

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ



ВІСНИК

**Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Випуск 9

**Дніпропетровськ
2005**

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

В І С Н И К
Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Випуск 9

Дніпропетровськ
2005

Редакційна колегія:

Головний редактор д-р техн. наук *Пишійко О. М.*
Члени редколегії: д-ри техн. наук *Біляєв М. М., Блохін Є. П., Боднар Б. Є., Босов А. А., Браташ В. О., Гетьман Г. К., Даніленко Е. І., Доманський В. Т., Дубинець Л. В., Жуковицький І. В., Загарій Г. І., Казакевич М. І., Коротенко М. Л., Костін М. О., Петренко В. Д., Пунагін В. М., Рибкін В. В., Разгонов А. П., Савчук О. М., Хандецький В. С., Шафіт Є. М.*;
д-ри фіз.-мат. наук *Гаврилюк В. І., Кравець В. В.*;
д-ри хім. наук *Плахотнік В. М., Федін О. В.*;
д-ри екон. наук *Бабіч В. П., Драгун Л. М., Зайцева Л. М., Крамаренко В. Д., Покотілов А. А.*
Відповідальний секретар канд. техн. наук *Корженевич І. П.*

*Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ № 7704.
Видане Державним комітетом телебачення і радіомовлення України 08.08.2003 р.*

Друкується за рішенням вченої ради Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна від 26.09.2005, протокол № 1

В53

Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 9. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2005. – 229 с.

У статтях наведені наукові дослідження, виконані авторами в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та інших організаціях. Статті присвячені вирішенню актуальних питань залізничного транспорту за такими напрямками: автоматизовані системи керування, екологія на транспорті, економіка транспорту, електричний транспорт, залізнична колія, моделювання задач транспорту та екології, ремонт та експлуатація засобів транспорту, рухомий склад і тяга поїздів, транспортне будівництво.

Вісник становить інтерес для працівників науково-дослідних організацій, викладачів вищих навчальних закладів, докторантів, аспірантів, магістрантів та інженерно-технічних працівників.

В статтях отражены научные исследования, выполненные авторами в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна и других организациях. Статьи посвящены решению актуальных вопросов железнодорожного транспорта по следующим направлениям: автоматизированные системы управления, экология на транспорте, экономика транспорта, электрический транспорт, железнодорожный путь, моделирование задач транспорта и экологии, ремонт и эксплуатация транспортных средств, подвижной состав и тяга поездов, транспортное строительство.

Вестник представляет интерес для работников научно-исследовательских организаций, преподавателей высших учебных заведений, докторантов, аспирантов, магистрантов и инженерно-технических работников.

ББК 39.2

© Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2005

ЗМІСТ

ГАЛУЗЬ ТЕХНІЧНИХ НАУК

1. РОЗДІЛ «АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НА ТРАНСПОРТІ»

Д. Б. АСТРАХАНЦЕВ, В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ), А. В. ЗАВГОРОДНИЙ (Приднепровская ж.-д.) МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ РЕЛЬСОВОЙ НИТИ.....	7
А. В. ЗАВГОРОДНИЙ (ГП Приднепровская ж.-д.), В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ), В. Г. СЫЧЕНКО (Днепропетровский орган сертификации ж.-д. транспорта) МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЕЙ ОПАСНОГО И МЕШАЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА РАБОТУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ	11
Т. Н. СЕРДЮК, В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ) ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХ В РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ	15
Т. Н. СЕРДЮК, В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ) ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИЗМЕРЕНИЙ С ВАГОНА-ЛАБОРАТОРИИ	19
В. Г. СЫЧЕНКО (Днепропетровский орган сертификации ж.-д. транспорта), М. П. БАДЕР (Московский государственный университет путей сообщения), В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ) ПРОГРАММНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ	24
А. И. ТИМОШКИН, В. В. КАМЕНСКИЙ (Ростовский государственный университет) МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО АППАРАТНОГО КОНТРОЛЯ ЦИФРОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ	28

2. РОЗДІЛ «ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ»

Ю. Л. ЗАЯЦ, В. В. БЕЛЯЕВА (ДИИТ) ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСАХ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ	31
--	----

3. РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ»

А. В. АУЛІН, Д. М. БАРАНОВСЬКИЙ (КНТУ), В. Г. КУЗНЕЦОВ (ДІТ) ВТОРИННІ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ КОНТАКТНОГО ПРОВОДУ	36
Н. Г. ВИСИН, Б. Т. ВЛАСЕНКО, А. А. СОКОЛОВ (ДИИТ) ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СТУПЕНЧАТОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА НА ЭЛЕКТРОПОЕЗДАХ ЭР2Р, ЭР2Т И ЕПЛ2Т	41
Г. К. ГЕТЬМАН, С. В. АРПУЛЬ, Е. А. ДОВГАНЬ (ДИИТ) ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МОЩНОСТНОГО РЯДА ТЯГОВЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК НА ПОЛИГОНЕ ТЯГИ.....	47
Г. К. ГЕТЬМАН, Н. Г. ВИСИН, Б. Т. ВЛАСЕНКО, А. И. КИЙКО (ДИИТ) МОДЕРНИЗАЦИЯ ГРУЗОВОГО ПАРКА ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВЛ80Т И ВЛ80С НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ	51
Т. Н. МИЩЕНКО (ДИИТ) МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЧКОВ СЛУЧАЙНОЙ ФУНКЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТОКОПРИЕМНИКЕ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОВОЗЕ ДЭ 1	61

4. РОЗДІЛ «ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ»

П. В. КОВТУН, В. В. ТАЛЕЦКИЙ, Е. М. ЭТИН, П. Ю. ЭТИН (Белорусский государственный университет транспорта) ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ БЕЗБАЛЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА НА БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ	69
В. В. РИБКІН, М. А. АРБУЗОВ (ДІТ) ВИМІРЮВАННЯ НЕЙТРАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ РЕЙКОВОЇ ПЛІТІ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ	74
В. В. РИБКІН, О. М. БАЛЬ (ДІТ) МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМИХ НАПРУЖЕНЬ В РЕЙКАХ	78
М. І. УМАНОВ, В. В. ЦИГАНЕНКО, А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, Н. В. ХАЛПОВА, В. В. КОВАЛЬОВ (ДІТ) УСТАНОВЛЕННЯ ДОПУСТИМИХ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ПОЇЗДІВ ПО ДІЛЯНЦІ КОЛІЇ, ВИДРЕМОНТОВАНИЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУЧАСНИХ КОЛІЙНИХ МАШИН	81

5. РОЗДІЛ «МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧ ТРАНСПОРТУ ТА ЕКОЛОГІЇ»

А. М. БАШКАТОВ (Приднестровский государственный университет) МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ Ж.-Д. ТРАНСПОРТА И МАРШРУТНЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЫШЛЕННОГО УЗЛА	88
В. В. ГАРБАРУК, П. В. ГЕРАСИМЕНКО, С. В. ЕЛИЗАРОВ, В. А. ХОДАКОВСКИЙ, (ПГУПС, Россия) ОЦЕНКА ЧИСЛЕННОСТИ УЧЕБНО-ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ПЕРСОНАЛА ЛАБОРАТОРИЙ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАФЕДР	94
Н. Н. СТРЕКАЛОВ (РГОТУПС) АППРОКСИМАЦИЯ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ	99
Р. В. ЛІСНЕВСЬКИЙ (КНУБ) МОДЕЛЬ ПІДТРИМКИ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СКЛОПАКЕТІВ НА ОСНОВІ «ІНДИВІДУАЛЬНИХ ДАНИХ ЗАМОВНИКА»	102

6. РОЗДІЛ «РЕМОНТ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ»

І. Є. КРАМАР, С. О. ЯКОВЛЄВ (ДІТ), В. В. СИТИК (В/Ч Т 0100) СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ БУДІВЕЛЬНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ДЕРЖАВНОЇ СПЕЦІАЛЬНОЇ СЛУЖБИ ТРАНСПОРТУ МІНІСТЕРСТВА ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ	105
Б. І. ТОРОПОВ, (Київський університет економіки і технологій транспорту) РОЗВИТОК НАУКОВИХ УЯВЛЕНЬ ЩОДО РОЗМІЩЕННЯ СОРТУВАЛЬНИХ СТАНЦІЙ НА МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЦЬ	109

7. РОЗДІЛ «РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ»

Н. Г. ВИСИН, Б. Т. ВЛАСЕНКО, А. И. КИЙКО, А. А. ЕГОРОВ (ДИИТ) ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ПРИ РЕКУПЕРАТИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ ДЭ1	115
Л. В. ПЕТРОВИЧ, С. М. ГОЛІК (ДІТ) ВИКОРИСТАННЯ ГРАФ-МОДЕЛЕЙ У ЗАДАЧАХ ДІАГНОСТУВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ В КОЛАХ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОВОЗА ЧС7	120
V. KLAPITA, V. BUKOVÁ, V. BARTOŠOVÁ (Žilinská univerzita v Žiline, Slovakia) USING OF SMART DUST IN TRANSPORT SERVICES	125
И. А. ВАКУЛЕНКО, Г. В. РЕЙДЕМЕЙСТЕР (ДИИТ), О. Н. ПЕРКОВ (ИЧМ НАНУ) ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС	129

8. РОЗДІЛ «ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО»

В. Є. АРТЬОМОВ (ДІТ) ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНАЦІЙНИХ ЕПЮР ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ФАКТОРІВ У КОНСТРУКЦІЯХ МОСТІВ	134
Д. О. БАННИКОВ (ДИИТ) СНИЖЕНИЕ ПЛОЩАДИ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА СТАЛЬНЫХ ЕМКОСТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	136
Ю. В. БЕЛЯВСКИЙ, А. В. МИШУТИН (Одесская государственная академия строительства и архитектуры) ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВОДОПРОПУСКНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ	146
С. В. БОРЩЕВСКИЙ (Донецкий национальный технический университет) ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО И ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХРАНЕНИЯ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ	149
С. А. БОКАРЕВ А. Н. ЯШНОВ, С. С. ПРИБИТКОВ, А. В. СЛЮСАРЬ (Сибирский государственный университет путей сообщения) СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАДЗОРА ЗА ИСКУССТВЕННЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ	154
В. Е. ВОЛКОВА, Е. А. МИСЮРА (ДИИТ) АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВАНТ ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ ВОЗМУЩЕНИИ	159
А. А. ГОНЧАРЕНКО (ДИИТ) ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «HEATISOL-2» НА ОСНОВЕ СТЕКЛОБОЯ И ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	163
Г. С. ЖЕЛЕЗНЯК, К. И. СОЛДАТОВ (ДИИТ) ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КВАЗИРЕГУЛЯРНОЙ ТРЕХПРОЛЕТНОЙ БАЛКИ	166
В. А. ИЩЕНКО, М. В. ШАПТАЛА (ДИИТ) РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	174
В. Н. КОНОВАЛ (Черкасский государственный технологический университет) ВЛИЯНИЕ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ	177
Н. И. НЕТЕСА (ДИИТ) ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ В НИЗКОПРОЧНЫХ БЕТОНАХ.....	180
А. П. НИКИФОРОВ, Н. А. МАТЕНЧУК (ДИИТ), О. А. ПУШКАРЕНКО, Д. О. ГОРИДЬКО (ІГАСиА) РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С КОМПЛЕКСНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ	184
О. М. ПШНЬКО, С. В. МЯМЛІН, В. Д. ПЕТРЕНКО, С. В. ЦЕПАК (ДІТ) ДИНАМІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ СИСТЕМИ НАВАНТАЖЕННЯ «ВАГОН-КОЛІЯ-ЗЕМПОЛОТНО» В РОЗРАХУНКАХ ТРАНСПОРТНИХ ВІДКОСІВ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ	188
А. В. РАДКЕВИЧ (ДІТ) СИСТЕМОТЕХНІЧНЕ ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ У ВСТАНОВЛЕНІ ТЕРМІНИ	195
А. С. РАСПОПОВ (ДИИТ) КОЛЕБАНИЯ КОНТИНУАЛЬНЫХ БАЛОК С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ОПОРАМИ.....	199
Б. В. САВЧИНСКИЙ (ДИИТ) ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ.....	203
А. В. КРАСНЮК, А. Л. КОРЕЙКО, Е. С. ХАРЧЕНКО (ІГАСиА) ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ ДЛЯ РЕМОНТА И ЗАЩИТЫ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ	206

ГАЛУЗЬ ЕКОНОМІЧНИХ НАУК

9. РОЗДІЛ «ЕКОНОМІКА ТРАНСПОРТУ»

Ю. С. БАРАШ (ДІТ) ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ.....	208
А. А. КОВТУН (Белорусский государственный университет транспорта) БИЗНЕС-ПЛАНИРОВАНИЕ И ФИНАНСОВЫЙ SWOT-АНАЛИЗ КАК СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВУЗА.....	214
Т. В. ТЕСЛЕНКО, ЧЖАН НИН (ДІТ) ДЕЯКІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ЗАЛІЗНИЦЬ КИТАЮ.....	219
Т. В. ПОЛШКО (ДІТ) АНАЛІЗ БЕЗБИТКОВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ПІДПРИЄМСТВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ.....	222
А. С. САВЕНКО, Г. И. МУЗЫКИНА, П. В. БЕХ (ДИИТ) ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ	226

Д. Б. АСТРАХАНЦЕВ, В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ),
А. В. ЗАВГОРОДНИЙ (ГП Приднепровская ж.-д.)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ РЕЛЬСОВОЙ НИТИ

Розроблено математичну модель, що описує розподіл електромагнітного поля навколо рейки, та враховує поверхневий ефект в рейковій сталі, проведено експериментальні вимірювання напруження магнітного поля.

Разработана математическая модель, описывающая распределение электромагнитного поля вокруг рельса и учитывающая наличие поверхностного эффекта в рельсовой стали, проведены экспериментальные измерения напряженности магнитного поля.

A mathematical model describing distribution of an electromagnetic field around a rail with account of skin-effect in rail steel is developed and experimental measurements of a magnetic intensity are carried out.

Рельсовые линии электрифицированных железных дорог выполняют ряд важных функций, в частности, служат проводником для обратного тягового тока, а также сигнальных токов автоблокировки и автоматической локомотивной сигнализации. Исследование переменного электромагнитного поля вокруг рельсовой нити представляет практический интерес по следующим причинам. При испытании новых типов подвижного состава и системы электрооборудования железных дорог на электромагнитную совместимость с устройствами железнодорожной автоматики необходимо проводить исследование спектрального состава электромагнитных помех в рельсовых нитях и вокруг них при прохождении поезда. Такие исследования важны также для исследования индуктивного канала передачи информации с пути на локомотив в многозначной автоматической локомотивной сигнализации с применением сигнального тока тональной частоты.

В связи с этим целью работы является исследование распределения электромагнитного поля вокруг рельса, а также измерение электродвижущей силы в катушке, наведенной в ней протекающим в рельсе током, в зависимости от ее геометрических размеров и расположения относительно рельса. Для достижения поставленной цели разработана математическая модель, описывающая электромагнитное поле вокруг рельса и учитывающая наличие поверхностного эффекта в рельсовой стали, проведены экспериментальные измерения напряженности магнитного поля.

Напряженность магнитного поля в точке Q в соответствии с законами электромагнитной

индукции [1; 2] равняется ротору векторного потенциала магнитного поля, представленного в виде интеграла от плотности тока по объему V рельса

$$\begin{aligned} \bar{H}(Q) &= \frac{1}{4\pi} \operatorname{rot} \int_V \frac{\bar{\delta}(M)}{r_{QM}} dV_M = \\ &= \frac{1}{4\pi} \int_V \left[\frac{\bar{\delta}(M), \bar{r}_{QM}}{r_{QM}^3} \right] dM, \quad (1) \end{aligned}$$

где M – точка центра элементарной ячейки с площадью dS_M и объемом dV_M , в рельсе с вектором плотности тока $\bar{\delta}(M)$; \bar{r}_{QM} – вектор, проведенный из точки Q в точку M (рис. 1).

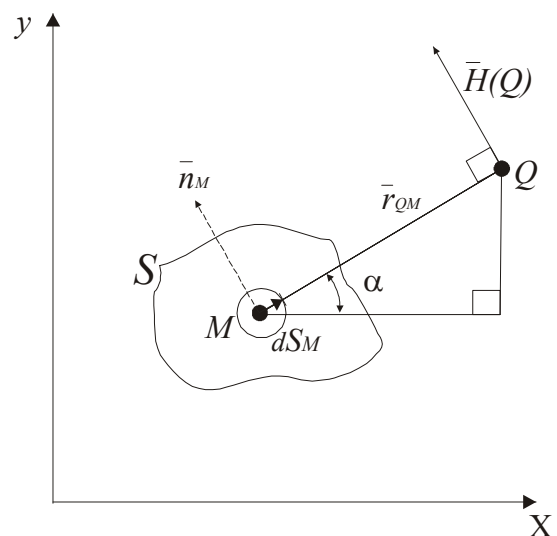


Рис. 1. Схематическое изображение элементарной ячейки векторов к расчету напряженности магнитного поля

Преобразовав выражение для напряженности электромагнитного поля (1) с помощью интегральной теоремы для ротора векторной функции

$$\int_V \operatorname{rot} \bar{\delta}(M) dV = \oint_S [\bar{n}, \bar{\delta}(M)] dS, \quad (2)$$

получим

$$\bar{H}(Q) = -\frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{[\bar{n}_M, \bar{\delta}(M)]}{r_{QM}} dS. \quad (3)$$

Перепишем векторное произведение векторов $\bar{\delta}(M)$ и \bar{r}_{QM} в декартовой системе координат в виде

$$\begin{aligned} [\bar{n}_M, \bar{\delta}(M)] &= \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ n_{Mx} & n_{My} & n_{Mz} \\ 0 & 0 & \delta_{Mz} \end{vmatrix} = \\ &= \delta_M (\bar{i} \sin \alpha - \bar{j} \cos \alpha). \end{aligned} \quad (4)$$

Соответственно для модуля $\bar{\delta}(M)$ запишем

$$|\bar{r}_{QM}| = \sqrt{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2} \quad (5)$$

С учетом формул (3)–(5) для проекций вектора напряженности магнитного поля $\bar{H}(Q)$ вдоль x и y осей координат получим

$$\begin{aligned} H_x(Q) &= -\frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{\delta(M) \cos(\alpha)}{\sqrt{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2}} dS = \\ &= -\frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{\delta(M)(x_Q - x_M)}{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2} dS, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} H_y(Q) &= -\frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{\delta(M) \sin(\alpha)}{\sqrt{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2}} dS = \\ &= -\frac{1}{4\pi} \oint_S \frac{\delta(M)(y_Q - y_M)}{(x_Q - x_M)^2 + (y_Q - y_M)^2} dS. \end{aligned} \quad (7)$$

Электродвижущую силу в катушке с центром в точке Q , наводимую при протекании электрического тока в рельсе, определяли, в соответствии с законом электромагнитной индукции [1, 2] по формуле

$$E(Q) = -\frac{d\Phi(Q)}{dt} = -\mu\mu_0 \frac{S_k}{dt} \frac{d \int [\bar{H}(Q), d\bar{S}_k]}{dt}, \quad (8)$$

в которой интегрирование производили по площади катушки с центром в точке Q . Для нахождения напряженности магнитного поля вокруг рельса при протекании по нему электрического тока, в соответствии с полученным математическим описанием, была разработана компьютерная программа.

Поскольку поверхностный эффект в рельсовой стали наблюдается уже в тональном диапазоне частот, в работе моделировали также напряженность магнитного поля вокруг рельса и ЭДС, наводимую в катушке при неравномерном распределении плотности тока по сечению рельса. Обозначив толщину скин-слоя через ξ , параметр, характеризующий неравномерность распределения плотности тока по сечению рельса, примем равным

$$K_\xi = \sqrt{\frac{S_\xi}{S_0}}, \quad (9)$$

где S_0 , S_ξ — значения общей площади сечения рельса и площади скин-слоя.

Экспериментальные измерения распределения электромагнитного поля вокруг рельса проводили с помощью катушки, которую располагали над головкой рельса (позиции А и В), и вдоль шейки рельса (например, позиции С и D) как показано на рис. 2. Позиции А и В отличаются ориентацией ее площади соответственно перпендикулярно оси ординат и абсцисс декартовой системы координат. ЭДС в катушке, наводимую током в рельсе, измеряли электронным цифровым вольтметром В7-35 с высоким входным сопротивлением. Мгновенное значение напряжения на выходе катушки, расположенной сбоку от рельса при прохождении поезда, регистрировали с помощью персонального компьютера (ноутбука) с аналого-цифровым преобразователем.

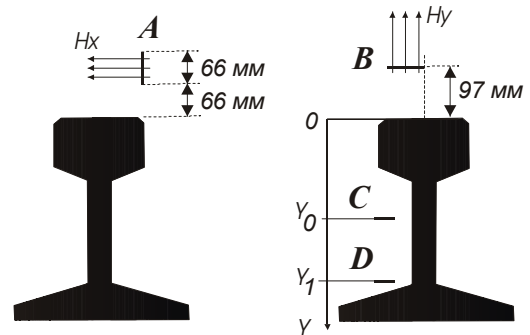


Рис. 2. Схематическое изображение расположения катушки относительно рельса при измерении ЭДС

Результаты расчетов и экспериментальных измерений приведены на рис. 3–4. Зависимость напряженности магнитного поля H_x , H_y и распределение магнитных силовых линий и от координаты y приведена на рис. 3.

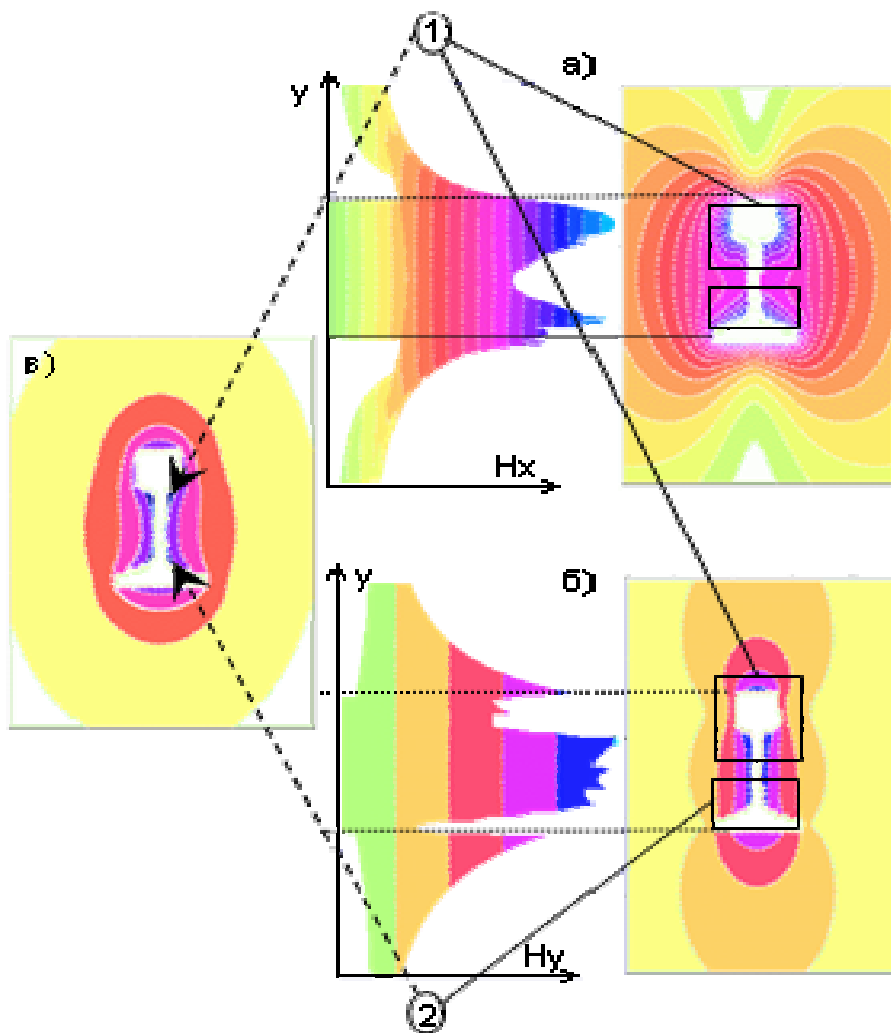


Рис. 3. Зависимость напряженности магнитного поля H_x (а), H_y (б) и распределение магнитных силовых линий от координаты y

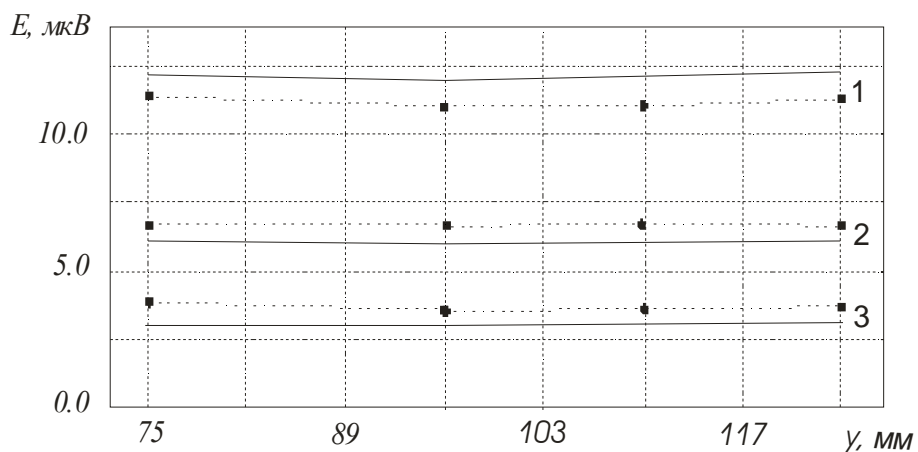


Рис. 4. Зависимость ЭДС в катушке от координаты y при трех значениях частот (Гц): 100(1), 50(2), и 25(3); линии – расчет; точки – эксперимент

Как видно из рисунка, максимальные значения напряженности магнитного поля наблюдаются для H_x у головки и подошвы рельса, а для H_y – в области шейки рельса.

Экспериментально измеренные и полученные расчетным методом зависимости ЭДС в катушке от координаты y при трех значениях частот приведены на рис 4. (Гц): 100 (1), 50 (2),

и 25 (3). Как видно из рисунка, ЭДС почти не меняется с частотой в пределах ординаты $y_0 \dots y_1$, что говорит об однородности поля в этой области. Расхождение между экспериментально измеренными и теоретическими значениями не превышает 5 %.

На рис. 5 приведен график зависимости ЭДС в катушке, расположенной в позиции *A* и *B*, от коэффициента K_ξ , характеризующего неравномерность распределения плотности тока по сечению рельса. Как видно из рисунка, ЭДС в катушке при ориентации ее площади перпендикулярно оси абсцисс превышает ЭДС в катушке при ориентации ее площади перпендикулярно оси ординат, и оба значения уменьшаются при увеличении коэффициента K_ξ .

Результаты расчета достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Таким образом, предложенное в работе математическое описание достаточно точно описывает распределение электромагнитного поля вокруг рельса. Расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 5 %.

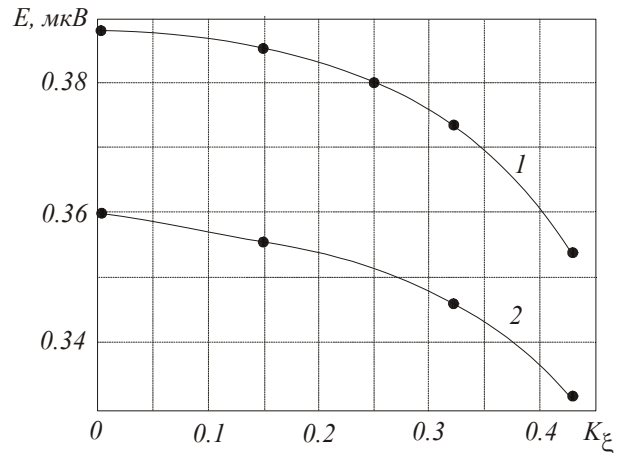


Рис. 4. Зависимость ЭДС в катушке, расположенной в позиции *A* (1) и *B* (2) от коэффициента неоднородности тока в рельсе: линии – расчет; точки – эксперимент

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тозони О. В. Расчет трехмерных электромагнитных полей. – К.: Техника, 1974. – 351 с.
2. Инкин А. И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин. – Новосибирск: ЮКЭА, 2002. – 464 с.

Поступила в редколлегию 18.04.05.

А. В. ЗАВГОРОДНИЙ (ГП Приднепровская ж.-д.), В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ),
В. Г. СЫЧЕНКО (Днепропетровский орган сертификации ж.-д. транспорта)

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЕЙ ОПАСНОГО И МЕШАЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА РАБОТУ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Проведено аналіз електромагнітного впливу рухомого складу та системи тягового електропостачання на роботу рейкових кіл та автоматичної локомотивної сигналізації безперервної дії. Запропоновано методику визначення допустимих рівнів небезпечного та заважаючого електромагнітного впливу тягового струму на РК і АЛСН на основі комп'ютерного моделювання.

Проведен анализ электромагнитного влияния подвижного состава и системы тягового электроснабжения на работу рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа. Предложена методика определения допустимых уровней опасного и мешающего электромагнитного влияния тягового тока на РК и АЛСН на основе компьютерного моделирования.

An analysis of electromagnetic influence of rolling stock and traction power supply system on rail circuits and cab locomotive signalization has been provided. A method of determining permissible levels of dangerous and preventing electromagnetic influence of traction current on railway circuits and cab locomotive signalization has been proposed.

Введение

При разработке и внедрении новых типов подвижного состава с высоковольтными полупроводниковыми преобразователями электрической энергии проблема их электромагнитной совместимости с существующими устройствами железнодорожной автоматики является одной из важнейших при доказательстве безопасности и проведении их испытаний.

Однако нормативных документов, определяющих предельно допустимые уровни влияния тягового электроснабжения на линии автоматики, в Украине нет, а для оценки влияния системы тягового электроснабжения (СТЭС) на линии связи используют устаревшие нормативные документы, не учитывающие техническое переоснащение отрасли.

Отсутствие четкой стандартизированной нормативной базы, определяющей эксплуатационно-технические требования по электромагнитной совместимости, порядок и процедуру доказательства безопасности подвижного состава и системы тягового электроснабжения, затрудняет проведение соответствующих испытаний.

1. Цель и задачи исследований

Целью исследований является определение уровней опасного и мешающего электромагнитного влияния тягового тока на рельсовые цепи (РЦ) и автоматическую локомотивную сигнализацию непрерывного типа (АЛСН).

Проведение экспериментальных исследований для всех видов рельсовых цепей, используемых на железнодорожном транспорте Украины, с моделированием всех возможных ситуаций и сочетанием наиболее неблагоприятных, с точки зрения безопасности, условий их работы, является практически невыполнимой задачей.

В связи с этим в настоящей работе поставлена задача проведения анализа и выработки методики подхода к определению допустимых уровней опасного и мешающего электромагнитного влияния тягового тока на РК и АЛСН на основе компьютерного моделирования.

2. Анализ проблемы

Влияние тягового электроснабжения (ТЭС) электрифицированных железных дорог на рельсовые цепи можно упрощенно классифицировать следующим образом. Напряжение на контактном проводе наводит в рельсовой линии электростатические потенциалы относительно земли (электрическое влияние). Однако в силу небольшой емкости между контактным проводом и рельсами при напряжении 25 кВ это влияние можно не учитывать.

Переменный ток, протекающий в проводе при движении электровоза, наводит продольную электродвижущую силу (ЭДС), которая вызывает протекание в рельсовых нитях тока (электромагнитное влияние). Для однопутного участка вследствие симметрии системы этим влиянием также можно пренебречь.

Обратный тяговый ток, протекающий по рельсовой линии, оказывает значительное кондуктивное влияние на работу рельсовых цепей. Степень влияния характеризуется величиной обратного тягового тока в рельсовой линии на участке подключения аппаратуры приемного конца.

Величина обратного тягового тока, в свою очередь, определяется количеством и расположением электропоездов в фидерной зоне, их энергопотреблением, схемой электропитания (консольная или двухсторонняя), утечкой тягового тока в землю.

Другим основным фактором, характеризующим электромагнитное влияние, является схема канализации тягового тока (однониточная, двухниточная, схема межпутных соединений). Для двухниточной схемы канализации вводят коэффициент асимметрии тягового тока

$$K_a = \frac{I_{T1} - I_{T2}}{I_{T1} + I_{T2}} = \frac{I_{T1} - I_{T2}}{2I_T}, \quad (1)$$

где I_{T1} , I_{T2} - значения тягового тока соответственно в первой и второй рельсовых нитях.

В качестве третьего фактора электромагнитного влияния тягового тока можно выделить наличие в нем гармонических составляющих и их уровень. Относительное содержание в тяговом токе промышленной частоты гармонической составляющей с f -й частотой характеризуется коэффициентом гармоник

$$K_f = \frac{I_j}{I_{50}} \quad (2)$$

Степень влияния электромагнитных помех на РЦ определяется также устройствами защиты, примененными в них, а именно фильтрами, путевыми приемниками и т. д.

Проведем анализ влияния ТЭС на РЦ в соответствии с вышеизложенными факторами.

3. Методика исследований

Определение предельно допустимых уровней электромагнитного влияния ТЭС на РЦ проводили как теоретико-расчетными методами, так и путем экспериментальных измерений на действующих лабораторных стендах. Компьютерное моделирование проводили с помощью разработанной специальной программы, основывающейся на классической теории рельсовых цепей, а также с применением программы для моделирования PSpice.

Преимуществом компьютерного моделирования является возможность оперативного про-

ведения исследований для множества различных вариантов и параметров помехи. Экспериментальные исследования выполнены для подтверждения достоверности результатов, полученных при моделировании.

В основу определения предельно допустимых уровней гармонических помех с определенной частотой и фазой в РЦ, вызванных обратным тяговым током, положены критерии надежного выполнения всех режимов работы рельсовых цепей при неблагоприятных для этих режимов факторах.

Невыполнение нормального режима под действием помех приводит к мешающему влиянию, а шунтового и контрольного режимов – к опасному влиянию тягового тока на работу рельсовых цепей.

При компьютерном анализе использовали общепринятые для этих режимов эквивалентные схемы рельсовых цепей в виде каскадного соединения четырехполюсников.

Анализ проводили путем рассмотрения работы РЦ при наличии в ней суммарного тока, состоящего из сигнального тока i_s и тока гармонической помехи i_p

$$i_0(t) = I_{ms} \sin(\omega_s t + \varphi_s) + I_{mp} \sin(\omega_p t + \varphi_p), \quad (3)$$

где I_{ms} , ω_s , φ_s , I_{mp} , ω_p , φ_p – амплитудные значения, значения круговой частоты и начальной фазы соответственно сигнального тока и гармонической помехи. Параметры сигнального тока рассчитывали для самых неблагоприятных условий в отсутствии помехи. Для определения уровней опасного или мешающего влияния тягового тока проводили вариацию длины РЦ, основных параметров помехи - амплитуды, частоты, фазы при условии контроля напряжения (тока) на путевом приемнике. В процессе анализа определяли уровень помехи, при котором нарушается выполнение режимов работы рельсовых цепей. Критерием опасного или мешающего влияния служило повышение напряжения (тока) путевого приемника до напряжения (тока) его срабатывания в шунтовом и контрольном режимах или понижение напряжения (тока) приемника ниже напряжения (тока) возврата в нормальном режиме. Моделирование проводили на разработанной компьютерной программе, описывающей все необходимые РЦ.

Параметры аппаратуры приемного и передающего концов РЦ и рельсовой линии брали из справочной литературы [3; 4], соответ-

вующих нормалей, альбомов схем для типового проектирования, а правильность расчетов и моделирования проверялась сравнением результатов вычислений с экспериментальными данными, нормальными, регулировочными таблицами, литературными данными.

3.1. Методика исследований для шунтового и контрольного режимов. На вход путевого приемника в шунтовом и контрольном режимах действуют два сигнала – один соответствует сигнальному току, не превышающему по величине значение тока надежного возврата $I_{нв}$, а второй – ток помехи. При въезде локомотива на РЦ возможны два варианта возникновения опасного влияния гармонических помех тягового тока, приводящих к нарушению шунтового или контрольного режимов. В первом случае при въезде локомотива на приемный конец рельсовой цепи под действием гармонических помех тягового тока не произойдет надежного возврата якоря (сектора) путевого реле. Во втором случае возврат якоря (сектора) произойдет, но после этого якорь (сектор) реле снова притянется под действием помехи. Для рельсовых цепей с непрерывным питанием следует рассматривать первый случай, поскольку он реализуется при меньшем уровне помехи (ток отпускания меньше тока срабатывания). Для РЦ с импульсным (кодовым) питанием с точки зрения уровней помехи эти случаи равнозначны.

Для нахождения уровня опасного влияния тягового тока на РЦ использовали следующий порядок анализа при компьютерном моделировании. Вначале определяли минимальное значение напряжения источника питания РЦ в нормальном режиме в отсутствие помехи при самых неблагоприятных условиях для этого режима вариации длины рельсовой цепи от минимальной до максимально возможной по условиям проектирования. Затем определяли значение тока в путевом приемнике в шунтовом и контрольном режимах при отсутствии помехи в самых неблагоприятных для этого режима условиях, т. е. для шунтового режима при

$$U_{\max}, Z(r_{\min}), r_{u\max} = \infty, P_{ш.крит},$$

для контрольного режима при

$$U_{\max}, Z(r_{\min}), r_{и.крит}, P_{ип.крит}.$$

После этого проводили анализ изменений тока в путевом приемнике при воздействии на рельсовую цепь гармонической помехи и вариации основных параметров помехи. Коэффициент передачи для разностного тягового тока

на приемном конце РЦ при наличии дроссель-трансформаторов рассчитывали с учетом того, что разностный тяговый ток помехи протекает только по одной половине первичной (путевой) обмотки дроссель-трансформатора. В процессе анализа определяли минимальное значение тягового тока на приемном конце РЦ, при котором выполнялись критерии этих режимов, т. е. значение тока в путевом приемнике при наложенном поездном шунте или поврежденной рельсовой нити не превышало значение тока надежного возврата путевого приемника.

Критерий выполнения шунтового режима записывается в виде неравенства для коэффициента шунтовой чувствительности к нормативному поездному шунту

$$K_{шн} = \frac{I_{нв}}{I_{ршф}} \geq 1, \quad (4)$$

где $I_{нв}$ – ток надежного возврата, соответствующий току надежного отпускания якоря (сектора) реле $I_{но}$ для реле с непрерывным питанием или току надежного несрабатывания $I_{нн}$ для импульсных реле; $I_{ршф}$ – фактический ток путевого приемника, протекающий при наложении нормативного шунта в наихудших для шунтового режима условиях.

Критерий выполнения контрольного режима записывается в виде неравенства для коэффициента чувствительности рельсовой цепи к оборванной (поврежденной) рельсовой нити

$$K_{кп} = \frac{I_{нв}}{I_{ркф}} \geq 1, \quad (5)$$

где $I_{ркф}$ – наибольший возможный ток путевого приемника, протекающий при контрольном режиме в наихудших для шунтового режима условиях.

Ток надежного отпускания якоря (сектора) реле при непрерывном питании определяется выражением

$$I_{но} = K_{зо} I_0, \quad (6)$$

где I_0 – ток отпускания якоря (сектора) реле, $K_{зо} < 1$ – коэффициент запаса по отпусанию якоря реле, $K_{зо} = 0,6$ – для электромагнитных реле, $K_{зо} = 0,9$ – для индукционных (секторных) реле.

Ток надежного несрабатывания для импульсных реле определяется выражением

$$I_{нн} = K_{зн} I_{ср}, \quad (7)$$

где $K_{зн} = 0,9$ – коэффициент запаса по несрабатыванию реле.

3.2. Методика исследований для нормального режима. Нормальный режим реализуется в исправной и свободной от подвижного состава РЦ в виде дискретной информации «Свободно». Нарушение выполнения нормального режима под действием тягового тока может привести к появлению дискретной информации «Занято», т. е. к мешающему воздействию тягового тока на путевой приемник. Это возможно при нарушении правильного срабатывания реле в соответствии с импульсами в кодовых посылах, т. е. если в момент кодового импульса уровень напряжения на входе импульсного реле недостаточен для его надежного срабатывания или уровень напряжения в паузе превышает напряжение надежного отпущения якоря реле.

Другим критерием, которому должна удовлетворять РЦ в нормальном режиме, является требование, чтобы фактический коэффициент перегрузки путевого приемника не превышал допустимый коэффициент перегрузки

$$K_{\text{пер.ф}} \leq K_{\text{пер.д}} \quad (8)$$

3.3. Методика исследований для режима АЛСН. Критерием надежности режима АЛСН является соотношение

$$K_{\text{л}} = I_{\text{лф min}} / I_{\text{лн}} \geq 1, \quad (9)$$

где $I_{\text{лф min}}$ – фактический минимальный ток в рельсовой линии при наложении поездного шунта на удаленном от генератора сигналов АЛСН конце рельсовой линии и критическом сочетании основных параметров для этого режима

$$U_{\text{min}}, Z, r_{\text{u min}}, p = 0,$$

$I_{\text{лн}}$ – нормативный ток АЛСН, при котором локомотивный приемник работает устойчиво.

Нормативный ток кодовой АЛСН при электротяге переменного тока составляет 1.4 А.

При компьютерном исследовании проводили анализ возможного искажения кодовых посылок за счет наложения помех тягового тока, при которых произойдет нарушение выполнения критерия надежности АЛСН.

Выводы

Проведен анализ электромагнитного влияния подвижного состава и системы тягового электроснабжения на работу рельсовых цепей и автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа. Предложена методика определения допустимых уровней опасного и мешающего электромагнитного влияния тягового тока на РЦ и АЛСН на основе компьютерного моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаврилюк В. І. Аналіз електромагнітного впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл // Вісник Дніпропетровського національн. ун-ту ім. В. Лазаряна. 2003. № 1. – С. 3–7.
2. Анохов И. В. Про електромагнітну сумісність електрифікованих залізничних ліній постійного струму / И. В. Анохов, М. М. Бадер, В. И. Гаврилюк, В. Г. Сыченко // Залізничний транспорт України. 2002. – № 2. – С. 10–12.
3. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатов, М. Ф. Котляренко, А. И. Баженов, Т. В. Лебедева. – М.: Транспорт, 1982. – 360 с.
4. Аркатов В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и технологическое обслуживание / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степинский. – М.: Транспорт, 1980. – 295 с.
5. Брылеев А. М. Электрические рельсовые цепи / А. М. Брылеев, Н. Ф. Котляренко – М.: Транспорт, 1970. – 256 с.
6. Дмитриев В. С. Совершенствование систем автоблокировки / В. С. Дмитриев, В. А. Минин. – М.: Транспорт, 1987. – 143 с.
7. Методичні вказівки з перевірки пристроїв АБТ, АБТЦ і АЛСО перед включенням в експлуатацію на залізницях України. Київ. Укрзалізниця. 2003.
8. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації безперервного типу і пристроїв контролю пильності машиніста на залізницях України. Київ. Укрзалізниця. 2004.
9. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (ЦШЕОТ 0012). Київ.: Укрзалізниця. 1998.
10. Леонов А. А. Техническое содержание автоматической локомотивной сигнализации и авто-стопов. – М.: Транспорт, 1974. – 248 с.
11. Костроминов А. М. Об электромагнитной совместимости рельсовых цепей с перспективным электроподвижным составом // Автоматика, телемеханика и связь. – 1989. – № 6. – С. 33–34.
12. Костроминов А. М. Защита устройств железнодорожной автоматики и телемеханики от помех. – М.: Транспорт, 1997. – 192 с.
13. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. – Л.–М.: Госэнергоиздат, 1949.
14. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 1. / Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.
15. Завгородний А. В. Анализ электромагнитного влияния тягового электроснабжения на работу рельсовых цепей / А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Вісник Дніпропетровського національн. ун-ту ім. акад. В. Лазаряна. 2003. – № 1. – С. 3–7.

Поступила в редколлегию 20.05.2005.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХ В РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ

Проаналізовано найбільш ймовірні причини виникнення завад частотою 50 Гц в рейкових колах, що були зафіксовані на деяких залізничних ділянках. Середнє значення амплітуди 1,8 А в паузі коду «З». Причиною виникнення даної гармоніки є робота випрямлячів тягових підстанцій.

Проанализированы наиболее вероятные причины возникновения помехи частотой 50 Гц в рельсовых цепях, которые были зафиксированы на некоторых железнодорожных участках. Среднее значение амплитуды 1,8 А в паузе кода «З». Причиной возникновения данной гармоника является работа выпрямителей тяговых подстанций.

The occurrence reasons of 50 Hz frequency interference in rail circuits are analysed. The interference was registered on some railway sections by an experimental research. The average value of amplitude has made 1.8 A in a dividing pause of a code «Green». The occurrence reason of mentioned harmonic is the work of substation rectifiers.

Введение

Установление природы появления стационарных гармонических помех в рельсовых линиях играет важную роль для обеспечения устойчивой работы рельсовых цепей и системы автоматической локомотивной сигнализации (АЛС), широко применяемой на железных дорогах. Принцип работы АЛС основан на передаче на локомотив сигнальных показаний путем посылки в РЦ кодового тока частотой 50 Гц на участках с электротягой постоянного тока и 25 или 75 Гц на участках с электротягой переменного тока. Поскольку рельсовые линии используются не только для передачи сигнального тока, а и для пропуска обратного тягового тока, то и РЦ, и система АЛС будет находиться под непосредственным влиянием тягового тока и его гармоник. При этом наиболее опасными будут те гармоники, частоты которых лежат в области полосы пропускания частот заградительного фильтра.

Целью работы является экспериментальное определение гармонического состава обратного тягового тока, протекающего в рельсах и создание математической модели, описывающей динамические процессы в тяговой и рельсовой сети, которая позволит учитывать влияние различных факторов на распределение напряжения и токов гармоник в рельсах.

Результаты эксперимента

Было разработано устройство, которое позволяет записывать сигнал с катушек локомотивной сигнализации (до фильтра) и контроли-

ровать параметры кодового тока автоматической локомотивной сигнализации [1]. Так как ток в рельсах представляет собой сумму обратного тягового тока со всеми его гармониками и кодового, то имеется возможность определять спектральный состав тягового тока, анализирую его в паузах кода.

На основании экспериментальных данных зафиксированы такие частоты в рельсовых цепях при электротяге постоянного тока: 50, 75, 100, 150 Гц. Осциллограмма и спектральный состав обратного тягового и кодового тока, протекающего в рельсах, приведены на рис. 1.

Наиболее опасной среди них является частота 50 Гц, поскольку она совпадает с кодовой несущей частотой. Причинами возникновения помехи частотой 50 Гц может быть следующее.

Во-первых, наблюдается неодинаковость электрических силовых цепей преобразователей тяговых подстанций. Отсюда вытекает неодинаковость параметров схем замещения на интервалах работы фаз питающего напряжения, которое получило название «параметрической несимметрии силовых цепей преобразователя». Это же касается и инверторных агрегатов. Во-вторых, присутствие гармоника 50 Гц обусловлено несимметрией питающего напряжения. В-третьих, в процессе работы регуляторов пуска тяговых двигателей (более 30 с) в сигнальных каналах непрерывно протекают токи помех частотой 25...375 Гц, в состав которых также входит гармоника 50 Гц. В-четвертых, нормативное сопротивление изоляции рельсовой линии невелико (~1 Ом/км), поэтому в рельсовых цепях также протекают токи утечки из соседних рельсовых цепей на многопутных участках или на станциях.

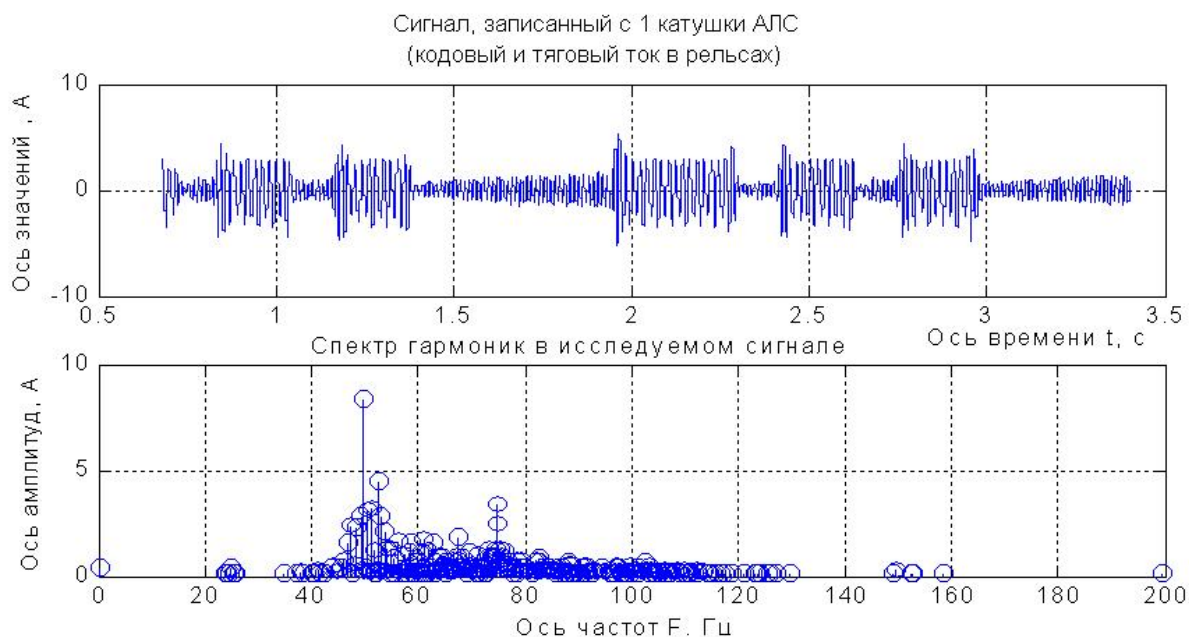


Рис. 1. Осциллограмма и спектр тягового и кодowego тока, протекающего в рельсах

Поскольку гармоника 50 Гц наблюдалась в пределах не одной РЦ, то можно сделать вывод, что данная помеха содержится в тяговом токе. Среднее значение ее амплитуды составило 1,8 А в разделительной паузе кода «3». Такое значение помехи является весьма критичным, поскольку амплитуда кодowego сигнала должна быть не менее 2 А для рельсовых цепей перегонов с электротягой постоянного тока. Далее необходимо определить характер распределения гармоники частотой 50 Гц по длине фидерной зоны, в предположении, что она содержится в обратном тяговом токе.

Моделирование

Оценивать уровни помех от тягового тока в рельсовых цепях необходимо для определения степени их влияния на работу рельсовых цепей и при разработке защитных средств. В настоящий момент интерес представляет влияние сопротивления балласта на величину токов утечки тягового тока.

При определении влияния гармоник тягового тока на работу рельсовых цепей воспользуемся схемой замещения тяговой сети (рис. 2). Здесь тяговая сеть представлена контуром контактная сеть – рельсы.

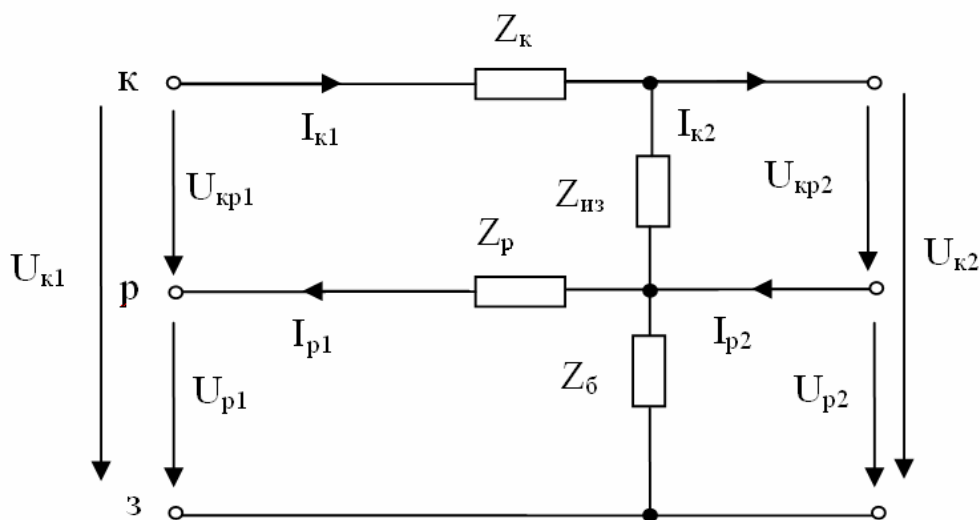


Рис. 2. Схема замещения тяговой сети

Пропуск обратного тягового тока на подстанцию осуществляется по рельсовым линиям или специальным проводам. В данном случае обратный тяговый ток возвращается на подстанцию по рельсовым нитям. Заменяем рельсовые нити одной линией и представим контуром рельс – земля. Тяговый ток к электровозу передается по контактной сети, которая включает в себя контактный провод и несущий трос, соединенные между собой струнами по всей длине анкерного участка. Контактная сеть в схеме замещения также представлена одним проводом.

Тяговую сеть будем рассматривать как шестиполюсник, в котором Z_k – сопротивление контактной сети с учетом сопротивления взаимной индукции; Z_p – сопротивление рельсовой сети с учетом сопротивления взаимной индукции в контуре рельсовые нити – контактная сеть; $Z_{из}$ – сопротивление изоляции контактной сети, учитывающее заземление на рельсы различных железнодорожных конструкций (главным образом опор контактной сети, постов секционирования, разъединителей, разрядников и т. д.), Z_6 – сопротивление балласта, которое представляет собой сопротивление, оказываемое току утечки от рельсовых нитей через шпалы, балласт и земляное полотно.

Данная схема замещения (см. рис. 2) характерна для каждой гармоники тягового тока. Рассмотрим вопрос распределения напряжения и токов по длине тяговой сети для случая, когда линии являются однородными, т.е. сопротивления по длине участка распределены равномерно.

Составим систему уравнений для токов и напряжений в тяговой сети по законам Кирхгофа:

- для тяговой сети

$$\begin{cases} \dot{U}_{кп1} = \dot{I}_{к1} Z_k + \dot{U}_{кп2}, \\ \dot{I}_{к1} = \dot{I}_{к2} + \frac{\dot{U}_{кп2}}{Z_{из}}; \end{cases} \quad (1)$$

- для контура контактная сеть - земля

$$\begin{cases} \dot{U}_{к1} = \dot{I}_{к1} Z_k + \dot{U}_{к2}, \\ \dot{I}_{к1} = \dot{I}_{к2} + \frac{\dot{U}_{кп2}}{Z_{из}}; \end{cases} \quad (2)$$

- для контура рельсовая сеть – земля

$$\begin{cases} \dot{U}_{п1} = -\dot{I}_{п1} Z_p + \dot{U}_{п2}, \\ \dot{I}_{п1} = \dot{U}_{п2} \frac{1}{Z_6} + \dot{I}_{п2}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\dot{U}_{кп1}$, $\dot{U}_{кп2}$ – напряжение контактная сеть – рельсы, $\dot{U}_{п1}$, $\dot{U}_{п2}$ – напряжение между рельсами и землей; $\dot{U}_{к1}$, $\dot{U}_{к2}$ – напряжение в контуре контактная сеть – земля; $\dot{I}_{к1}$, $\dot{I}_{к2}$ – ток в контактной сети; $\dot{I}_{п1}$, $\dot{I}_{п2}$ – ток в рельсовой сети (обратный тяговый ток) в начале и в конце линии соответственно.

Определим A -параметры для системы уравнений (1), схема которой представляет собой четырехполюсник.

$$\begin{cases} \dot{U}_{кп1} = \dot{U}_{кп2} \left(1 + \frac{Z_k}{Z_{из}} \right) + \dot{I}_{к2} Z_k, \\ \dot{I}_{к1} = \frac{\dot{U}_{кп2}}{Z_{из}} + \dot{I}_{к2}, \end{cases} \quad (4)$$

тогда

$$A_k = 1 + \frac{Z_k}{Z_3}, \quad B_k = Z_k,$$

$$C_k = \frac{1}{Z_{из}}, \quad D_k = 1.$$

Система уравнений (4) примет вид

$$\begin{cases} \dot{U}_{кп1} = A_k \dot{U}_{кп2} + B_k \dot{I}_{к2}, \\ \dot{I}_{к1} = C_k \dot{U}_{кп2} + D_k \dot{I}_{к2}. \end{cases} \quad (5)$$

Величина токов утечки обратного тягового тока зависит от состояния балласта. Поэтому, если рассмотреть отдельно четырехполюсник рельсовой цепи, которая работает в нормальном режиме, и определить величину токов утечки в процентах от сигнального тока в конце рельсовой цепи (РЦ), можно вычислить величину токов утечки обратного тягового тока через балласт.

$$\begin{cases} \dot{U}_{рц1} = \dot{I}_{рц1} Z_p + \dot{U}_{рц2}, \\ \dot{I}_{рц1} = \dot{U}_{рц2} \frac{1}{Z_6} + \dot{I}_{рц2}. \end{cases} \quad (6)$$

На рис. 3 представлена схема замещения, рельсовой линии, для которой можно записать следующие уравнения [2].

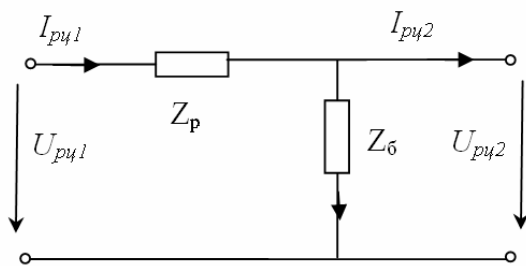


Рис. 3. Четырехполюсник рельсовой линии:
 $I_{рц1}, I_{рц2}$ – сигнальный ток в начале и конце рельсовой цепи; $U_{рц1}, U_{рц2}$ – напряжение в начале и в конце рельсовой цепи; Z_p – сопротивление рельсовой линии; Z_6 – сопротивление балласта

Проведя некоторые математические преобразования, получим

$$\begin{cases} \dot{U}_{рц1} = \dot{U}_{рц2} \left(\frac{Z_p}{Z_6} + 1 \right) + \dot{I}_{рц2} Z_6, \\ \dot{I}_{рц1} = \dot{U}_{рц2} \frac{1}{Z_6} + \dot{I}_{рц2}. \end{cases} \quad (7)$$

Тогда коэффициенты рельсового четырехполюсника равны:

$$\begin{aligned} A_p &= 1 + \frac{Z_p}{Z_6}, & B_p &= Z_p, \\ C_p &= \frac{1}{Z_6}, & D_p &= 1, \end{aligned}$$

а система уравнений примет вид

$$\begin{cases} \dot{U}_{рц1} = \dot{U}_{рц2} A_p + \dot{I}_{рц2} B_p, \\ \dot{I}_{рц1} = \dot{U}_{рц2} C_p + \dot{I}_{рц2} D_p. \end{cases} \quad (8)$$

Напряжение и ток вначале рельсовой цепи можно определить путем экспериментальных исследований. Тогда можно получить, что

$$\dot{U}_{рц2} = \left(\frac{\dot{U}_{рц1}}{B_p} - \frac{\dot{I}_{рц1}}{D_p} \right) \frac{1}{\frac{A_p}{B_p} - \frac{C_p}{D_p}}, \quad (9)$$

$$\dot{I}_{рц2} = \left(\dot{U}_{рц2} C_p + \dot{I}_{рц1} \right) \frac{1}{D_p}. \quad (10)$$

Величина токов утечки сигнального тока для каждого участка РЦ, представленного четырехполюсником (см. рис. 3), и коэффициент утечки тока через балласт равны:

$$I_y = \frac{U_{рц2}}{Z_6}, \quad K_y = \frac{I_y}{I_{рц2}}. \quad (11)$$

Теперь, если вернуться к шестиполуснику (см. рис. 2), который описывает распределение токов и напряжений в тяговой сети, можно определить величину токов утечки в обратном тяговом токе, используя коэффициент утечки K_y . А, зная величину тока утечки обратного тягового тока, можно определить напряжение (потенциал) рельса в конце линии от протекающего по нему обратного тягового тока

$$\begin{cases} I_{y.обр.т.} = I_{к2} K_y, \\ U_{p2} = I_{y.обр.т.} Z_6. \end{cases} \quad (12)$$

В соответствии с законом Кирхгофа запишем

$$I_{p1} = \frac{U_{кр2}}{Z_{из}} + I_{p2} - I_{y.обр.т.},$$

где напряжение рельса от протекающего по нему тягового тока равно

$$U_{p1} = -I_{p1} Z_p.$$

Таким образом, с помощью предложенной математической модели может быть определено распределение напряжения и токов вдоль рельсовой и контактной сети для всех гармоник при различных значениях сопротивления изоляции.

Выводы

Было выполнено математическое моделирование распределения гармоники 50 Гц амплитудой 1,8 А по длине фидерной зоны. Таким образом, при равномерно распределенной нагрузке по длине фидерной зоны точка токораздела питания участка тяговыми подстанциями находится в середине фидерной зоны. Наибольшее значение амплитуды помехи наблюдается в рельсовых цепях, примыкающих к тяговым подстанциям. Токи утечки являются максимальными в середине участка «тяговая подстанция – точка токораздела».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сердюк Т. Н. Автоматизированная система для контроля параметров кодового тока в рельсах / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. 2004. – Вип. 3. – С. 15–20.
2. Котляренко. Путевая автоблокировка и авторегулировка. Котляренко и др. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.

Поступила в редколлегию 12.06.2005.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИЗМЕРЕНИЙ С ВАГОНА-ЛАБОРАТОРИИ

Запропоновано метод для визначення параметрів рейкових кіл під час проведенні вимірів за допомогою автоматизованої мікропроцесорної системи, розташованої у вагоні-лабораторії. Ця система дозволяє контролювати та вимірювати параметри кодового струму в рейкових колах. Величини первинних та вторинних параметрів рейкового кола визначаються за даними вимірів кодового струму в рейках.

Предложен метод для определения параметров рельсовых цепей при проведении измерений с помощью автоматизированной измерительной системы, расположенной в вагоне-лаборатории. Эта система позволяет контролировать и измерять параметры кодового тока в рельсовых цепях. Значения первичных и вторичных параметров рельсовых цепей определяются по данным измерений кодового тока в рельсах.

A method is proposed for determination of rail circuits parameters in measurements with the use of automated microprocessor system, installed in a laboratory car. The system allows to check and measure the parameters of current in the rail circuits. The value of primary and secondary parameters of the rail circuits is determined by the data of measurement of code current in rails.

Введение

Работоспособность устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте во многом определяется качеством измерений и применением прогрессивных методов обслуживания. Результаты измерений позволяют выявить отклонения параметров эксплуатируемой аппаратуры от установленных норм и, таким образом, своевременно принять меры для нормального ее функционирования.

Существуют некоторые особенности в работе рельсовых цепей, в частности – изменение положения подвижных единиц ведет к изменению положения сопротивления шунта. Таким образом, рельсовые цепи работают в нескольких режимах. Поэтому способы измерения их параметров являются специфичными.

Все методы контроля параметров рельсовых цепей, которые используются в условиях эксплуатации, можно разделить на два вида. Первый метод связан с выходом на поле и предполагает измерение сопротивления рельсовой цепи, сопротивления изоляции, напряжения и тока в начале и конце рельсовой линии. Второй метод предполагает определение тока и напряжения вначале и конце во время измерительной поездки на вагоне-лаборатории и позволяет определить параметры кодового тока, протекающего в рельсах [1]. Первичные и вторичные параметры рельсовой цепи во время измерительной поездки в условиях эксплуатации не определяются.

Существующие методы измерения базируются на физически и морально устаревших аппаратных средствах, не обеспечивающих достаточную точность измерений. К недостаткам используемых в настоящее время методов и средств контроля [2; 3] можно отнести ограниченный набор контролируемых параметров, сложность и субъективизм при оценке результатов измерения.

Постановка задачи и цель работы

Применение современных микропроцессорных систем позволяют устранить отмеченные выше недостатки, а именно, контролировать большое число необходимых параметров, с обеспечением достаточно высокой точности измерения, проводить их обработку, автоматически контролировать отклонение от допустимых норм и извещать при их выявлении обслуживающий персонал, записывать и сохранять информацию в цифровом виде на магнитных и оптических носителях.

Целью работы является разработка метода для определения первичных и вторичных параметров рельсовой цепи при проведении измерений с помощью вагона-лаборатории на базе микропроцессорной автоматизированной системы для контроля и измерения параметров кода АЛС, описанной в [4].

Построение математической модели

Для определения параметров рельсовой цепи (РЦ) воспользуемся общей схемой замещения рельсовой цепи, представленной на рис. 1.

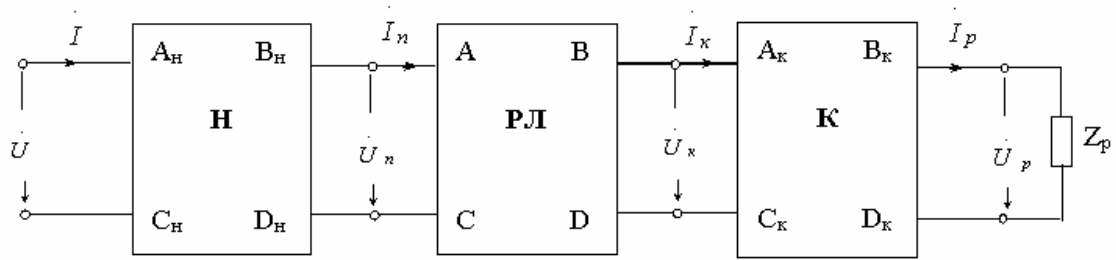


Рис. 1. Схема замещения рельсовой цепи, кодируемой с питающего конца

Четырехполосники Н и К замещают промежуточную и защитную аппаратуру передающего и приемного концов соответственно. Четырехполосник РЛ – представляет собой только рельсовую линию во всех режимах работы РЦ – нормальном, шунтовом, контрольном и АЛС.

При проведении измерений с помощью аппаратно-измерительного комплекса, который используется на базе вагона-лаборатории и предназначен для обслуживания устройств автоматики, определяется величина тока локомотивной сигнализации на протяжении всей РЦ.

Измерения проводятся в режиме АЛС. Этот режим подразумевает такое состояние исправной и занятой рельсовой цепи, при котором в рельсовой петле создается уровень кодового сигнала, достаточный для надежного срабатывания действия локомотивного приемника, расположенного на удаленном от генератора АЛС конце рельсовой линии [5].

Для режима АЛС характерны такие значения параметров рельсовой линии:

- удельное сопротивление рельсов максимальное;
- удельная проводимость изоляции рельсовой линии максимальная;
- напряжение источника минимальное;
- удельная координата рельсовой линии

$$p = x/l = 0,$$

где l – длина рельсовой линии, м; x – абсолютная координата рельсовой линии, равная расстоянию от приемного конца до координаты. В данном случае до поездного шунта, м.

Критерием надежности режима АЛС является соотношение

$$K_{л} = \frac{I_{л.ф.мин}}{I_{л.н}} \geq 1, \quad (1)$$

где $I_{л.ф.мин}$ – фактический минимальный ток в рельсовой линии при наложении нормативного поездного шунта на удаленном от генератора кодовых сигналов АЛС конце и критическом соотношении параметров рельсовой цепи, А; $I_{л.н}$ – нормативный ток АЛС, который равен при авто-

номной тяге 1,2 А, при электрической тяге постоянного тока – 2 А, при электрической тяге переменного тока – 1,4 А [5].

Исходными данными для определения первичных и вторичных параметров РЦ являются длина рельсовой цепи $l_{р.ц}$, величина тока АЛС на удаленном от генератора конце I_k , величина тока АЛС в начале рельсовой цепи I_n , нормативное сопротивление поездного шунта $R_{ш} = 0,06$ Ом и аргумент тока АЛС φ_i .

Согласно теории четырехполосников, можно записать уравнения напряжения и токов в начале РЦ в виде:

$$\begin{cases} \dot{U}_n = A_{ш} \dot{U}_k + B_{ш} \dot{I}_k, \\ \dot{I}_n = C_{ш} \dot{U}_k + D_{ш} \dot{I}_k, \end{cases} \quad (2)$$

где \dot{U}_n , \dot{I}_n – напряжение и ток в начале РЦ; \dot{U}_k

\dot{I}_k – напряжение и ток в точке наложения поездного шунта (в конце рельсовой цепи); $A_{ш}$, $B_{ш}$, $C_{ш}$, $D_{ш}$ – параметры рельсового четырехполосника в режиме АЛС, при наложении шунта на релейном конце рельсовой цепи.

Определение параметров рельсовых цепей рассмотрим для случая, когда кодовые сигналы посылаются с питающего конца рельсовой цепи (рис. 2).

Коэффициенты рельсового четырехполосника при наложении поездного шунта на релейном конце равны:

$$\left. \begin{aligned} A_{ш} &= 1 + \frac{\dot{Z}}{R_{ш}} & B_{ш} &= \dot{Z}, \\ C_{ш} &= \frac{1}{R_{ш}} & D_{ш} &= 1, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\dot{Z} = \dot{z}l$ – полное сопротивление рельсовой линии, Ом; l – длина рельсовой цепи, км; \dot{z} – удельное сопротивление рельсовой линии, Ом/км.

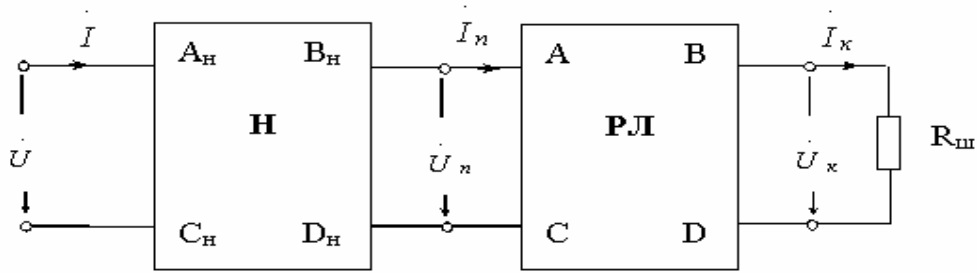


Рис. 2. Схема замещения рельсовой цепи при вступлении поезда на релейный конец

Подставим значения рельсового четырехплюсника в систему уравнений (3)

$$\begin{cases} \dot{U}_H = \left(1 + \frac{\dot{Z}}{R_{ш}}\right) \dot{U}_K + \dot{Z} \dot{I}_K, \\ \dot{I}_H = \frac{1}{R_{ш}} \dot{U}_K + \dot{I}_K. \end{cases} \quad (4)$$

Выполнив некоторые математические преобразования для получения значения первичных параметров рельсовой линии, учитывая что

$$\dot{U}_K = \dot{I}_K R_{ш},$$

получим

$$\begin{cases} \dot{U}_H = \left(1 + \frac{\dot{Z}}{R_{ш}}\right) \dot{I}_K R_{ш} + \dot{Z} \dot{I}_K, \\ \dot{I}_H = \frac{1}{R_{ш}} \dot{I}_K R_{ш} + \dot{I}_K, \\ \dot{U}_H = \left(R_{ш} + \dot{Z}\right) \dot{I}_K + \dot{Z} \dot{I}_K, \\ \dot{I}_H = 2 \dot{I}_K. \end{cases} \quad (5)$$

По определению условий работы рельсовой линии в режиме АЛС напряжение в начале линии равно минимальному напряжению путевого трансформатора и

$$\dot{U}_H = \dot{U}_{\min}.$$

Величина минимального напряжения путевого трансформатора определяется из регулировочных таблиц [5].

Тогда получим, что полное сопротивление рельсовой линии равно

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}_{\min} - \dot{I}_K R_{ш}}{2 \dot{I}_K}. \quad (6)$$

Аргумент тока автоматической локомотивной сигнализации

В настоящее время существуют два способа для контроля параметров рельсовых цепей: амплитудно-ординатный и фазово-ординатный. Для реализации первого способа достаточно знать координату и величину тока АЛС. Второй способ предполагает, что известны три параметра: ток АЛС, аргумент тока, координата, и является более точным.

В составе аппаратуры «Контроль», которая используется на действующих железных дорогах для контроля параметров тока локомотивной сигнализации, отсутствуют технические средства для измерения аргумента тока автоматической локомотивной сигнализации. Таким образом, любые методы, реализованные на базе действующей аппаратуры, не позволят определить параметры рельсовых цепей наиболее точно. Ранее было предложено для измерения фазы тока АЛС применять цифровые фазометры [6]. Недостатком реализации фазово-ординатного способа являлась низкая помехозащищенность датчиков тока АЛС, что не позволяло определять фазовые соотношения с требуемой точностью.

Разработанная на базе микропроцессорной техники автоматизированная системы для контроля и измерения параметров тока АЛС [4] предполагает определение и амплитуды, и фазы тока автоматической локомотивной сигнализации, поскольку в ней используются преобразования Фурье. Для определения фазы тока АЛС предлагается использовать синхронизирующий сигнал, вырабатываемый измерительной аппаратурой. Таким образом, точность при определении аргумента тока АЛС повышается.

На рис. 3 представлена зависимость значения аргумента тока локомотивной сигнализации от координаты пути. Сплошной линией обозначена теоретическая кривая аргумента тока АЛС, протекающего в рельсовой цепи длиной 2 600 м. В данном случае было принято предположение, что сопротивление рельсовой

цепи одинаково распределено по всей своей длине и находится в установленных пределах. Кривая взята из [6]. Звездочками и квадратиками показаны значения фазы тока АЛС для двух реальных рельсовых цепей длиной 2 600 м. Измерения были проведены на участке Днепро-

петровск – Чаплино. Значения аргументов несколько отличаются от идеальных, т. к. состояние пути оказывается различным на отдельных участках (из-за вариации сопротивления электрических соединителей, балласта и т. д.). Но характер кривой остается подобным.

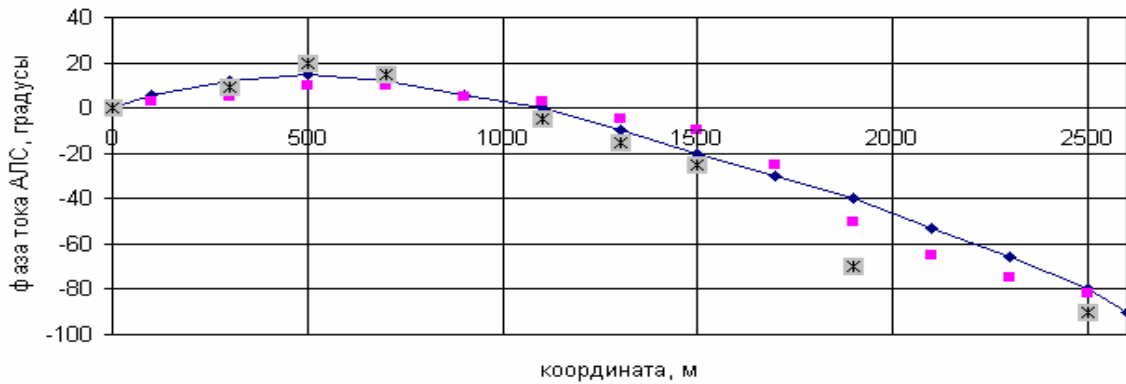


Рис. 3. Зависимость аргумента тока локомотивной сигнализации от координаты пути в пределах одной рельсовой цепи

Определение вторичных параметров рельсовой цепи

Известно, что коэффициенты рельсового четырехполюсника определяются через вторичные параметры рельсовой цепи следующим образом:

$$A = D = ch(\gamma l), \quad B = \dot{Z}_B sh(\gamma l),$$

$$C = \frac{sh(\gamma l)}{\dot{Z}_B}, \quad (7)$$

где \dot{Z}_B – волновое сопротивление рельсовой линии, Ом; γ – коэффициент распространения волны, 1/км.

При наложении поездного шунта на релейном конце получается, что

$$A_{III} = A, \quad B_{III} = B, \quad C_{III} = C, \quad D_{III} = D,$$

тогда

$$\dot{Z} = \dot{Z}_B sh(\gamma l), \quad \frac{1}{R_{III}} = \frac{sh(\gamma l)}{\dot{Z}_B},$$

$$\dot{Z}_B = \frac{\dot{Z}}{sh(\gamma l)}, \quad sh(\gamma l) = \frac{\dot{Z}_B}{R_{III}},$$

$$\dot{Z}_B = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z}_B} R_{III}, \quad (8)$$

отсюда можно определить волновое сопротивление рельсовой линии

$$\dot{Z}_B = \sqrt{\dot{Z} R_{III}}. \quad (9)$$

Также можно получить, что

$$sh(\gamma l) = \frac{\dot{Z}_B R_{III}}{\dot{Z}}, \quad sh(\gamma \cdot l) = \sqrt{\dot{Z}_B \cdot R_{III}}.$$

Тогда коэффициент распространения волны равен

$$\gamma = \frac{\operatorname{arcsch}\left(\sqrt{\dot{Z}_B R_{III}}\right)}{l}. \quad (10)$$

Волновое сопротивление линии зависит от ее первичных параметров следующим образом:

$$\dot{Z}_B = \sqrt{\dot{z} R_{II}}, \quad (11)$$

где R_{II} – эквивалентное сопротивление изоляции рельсовой линии и заземлений контактных опор, Ом·км; \dot{z} – удельное сопротивление рельсовой линии, Ом/км.

Таким образом, сопротивление изоляции рельсовой линии может быть определено следующим образом:

$$R_{II} = \frac{\dot{Z}_B^2}{\dot{z}}, \quad (12)$$

Результаты моделирования

Для моделирования возьмем рельсовую цепь длиной 2 600 м, расположенную на участ-

ке с электротягой постоянного тока. Сопротивление поездного шунта примем $R_{ш} = 0,06$ Ом. Ток в рельсовой цепи на релейном конце равным $I_k = 2$ А, на питающем – максимум $I_n = 25$ А. В соответствии с [5] для рельсовой цепи длиной 2 600 м частотой 50 Гц с двумя дроссель-

трансформаторами, реле типа ИМВШ-110 и напряжением $U_n = U_{min} = 152$ В. Используя выражения (10) и (11), выполнен расчет волнового сопротивления и коэффициента затухания для данной рельсовой цепи. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

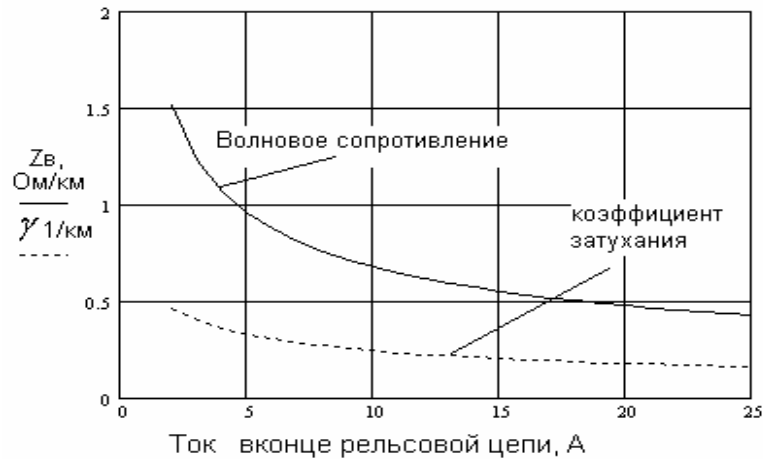


Рис. 4. Зависимость волнового сопротивления и коэффициента затухания от величины тока в конце рельсовой цепи

Поскольку величина минимального напряжения является фиксированной и выставляется по регулировочным таблицам во время проверки рельсовых цепей, то при моделировании принимаем

$$U_n = U_{min} = const.$$

По графикам определяется величина волнового сопротивления и коэффициента затухания линии для данной рельсовой цепи в зависимости от величины тока, измеренного на релейном конце. Данный метод является косвенным и обладает достаточной степенью точности измерений. Погрешность измерений составляет не более 5 %.

Выводы

Предложен метод для определения первичных и вторичных параметров рельсовых цепей при проведении измерений с помощью автоматизированной микропроцессорной системы, расположенной в вагоне-лаборатории. Преимуществом данного метода является то, что во время измерительной поездки вагона-лаборатории производится контроль параметров не только кодового тока, но и самих рельсовых цепей. Он исключает большое количество трудоемких операций, связанных с выходом на поле, и субъективизм при выполнении работ. Обладает достаточной степенью точности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ): ЦШЕОТ/0012: Затв. Гол. упр. зв'язку, енергетики та обчислювальної техніки М-ва транспорту України 05.10.1998. – К., 1998. – 72 с.
2. Воронин В. А. Об измерениях в рельсовых цепях тональной частоты / В. А. Воронин, В. С. Широков // Автоматика, телемеханика, информатика. 1999. – № 8. – С. 26–28.
3. Дмитренко И. Е. Измерение и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / И. Е. Дмитренко, В. В. Сапожников, Д. В. Дьяков. – М.: Транспорт, 1994. – 263 с.
4. Сердюк Т. Н. Автоматизированная система для контроля параметров кодового тока в рельсах / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. 2004. – Вип. 3. – С. 15–20.
5. Аркатов В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник / В. С. Аркатов, Н. Ф. Коляренко, А. И. Баженов, Т. Л. Лебедева. – М.: Транспорт, 1982. – 360 с.
6. Удовиков А. А. Определение первичных параметров рельсовой линии из движущегося вагона-лаборатории // Межвуз. сб. науч. тр. / ХИИТ. – Вып. 23. – Харьков, 1993. – С. 62–64.

Поступила в редколлегию 22.03.2005.

В. Г. СЫЧЕНКО (Днепропетровский орган сертификации ж.-д. транспорта),
М. П. БАДЕР (Московский государственный университет путей сообщения),
В. И. ГАВРИЛЮК (ДИИТ)

ПРОГРАММНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

Проанализовано критеріи якості регулювання напруги на шинах тягової підстанції та запропоновано субоптимальний адаптивний алгоритм регулювання напруги. Розроблена для ділянки залізниці з електротягою постійного струму методика програмного регулювання дозволяє зменшити експлуатаційні витрати і не потребує значних витрат на її впровадження.

Проанализированы критерии качества регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции и предложен субоптимальный адаптивный алгоритм регулирования напряжения. Разработанная для участка железной дороги с электротягой постоянного тока методика регулирования напряжения позволяет добиться снижения эксплуатационных расходов и не требует значительных затрат на ее внедрение.

The criteria of voltage regulating quality on tractive power supply substation buses have been analyzed and the suboptimum adaptive algorithm of voltage regulation has been proposed. The method developed for a DC-electrified railway section allows reducing maintenance costs and does not require significant expenses for its implementation.

Введение

Программой энергосбережения на железнодорожном транспорте Украины предусматривается широкое использование энергооптимальных технологий в перевозочном процессе. Для реализации этого необходим комплексный системный подход, предусматривающий разработку и совершенствование технических и организационных мер по оптимизации параметров системы тягового электроснабжения, режимов ее работы, а также стимулирования рационального энергопотребления.

Для уменьшения эксплуатационных расходов на железнодорожном транспорте широко применяются технологические мероприятия, основанные на формировании графика движения поездов с учетом многотарифности оплаты за электроэнергию в течение суток.

Уменьшение энергопотребления возможно путем улучшения качества электрической энергии и внедрения рациональных режимов ведения поездов.

Критериями качества электрической энергии в тяговых сетях являются отклонение и колебания напряжения, а также несинусоидальность его для электротяги переменного тока [1]. Изменение уровня напряжения в тяговой сети влияет на коэффициент полезного действия электроподвижного состава. Помимо этого, вследствие увеличения разности в напряжениях на шинах смежных подстанций, возникают значительные

уравнительные токи, перетекающие между подстанциями, что приводит к значительному увеличению потерь электроэнергии.

Одним из важнейших направлений повышения эффективности работы системы тягового электроснабжения и снижения потерь электроэнергии является применение регулирования напряжения на шинах тяговых подстанций. На тяговых подстанциях постоянного тока применяются регуляторы пределов напряжения (РПН) на основе трансформаторов, обмотки которых выполнены с ответвлениями, коммутируемыми специальными переключателями без разрыва цепи тока [1]. Регулирование напряжения при этом осуществляется ступенчато, а ресурс переключений напряжения ограничен (до 11 тысяч переключений). Однако внедрение такой системы затруднено вследствие устаревшего оборудования тяговых подстанций, отсутствия регулирующих устройств. Системы бесконтактного регулирования напряжением не получили широкого распространения.

Цели и задачи исследования

Таким образом, решение задачи снижения энергопотребления за счет повышения качества напряжения на тяговых подстанциях, оборудованных РПН со ступенчатым регулированием напряжения, связано, главным образом, с разработкой рациональных алгоритмов управления регуляторами с учетом ограниченного ресурса их работы.

В соответствии с вышеизложенным, целью настоящей работы является анализ критериев качества регулирования напряжения и разработка субоптимального адаптивного алгоритма регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции.

Анализ критериев качества регулирования напряжения на тяговой подстанции

Система тягового электроснабжения (СТЭС) с позиций технической кибернетики – это многомерный объект автоматического управления, характеризующийся стохастическим характером изменения параметров функционирования, переменными параметрами которого являются потенциалы в узлах, токи и соответственно потоки активной и реактивной энергии, протекающие по фидерам, а возмущениями – случайные изменения мощности нагрузки в узлах, вызванные изменениями количества, положения и режимов работы тяговых потребителей, изменением режимов работы нетяговых потребителей и т. д. Управляющими воздействиями являются формируемые по определенному алгоритму воздействия на РПН, приводящие к переключению отводов обмоток трансформатора и регулировке напряжения на шинах.

С учетом случайного характера возмущений, воздействующих на систему, изменение напряжения на шинах тяговой подстанции будет также случайной величиной. Параметром качества напряжения может служить среднее квадратическое отклонение напряжения от заданного среднего значения или дисперсия. Однако разработка алгоритма функционирования РПН со ступенчатым регулированием напряжения по критерию минимизации дисперсии напряжения на шинах подстанции не дает заметного снижения эксплуатационных расходов. Критерием решения задачи оптимизации регулирования напряжения переключения отводов обмотки трансформатора является минимизация функционала, учитывающего уменьшение расходов на перевозки, снижение потерь на протекание уравнительного тока между подстанциями, а также расходы на переключения РПН.

Адаптивный алгоритм регулирования напряжения

Необходимость создания энергооптимальной системы регулирования напряжения, позволяющей учитывать многообразие влияющих факторов, привела к разработке адаптивных субоптимальных алгоритмов регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции [2].

Адаптивные субоптимальные алгоритмы очень широко используются при построении систем управления и регулирования при неопределенности параметров или неполной факторизации критериев качества функционирования системы. Разработанные алгоритмы позволяют создать систему непрерывного следящего регулирования напряжения, адаптирующуюся к изменяющимся условиям токопотребления, то есть к изменению поездной ситуации. В силу этого, применяя к адаптивным алгоритмам регулирования напряжения принцип «достаточного управления», заключающийся в том, что на шинах тяговой подстанции поддерживается напряжение $U = f(I, \Delta t)$, «достаточное» для проследования поезда по межподстанционной зоне в соответствии с графиком движения.

Для каждого значения тока в контактном проводе, усредненного по уровню и длительности, расчетным путем можно подобрать энергооптимальный уровень напряжения с соблюдением всех вышеназванных ограничений. Таким образом, при пропуске одного поезда по межподстанционной зоне зависимость изменения напряжения на шинах тяговой подстанции от времени можно рассматривать с достаточной степенью точности как функцию только времени $U = f(t)$.

Алгоритм регулирования напряжения в соответствии с последним выражением, реализует программное управление или управление по разомкнутой схеме, которое широко используется в вероятностных задачах адаптивного управления нелинейными объектами и является одной из разновидностей субоптимальных стратегий управления. При этом происходит переход от параметрического закона управления к временному, что упрощает структуру регулятора.

Однако на межподстанционной зоне, как правило, находится несколько разнотипных поездов, оказывающих взаимное влияние на их тягово-энергетические характеристики. На имитационной модели (ИМ) эксплуатационной работы на участке тяговой сети можно получить зависимости $U(t)$ и $I(t)$ в течение определенного периода времени (например, суток) и реализовать управление напряжением на шинах тяговой подстанции по критерию обеспечения минимума расхода электроэнергии. Таким образом, описанный принцип программного управления по разомкнутой схеме может быть реализован для регулирования напряжения на шинах подстанции при пропуске по участку всех поездов, предусмотренных графиком поездной работы.

В соответствии с вышеизложенным разработан следующий алгоритм программного регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции:

- с помощью имитационной модели для участка тяговой сети находим зависимости токов подстанций от времени для заданного числа поездов;
- проводим усреднение токов по временным интервалам;
- для каждого значения тока и соответствующего временного интервала на имитационной модели с учетом ограничений определяем достаточный уровень напряжения на шинах подстанции при минимуме расхода электрической энергии на тягу поездов, то есть получаем закон регулирования $U(t)$ для каждой из подстанций;
- устройствами регулирования напряжения, имеющимися на данной подстанции, по заданному закону $U = f(t)$ осуществляем регулирование напряжения.

Рассмотрим некоторые аспекты практической реализации алгоритма программного регулирования напряжения.

СТЭС характеризуется сложным взаимодействием составляющих ее устройств, часть которых имеет нелинейные характеристики. Тяговые подстанции, тяговая сеть электроподвижной состав совместно с системой внешнего электроснабжения образуют протяженную многомерную динамическую систему, режим которой невозможно исследовать без учета случайных факторов, влияющих на ее состояние. Меняющиеся во времени условия работы устройств системы оказывают влияние на эффективность ее функционирования. Сложность задач практических расчетов и анализа работы системы электроснабжения электрифицированной железной дороги усугубляется тем, что ряд важнейших параметров устройств электроснабжения и показателей ее работы являются функционалами от переменных, соответствующих случайным процессам. Для исследования таких многомерных объектов управления, характеризующихся стохастическим характером функционирования, широко применяется имитационное моделирование, заключающееся в том, что математическая модель воспроизводит с помощью ЭВМ функционирование во времени системы. При этом отображаются элементарные явления, составляющие процесс, с со-

хранением их логической последовательности протекания во времени. В настоящее время для исследования режимов работы системы тягового электроснабжения разработан целый ряд моделей. Однако эти имитационные модели построены, в основном, для получения усредненных значений величин и не учитывают в полной мере разнообразие типов поездов, обращающихся на участке, а также изменение уровня напряжения на токоприемнике электровоза. Поскольку проведение экспериментальных измерений с регулированием уровней напряжения в тяговой сети затруднительно из-за невозможности воспроизведения на практике одинаковых показателей работы системы электроснабжения при изменении напряжения, исследование проведено на имитационной модели.

Общепринятым подходом к моделированию работы СТЭС является разделение ее на две подсистемы: динамическую, включающую моделирование движения поездов и, следовательно, нагрузок (вектор задающих токов или мощностей), и статическую, включающую электрический расчет для конкретной мгновенной поездной ситуации. Для решения задач энергоснабжения, где требуется получить средневзвешенные оценки электрических величин, например, потери энергии, обычно осуществляют моделирование с одним (средневзвешенным) типом поезда. При решении задачи энергооптимального регулирования напряжения в тяговой сети с целью получения оценки изменения напряжения на токоприемнике электровоза при его движении по перегону, необходимо вводить в модель все типы поездов (и электровозов), обращающихся на данном участке. Сложность модели при этом возрастает, а если учесть, что на каждом шаге счета для всех поездов, находящихся на участке, выполняется тяговый расчет, то и время счета увеличивается. Однако для получения наиболее близких к реальным оценкам электрических величин (в частности, токов и напряжений), при рассмотрении различных алгоритмов регулирования напряжения, а также с целью уменьшения времени обучения при построении адаптивной системы регулирования такой подход представляется правомерным.

Моделирование графика движения поездов представляет собой моделирование очередности отправления поездов различных типов и моделирование интервалов между ними с вероятностной точки зрения. Детальное рассмотрение данного вопроса выходит за рамки этой статьи. Здесь отметим, что в имитационной модели при расчете вероятностей применяется схема «выборка без возвращения», что больше

соответствует действительности, так как число отправляемых за расчетный период поездов различных типов всегда конечно, а также осуществляется учет всех типов поездов, обращающихся на участке.

Моделирование тяговой нагрузки осуществляется вектором задающих токов, то есть каждый электровоз заменяется функцией тока $J(s)$, определяемой из тягового расчета. Такой подход позволяет учесть реальные условия движения (профиль, влияние других поездов). Тяговые расчеты выполняются с учетом действительного напряжения на токоприемниках электровозов путем введения напряжения непосредственно в формулы расчета кривых движения. В результате расчета мгновенной схемы по значению напряжения на токоприемнике электровоза производится пересчет от действительной скорости, соответствующей данному напряжению, к скорости, соответствующей номинальному напряжению, и по аппроксимированным тяговым и токовым характеристикам электровоза для номинального напряжения определяется его сила тяги и ток для действительного напряжения.

Электрический расчет производится известными методами. Моделирование нагрузки районных потребителей осуществляется с помощью генератора случайных чисел. При этом учитывается, что районная нагрузка имеет постоянную и переменную составляющие. Моделирование же питающей энергосистемы, а вернее учет изменения напряжения на питающих шинах осуществляется моделированием изменения сопротивления энергосистемы.

Выбор временного интервала для усреднения тока, то есть, фактически, выбор количества управляющих воздействий, определяется для каждого конкретного участка с учетом возможностей и ресурса коммутирующей аппаратуры и количества пиков нагрузки. В этом ракурсе также представляет интерес переход на дифференцированные тарифы по оплате за электроэнергию на тягу поездов [3].

Расчет энергооптимального уровня напряжения на ИМ осуществляется на основе критерияльного подхода [4], основанного на том, что уровень напряжения рассматривается не как нормированный, наперед заданный показатель, а как параметр, оптимизирующий передачу энергии электроподвижному составу.

Предлагаемая методика программного управления режимом напряжения на шинах тяговой подстанции является упрощенной, однако наиболее приемлема по технико-экономическим сооб-

ражениям в современных условиях. Практическое использование предлагаемой методики предполагает изменение режимных карт ведения поезда по участку. При этом локомотивным бригадам фактически предлагаются условия ограниченного выбора режимов вождения, что нивелирует различную квалификацию машинистов и снижает влияние «субъективного фактора». Фактически речь идет о создании энергетического паспорта конкретного участка СТЭС, который увязывает весь комплекс железнодорожного транспорта, обеспечивающий перевозочный процесс.

Выводы

В работе проанализированы критерии качества регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции и предложен субоптимальный адаптивный алгоритм регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции.

Предложенная методика программного регулирования для реальных условий работы электрифицированного участка постоянного тока не требует больших затрат и позволяет добиться снижения эксплуатационных расходов и повышения экономичности работы. Расчеты, проведенные для участка Внуково – Малоярославец Московской железной дороги по исполненному графику движения поездов, показали возможность снижения электропотребления на тягу поездов до 3 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. 1. / Под ред. К. Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.
2. Сыченко В. Г. Алгоритмы управления режимом напряжения на тяговых подстанциях постоянного тока. / Депон. рукопись № 329. – Ук. 99 от 13.12.99 г. – 16 с., ил.
3. Мамошин Р. Р. Снижение энергоемкости в системах электроснабжения электрической тяги. // Труды второй научн. технич. конференции: Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте. Кн. 1. – М.: МИИТ, 1999. – С. 1–6.
4. Сыченко В. Г. Выбор управляющего параметра при разработке микропроцессорной адаптивной системы регулирования напряжения на шинах тяговой подстанции // Межвузовский сборник научных трудов / Транспорт. Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта. – Д.: Сич, 1999. – С. 166–172, ил.

Поступила в редколлегию 06.06.2005.

А. И. ТИМОШКИН, В. В. КАМЕНСКИЙ (Ростовский государственный университет)

МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОГО АППАРАТНОГО КОНТРОЛЯ ЦИФРОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ

Наведено різні методи оперативного вбудованого контролю для цифрових функціональних вузлів. Подані методи базуються на одночасному використанні декількох самоконтрольованих або (і) несамоконтрольованих схем вбудованого контролю для одного й того ж функціонального вузла.

Предлагаются различные методы оперативного встроенного контроля для цифровых функциональных узлов. Предлагаемые методы базируются на одновременном использовании нескольких самоконтролируемых или (и) несамоконтролируемых схем встроенного контроля для одного и того же функционального узла.

Various methods of operative built-in check for digital functional units are proposed. These methods are based on simultaneously using several self-checking or (and) non-self-checking control schemes for the same functional unit.

Для обеспечения максимальной эффективности железнодорожного транспорта необходимо свести к минимуму количество отказов и время восстановления узлов и систем управления. Бесперебойность работы железнодорожного транспорта обеспечивается современными системами автоматики и телемеханики, которые должны обладать высокой надежностью и отказоустойчивостью. Для повышения надежности и отказоустойчивости аппаратных средств систем телеуправления и телесигнализации используются различные методы резервирования устройств этих систем.

Обычно в системах железнодорожной автоматики и телемеханики используются методы резервирования, основанные на троированных мажоритарных структурах. Одним из существенных недостатков данной группы методов является общая сложность системы и как следствие ее высокая стоимость.

Другая группа методов повышения надежности и отказоустойчивости основана на контроле правильности функционирования устройств. Устройства дополняются схемами встроенного контроля (СВК) или самоконтролируемыми схемами встроенного контроля (ССВК).

СВК формирует сигнал ошибки в случае возникновения неисправностей в контролируемом устройстве. Однако СВК не обнаруживает собственные неисправности, что порождает в этом случае проблему «сторожа над сторожем».

Самоконтролируемая схема встроенного контроля обнаруживает не только неисправности контролируемого устройства, но также свои собственные. ССВК обычно имеет два выхода. Парафазный сигнал на выходах свидетельствует о правильном функционировании контролируемого устройства и ССВК, а синфазный – о наличии не-

исправности в устройстве или ССВК. Но в этом случае при синфазном сигнале на выходах ССВК приходится заменять весь самоконтролируемый блок (т. е. устройство и ССВК) целиком.

Для обеспечения возможности отдельной замены либо устройства, либо ССВК в самоконтролируемом блоке предлагается использовать в нем две ССВК одновременно (рис. 1). При этом при наличии синфазных сигналов на выходах обеих ССВК заменяется контролируемое устройство, при наличии синфазного сигнала на выходах только одной из двух ССВК заменяется эта ССВК.

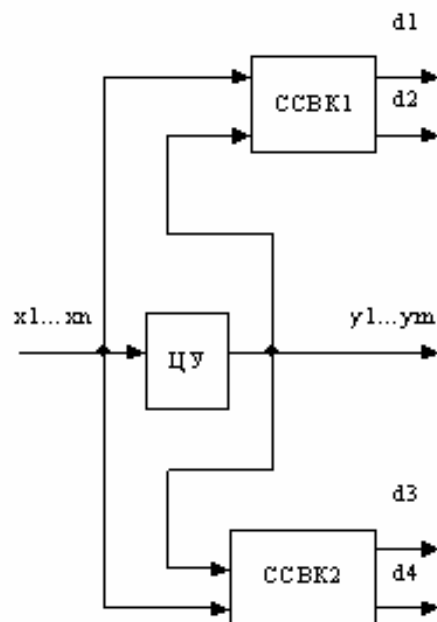


Рис. 1

Частичную возможность отдельной замены дает метод оперативного контроля на основе одновременного использования в самоконтро-

лируемом блоке двух несамоконтролируемых схем встроенного контроля (рис. 2). При этом при наличии сигналов о неправильном функционировании на выходах обеих СВК заменяется контролируемый цифровой узел, а при наличии различных сигналов на выходах этих СВК заменяется весь самоконтролируемый блок целиком (т. е. цифровой узел и две СВК).

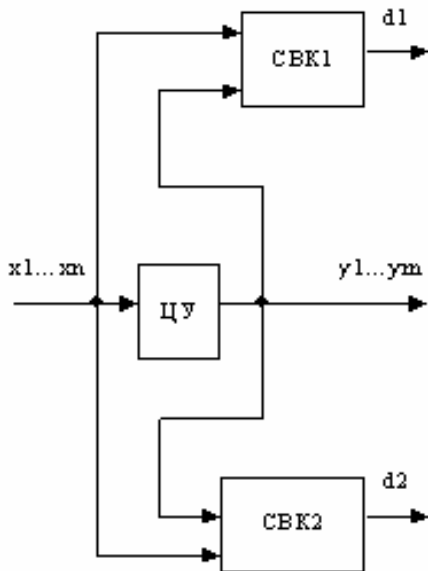


Рис. 2

Полную возможность отдельной замены наряду с методом на основе двух ССВК дает метод оперативного контроля на основе одновременного использования в самоконтролируемом блоке трех несамоконтролируемых схем встроенного контроля (рис. 3).

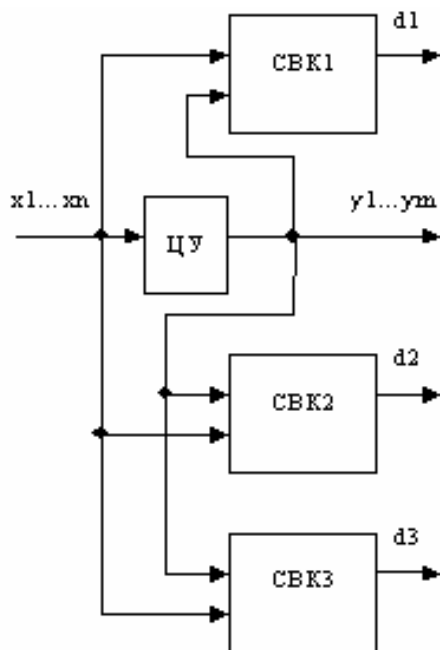


Рис. 3

В этом случае, при наличии сигналов о неправильном функционировании на выходах всех трех СВК, заменяется контролируемый цифровой узел, при наличии сигнала о неправильном функционировании на выходе одной из трех СВК заменяется эта СВК, а при наличии сигнала о правильном функционировании на выходе одной из трех СВК заменяется эта СВК и контролируемый узел. Считается, что одновременно не могут отказать две и более подсхем структур, приведенных на рис. 1–3.

Метод повышения разрешающей способности оперативного контроля на основе одновременного использования двух самоконтролируемых схем встроенного контроля (ССВК) имеет существенный недостаток. Для реализации встроенного контроля правильности функционирования цифровых узлов могут потребоваться большие аппаратные затраты. Так, по данным работ [2; 3] аппаратные затраты на реализацию одной несамоконтролируемой схемы встроенного контроля (СВК) в среднем составляют 25...30 % от затрат на реализацию цифрового контролируемого узла. Поскольку затраты на реализацию ССВК как минимум вдвое превышают затраты на реализацию СВК, то суммарные затраты на реализацию двух ССВК могут составить 100...120 %. Для уменьшения аппаратных затрат на реализацию схем встроенного контроля при сохранении возможности отдельной замены [1] предлагается следующее:

- организовать двухуровневый контроль правильности функционирования;
- ССВК использовать в комбинации с СВК.

Применение двух отмеченных принципов позволяет получить рациональную с точки зрения затрат на реализацию встроенного контроля структуру самоконтролируемого блока. Эта структура представлена на рис. 4. Правильность функционирования цифрового узла контролируется одновременно двумя СВК, правильность функционирования которых в свою очередь контролируется отдельной ССВК. При этом затраты на реализацию встроенного контроля составляют 75...90 %.

При наличии сигналов о неправильном функционировании на выходах обеих СВК заменяется контролируемый цифровой узел, а также ССВК, на выходах которой присутствует синфазный сигнал, либо заменяются обе СВК при синфазных сигналах на выходах двух ССВК. (Считается, что одновременно могут отказать не более двух подсхем рассматриваемой структуры).

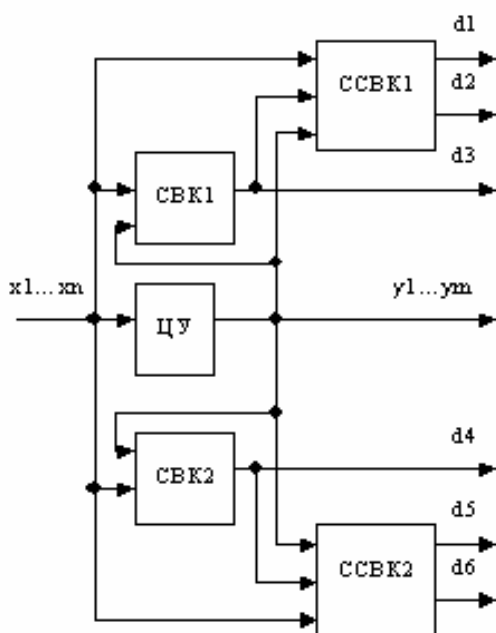


Рис. 4

При наличии различных сигналов на выходах двух СВК и синфазных сигналов на выходах обеих ССВК заменяется СВК с сигналом на выходе об ошибочном функционировании и ССВК той СВК, на выходе которой присутствует сигнал о правильном функционировании.

Если на выходе одной СВК имеется сигнал о неправильном функционировании и парафазный сигнал на выходах ее ССВК, а на выходе другой СВК – сигнал о правильном функционировании и синфазный сигнал на выходах ее ССВК, то заменяются контролируемый узел и СВК с выходным сигналом о правильном функционировании.

При наличии сигнала о неправильном функционировании на выходе одной СВК и синфаз-

ного сигнала на выходах ее ССВК, а также сигнала о правильном функционировании на выходе другой СВК и парафазного сигнала на выходах ее ССВК заменяется СВК с выходным сигналом о неправильном функционировании.

Если на выходах обеих СВК имеются сигналы о правильном функционировании и синфазный сигнал на выходе одной из ССВК, то заменяется ССВК с синфазным сигналом.

При наличии сигналов о правильном функционировании на выходах обеих СВК и синфазных сигналов на выходах обеих ССВК выполняется следующая последовательность действий:

- заменяется контролируемый узел и обе СВК;
- если после замены совокупность значений выходных сигналов схем встроенного контроля не меняется, то в самоконтролируемый блок возвращаются заменяемые схемы и заменяются уже обе ССВК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимошкин А. И. Метод повышения разрешающей способности аппаратного контроля / А. И. Тимошкин, В. В. Каменский // Труды научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава: Транспорт-2004. Ч. 1. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2004.
2. Граф Ш. Схемы поиска неисправностей / Ш. Граф, М. Гессель; Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 144 с.
3. Согомонян Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. – М.: Радио и связь, 1989 – 208 с.

Поступила в редколлегию 12.06.2005.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЯЦИИ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСАХ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ

Запропонована чисельна модель, на базі якої розроблений метод розрахунку процесу розповсюдження токсичного газу в приміщенні. Як математична модель використовуються двовимірні рівняння переносу домішки та потенціального руху повітря. Розрахунок здійснюється з використанням неявних різницьових схем. Надаються результати обчислювального експерименту по моделюванню забруднення повітря в приміщенні після аварійного викиду токсичної речовини.

Предложена численная модель, на базе которой разработан метод расчета процесса распространения токсичного газа в помещении. В качестве математической модели используются двумерные уравнения переноса примеси и потенциального движения воздуха. Расчет производится с использованием неявных разностных схем. Предлагаются результаты вычислительного эксперимента по моделированию загрязнения воздуха в помещении после аварийного выброса токсичного вещества.

A numerical model to simulate the process of pollutant transfer in rooms was developed. The numerical simulation is carried out using 2D models of pollutant transfer and potential flow. The implicit finite difference schemes are used. The results of numerical simulation of air pollution in a confined space after blasts of toxic substances have presented.

Одной из важнейших проблем в области экологической безопасности на производстве является проблема защиты людей в производственных помещениях в случае аварийной утечки или выброса токсичных веществ [1]. Такие аварийные ситуации в производственных помещениях возникают по ряду причин: нарушение техники безопасности на производстве, нарушение технологических процессов, износ оборудования, террористический акт.

В случае аварии в воздушную среду производственного помещения в течение небольшого промежутка времени может поступить значительное количество токсичного вещества, в результате чего его концентрация в помещении может в десятки и даже сотни раз превысить ПДК.

Другой опасностью аварийных выбросов в помещении является опасность появления в различных местах помещения подзон, где концентрация токсичного вещества может превысить нижний предел воспламенения [2].

На производстве очень часто располагается оборудование, имеющее нагретые участки, и следствием аварийной утечки будет взрыв в помещении. Снижение концентрации токсичного вещества в помещении после аварии происходит за счет работы аварийной вентиляции. Поэтому при проектировании или реконструкции систем аварийной вентиляции очень важно знать не только как при выбранных параметрах системы будет происходить снижение концентрации токсичного вещества в помещении, но и как будет формироваться при этом зона за-

грязнения в помещении, чтобы избежать появления подзон, где может быть достигнут нижний концентрационный предел воспламенения. Ранее при расчете и проектировании аварийной вентиляции использовались аналитические модели [6]. Однако на базе этих моделей не представлялось возможным прогнозировать динамику развития зоны загрязнения в помещении при аварии и работе аварийной вентиляции.

Целью работы является разработка метода компьютерного прогнозирования динамики загрязнения воздушной среды помещения в случае аварийного выброса с учетом работы системы аварийной вентиляции. Разработанный метод основывается на создании численной модели процесса переноса примеси в помещении и вентиляции его. Представленный метод позволяет моделировать широкий спектр аварийных ситуаций в производственном помещении: залповый выброс, полунепрерывный, серия выбросов и т. п.

Математическая модель загрязнения воздушной среды в помещении. Для моделирования процесса переноса токсичного газа в помещении после аварии используется модель градиентного типа, осредненная по ширине помещения

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_i(t) \delta(r - r_i), \quad (1)$$

где C – концентрация токсичного вещества в помещении; u, v – компоненты вектора скорости воздушной среды в декартовой системе координат X, Y ; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициент турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса токсичного вещества в помещении; $\delta(r - r_i)$ – дельта-функция Дирака; $r_i = (x_i, y_{ii})$ – координаты источника выброса.

Делается предположение, что движение воздушной среды в помещении – потенциальное, тогда компоненты скорости воздушной среды определяются соотношениями:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y},$$

где P – потенциал.

Уравнение для определения потенциала имеет вид

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Постановка краевых условий для уравнения (1) рассмотрена в работах [3; 4]. Для уравнения (2) ставятся следующие граничные условия:

- на твердых стенках

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

где n – единичный вектор внешней нормали;

- на входной границе (границы втекания воздушного потока в помещение)

$$\frac{\partial P}{\partial n} = V_n,$$

где V_n – известное значение скорости;

- на выходной границе

$$P = P(x = \text{const}, y) + \text{const}$$

(условия Дирихле).

Метод решения

Для численного интегрирования уравнений (1) и (2) используется прямоугольная разностная сетка. Уравнение (1) интегрируется с использованием попеременно-треугольной неявной разностной схемы расщепления [3]. Используемая попеременно-треугольная разностная схема позволяет разработать эффективный алгоритм расчета переноса токсичного газа в областях сложной геометрической формы,

которыми являются производственные помещения, где размещено различное технологическое оборудование, представляющее препятствие на пути воздушного потока индуцированного работой системой вентиляции.

Для численного интегрирования уравнения (2) используется идея «установления решения по времени», т. е. интегрируется уравнение вида

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

где η – фиктивное время.

Численное интегрирование данного уравнения проводится с помощью неявного попеременно-треугольного метода А. А. Самарского [5].

Результаты численного моделирования

На базе разработанной численной модели создан пакет программ «ROOM-2D», (программы записаны на алгоритмическом языке FORTRAN-IV), который представляет собой инструмент прогноза динамики загрязнения помещения при аварийном выбросе в нем токсичного вещества. Применение данного пакета программ рассматривается на конкретной задаче.

Рассматривается следующий сценарий аварии. В помещении произошел залповый выброс аммиака, в результате которого образовалась зона загрязнения размером $3,5 \times 1,8$ м (рис. 1). Средняя концентрация аммиака в зоне загрязнения $C = 1$ (в безразмерном виде). Размеры помещения: длина – 10 м, ширина – 10 м, высота – 5 м.

Из рис. 1 видно, что облако имеет сложную Геометрическую форму, близкую к округлости. Подача чистого воздуха в помещение осуществляется через отверстие, расположенное на потолке помещения, ближе к его левой стенке. Высота входного отверстия – 1,6 м. Выходное отверстие расположено либо внизу на правой стенке (первый вариант расчета), либо на полу помещения (второй вариант расчета). Ширина выходного отверстия – 1,5 м. Скорость втекания воздушного потока – 1 м/с, коэффициент диффузии – $0,3 \text{ м}^2/\text{с}$. Задачей исследования является анализ влияния положения выходного вентиляционного отверстия на динамику развития зоны загрязнения в помещении после аварии.

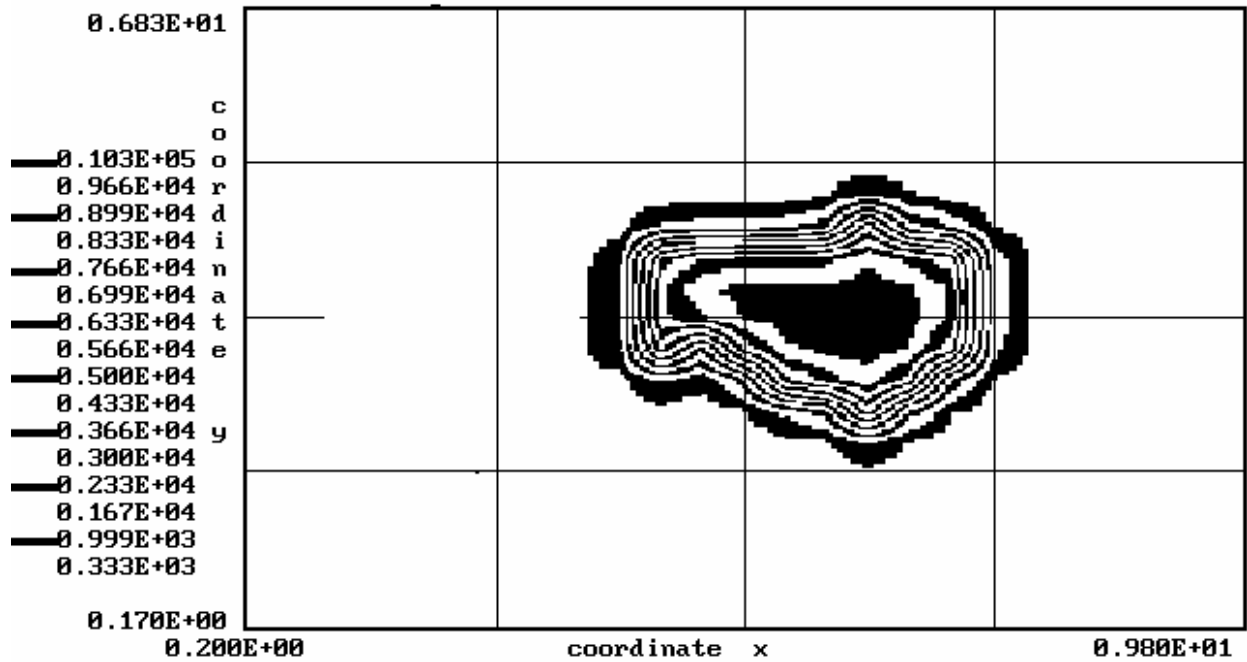


Рис. 1. Зона загрязнения помещения после аварийно выброса аммиака $t = 0$

На рис. 2, 3 показано как развивается зона загрязнения в помещении для первого варианта расчета. Хорошо видно, как зона загрязнения вытягивается в направлении нижнего выходного отверстия, расположенного на правой стене помещения. Через 15 с после начала работы аварийной вентиляции происходит значительное уменьшение зоны за-

грязнения, которая представляет собой «полоску», прижатую к полу и вытянутую в направлении выхода воздушного потока (рис. 3). На рис. 4, 5 показана динамика изменения зоны загрязнения в помещении, в сходственные моменты времени, но для второго варианта расчета, т. е. когда вытяжное отверстие расположено на полу.

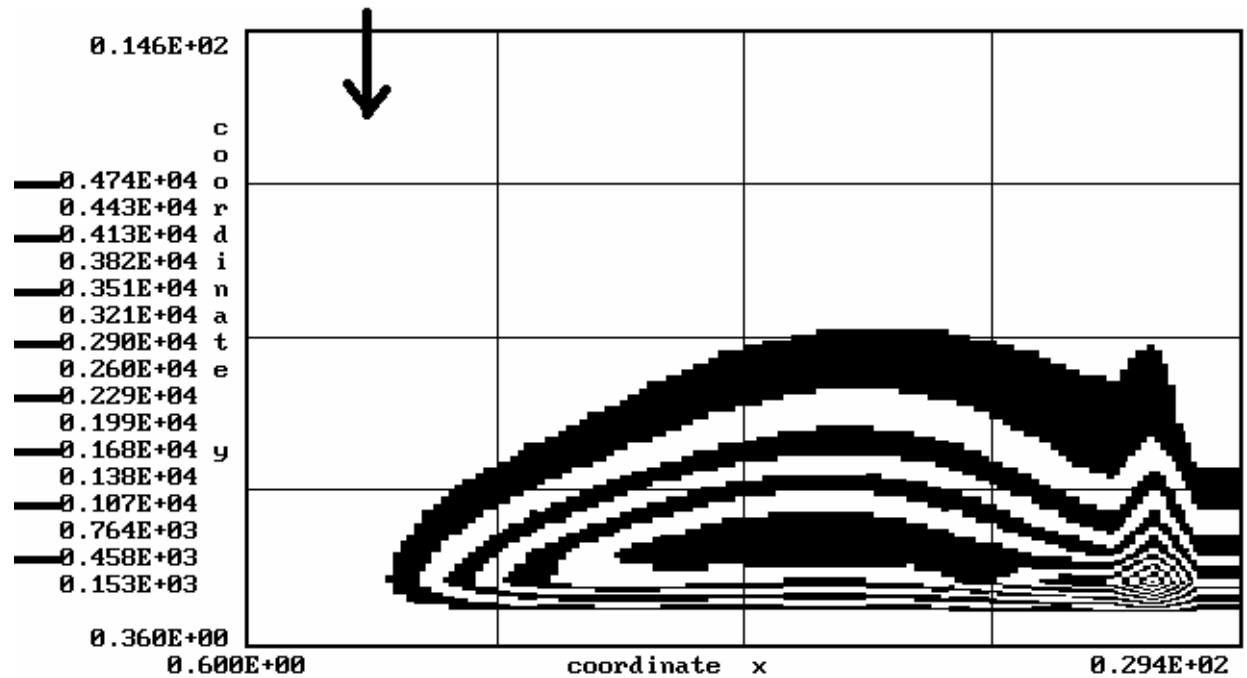


Рис. 2. Зона загрязнения помещения через $t = 5$ с после аварии (вентиляционное выходное отверстие расположено внизу правой стенки)

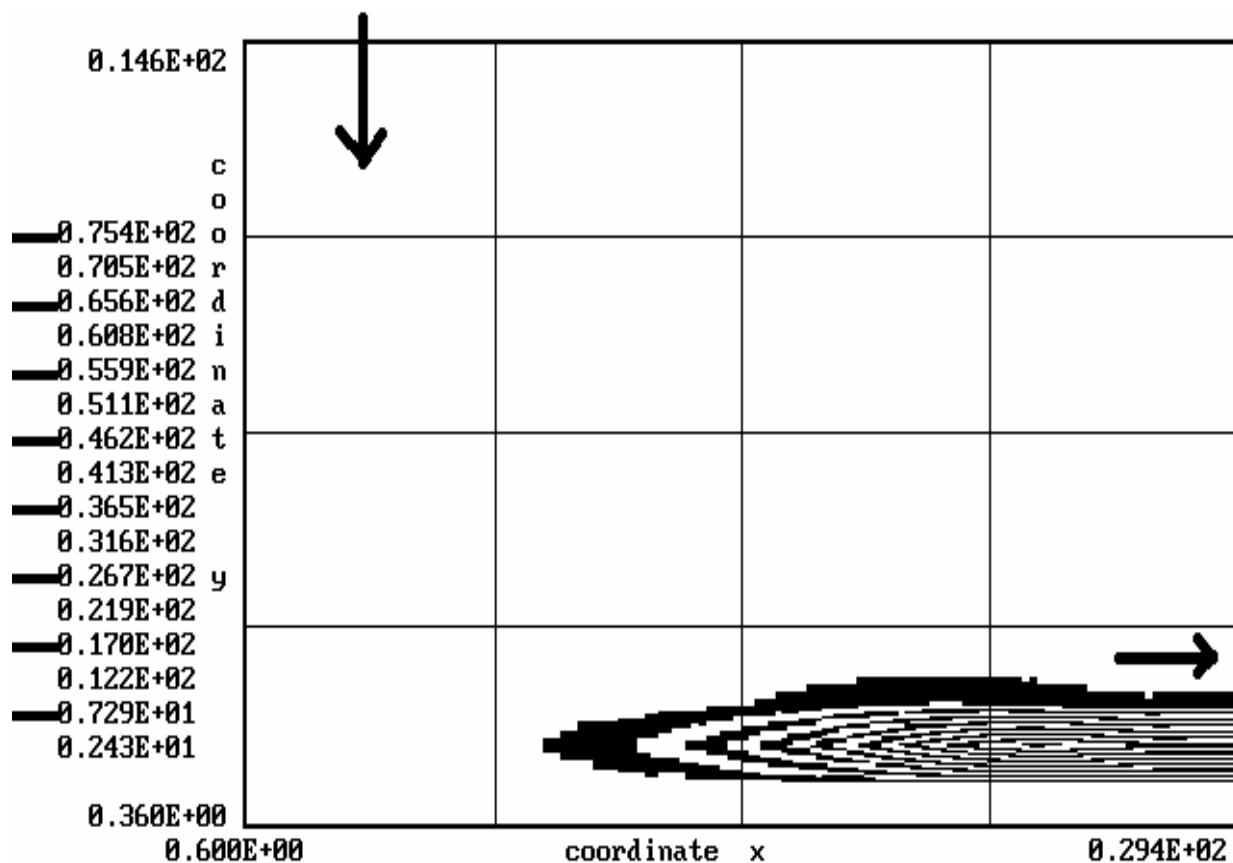


Рис. 3. Зона загрязнения помещения через $t = 15$ с после аварии (вентиляционное выходное отверстие расположено внизу правой стенки)

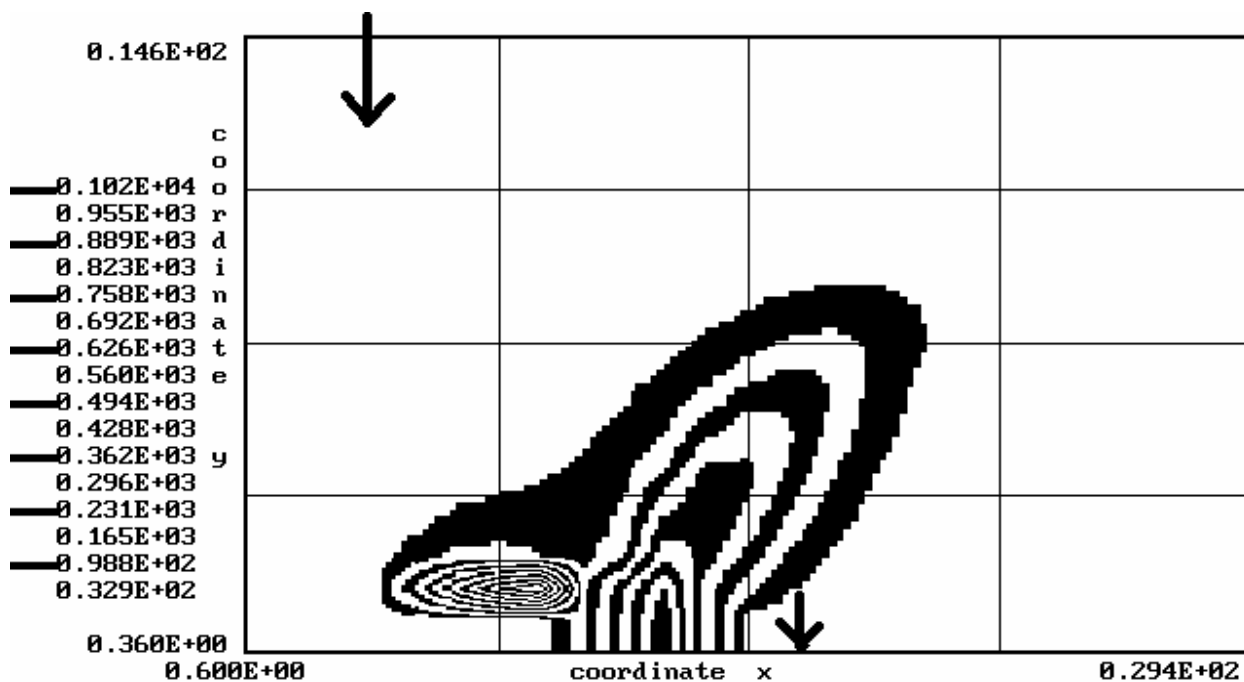


Рис. 4. Зона загрязнения помещения через $t = 5$ с после аварии (вентиляционное выходное отверстие расположено на полу помещения)

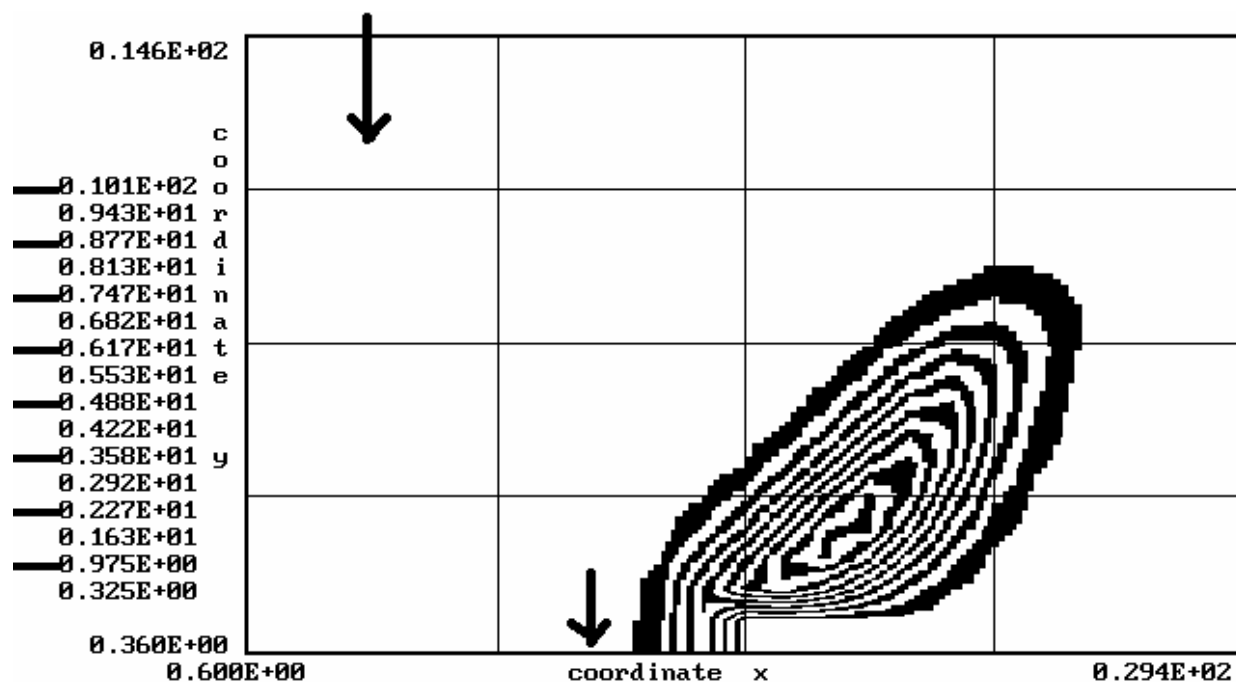


Рис. 5. Зона загрязнения помещения через $t = 15$ с после аварии (вентиляционное выходное отверстие расположено на полу помещения)

При сравнении рис. 2–5 хорошо видно, как изменение положения выходного вентиляционного отверстия привело к изменению формы и размеров образовавшейся зоны загрязнения токсичным газом. Так для второго варианта расчета форма зоны загрязнения больше напоминает эллипс, вытянутый в сторону вытяжного отверстия, а, как отмечалось выше, для первого варианта расчета форма зоны загрязнения имеет вид вытянутой «полоски». Отчетливо видно, что для второго варианта расчета размеры зоны загрязнения больше, чем для первого. Таким образом, с помощью разработанного метода появляется возможность оптимизировать процесс проветривания за счет организации такого направления движения загрязненного потока, при котором можно уменьшить развитие начальной зоны загрязнения и защитить отдельные места в помещении от загрязнения и возможного взрыва.

Выводы

В данной работе предложен эффективный метод расчета вентиляции помещения после аварийных выбросов токсичных газов. Метод основан на создании численной модели процесса вентиляции помещения. Данный метод позволяет рассматривать решение задачи вентиляции помещения в новой постановке – с учетом размеров и положения приточно-вытяжных отверстий вентиляции. Проведенный вычислительный эксперимент показал, что положение приточно-вытяжных отверстий оказывает самое существенное влияние на динамику разви-

тия зоны загрязнения при работе аварийной вентиляции.

Расчет задачи на ПК типа PENTIUM-II с помощью разработанного метода требует 2 секунды машинного времени, что позволяет проектиранту в течение одной рабочей смены выполнить расчет десятков вариантов аварийной вентиляции. Дальнейшее совершенствование предложенного метода необходимо вести в направлении создания пространственной модели переноса примеси в помещении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учебное пособие в 5-ти книгах / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. – М.: Из-во АСВ, 2001. – 200 с.
2. Демидов П. Г. Горение и свойства горючих веществ. – М.: Изд-во министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1962. – 254 с.
3. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука. – 1982. – 320 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем / 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1983. – 616с.
6. Эльтерман В. М. Вентиляция химических производств / 3-е изд., перераб. – М.: Химия. – 1980. – 288 с.

Поступила в редколлегию 15.06.2005.

ВТОРИННІ СТРУКТУРИ ПОВЕРХНІ ТЕРТЯ КОНТАКТНОГО ПРОВОДУ

Досліджено процес утворення вторинних структур на поверхнях тертя контактних проводів у процесі експлуатації. Показана можливість отримання та модифікації вторинних структур матеріалу трибосистеми «контактний провід – струмоз’ємний матеріал» за допомогою лазерних технологій. Виявлено, що в матеріалі в зоні лазерного впливу протікають окисно-відновні реакції вуглекислого газу міддю, інтенсивні дифузійні процеси вуглецю в мідню матрицю.

Исследован процесс образования вторичных структур на поверхностях трения контактных проводов в процессе эксплуатации. Показана возможность получения и модификации вторичных структур материала трибосистемы «контактный провід – токоємный материал» с помощью лазерных технологий. Обнаружено, что в материале в зоне лазерного облучения протекают окислительно-восстановительные реакции углекислого газа медью, интенсивные диффузионные процессы углерода в медную матрицу.

The process of secondary structures formation on the friction surface of contact wire in the process of operation has been explored. A possibility of obtaining and modifying secondary material structures within the system «contact wire – current collection material» by means of laser technologies has been displayed. It has been established that in the laser irradiation area of the material reductive-oxidative interactions of carbon dioxide with copper as well as intensive diffusive processes of carbon into the copper matrix occur.

Вступ

Взаємодія струмоприймача і контактної підвіски є тим процесом, від умов протікання якого залежить надійність і економічність електричної тяги на залізниці. Неправильний вибір конструктивних параметрів як контактної мережі, так і струмоприймачів, може стати причиною:

- частих відмов цих пристроїв;
- значних втрат матеріалу в контакті, що ковзає;
- погіршення роботи електрообладнання локомотивів;
- виникнення перешкод в пристроях зв’язку, розташованих в зонах залізниць;
- підвищення витрат на поточне обслуговування та ремонт.

Саме знос елементів у парі ковзання «контактний провід – струмоприймач» є однією з головних статей витрат на залізниці. Характер взаємодії цієї трибосистеми потребує всебічного дослідження і, можливо, прийняття нових наукових рішень, спрямованих на покращення її роботи.

Підвищення ресурсу і надійності спряжень пар тертя визначається їх сумісністю, під якою розуміють спроможність трибосистеми реалізувати оптимальний стан по визначених критеріях в заданому діапазоні умов роботи.

Сумісність системи виявляється як під час припрацювання, так і в подальшому етапі роботи.

Процес припрацювання контактної проводу в парі з струмоз’ємними вставками може тривати декілька років. Він супроводжується надмірним зношуванням, тобто перевищує звичайний знос, який відбувається при нормальній роботі, в декілька разів.

При терті всі фізико-хімічні процеси намагаються зосередитися в тонкому поверхневому шарі. Це є змістом принципу вторинної дисипативної гетерогенності Л. І. Бершадського [1–3].

У результаті взаємодії на поверхні тертя утворюються вторинні структури, а саме, явище їх утворення є структурною пристосованістю елементів. У процесі припрацювання трибосистем робоча поверхня контактної проводу структурно пристосовується до матеріалу струмоз’ємних вставок.

Згідно з принципом Ле-Шательє [4] трибосистема реагує на зовнішній вплив (тертя) таким чином, щоб зменшити результат цього впливу, тобто знос. Реакцією взаємодії матеріалу спряжених тіл на тертя і є утворення вторинних структур, які відіграють роль захисних функцій.

Мета та задачі досліджень

Метою даної роботи є дослідження закономірностей утворення вторинних структур контактних проводів у процесі їх експлуатації та винайдення можливостей керування цими структурами.

Для реалізації мети розв'язуються такі задачі:

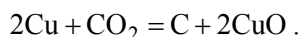
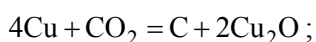
- дослідити утворення вторинних структур і їх вплив на процес припрацювання;
- показати на прикладі лазерних технологій отримання та модифікування вторинних структур робочої поверхні контактної проводу.

Вторинні структури робочої поверхні контактних проводів, сформовані в процесі припрацювання трибосистеми. Утворення сумісних елементів трибосистеми пов'язане з виникненням незворотних процесів, внаслідок чого змінюється ентропія і виникає дисипативна самоорганізація. Дослідження дисипативних вторинних структур дозволяє внести корективи в процеси припрацювання спряжених деталей.

Згідно з дослідженням, проведеним у роботі [1; 2], в процесі тертя на утворення вторинних структур витрачається більше 90 % всієї підведеної до трибосистеми енергії. Отже, в процесі тертя утворюється дисипативна зона з підвищеним рівнем внутрішньої енергії поверхневих шарів. Для процесів тертя, за умови однакової щільності поверхневої енергії системи у початковий момент, з ростом нерівномірності розподілення енергії ентропія системи повинна знижуватися. Зниження ентропії свідчить про упорядкованість системи тертя. Цей процес характеризується утворенням нових вторинних упорядкованих структур [5; 6].

Дослідження складу і процесів утворення вторинних структур робочої поверхні контактних проводів проведено в роботах [7–11]. Основну роль в утворенні неврівноважених вторинних структур і здійснення ними захисних функцій відіграє вуглець. Мова йде про вуглець, перенесений не з вставки, а той що утворюється в результаті хімічних реакцій розкладу окислів вуглецю чи відновлення їх міддю. Ці хімічні реакції мають неврівноважений характер протікання і визначаються такими параметрами стану, як градієнти температури, тиску, хімічного потенціалу, напруги та ін.

Для реакцій відновлення вуглецю міддю характерними є такі рівняннями:



Інтенсивне проходження реакцій розкладу двоокису вуглецю в трибосистемі з струмомоз'ємом досліджено в роботі [12]. Автори цієї роботи експериментально показали, що інтенсивне проходження зазначених реакцій спричиняє значне зниження інтенсивності зношування спряженої пари.

Нами досліджена мікроструктура робочої поверхні мідного контактної проводу марки МФ-100. Дослідження поверхні проводили на скануючому електронному мікроскопі «Самека», на зразках, вирізаних з нового контактної проводу та проводу після припрацювання з вугільними вставками. Особливу увагу сконцентровано на поверхневий шар, в який введений вуглець.

Результати досліджень показали, що на робочій поверхні мідного контактної проводу, що пройшов припрацювання, виявлено два структурних різновиди вуглецю. Один різновид – це ділянки плівки, яка покривала робочу поверхню контактної проводу. Вуглець у цьому випадку був «намазаний» на поверхню проводу в результаті електромеханічного процесу під час струмомоз'єму.

Другий структурний різновид вуглецю має інше походження: у цьому випадку вуглець рівномірно розподілено по поверхні мідної матриці і подано у вигляді окремих молекул або поодиноких включень.

Кількісний аналіз вуглецю розміщеного на поверхні контактної проводу подано в табл. 1.

Таблиця 1

Кількісний вміст вуглецю на робочій поверхні контактної проводу

Характер нанесення вуглецю	Новий контактний провід	Контактний провід після припрацювання
«Намазаний» на поверхню тертя, % площі поверхні проводу	–	50–80
Введений у мідну матрицю, % мас	2,3–3,7	5,5–7

Дані, наведені в табл. 1, свідчать про те, що вторинні структури контактної проводу після припрацювання мають більшу кількість введених включень вуглецю. Отже, під час експлуатації при струмомоз'ємі кількість вуглецю в мідній матриці збільшується переважно за рахунок проходження неврівноважених реакцій відновлення вуглецю з його окислів міддю.

Новий контактний провід теж містить введені частинки вуглецю, який попадає в матрицю при адсорбції вуглекислого газу на мідній поверхні.

У роботі [14] були розглянуті вторинні структури контактної проводу, що утворилися в результаті електромеханічної взаємодії з вугільними вставками. Експериментально показано, що чим більша площа робочої поверхні

проводу, яка покрита перенесеним («намазаним») вуглецем, тим більша інтенсивність зношування проводу і струмоз'ємного матеріалу. Крім цього авторами роботи виявлено, що зі зменшенням концентрації зануреного вуглецю в мідній матриці – інтенсивність зношування обох контактів збільшується. Інтенсивність зношування контактів, що ковзають, збільшується при проходженні врівноважених процесів у вторинних структурах (рекристалізація) і зменшується при проходженні неврівноважених процесів (реакція розкладу окислів вуглецю).

Зниження інтенсивності зношування при проходженні неврівноважених процесів на поверхнях тертя можна пояснити тим, що робочі поверхні потребують більших витрат енергії і відповідно до цього знижується частка енергії тертя, яка йде на руйнування поверхні.

Про можливість формування вторинних структур на робочій поверхні контактного проводу до його експлуатації

Введені частинки вуглецю на робочій поверхні нового контактного проводу треба сформувати так, щоб вони були рівномірно розподілені по поверхні тертя. Такого насичення можливо досягти, використавши концентровані потоки енергії, наприклад, лазерне випромінювання [15].

Вторинні структури на робочій поверхні контактного проводу під час експлуатації утворюються в результаті проходження реакцій відновлення вуглекислого газу міддю. Для того щоб здійснити такі реакції потрібно змінити хоча б один з параметрів неврівноваженого стану. Таким параметром може бути градієнт температур.

Якщо підвищити рівень температури рекристалізації мідного контактного проводу, яка складає (275 °С), то неврівноважені процеси відновлення вуглецю міддю почнуть відбуватися раніше процесу рекристалізації, тобто зменшиться величина механічного зносу. У цьому випадку також доцільно використати концентровані потоки енергії.

Застосування лазерних технологій відкриває можливість сформувати вторинні структури контактного проводу і відтіснити вгору температуру рекристалізації [15; 16].

Новий мідний контактний провід опромінювали на лазерній установці «Комета-2», що має безперервне випромінювання на довжині хвилі $\lambda = 10,6$ мкм.

При обробці робочої поверхні проводу варіювали такі технологічні параметри:

– потужність випромінювання P – 400...1000 Вт;

– діаметр лазерного випромінювання d – 3...8 мм;

– швидкість поздовжньої подачі зразка проводу v – 10...30 мм/с.

Для більш інтенсивного протікання процесу відновлення вуглецю міддю в зону лазерного впливу направляли потік вуглекислого газу (рис. 1) під тиском.

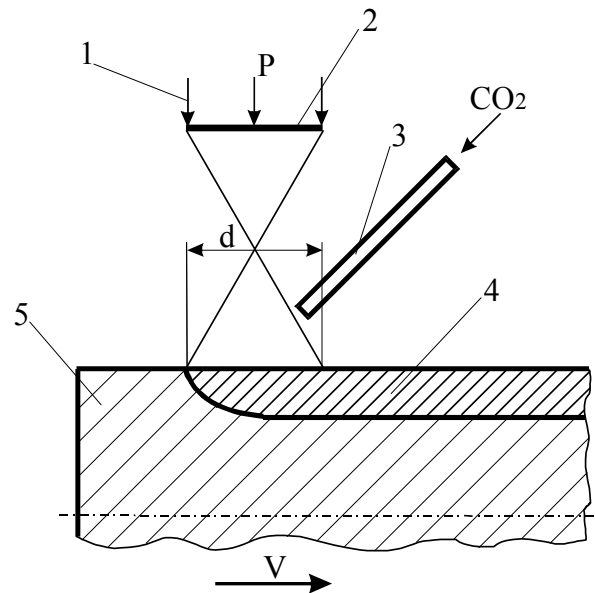


Рис. 1. Принципова схема лазерного опромінювання контактної поверхні проводу: 1 – пучок лазерного променя; 2 – фокусуюча лінза; 3 – патрубок з вуглецевим газом; 4 – сформований шар; 5 – зразок контактної поверхні проводу

Було виявлено, що інтенсивність протікання окисно-відновних реакцій суттєво залежить від технологічних параметрів лазерної обробки, а також від тиску вуглекислого газу.

Дослідження показали, що в матеріалі в зоні лазерного впливу крім окисно – відновних реакцій протікають інтенсивні дифузійні процеси вуглецю в мідну матрицю.

Характерний вигляд мікроструктури поверхні тертя зразка контактної поверхні проводу для зазначеного способу її формування наведено на рис. 2.

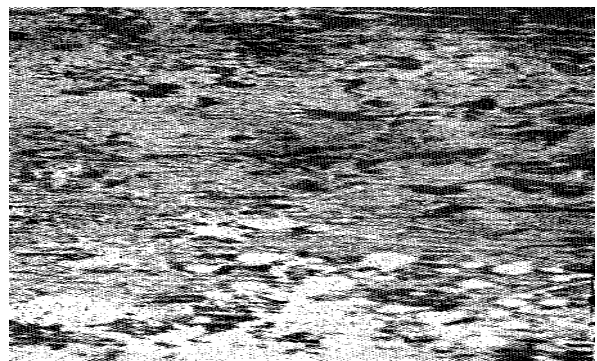


Рис. 2. Мікроструктура робочої поверхні контактної поверхні проводу після лазерної обробки ($\times 250$, тиск CO_2 – 0,1 МПа).

На рис. 2 темні острівки – це введені частки вуглецю в мідь. Ступінь охоплення площі поверхні вуглецевими острівками визначається режимами лазерного опромінення та тиском вуглекислого газу, спрямованого в зону лазерного впливу.

Порівняльні випробування на зносостійкість трибосистеми «контактний провід – вставка» на машині тертя

На лабораторній установці імітувалась робота пари тертя «контактний провід – струмоз’ємний матеріал». Кільце з мідного контактного проводу марки МФ-100 довжиною 2130 мм припаювалось до мідного диску, який може обертатися зі швидкістю 1 об/хв. Зверху, до кільця притискалися дві струмоз’ємні вставки типу «А». Для наближення до реальних умов експлуатації контактного проводу і струмоприймача вісь обертання кільця була зміщена відносно центру кільця на 21 мм. Знос проводу визначали за допомогою мікрометражу, а знос вставок – ваговим методом. В процесі випробувань досліджували залежність інтенсивності зношування мідного контактного проводу до і після лазерного опромінення та струмоз’ємних вставок типу «А» від величини струму, що знімається. Отримані дані наведені в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

Інтенсивність зношування трибосистеми без лазерного опромінення контактного проводу

Струм, А	0	20	50	95
Інтенсивність зношування струмоз’ємних вставок типу «А», мг/год	2,9	7,1	16,2	8,2
Інтенсивність зношування контактного проводу, мкм/год	0,2	0,3	0,8	0,3

Таблиця 3

Інтенсивність зношування трибосистеми після лазерного опромінення контактного проводу

Струм, А	0	20	50	95
Інтенсивність зношування струмоз’ємних вставок типу «А», мг/год	2,0	3,2	3,3	3,0
Інтенсивність зношування контактного проводу, мкм/год	0,1	0,1	0,1	0,1

Можна бачити, що інтенсивність зношування елементів трибосистеми «контактний провід – вставка» залежить від величини струму, що знімається, але після лазерного опромінення контактного проводу запропонованим способом знос струмоз’ємних вставок стає усталеним, а знос контактного проводу практично не залежить від величини струму, що знімається.

Результати випробувань на зношування свідчать про те, що в досліджуваній парі тертя відбуваються невірноважені реакції відновлення вуглецю міддю.

Висновки

Дослідження, проведені в даній роботі показали:

1. У процесі припрацювання на робочій поверхні контактного проводу утворюються вторинні структури, призначення яких захистити поверхневий шар від процесу електромеханічного зношування.

2. Інтенсивність зношування контактів, що ковзають, збільшується при проходженні врівноважених процесів у вторинних структурах і зменшується при проходженні невірноважених процесів.

3. В умовах експлуатації невірноважені процеси введення частинок вуглецю в робочу поверхню контактного проводу протікають завдяки окисно – відновних реакцій вуглецю міддю.

4. Інтенсивністю протікання окисно-відновних реакцій можна керувати, змінюючи фізико-хімічні параметри невірноваженого стану поверхневих шарів матеріалу.

5. Одним з керованим параметром невірноваженого стану матеріалу, підлеглого обробці концентрованими потоками енергії (лазерне випромінювання) є градієнт температури.

6. У результаті застосування лазерного опромінення поверхні тертя мідного контактного проводу вдалося підняти температуру рекристалізації міді до 350 °С.

7. Протікання невірноважених процесів в трибосистемі допомагає зменшити зношувальність її елементів.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бершадский – К.: Техника, 1976. – 423 с.
2. Klamecki В. Е. Energy Dissipation in Sliding // Wear 77 (1982). № 2. – Р. 115–128.
3. Бершадский Л. И. Структурная термодинамика трибосистем. – К.: «Знание», 1990. – 30 с.
4. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин – М.: Мир, 1973. – 149 с.

5. Гершман И. С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И. С. Гершман, Н. А. Буше // Трение и износ, 1995. – № 1. – т. 16. – С. 61–70.
6. Буше Н. А. Совместимость трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В. В. Копытько. – М.: Наука, 1981. – 127 с.
7. Гершман И. С. Роль углерода в самоорганизации процесса изнашивания сильноточных скользящих электрических контактов / И. С. Гершман, С. М. Трушевский, А. В. Шумицкий // Трение и износ, 2002. – № 5 – т. 23. – С. 520–523.
8. Берент В. Я. Вторичные структуры на поверхностях сильноточных скользящих контактов. 1. Строение и состав / В. Я. Берент, И. С. Гершман // Трение и износ, 1989. – № 4. – т. 10. – С. 687–692.
9. Гершман И. С. Исследование закономерностей образования вторичных структур в условиях трения с токосяемом / И. С. Гершман, Н. В. Пенский // Трение и износ. 1995. – № 1. – т. 16. – С. 126–131.
10. Гершман И. С. Исследование закономерностей образования вторичных структур в условиях трения с токосяемом / И. С. Гершман, Н. В. Пенский // Трение и износ. 1995. – № 1 – т. 16. – С. 126–131.
11. Гершман И. С. Термодинамические аспекты существования устойчивых вторичных структур на поверхностях сильноточных скользящих контактов / И. С. Гершман, Н. А. Буше, В. Я. Берент // Трение и износ. 1989. – № 2 – т. 10. – С. 225–232.
12. Гершман И. С. Неустойчивость системы с токосяемом в процессе самоорганизации / И. С. Гершман, Н. А. Буше // Трение и износ. 1999. – № 6. – т. 20. – С. 623–629.
13. Гершман И. С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И. С. Гершман, Н. А. Буше // Трение и износ. 1999. – № 1. – т. 16 – С. 61–70.
14. Гершман И. С. Токосяемные углеродные материалы нового поколения // Вестник ВНИИЖТ, 2003, № 6. – С. 70–78.
15. Аулин В. В. Электропроводность меди после лазерного воздействия / В. В. Аулин, Г. М. Ашмарин, М. Ю. Голубев // Металлы. – Изв. АН СССР, 1986. – № 5. – С. 187–195.
16. Аулин В. В. Зернограничное внутреннее трение нелегированной меди, подвергнутой непрерывному лазерному облучению / В. В. Аулин, Г. М. Ашмарин, М. Ю. Голубев // Физика и химия обработки материалов. – АН СССР, 1986. – № 5. – С. 147–151.

Надійшла до редколегії 21.05.2005.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СТУПЕНЧАТОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА НА ЭЛЕКТРОПОЕЗДАХ ЭР2Р, ЭР2Т И ЕПЛ2Т

Розглянуто перехідні процеси в силовому колі тягових двигунів і їх вплив на роботу ступеневого автоматичного пуску електропоїздів ER2R, ER2T і EPL2T. Даються рекомендації щодо підвищення надійності роботи мотор-вагонного рухомого складу.

Рассмотрены переходные процессы в силовой цепи тяговых двигателей и их влияние на работу ступенчатого автоматического пуска электропоездов ЭР2Р, ЭР2Т и ЕПЛ2Т. Даются рекомендации по повышению надежности работы мотор-вагонного подвижного состава.

The article examines transitional processes in the power circuit of tractive motors and their influence on the work of grading automatic starting of EMU trains ER2R, ER2T and EPL2T. Recommendations have been developed for increasing reliability of operations of multiple-unit rolling stock.

Расчет переходных процессов в силовой цепи тягового двигателя и их влияние на автоматический пуск ЭР2Т.

На электропоездах постоянного тока ЭР1, ЭР2, ЭР2Т, ЭР2Р, ЕПЛ2Т применяется ступенчатый автоматический реостатный пуск посредством силового контроллера КСП и под контролем контактного реле ускорения (РУ) или бесконтактного реле ускорения (БРУ) совместно с бесконтактным переключателем вентилей. В работах [1] установлено, что при замыкании контакта РУ (БРУ) при токе уставки $I = I_{p,y}$ в силовой цепи тяговых двигателей получает питание вентиль КСП и при повороте его на 14° за время $0,3 \dots 0,4$ с, замыкается силовой контактор. При этом происходит вывод ступени пускового реостата и возрастание тока в силовой цепи тяговых двигателей. За время поворота КСП, из-за значительного ускорения $0,6 \dots 0,72$ м/с², происходит приращение скорости ΔV , а следовательно, и противо ЭДС в тяговых двигателях, что и приведет к уменьшению тока в их цепи. Величина тока I_2 согласно [1] определяется по следующей формуле:

$$I_2 = \frac{I_{p,y} + K_3}{e^{\left(\frac{t_\pi m K_1}{\sigma K_2}\right)}} - K_3, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент, характеризующий линеаризацию силы тяги на данном интервале изменения тока

$$K_1 = \frac{F_{I_{p,y}} - F_{I_2}}{I_{p,y} - I_2}, \frac{H}{A}, \quad (2)$$

где $F_{I_{p,y}}$ – сила тяги одного тягового двигателя при $I = I_{p,y}$; F_{I_2} – сила тяги одного тягового двигателя при $I = I_2$; K_2 – коэффициент, характеризующий линеаризацию скорости $V_{I_{p,y}} \dots V_{I_2}$

$$K_2 = \frac{V_{I_{p,y}} - V_{I_2}}{I_{p,y} - I_2}, \frac{M}{C \cdot A}, \quad (3)$$

где $V_2 = V_{I_2}$ – скорость при токе I_2 на данной реостатной позиции $\frac{M}{C}$; $V_{I_{p,y}}$ – скорость при токе $I_{p,y}$ на данной реостатной позиции $\frac{M}{C}$.

$$\sigma = m_{np} = 10^3 Q(1 + \gamma), \quad (4)$$

где m_{np} – приведенная масса электропоезда(кг); γ – коэффициент инерции вращающихся масс 0,06; $t_{поз}$ – время поворота вала КСП на угол, при котором замкнется очередной силовой контактор и выведет часть пускового резистора (0,3...0,4 с).

$$K_3 = \frac{F_H - \frac{W}{n_{дв}}}{K_1} A, \quad (5)$$

где $n_{дв}$ – количество двигателей в электропоезде; W – общее сопротивление движения поезда при данной скорости (Н)

$$W = \omega_0 Qg, \quad (6)$$

где ω_0 – основное удельное сопротивление движения поезда (кг/Т)

$$\omega_0 = 1,1 \cdot 0,012 - V_{I_2} + 0,000267V_{I_2}^2; \quad (7)$$

Q – вес десяти вагонов поезда, равный 575 т.

Как показали расчеты при времени поворота КСП на очередную позицию на электропоездах ЭР2Т $t_{\text{поз}} = 0,4$ с, ток в силовой цепи тяговых двигателей уменьшается по сравнению с током установки реле ускорения при движении на площадке на 10...8 %. Поэтому можно принять для расчета

$$I_2 = I_0 = 0,92I_{\text{p.y}}, \quad (8)$$

где I_0 – ток начала переходного процесса.

При повороте КСП на очередную позицию и замыкании очередного контактора уменьшается сопротивление в цепи тяговых двигателей и ток в их цепи возрастает по зависимости

$$I(t) = I_{\text{y.ct}} - (I_{\text{y.ct}} - I_2)e^{-\frac{t}{T_{\text{дв}}}}, \quad (9)$$

где

$$I_{\text{y.ct}} = \frac{\left(\frac{U_{\text{kc}}}{4} - C\phi_{\text{H44}}V_2\right)}{\left(\frac{R_{\text{p}}}{4} + R_{\text{дв}} + K_{\phi} \cdot V_2\right)}, \quad (10)$$

где U_{kc} – напряжение в контактной сети 3000 В;

$$T_{\text{дв}} = \frac{L_{\text{дв}}}{\left(\frac{R_{\text{p}}}{4} + R_{\text{дв}} + K_{\phi}V_2\right)}, \quad (11)$$

где $L_{\text{дв}}$ – индуктивность тягового двигателя в Гн., $R_{\text{p}(n+1)}$ – сопротивление реостата при переходе КСП с позиции « n » на позицию « $n+1$ », Ом; V_2 – скорость при токе $I_2 + I_0$, м/с; $R_{\text{дв}}$ – сопротивление тягового двигателя, Ом; K_{ϕ} – коэффициент, характеризующий лианеризацию кривой намагничивания при изменении тока с $I_{\text{p.y}}$ до тока I_2

$$K_{\phi} = \frac{C\phi_{I_{\text{p.y}}} - C\phi_{I_2}}{I_{\text{p.y}} - I_2}, \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{М} \cdot \text{А}}. \quad (12)$$

Величина магнитного потока, в результате его лианеризации и при токе $I = 0$ определяется по формуле

$$C\phi_{\text{нач}} = C\phi_{I_{\text{p.y}}} - K_{\phi}I_{\text{p.y}}. \quad (13)$$

Для устранения проскакивания позиций силовым контроллером во время пуска необходимо, чтобы ток в силовой цепи тяговых двигателей за время совместного действия силовой

и подъемной катушек $t_{\text{сов}}$ на электропоездах ЭР1, ЭР2Т превышал ток уставки РУ на 2 %, т. е. равен $I = 1,02I_{\text{p.y}}$.

На электропоездах ЭР2Р и ЭР2Т для фиксации позиций КСП необходимо, чтобы в БРУ импульс напряжения, поступающий на общий вход тиристорного триггера поступал позже, чем разрядится конденсатор C_i на время, пока ток в силовой цепи тяговых двигателей не превысит тока уставки БРУ. В противном случае произойдет проскакивание позиций КСП, что может вызвать буксование колесных пар, а иногда и к круговому огню на коллекторах тяговых двигателей.

Произведем расчет переходных процессов в силовой цепи тяговых двигателей на электропоезде ЭР2Т при ступенчатом реостатном автоматическом пуске.

Рассмотрим переходные процессы в цепи тяговых двигателей при самых ненадежных переходах КСП с 12-й на 13-ю позицию.

Рассмотрим расчет переходных процессов в силовой цепи тяговых двигателей при переходе КСП с 12-й на 13-ю позицию.

Для тока РУ равного $I_{\text{p.y}} = 350$ А, зададимся начальным уменьшением тока I_2 (А)

$$I_2 = 0,92I_{\text{p.y}} = 0,92 \cdot 350 = 322.$$

Определим коэффициент, характеризующий лианеризацию силы тяги на данном интервале изменения тока [2]

$$K_2 = \frac{F_{I_{\text{p.y}}} - V_{I_2}}{I_{\text{p.y}} - I_2} = \frac{27132 - 24355}{350 - 322} = 99,2 \frac{\text{Н}}{\text{А}},$$

где сила тяги при полученных токах и магнитный поток равны:

$$F_{I_{\text{p.y}}} = 3,42C\phi_{I_{\text{p.y}}} I_{\text{p.y}} = 3,42 \cdot 22,7 \cdot 350 = 27132 \text{ Н},$$

$$F_{I_2} = 3,42C\phi_{I_2} I_2 = 3,42 \cdot 22,1 \cdot 322 = 24355 \text{ Н},$$

$$C\phi_{I_{\text{p.y}}} = \frac{\frac{U_{\text{kc}}}{4} - I_{\text{p.y}}R_{\text{дв}}}{V_{I_{\text{p.y}}}} = \frac{\frac{3000}{4} - 350 \cdot 0,2}{30} = 22,7 \text{ В} \cdot \text{ч/км},$$

$$C\phi_{I_2} = \frac{\frac{U_{\text{kc}}}{4} - I_2R_{\text{дв}}}{V_{I_2}} = \frac{\frac{3000}{4} - 322 \cdot 0,2}{31} = 22,1 \text{ В} \cdot \text{ч/км}.$$

Определим коэффициент, характеризующий лианеризацию от скорости равной $V_{I_{\text{p.y}}} \dots V_{I_2}$:

$$K_2 = \frac{V_{I_{\text{p.y}}} - V_{I_2}}{I_{\text{p.y}} - I_2} = \frac{8,2 - 7,9}{350 - 322} = 0,011 \frac{\text{М}}{\text{А} \cdot \text{с}},$$

где

$$V_{I_{p.y}} = \frac{\frac{U_{kc}}{4} - \left(\frac{R_{I_3}}{4} + R_{дв}\right) I_{PV}}{3,6 C \phi_{I_{p.y}}} =$$

$$= \frac{\frac{3000}{4} - \left(\frac{0,45}{4} + 0,2\right) 350}{3,6 \cdot 22,7} = 7,9 \frac{\text{М}}{\text{С}},$$

$$V_{I_2} = \frac{\frac{U_{kc}}{4} - \left(\frac{R_{I_3}}{4} + R_{дв}\right) I_2}{3,6 \cdot C \phi_{I_2}} =$$

$$= \frac{\frac{3000}{4} - \left(\frac{0,45}{4} + 0,2\right) 322}{3,6 \cdot 22,1} = 8,2 \frac{\text{М}}{\text{С}}.$$

Определим коэффициент K_3 :

$$K_3 = \frac{F_H - \frac{W}{n_{дв}}}{K_1} = \frac{-7578 - \frac{9751}{20}}{99,2} = -61,3 \text{ А},$$

где

$$F_H = F_{I_{p.y}} - K_I I_{p.y} = 27132 - 99,2 \cdot 350 = -7578 \text{ Н},$$

$$W = \omega_0 Q g = 1,673 \cdot 575 \cdot 9,81 = 9751 \text{ Н}.$$

Расчет уменьшения тока от $I = I_{p.y}$ до значения тока I_2 за время поворота силового контроллера до момента замыкания контакторного элемента.

При переходе силового контроллера с одной позиции на другую, когда замыкается следующий контакторный элемент, выводится ступень ΔR пускового реостата, ток в силовой цепи возрастает не при токе I_{\min} , а при токе I_2 до установившегося значения.

Числовое значение I_2 находим по формуле

$$I_2 = \frac{I_{p.y} + K_3}{e^{\left(\frac{t_n m K_1}{\sigma K_2}\right)}} - K_3 =$$

$$= \frac{350 + (-81,3)}{e^{\left(\frac{0,4 \cdot 20 \cdot 99,2}{6,1 \cdot 10^5 \cdot 0,011}\right)}} - (-81,3) = 319,8 \text{ А}.$$

Расчет углового коэффициента линеаризованной функции производим по формуле

$$K_\phi = \frac{C \phi_{I_{p.y}} - C \phi_{I_2}}{I_{p.y} - I_2} = \frac{22,7 - 22,1}{350 - 322} = 0,02.$$

Произведем расчет переходного процесса при переходе силового контроллера с 11-й на 12-ю позицию. Определим постоянную времени по формуле:

$$T_{дв} = \frac{L_{дв}}{\left(\frac{R_{I_3}}{4} + R_{дв} + K_\phi V_2\right)} =$$

$$= \frac{20 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{0,45}{4} + 0,2 + 0,02 \cdot 31\right)} = 0,022 \text{ с}.$$

Произведем расчет установившегося значения тока $I_{уст}$

$$I_{уст} = \frac{\frac{U_{kc}}{4} - C \phi_{H44} V_{I_2}}{\left(\frac{R_{I_3}}{4} + R_{дв} + K_\phi V_{I_2}\right)} =$$

$$= \frac{\frac{3000}{4} - 13,41 \cdot 31}{\left(\frac{0,45}{4} + 0,2 + 0,02 \cdot 31\right)} = 362,3 \text{ А}.$$

Расчет переходного процесса рассчитываем за время $t = 3\tau$ по формуле

$$I(t) = I_{уст} - (I_{уст} - I_2) e^{\frac{-t}{T}}.$$

Расчет произведем для времени равного

$$t = 0,01 \text{ с}, \quad t = 0,02 \text{ с}, \quad t = 0,05 \text{ с}:$$

$$I(0,01) = 362,3 - (362,3 - 322) e^{\frac{-0,01}{0,022}} = 345,4 \text{ А},$$

$$< 1,02 I_{p.y} = 375 \text{ А},$$

$$I(0,04) = 362,3 - (362,3 - 322) e^{\frac{-0,04}{0,022}} = 355,6 \text{ А},$$

$$I(0,05) = 362,3 - (362,3 - 322) e^{\frac{-0,05}{0,022}} = 358 \text{ А}.$$

По результатам проведенных расчетов видим, что на электропоездах серии ЭР2Т при ступенчатом автоматическом реостатном пуске наблюдается проскакивание позиций при переходе силового контроллера с 12-й на 13-ю позицию.

Рассмотрим работу бесконтактного реле ускорения (БРУ) и переходные процессы в силовой цепи тяговых двигателей для электропоезда ЭР2Т (рис.).

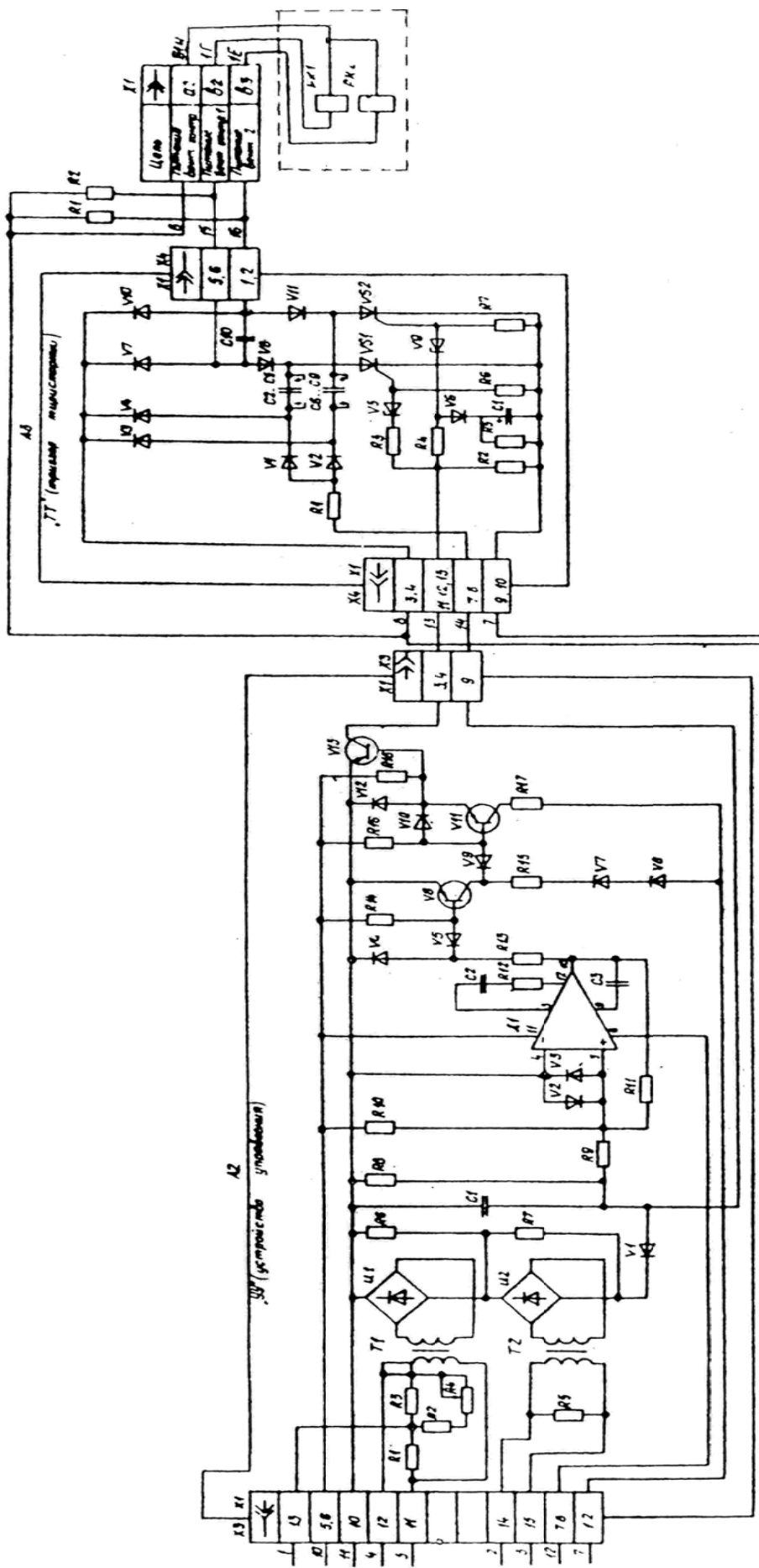


Рис. Схема бесконтактного ряда ускорения и переключения вентиляей

При применении БРУ, при значении тока в силовой цепи тяговых двигателей равный току уставки, например, $I_{p.y} = 350$ А поступает импульс напряжения на общий вход тиристорного триггера и выключается тиристор VS_1 или VS_2 в зависимости от позиций перехода РССП. При включении, например, VS_1 создается цепь обратной связи

$$\left[+20В - C_1 - R_1 - V_1 - C_2 \dots C_5 - VS_1 - (-) \right]$$

и происходит зарядка конденсатора C_1 с напряжения 16 В до напряжения 20 В.

Определим время зарядки конденсатора C_1 . Уравнение переходного процесса:

$$u_{C1}(t) = u_{C1}(t)_{yct} + u_{C1}(t)_{CBob}, \quad (14)$$

$$u_{C1}(t)_{yct} = 20 \text{ В}$$

$$u_{C1}(t)_{CBob} = Ae^{-pt}, \quad (15)$$

где

$$p = \frac{1}{T}, \quad (16)$$

$$u_c(t) = 20 + Ae^{-pt} \quad (17)$$

при $t = 0$, $u_c(t) = 16$ В, подставляя в формулу (4) получим $16 = 20 + A$, тогда $A = -4$. Тогда функция $u_c(t)$, формула, примет вид

$$u_c(t) = 20 - 4e^{-pt}. \quad (18)$$

Найдем время зарядки конденсатора по формуле:

$$T = R_1 C_{\text{экв}}, \quad (19)$$

$$\frac{1}{C_{\text{экв}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2 \dots C_5} = \frac{1}{1} + \frac{1}{5,5} = \frac{6,5}{5,5} \text{ мкФ} \quad (20)$$

$$\frac{1}{C_{\text{экв}}} = 0,846 \text{ мкФ},$$

где $C_1 = 1$, $C_2 \dots C_5 = 5,5$ мкФ, $R = 330$ Ом.

Время зарядки конденсатора и оператор «р» будут равны:

$$T = 33 \cdot 0,846 \cdot 10^{-6} = 28 \cdot 10^{-6} \text{ с},$$

$$p = \frac{1}{28 \cdot 10^{-6}} = 35714.$$

Тогда функция $u_c(t)$, формула (16), примет вид:

$$u_c(t) = 20 - 4e^{-35714t},$$

а это значит что заряд конденсатора происходит практически мгновенно и его учитывать не следует.

При этом произойдет, из-за действия обратной связи (см. рис.), снятие импульса напряжения с общего входа, и тиристор VS_2 , из-за предусмотренной задержки на его включение, не включится. При заряде конденсатора $C_2 \dots C_5$ почти мгновенно, и при наличии в его цепи диода V_1 , начнется разряд конденсатора C_1 , по следующей цепи $\left[+u_{C1} - R_8 - (-u_{C1}) \right]$ по зависимости:

$$u_c(t) = 20 - e^{-\frac{t}{T_{\text{раз}}}}, \quad (21)$$

где $T_{\text{раз}}$ – постоянная времени разряда конденсатора C_1 ;

$$T_{\text{раз}} = R_8 C_1 = 620 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,62 \text{ с}. \quad (22)$$

Время разряда конденсатора до напряжения 16 В определяется из соотношения (24):

$$u_{C1}(t) = 20e^{-1,6t} = 16 \text{ при } t = 0,14 \text{ с}. \quad (23)$$

При этом, из-за уменьшения тока в силовой цепи тяговых двигателей, напряжение с датчика тока уменьшится и напряжение на C_1 будет меньше чем 20 В.

Определим превысит ли ток в цепи тяговых двигателей ток уставки БРУ к моменту, когда конденсатор C_1 зарядится до 16 В, с тем, чтобы не поступал импульс напряжения вновь на общий вход тиристорного триггера и не получил питание тиристор VS_2 , что привело бы к проскакиванию позиций КСП.

Как показали вышеприведенные расчеты ток в силовой цепи тяговых двигателей возрастает до тока уставки БРУ от значения I_2 за время $t_{\text{перех}} \geq 0,03$ с.

Таким образом, общее время от момента начала разрешения перехода КСП, до момента времени, когда ток в силовой цепи со значения I_2 превысит ток установки БРУ I_{yct} составляет:

$$t = t_{\text{пов}} + t_{\text{перех}} = 0,4 + 0,03 = 0,45 \text{ с},$$

где $t_{\text{пов}}$ – время, за которое вал КСП повернется на угол 14° и замкнет очередной контактор,

равное 0,4 с; $t_{\text{перех}}$ – время за которое возрастет ток со значения I_2 до значения $1,02I_{\text{р.у}}$.

Так как время разряда конденсатора C_1 значительно меньше необходимого, то есть $t_{C_1\text{раз}} = 0,14 < t = 0,45$ с, то при $t = 0,14$ с, появится импульс напряжения на общий вход тиристорного триггера и произойдет проскакивание позиций КСП, что может вызвать боксование колесных пар, срабатывание защиты, а в некоторых случаях приведет к круговому огню на коллекторах тяговых двигателей.

Для того, чтобы конденсатор C_1 разрядился за время $t = 0,45$ с необходимо заменить сопротивление $R_8 = 620$ кОм на сопротивление $R_8 = 2000$ кОм.

Тогда разряд конденсатора C_1 будет происходить по следующей зависимости:

$$u_{C_1}(t) = 20e^{-\frac{t}{T}} = 20e^{-\frac{t}{25}} = 16 \text{ В}, \quad (24)$$

где

$$T = R_8 \cdot C_1 = 2000 \cdot 103 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 2,5 \text{ с}. \quad (25)$$

Из расчета следует, что время разряда конденсатора C_1 с напряжения 20 В до напряжения 16 В происходит за 0,45 с, то есть равно времени полного поворота КСП на очередную позицию.

При таком соотношении времени всегда будет обеспечена надежная фиксация всех позиций КСП под контролем БРУ и, следовательно, надежная работа системы ступенчатого автоматического пуска на электропоездах постоянного тока.

Следует заметить, что к моменту действия обратной связи конденсаторы $C_2 \dots C_5$ или $C_6 \dots C_9$ должны быть обязательно разряжены.

Определим время разряда конденсатора $C_2 \dots C_5$. Постоянная времени разряда равна:

$$T_{C_2 \dots C_5} = R_1 \cdot C_{2 \dots 5} = 750 \cdot 10^3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 0,004 \text{ с},$$

$$T_{C_6 \dots C_9} = R_4 \cdot C_{6 \dots 9} = 750 \cdot 10^3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 0,004 \text{ с}.$$

Разряд конденсатора происходит на предыдущей позиции КСП, через сопротивление R_1 .

Время разряда конденсаторов равно:

$$t = t_{C_2 \dots C_5} = t_{C_6 \dots C_9} = 5 \cdot 0,004 = 0,02 \text{ с}.$$

То есть всегда разряжены конденсаторы $C_2 \dots C_5$ и $C_6 \dots C_9$ к моменту действия обратной связи. Определим время разряда конденсатора C_{10} при подаче импульса напряжения на общий вход, когда VS_1 был открыт, а VS_2 начнет открываться.

Конденсатор C_{10} был заряжен до напряжения $U_{C_{10(0)}} = 110$, а его разряд до 0 произойдет по зависимости

$$u_{C_{10}}(t) = u_{C_{10(0)}} e^{-\frac{t}{T}} = 110e^{-\frac{t}{T}} = 0,$$

где T – постоянная времени разряда конденсатора C_{10}

$$T - R_1 C_{10} = 33 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,033 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

где $C_{10} = 1$ мкФ; $R_1 = 33$ Ом.

Время разряда конденсатора

$$C_{10} t_{\text{разр}} = 5T = 5 \cdot 0,033 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,16 \cdot 10^{-3} = 160 \text{ мкс},$$

т. е. больше 100 мкс и поэтому тиристор VS_1 будет надежно закрыт и двойное питание катушек PK_1 и PK_2 электропневматического привода Решетова будет исключено.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Висин Н. Г. Некоторые вопросы улучшения системы автоматического управления на электропоездах // Труды ДИИТа. – М.: Транспорт, 1965. – Вып. 54. – С. 72–76.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985.

Поступила в редколлегию 01.06.2005.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МОЩНОСТНОГО РЯДА ТЯГОВЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК НА ПОЛИГОНЕ ТЯГИ

Наведено методику визначення оптимального ряду потужностей тягових засобів для пасажирських перевезень при обертанні на полігоні тяги локомотивного депо або дороги поїздів декількох швидкісних категорій.

Приведена методика определения оптимального мощностного ряда тяговых средств для пассажирских перевозок при обращении на полигоне тяги локомотивного депо или дороги поездов нескольких скоростных категорий.

A method of determining optimal power range of tractive vehicles for passenger operations in case of applying several speed categories on traction area of a locomotive depot or a railroad has been developed.

Основные внешние параметры тяговых средств (сила тяги, скорость движения, мощность номинального режима) обычно определяют из условия минимизации избыточной мощности потребного парка тяговых средств и среднего количества тяговых единиц (далее кратности тяги), необходимого для формирования тяговых сцепов требуемой мощности.

Вопросы моделирования взаимосвязи показателей и параметров оптимизации в задачах тягового обеспечения грузовых железнодорожных перевозок рассмотрены в [1]. В настоящей статье эти вопросы рассматриваются применительно к пассажирскому движению, причем для определенности в качестве тяговых средств приняты электровозы.

На зоне обращения локомотивов конкретного депо или дороги в общем случае могут обращаться поезда разных скоростных категорий (пассажирские, ускоренные пассажирские, скоростные и т. д.). Рассмотрим сначала случай, когда вождение поездов каждой категории осуществляется электровозами, пусковая скорость которых соответствует скоростной категории поездов, т. е. выбрана из условия реализации заданного уровня ходовой скорости движения независимо от значения мощности номинального режима [2].

Очевидно решение задачи состоит в определении такого сочетания значений мощности номинального режима электровозов (тяговых модулей) для каждой скоростной категории, при котором требуемая мощность потребного парка электровозов y_N и кратности тяги y_k будут минимальными. Иначе говоря, решение задачи состоит в поиске таких значений номинальной мощности электровозов для вождения поездов $j = 1, m$ скоростных категорий поездов чтобы:

$$\left. \begin{array}{l} N_{n1}, N_{n2}, \dots, N_{nj}, \dots, N_{nm} \\ y_N \rightarrow \min; \quad y_k \rightarrow \min. \end{array} \right\} \quad (1)$$

Рассмотрим порядок определения показателей оптимизации y_N и y_k .

На основании полученных в [1] расчетных выражений для каждого участка и каждой скоростной категории, выбранному сочетанию значений номинальной мощности $N_{nj} (j = \overline{1, m})$ можно определить $n \times m$ значений.

$$y_{Nij}; y_{kij} \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m},$$

где y_{Nij} и y_{kij} – средние значения соответственно, избыточной мощности и кратности тяги, приходящиеся на i -м участке на один поезд или электровоз эксплуатируемого парка j -й категории.

Для определения показателей оптимизации, необходимо определить структуру распределения электровозов эксплуатируемого парка по участкам и категориям.

В отличие от грузового движения, где средняя масса поезда зависит при данных внешних параметрах тяговых средств от величины расчетного подъема, в пассажирском движении доля эксплуатируемого парка, обусловленная каждым участком, определяется числом пар поездов, участковой скоростью и рядом других факторов, влияющих на величину оборота локомотива. Например, согласно [3; 4] эксплуатируемый парк пассажирских локомотивов

$$N_3 = \frac{1}{24} \left(\frac{2L_T}{\beta_M V_X} + T_D \right) \frac{L_H}{L_T} N_{\Pi} (1 + \gamma_L), \quad (2)$$

где L_T – длина тягового плеча, км; L_H – протяженность рассматриваемого направления, км;

L_n/L_T – число тяговых плеч на рассматриваемом направлении; T_d – время простоя локомотива в пунктах оборота и при остановках на отдельных пунктах, приходящееся на один оборот локомотива, ч; суточные размеры движения пассажирских поездов в одном направлении, поездов

$$N_{\Pi} = \frac{Ak_{\Pi}^n q_{\text{бр}}}{a_0 Q_{\text{бр}}},$$

где A – суточный пассажиропоток в одном направлении; k_{Π}^n – коэффициент месячной неравномерности пассажиров; $q_{\text{бр}}$ – масса брутто вагона; a_0 – средняя вместимость вагона; γ_d – коэффициент, учитывающий долю нерабочего парка локомотивов, $\gamma_d = 0,10 \div 0,16$. $\beta_M = V_M/V_X$ – коэффициент маршрутной скорости, равный отношению маршрутной скорости V_M к среднеходовой V_X на всем направлении.

Из приведенного выражения следует, что число электровозов эксплуатируемого парка на каждом участке будет включать разновидности, определяемые скоростной категорией поездов, а численность каждой разновидности будет определяться факторами, фигурирующими в выражении (2) для определения N_3 .

Введем следующие обозначения: N_{ij} – количество электровозов j -й скоростной категории на i -м участке; эксплуатируемый парк, необходимый для организации движения поездов всех категорий в пределах данной зоны обращения

$$N_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{ij},$$

где количество электровозов j -й категории для всей зоны

$$N_j = \sum_{i=1}^n N_{ij};$$

количество электровозов всех категорий для i -го участка.

$$N_i = \sum_{j=1}^m N_{ij}.$$

Нетрудно видеть, что имеют место равенства:

$$N_3 = \sum_{j=1}^m N_j \quad N_3 = \sum_{i=1}^n N_i \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Доли электровозов N_{ij} , N_i и N_j в парке эксплуатируемых на зоне обращения локомотивов обозначим следующим образом:

- доля электровозов j -й категории на i -м участке в эксплуатируемом парке

$$\alpha_{ij} = \frac{N_{ij}}{N};$$

- доля электровозов j -й категории на i -м участке в парке данной категории на зоне

$$\beta'_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_j} \quad j = \overline{1, m}; \quad i = \overline{1, n};$$

- доля электровозов j -й категории на i -м участке в парке локомотивов всех категорий на данном участке

$$\beta''_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_j} \quad j = \overline{1, m}; \quad i = \overline{1, n};$$

- доля электровозов j -й категории в эксплуатируемом парке всей зоны

$$\gamma'_j = \frac{N_j}{N_3};$$

- доля электровозов i -го участка (всех категорий) в эксплуатируемом парке зоны

$$\gamma''_i = \frac{N_i}{N_3}.$$

Нетрудно убедиться в справедливости соотношений:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} = 1;$$

$$\sum_{i=1}^n \beta'_{ij} = 1 \quad \text{при любом } j = \overline{1, m}$$

$$\sum_{i=1}^n \beta''_{ij} = 1 \quad \text{при любом } j = \overline{1, n}.$$

Взаимосвязь величины α со значениями β и γ , относящимися к данной скоростной категории можно представить как:

$$\alpha_{ij} = \beta'_{ij} \frac{N_j}{N} \quad \text{и} \quad \beta'_{ij} = \alpha_{ij} \frac{N}{N_j};$$

$$\beta'_{ij} = \gamma'_{ij} \frac{N_j N}{N^2} \quad \text{и} \quad \gamma'_{ij} = \beta'_{ij} \frac{N_j^2}{N_j N}$$

(одинаковы для всех значений i);

$$\alpha_{ij} = \gamma'_j \frac{N_{ij}}{N_j} \text{ или } \gamma'_j = \alpha_{ij} \frac{N_j}{N_{ij}}$$

(одинаковы для всех значений i).

Нетрудно показать, что все приведенные соотношения равнозначны выражению

$$\alpha_{ij} = \gamma'_j \beta'_{ij}. \quad (4)$$

Средневзвешенное значение показателей оптимизации для каждой категории на всей зоне определяется как:

$$y'_{Nj} = \sum_{i=1}^n \beta'_{ij} y_{Nij} \text{ или } y'_{Nj} = \frac{N}{N} \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{Nij}; \quad (5)$$

$$y'_{kj} = \sum_{i=1}^n \beta'_{ij} y_{kij} \text{ или } y'_{kj} = \frac{N}{N} \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{kij}. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) можно записать также в виде

$$y'_{Nj} = \frac{1}{\gamma'_j} \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{Nij} \quad y'_{kj} = \frac{1}{\gamma'_j} \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{kij}.$$

Выполнив необходимые вычислительные процедуры, с помощью приведенных выше выражений найдем значения показателей y'_{Nj} и y'_{kj} :

$$y'_{N1}, y'_{N2}, y'_{N3}, \dots, y'_{Nj}, \dots, y'_{Nm};$$

$$y'_{k1}, y'_{k2}, y'_{k3}, \dots, y'_{kj}, \dots, y'_{km};$$

соответствующих избыточной мощности и кратности тяги, обусловленных j -й скоростной категорией поездов.

Среднее значение избыточной мощности и кратности тяги определяется как:

$$y_N = \sum_{j=1}^m y'_{Nj} y'_j \quad y_k = \sum_{j=1}^m y'_{kj} y'_j. \quad (5)$$

С учетом (4)–(6) из выражения (7) получаем очевидное:

$$y_N = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{Nij} \quad y_k = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \alpha_{ij} y_{kij}. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) видно, что значения показателей оптимизации для отдельных скоростных категорий являются величинами независимыми, поэтому задача (1) распадается на m отдельных задач по определению оптимальной номинальной мощности электровозов для каждой скоростной категории поездов. Т. е. для решения задачи следует для каждого $j = \overline{1, m}$ найти такое значение N_{ij} , чтобы $y_{Nj} \rightarrow \min$ и $y_{kj} \rightarrow \min$.

При решении ряда задач представляется необходимым анализ распределения составляющих показателей оптимизации по отдельным участкам зоны обращения. В этом случае величины α_{ij} , β''_{ij} , γ''_i связаны следующими выражениями:

$$\alpha_{ij} = \beta''_{ij} \frac{N_{ij}}{N}, \text{ и } \beta''_{ij} = \alpha_{ij} \frac{N}{N_{ij}}; \quad (7)$$

$$\beta''_{ij} = \gamma''_i \frac{N_{ij}}{N_i^2} N,$$

$$\text{и } \gamma''_i = \beta''_{ij} \frac{N_i^2}{N_{ij} N} \text{ (при любом } j); \quad (8)$$

$$a_{ij} = \gamma''_i \frac{N_{ij}}{N_i}$$

$$\text{и } \gamma''_i = a_{ij} \frac{N_i}{N_{ij}} \text{ (при любом } j). \quad (9)$$

Анализируя полученные выражения, приходим к выводу, что все они представляют одно и то же соотношение

$$a_{ij} = \gamma''_i \beta''_{ij}. \quad (10)$$

С учетом приведенных выражений для средних значений показателей на i -м участке получаем:

$$y''_{Ni} = \sum_{j=1}^m \beta''_{ij} y_{Nij} \quad y''_{ki} = \sum_{j=1}^m \beta''_{ij} y_{kij}$$

или

$$y''_{Ni} = \frac{N}{N_i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} y_{Nij} \quad y''_{ki} = \frac{N}{N_i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} y_{kij},$$

или

$$y''_{Ni} = \frac{1}{\gamma''_i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} y_{Nij} \quad y''_{ki} = \frac{1}{\gamma''_i} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} y_{kij}.$$

С помощью приведенных выше формул можно найти значения показателей y''_{Ni} и y''_{ki} :

$$y''_{N1}, y''_{N2}, y''_{N3}, \dots, y''_{Nn};$$

$$y''_{k1}, y''_{k2}, y''_{k3}, \dots, y''_{kn},$$

представляющих избыточную мощность и кратность тяги для каждого участка зоны обращения ($i = \overline{1, n}$), обусловленные всеми категориями $j = \overline{1, m}$ обращающихся на участке поездов.

Среднее значение избыточной мощности и кратности тяги:

$$y_N = \sum_{i=1}^n y_{Ni} \gamma_i'' \quad y_k = \sum_{i=1}^n y_{ki} \gamma_i'' . \quad (11)$$

Воспользовавшись выражениями (12) и (9)–(11), можно убедиться в том, что выражения (13), как и должно быть, равнозначны выражениям (7) и (8).

В заключение отметим, что если для вождения всех скоростных категорий поездов требуются электровозы или тяговые модули одного типа, то показатели оптимизации можно определить по зависимостям, приведенным в [1]. Особенности определения закона распределения вероятности потребной мощности номинального режима для такого случая изложены в [5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гетьман Г. К. Определение рационального мощностного ряда грузовых электровозов для железных дорог Украины // Залізничний транспорт України. – 2002. – № 6. – С. 29–34.
2. Гетьман Г. К. Моделирование характеристик пассажирского электроподвижного состава / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль // Сб. науч. тр. Национальной горной академии Украины. – 2002. – Т. 3, № 15. – С. 118–125
3. Кочнев Ф. П. Вес и скорость пассажирских поездов. – М.: Транспорт, 1965. – 276 с.;
4. Кочнев Ф. П. Управление эксплуатационной работой железных дорог: Учеб. пособие для вузов / Ф. П. Кочнев, И. Б. Сотников. – М.: Транспорт, 1990. – 424 с.
5. Гетьман Г. К. Определение оптимального мощностного ряда пассажирских электровозов / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль // Залізничний транспорт України. – 2005.

Поступила в редколлегию 25.05.2005.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГРУЗОВОГО ПАРКА ЭЛЕКТРОВЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ВЛ80^T И ВЛ80^C НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ УКРАИНЫ

Коротко викладається зміст технічного проекту на модернізацію електровозів ВЛ80^T і ВЛ80^C на плавне тиристорне регулювання напруги на тягових двигунах з єдиною системою автоматичного керування.

Кратко излагается содержание технического проекта на модернизацию электровозов ВЛ80^T и ВЛ80^C на плавное тиристорное регулирование напряжения на тяговых двигателях с единой системой автоматического управления.

The article provides brief description of a technical project for reequipping the electric locomotives VL80T and VL80S with smooth thyristor adjusters of tractive motors with the single automatic control system.

На електрифікованих залізничних дорогах України експлуатується більше трістот п'ятидесяти вантажних електровозів змінного струму серій ВЛ80^T і ВЛ80^C. Всі ці електровози зі ступінчастим контактним регулюванням напруги на тягових двигачах морально і технічно застаріли і на 60...70 % вичерпали свій ресурс.

Пора обновить грузовой парк электровозами с бесконтактным плавным регулированием напряжения на тяговых двигателях в режимах тяги и реостатного торможения с единой системой автоматического регулирования.

Кафедра ЭПС ДИИТа разработала технический проект на модернизацию электровозов ВЛ80^T и ВЛ80^C, согласно которому в силовой

схеме потребуется произвести относительно простые пересоединения для осуществления четырехзонного плавного регулирования напряжения на тяговых двигателях без изменения конструкции трансформатора, в цепи управления установить блок автоматического управления и блок управления полупроводниковым тиристорным преобразователем.

1. Модернизированная принципиальная схема электровозов ВЛ80^T и ВЛ80^C

На рис. 1 представлена модернизированная принципиальная схема электровозов ВЛ80^T и ВЛ80^C.

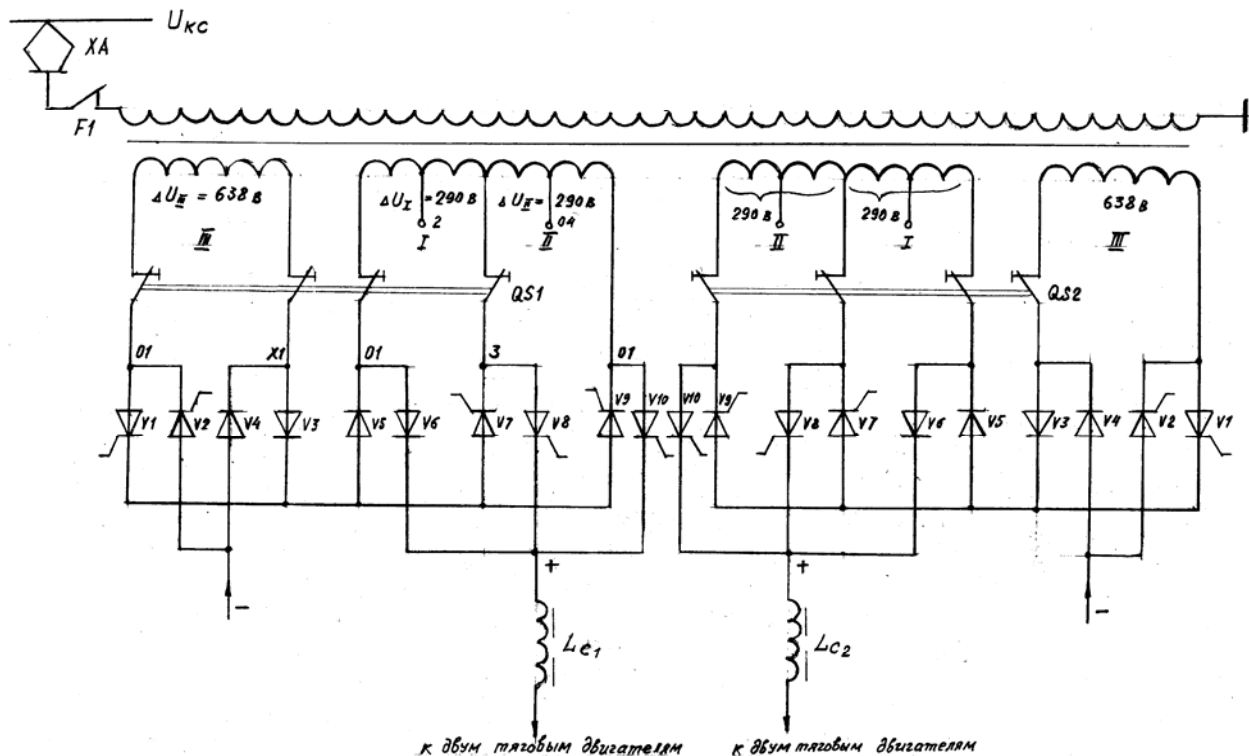


Рис. 1. Принципиальная модернизированная силовая схема электровозов ВЛ80^T и ВЛ80^C

При этом производятся следующие пересоединения во вторичной обмотке трансформатора:

1. Выводы вторичной обмотки трансформатора 2, 4, 8, 6 – не используются, т. е. остаются свободными и изолируются.

2. Произвести соединения выводов x_1 с 1 и x_2 с 5. Выводы трансформатора 02, 7, 5, a_2 соединить с тиристорной управляемой выпрямительной установкой для осуществления плавного регулирования напряжения U_d на тяговых двигателях 3 и 4. Аналогично выводы трансформатора 01, 3, 1, a_1 соединить с другой управляемой выпрямительной установкой согласно рис. 1 для осуществления плавного регулирования напряжения на тяговых двигателях 1 и 2. Плавное регулирование напряжения на тяговых двигателях производится аналогично схеме регулирования на электровозах ВЛ85, правда при более простом алгоритме управления тиристорами.

Несмотря на то, что на третьей секции вторичной обмотки трансформатора напряжение больше суммы двух других на 58 В, это не будет иметь существенного значения во время перехода на «равновеликую» по напряжению третью секцию,

так как при наличии системы автоматического управления ток в двигателях будет поддерживаться не изменяемым, т. е. таким, который был задан машинистом на контроллере машиниста.

Рассмотрим принцип плавного регулирования напряжения на тяговых двигателях от преобразователя по схеме (см. рис. 1).

Вначале плавное регулирование напряжения осуществляется от первой секции вторичной обмотки трансформатора. Предположим, что э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора (рис. 2) направлена и действует слева направо и при $\omega t = \beta_1$ открывается тиристор v_8 , тогда напряжение поступает на тяговые двигатели от части полусинусоиды. Ток протекает по цепи тяговых двигателей и на их индуктивностях происходит накопление электромагнитной энергии. Во второй полупериод, когда $\omega t < \pi + \beta_1$ тиристор v_7 закрыт и напряжение на тяговые двигатели не поступает. Однако ток в цепи двигателей поддерживается за счет накопленной электромагнитной энергии на индуктивностях тяговых двигателей и протекает через диоды IV, III, V, VI. При этом ток в цепи тяговых двигателей несколько уменьшается за счет потери энергии на сопротивлениях и на диодах.

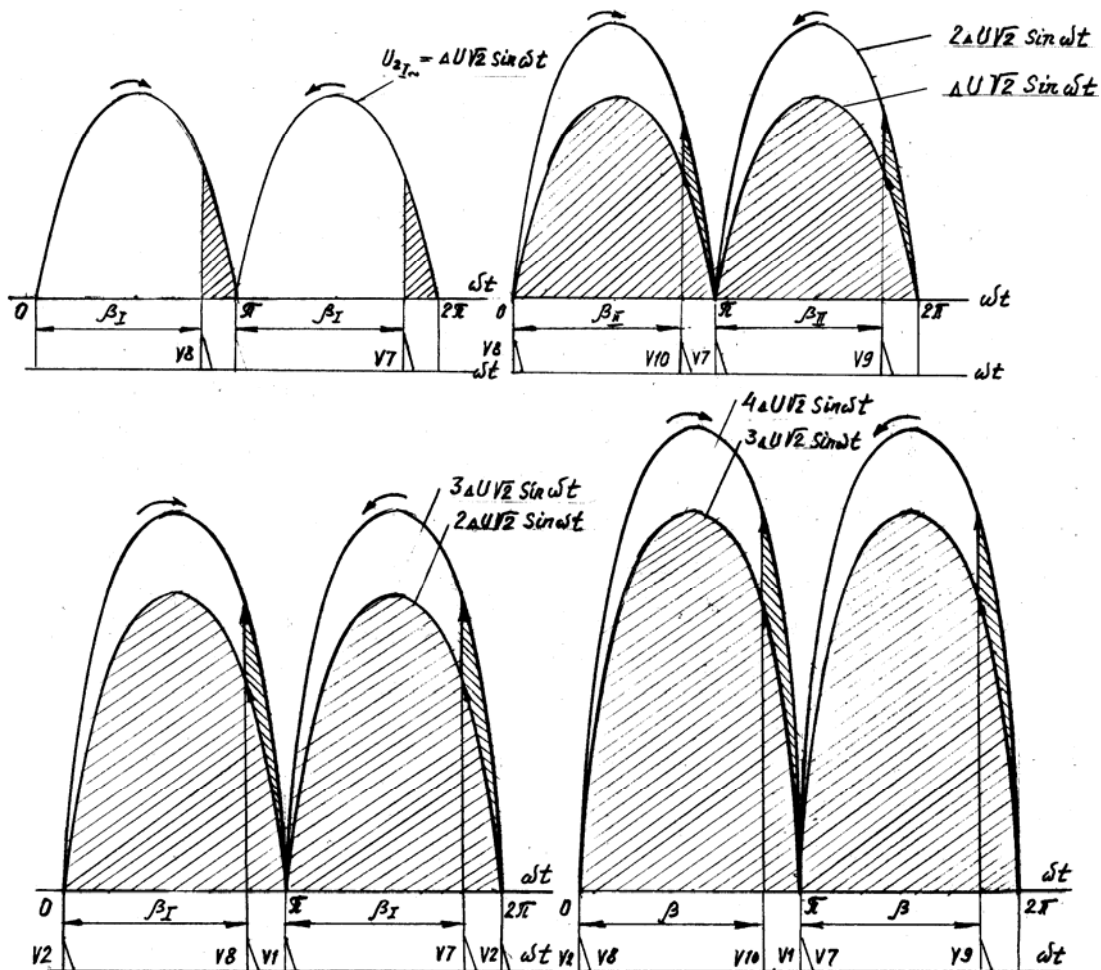


Рис. 2. Диаграммы напряжений и углы открытия тиристоров

При $\omega t = \pi + \beta_1$ открывается тиристор $v7$ и напряжение от первой секции вторичной обмотки трансформатора скачком увеличивается и поступает в цепь тяговых двигателей. При этом ток в цепи тяговых двигателей увеличивается и вновь дополнительно происходит накопление электромагнитной энергии на их индуктивностях. При $\omega t > 2\pi$ изменяется направление напряжения во вторичной обмотке трансформатора, но тиристор $v8$ закрыт. Поэтому напряжение на тяговые двигатели не поступает, но ток поддерживается за счет накопленной электромагнитной энергии на индуктивностях и проходит через диоды IV, III, V, VI, сглаживающий реактор, тяговые двигатели. При $\omega t = 2\pi + \beta_1$ вновь открывается тиристор $v8$ и далее процесс повторяется.

Для повышения напряжения на тяговых двигателях по мере увеличения скорости движения, чтобы поддерживать во время пуска неизменным пусковой ток, автоматика плавно увеличивает угол регулирования β_1 $180 \dots 0^\circ$ и, следовательно, среднее напряжение на тяговых двигателях увеличивается $0 \dots 0,9\Delta U_1$, где ΔU_1 – действующее напряжение первой секции вторичной обмотки трансформатора. При $\omega t = \beta_1 = 0^\circ$ тиристоры VII и VIII работают как диоды, так как постоянно открываются в начале каждого полупериода. Для дальнейшего повышения напряжения на тяговых двигателях вступает в работу вторая секция II вторичной обмотки трансформатора (рис.2, б).

При $\omega t = 0^\circ$ открыт тиристор $v8$ и напряжение на тяговые двигатели поступает от первой секции вторичной обмотки трансформатора, а при $\omega t = \beta_{II}$ открывается тиристор $v10$ и к напряжению первой секции прибавляется часть

напряжения от второй секции вторичной обмотки трансформатора. Поэтому среднее напряжение на тяговых двигателях увеличивается. Аналогично во второй полупериод при $\omega t = \pi + \beta_{II}$ открывается тиристор $v9$ и к напряжению первой секции прибавляется напряжение от части полусинусоиды второй секции трансформатора. Изменяя угол регулирования β_{II} от 180° до 0° , напряжение на тяговых двигателях увеличивается $0,9 \dots 2 \cdot 0,9\Delta U$. При $\omega t = \beta_{II} = 0^\circ$ тиристоры $v10$ и $v9$ работают как диоды. Для дальнейшего повышения напряжения (см. рис. 2, в) автоматически происходит переход с напряжения двух секций вторичной обмотки трансформатора на третью, почти равновеликую по напряжению секцию, посредством постепенного закрытия тиристоров $v10$ и $v9$ и постепенного открытия тиристоров $v1$ и $v2$ под контролем тока. При $\beta_{III} = 0^\circ$ тиристоры $v1$ и $v2$ работают как диоды (соответственно в разные полупериоды).

Затем к напряжению III секции вторичной обмотки трансформатора постепенно будет прибавляться напряжение первой секции путем уменьшения угла регулирования β_1 $180 \dots 0^\circ$ и среднее напряжение на тяговых двигателях увеличится $2 \cdot 0,9 \dots 3 \cdot 0,9\Delta U$.

Аналогично происходит увеличение напряжения при регулировании напряжения второй секции вторичной обмотки трансформатора посредством изменения угла регулирования β_{II} $180 \dots 0^\circ$ (см. рис. 2, з) и напряжение на тяговых двигателях постепенно увеличится $3 \cdot 0,9 \dots 4 \cdot 0,9\Delta U$.

На рис. 3 показаны диаграммы выходных напряжений на тяговых двигателях по зонам регулирования и их скоростные характеристики.

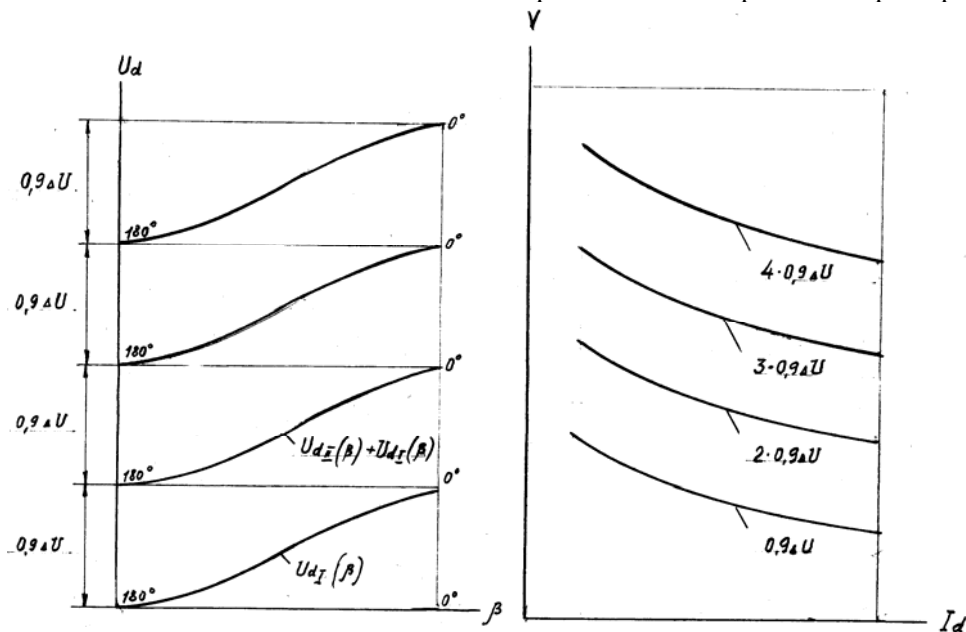


Рис. 3. Диаграммы выходных напряжений по зонам регулирования и скоростные характеристики

Полная модернизированная схема силовой цепи тяговых двигателей электровозов ВЛ80^T и ВЛ80^C представлена на рис. 4.

2. Система автоматического управления (САУ) в режиме тяги на электровозах ВЛ80^T и ВЛ80^C

На рис. 5 представлена функциональная схема САУ в режиме тяги.

Функциональная схема САУ в режиме тяги представляет собой два замкнутых контура регулирования, а именно: контур регулирования тока якоря (внутренний) и контур регулирования скорости движения (внешний); а также включает в себя токовую защиту путем снятия импульсов управления управляемого выпрямителя.

Оба контура регулирования состоят: из задающего (задатчика тока якоря ЗТ – сельсин и задатчик скорости ЗС – другой сельсин) контроллера машиниста КМ; блока автоматического управления БАУ (элемент «ИЛИ – min»), регулятор скорости РС, блок выделения минимальной скорости БДС, задатчик интенсивности ЗИ, ограничитель максимального тока «Огр. $I_{я}$ », регулятора тока якоря РТЯ, согласующий элемент СЭ, блоки выделения избыточного скольжения БВС и защиты от боксования БЗ; блока управления БУУВ; управляемого выпрямителя УВ; тягового трансформатора Т, тягового электродвигателя ТД; звеньев обратной связи – датчика тока ДТЯ и датчика скорости ТГС совместно с блоками измерений БИ-1 и БИ-2. Токсовая защита состоит из блоков токовой защиты БТЗ и промежуточных реле БПР.

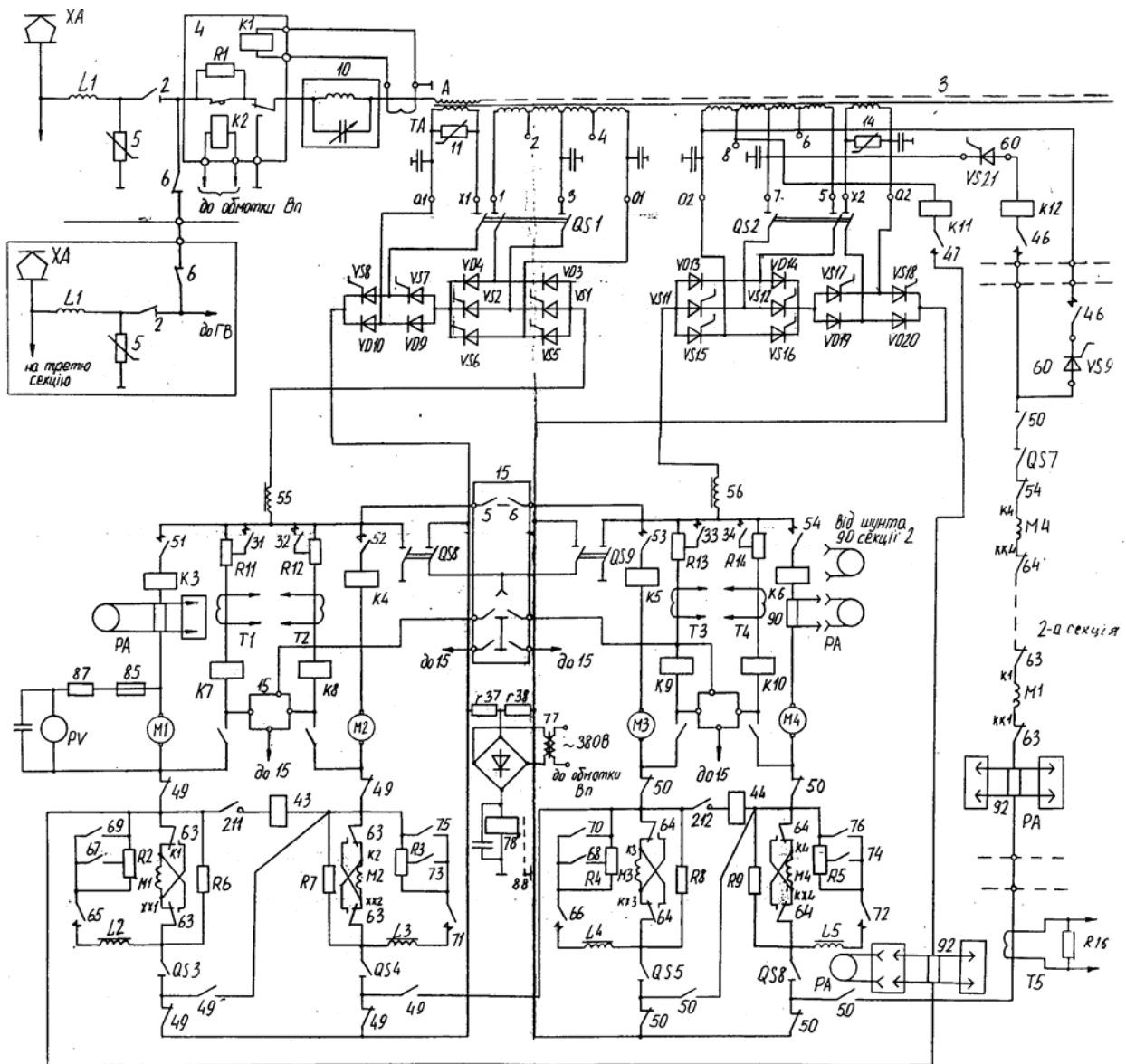


Рис. 4. Силовая схема модернизированного электровоза ВЛ80^T (ВЛ80^C)

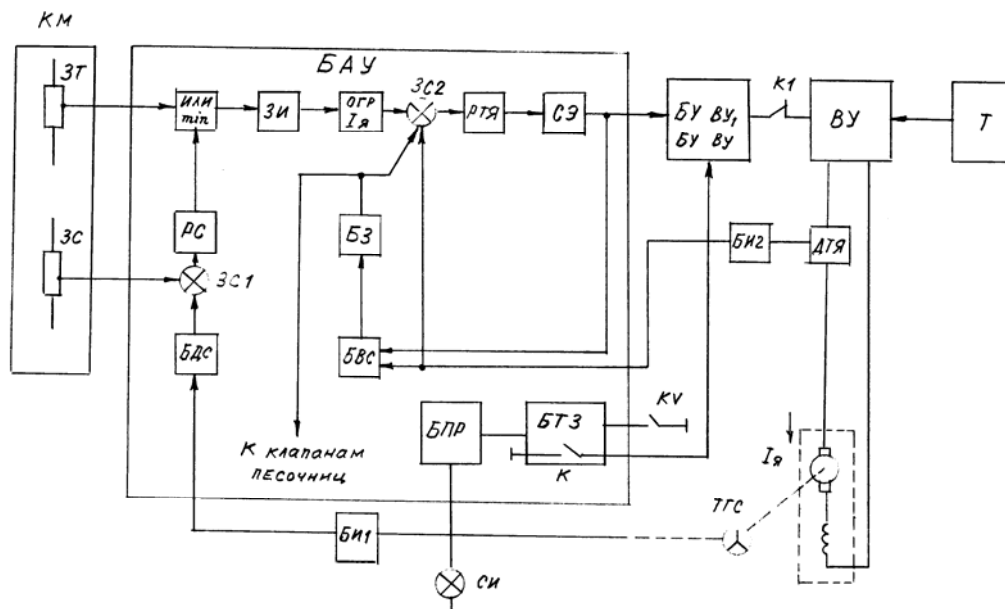


Рис. 5. Функциональная схема САУ в режиме тяги на ВЛ80^Т и ВЛ80^С

Контур регулирования тока якоря тяговых электродвигателей работает по принципу стабилизации тока; точнее незначительное уменьшение тока при увеличении скорости движения. При пуске постоянное напряжение 0...50 В с контроллера машиниста КМ поступает в качестве заданных значений тока якоря и скорости движения в блок БАУ.

Напряжения пропорциональны соответственно току якоря 0... I_{\max} и скорости движения 0...110 км/ч.

Задание тока якоря в блоке БАУ поступает на один из входов элемента «ИЛИ-min», на другой вход подается сигнал с выхода регулятора РС, который выполняет функции автоматического задатчика тока якоря для контура тока. На вход элемента «ИЛИ-min» будет проходить наименьшее значение из этих двух сигналов, которое поступает на вход задатчика интенсивности ЗИ. Задатчик интенсивности преобразует входной сигнал с элемента «ИЛИ-min» в линейно-зависимый от времени выходной, т. е. обеспечивает плавное нарастание (с заданной интенсивностью) тока якорей тяговых электродвигателей до заданной величины. Напряжение, пропорциональное заданному значению тока якорей тяговых двигателей, с задатчика интенсивности ЗИ поступает на вход ограничителя тока якорей, который ограничивает ток на уровне I_{\max} . Задание тока якоря с выхода ограничителя поступает на элемент сравнения ЭС2, где сравнивается с сигналом, соответствующим значению максимального тока, поступающим с блока измерений БИ-2.

Блоки измерений БИ-2 совместно с датчиками тока ДТЯ формируют напряжения, про-

порциональные токам якорей тяговых электродвигателей и выделяют напряжение, пропорциональное току наиболее загруженного тягового электродвигателя.

Таким образом, поддержание заданного значения тока якоря ведется по наиболее загруженному тяговому электродвигателю.

Сигнал рассогласования между заданным и фактическим значениями тока с выхода ЭС-2 поступает на регулятор тока якоря РТЯ, выходной сигнал которого является управляющим и через согласующий элемент СЭ поступает к БУУВ.

Согласующий элемент СЭ предназначен для согласования уровней выходного сигнала БАУ и уровней входного сигнала БУУВ по каналу управления УВ (а ВУВ в режиме реостатного торможения). Выходное напряжение БАУ изменяется в пределах от 0 до 50 В по каналу УВ (и от 0 до 10 В по каналу ВУВ).

Блок БУУВ предназначен для управления УВ, обеспечивая при этом плавное зонное регулирование напряжения на тяговых электродвигателях в режиме тяги, а также для управления выпрямительной установкой возбуждения в режиме реостатного торможения.

При спуске, когда заданное значение скорости выше, чем фактическое, на выход элемента «ИЛИ-min» будет проходить сигнал заданного значения тока якорей. При этом регулятор РТЯ будет поддерживать ток якорей тяговых электродвигателей на заданном уровне, т.е. обеспечивает разгон электровоза с заданным значением токов якорей тяговых электродвигателей до заданной скорости.

В контуре регулирования скорости на регулятор скорости РС поступает сигнал с элемента

сравнения ЭС1, на котором сравниваются заданное значение скорости, поступающее с датчика скорости ЗС, и реальное значение скорости, поступающее с датчиков скорости ТГС через блоки измерений БИ-1 к блоку датчиков скорости БДС.

В качестве датчиков скорости используются трехфазные синхронные тахогенераторы ТГС, которые установлены на каждой тележке электровоза. Блок измерения БИ-1 предназначен для выпрямления напряжения, поступающего с датчиков скорости. Выпрямленное напряжение, пропорциональное частоте вращения колесных пар, поступает в БАУ на блок датчиков скорости БДС.

Блок БДС предназначен для сглаживания выпрямленного напряжения, поступающего с БИ-1, и выделения напряжения, соответствующего минимальной в режиме тяги и максимальной в режиме реостатного торможения частоте вращения колесных пар.

Таким образом, в режиме тяги поддержание заданного значения скорости движения ведется по минимальному фактическому значению частоты вращения колесных пар, так как частота вращения колесной пары, у которой произошел срыв сцепления, будет выше, чем у нормально сцепленной колесной пары.

Регулятор РС по рассогласованию заданного и фактического значений скорости вырабатывает сигнал, пропорциональный заданному значению тока якоря, для поддержания скорости движения состава в соответствии с заданным значением.

При разгоне, когда фактическое значение скорости будет приближаться к заданному, сигнал с выхода регулятора РС начнет уменьшаться и после того, как его величина станет меньше, чем заданное значение тока якоря, он будет определять величину тока якорей тяговых электродвигателей.

При скорости электровоза, равной заданному значению, сигнал с выхода регулятора РС будет равен нулю. Это приведет к тому, что на выходе элемента «ИЛИ-min» будет отсутствовать задание тока якоря, и САУ зарегулирует ток до нуля.

В процессе пуска и разгона электровоза может возникать боксование как отдельных колесных пар, так и синхронное. Для защиты от боксования колесных пар в САУ предусмотрено устройство выявления избыточного скольжения (блок БВС), работа которого основана на сравнении интенсивностей приращения активной мощности, подведенной к тяговым электродвигателям, и частоты вращения колесных пар. Информацию о подведенной мощности несут: сигнал с выхода СЭ и датчики тока ДТЯ, а о частоте вращения – тахогенераторы ТГС. Сигнал с выхода блока БВС поступает непо-

средственно на исполнительный элемент (блок БЗ), который воздействует по двум каналам: первый – включение клапанов песочниц, второй – уменьшение заданного значения тока якорей тяговых электродвигателей.

При срыве в боксование колесных пар вначале работает канал подачи песка (как безынерционный), а если восстановления сцепления колесной пары с рельсами не происходит, то в работу вступает канал по току. Уменьшение заданного значения тока якорей тяговых электродвигателей происходит на величину, пропорциональную скорости избыточного скольжения колесных пар до восстановления сцепления. После восстановления сцепления САУ плавно увеличивает ток якорей тяговых электродвигателей до заданного значения, которое предшествовало боксованию. При срабатывании защиты от боксования на пульте машиниста загорается сигнальная лампа.

Блок БТЗ предназначен для защиты тяговых электродвигателей от аварийных токов в режиме тяги путем запрета на прохождение импульсов управления с БУУВ на все ВУ электровоза и управления промежуточным реле в блоке БПР, включающим сигнальную лампу «СИ» на пульте машиниста. Входное напряжение с блока измерения БИ-2 поступает на блок БТЗ, где сравнивается с опорным напряжением, определяющим уставку срабатывания токовой защиты. В исходном состоянии, когда опорное напряжение выше, чем напряжение с блока БИ-2, контакт «К» в блоке БТЗ разомкнут и с выхода БУУВ на УВ подаются импульсы управления согласно алгоритму работы БУУВ. При протекании аварийных токов в цепи тяговых электродвигателей с блока измерений БИ-2 на блок БТЗ будет поступать сигнал, уровень которого выше, чем опорное напряжение. Это приведет к срабатыванию реле в блоке БТЗ. Блок БТЗ даст команду через замкнутый контакт «К» на запрет прохождения импульсов управления с БУУВ, а также создаст цепь питания промежуточного реле в блоке БПР и через его контакты питание лампы «СИ».

3. Система автоматического управления в режиме реостатного торможения на электровозах ВЛ80^Т и ВЛ80^С

На рис. 6 представлена функциональная схема САУ в режиме реостатного торможения.

Функциональная схема САУ в режиме реостатного торможения представляет собой три замкнутых контура регулирования, а именно: контур регулирования тока возбуждения, контур регулирования силы (мощности) торможения и контур регулирования скорости движения.

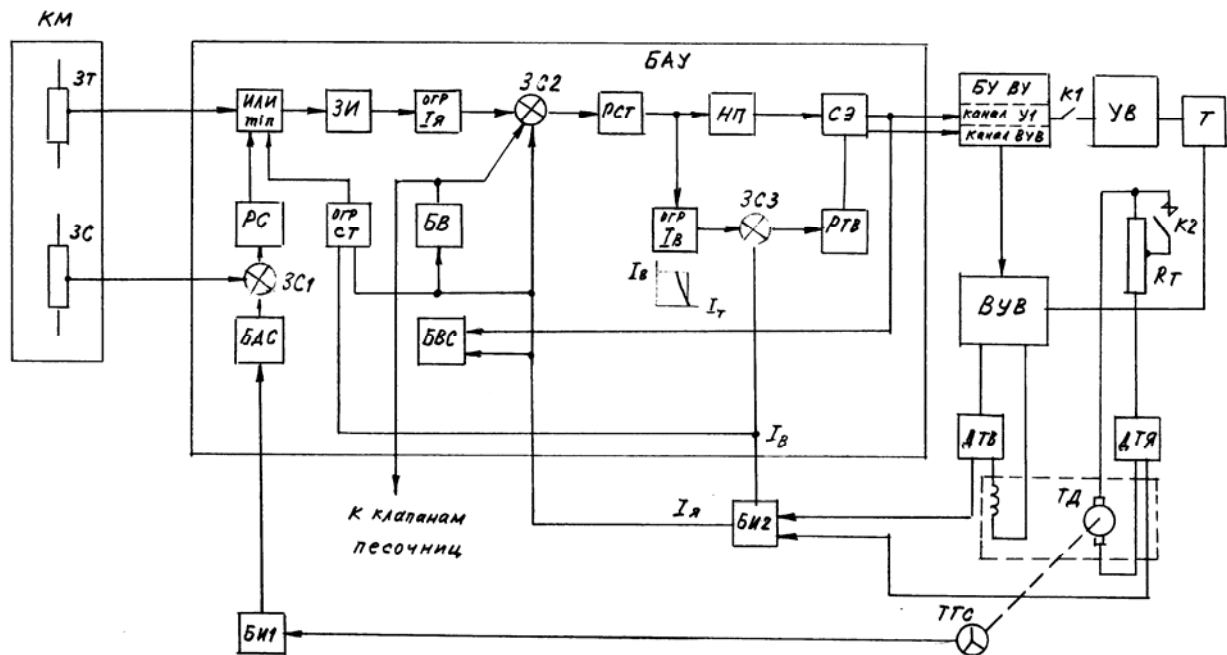


Рис. 6. Функциональная схема САУ в режиме реостатного торможения ВЛ80^Т и ВЛ80^С

Эти контуры регулирования состоят из: задающего элемента (датчик тока якоря ЗТ и датчик скорости ЗС); контроллера машиниста КМ; блока автоматического управления БАУ (элемент «ИЛИ-min», регулятор скорости РС, датчик интенсивности ЗИ, блок выделения максимальной скорости БДС, ограничитель токов якоря «Огр. $I_{я}$ », возбуждения «Огр. $I_{в}$ » и силы торможения, «Огр. СТ» – по условиям коммутации тяговых электродвигателей, регулятор силы торможения РСТ, нелинейный преобразователь НП, регулятор тока возбуждения РТВ, согласующий элемент СЭ, блоки выделения избыточного скольжения БВС и защиты от юза БЗ); блока управления БУВУ; выпрямительной установки возбуждения ВУВ; тягового трансформатора Т; тягового двигателя ТД; звеньев обратной связи – датчиков тока якоря и возбуждения ДТЯ и ДТВ и датчика скорости ТГС совместно с блоками измерений БИ-1, БИ-2.

Как видно из рис. 6, контуры регулирования тока возбуждения и силы (мощности) торможения являются внутренними, а контур регулирования скорости – внешним.

Регулирование в режиме реостатного торможения осуществляется по каналу ВУВ. Блок РСТ поддерживает заданное значение тока якоря тяговых электродвигателей с учетом ограничений. При регулировании тока возбуждения $0 \dots I_{час}$ нелинейный преобразователь работает в зоне нечувствительности и сопротивление тормозного резистора неизменно. Регулирование тока якоря в этом случае равносильно регулированию тормоз-

ной мощности тяговых двигателей. При токе возбуждения, равном $I_{в} = I_{я(ч)}$, нелинейный преобразователь выходит из зоны нечувствительности и в дальнейшем сила торможения регулируется одноступенчатым изменением тормозного резистора и величиной тока возбуждения. В первом случае контур регулирования тормозной мощности образуют: блоки РСТ, РТВ, БУВУ, выпрямительная установка возбуждения ВУВ и тяговый двигатель ТД. Во втором случае в контур регулирования силы торможения входят: блоки РСТ, БУВУ, тяговый электродвигатель ТД. Контур регулирования тока возбуждения при этом осуществляет стабилизацию тока возбуждения на уровне $I_{дв(ч)} = I_{в}$.

Контур регулирования скорости движения вступает в работу тогда, когда фактическая скорость движения станет равной или меньше заданного значения. При торможении постоянные напряжения $0 \dots 50$ В с контроллера машиниста «КМ» поступают в качестве заданных значений тока якоря и скорости движения в блок БАУ. Напряжения пропорциональны соответственно току якоря $0 \dots I_{ч}$ и скорости движения $0 \dots 110$ км/ч.

Заданное значение тока якоря в блоке БАУ поступает на один из входов элемента «ИЛИ-min», на другой вход подается сигнал с регулятора скорости РС, который выполняет функции автоматического датчика тока якоря для контуров регулирования тока возбуждения и силы (мощности) торможения. На входе элемента «ИЛИ-min» будет наименьшее значение из этих двух сигналов, которое поступает на вход датчика интенсивности ЗИ, который обеспечи-

вает плавное нарастание силы (мощности) торможения (с заданной интенсивностью) во всех режимах реостатного торможения.

Напряжение, пропорциональное заданному значению тока якорей тяговых двигателей, с выхода задатчика интенсивности ЗИ поступает на вход ограничителя «Огр. $I_{Я}$ », который ограничивает ток якоря на уровне $I_{Ч}$. Задание тока якоря с ограничителя «Огр. $I_{Я}$ » поступает на элемент сравнения ЭС2, где сравнивается с сигналом, соответствующим фактическому значению максимального тока якоря, поступающего с блока измерений БИ-2. Назначение блока измерений БИ-2 совместно с датчиками тока ДТЯ описано ранее.

Сигнал рассогласования между заданным и фактическим значениями тока якоря поступает на вход регулятора силы торможения РСТ.

Сигнал с выхода регулятора РСТ в качестве заданного значения тока возбуждения поступает на вход ограничителя «Огр. $I_{В}$ », который ограничивает ток возбуждения тяговых электродвигателей на уровне $I_{В(ЧАС)}$. С выхода ограничителя «Огр. $I_{В}$ » сигнал 0...4 В поступает на вход элемента ЭС3, где сравнивается с сигналом, соответствующим фактическому значению тока возбуждения, поступающим с блока измерений БИ-2. Сигнал, соответствующий фактическому току возбуждения тяговых электродвигателей формируется блоком измерений БИ-2 совместно с датчиком тока возбуждения ДТВ.

Сигнал рассогласования между заданным и фактическим значениями тока возбуждения поступает на вход регулятора тока возбуждения РТВ, выходной сигнал которого через согласующий элемент СЭ и блок БУУВ (канал ВУВ) управляет выпрямительной установкой возбуждения ВУВ.

При торможении, когда фактическая скорость движения на спуске станет равной или меньше заданного значения, вступает в работу внешний контур регулирования скорости. В контуре регулирования скорости движения на регулятор скорости РС поступает сигнал с элемента сравнения ЭС1, в котором сравнивается заданное, поступающее с задатчика скорости ЗС и фактическое значение скорости, поступающее с датчиков скорости ТГС через блоки измерений БИ-1 и БДС (блока датчиков скорости). Поддержание заданного значения скорости движения на спуске ведется по максимальному фактическому значению частоты вращения колесных пар, так как частота вращения колесной пары, у которой произошел срыв сцепления, будет ниже, чем у нормальной сцепленной колесной пары. По рассогласованию заданного и фактического значения скорости движения на спуске регулятор РС вырабатывает сиг-

нал, пропорциональный заданному значению тока якоря, для поддержания этой скорости.

Канал ограничения максимальной силы торможения по условиям коммутации тяговых электродвигателей работает при высоких скоростях движения от 110 до 60 км/ч, если нарушится соотношение $I_{В} \geq \beta_{\min} I_{Я}$.

Если это соотношение токов якорей и возбуждения тяговых электродвигателей превышает $1/\beta_{\min}$, то с блока «Огр. СТ» поступает сигнал, который меньше сигнала с задатчика тока ЗТ или с регулятора скорости РС, в блоке «ИЛИ-min» и является задающим током якоря. Ток якоря уменьшается, но уменьшается и ток возбуждения тяговых электродвигателей. Однако уменьшение тока якоря происходит в большей степени, нежели ток возбуждения; поэтому соотношение $I_{В}/I_{Я} > 1/\beta_{\min}$ и действие блока «Огр. СТ» прекращается.

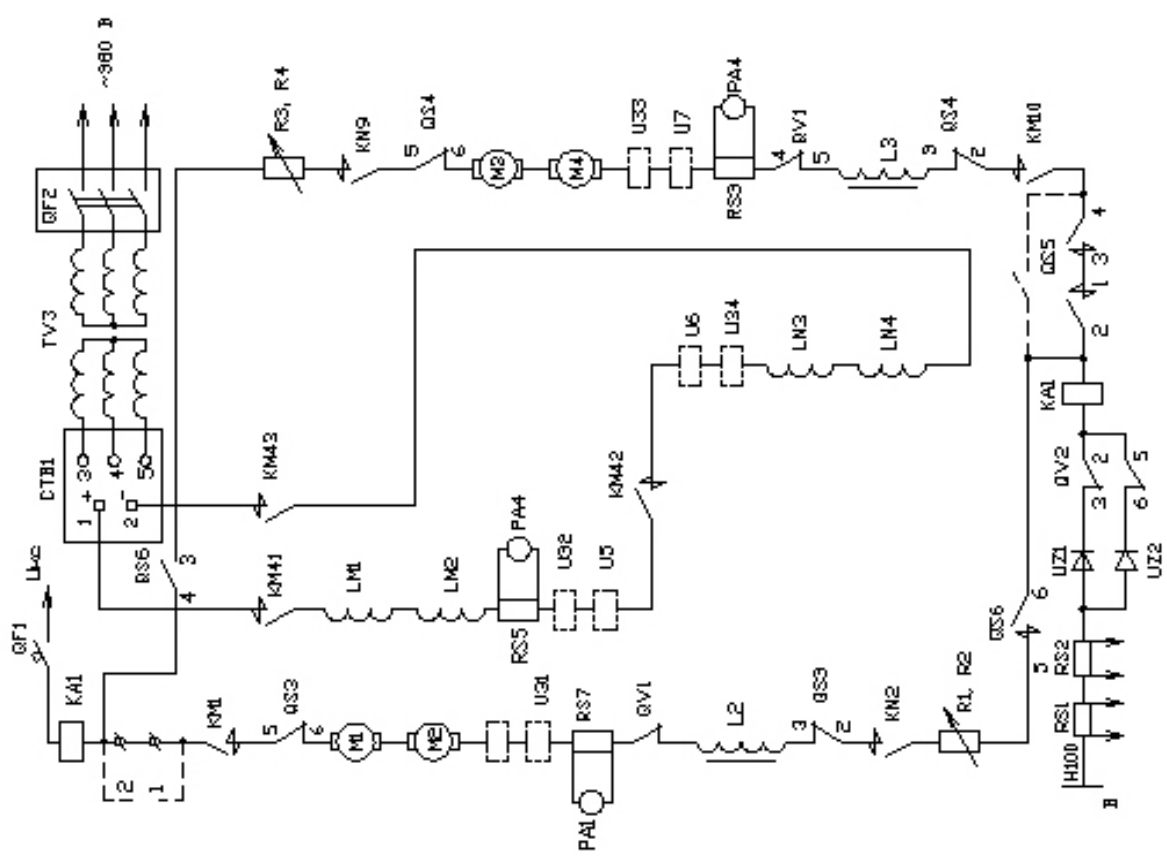
Режим реостатного торможения начинается с предварительного торможения, а САУ, в зависимости от скорости движения на спуске, стремится поддержать заданную величину силы торможения на уровне 6...8 тс.

Для защиты от юза колесных пар в режиме реостатного торможения в САУ предусмотрено устройство выявления избыточного скольжения (блок БВС) и исполнительный элемент (блок БЗ), принцип работы которого описан ранее.

Как в режиме тяги, защита от юза должна воздействовать по каналам: канал включения клапанов песочниц и канал уменьшения тока якорей тяговых электродвигателей до восстановления сцепления. При восстановлении сцепления САУ плавно увеличивает ток якорей тяговых электродвигателей до заданного значения, которое предшествовало юзу. При срабатывании защиты от юза на пульте машиниста должна загореться сигнальная лампа.

При модернизации грузовых электропоездов ВЛ80^Т и ВЛ80^С вместо выпрямительных установок потребуется поставить управляемые выпрямительные установки, которые как показали расчеты, размещаются в тех же габаритах. Необходимо будет изменить контроллер машиниста и соответственно систему управления, выполнить ее аналогично электропоезду ВЛ85.

Механическое и значительное большинство электрического оборудования практически совпадают. В результате модернизации мы получим силовую схему и систему управления как и на электропоезде ВЛ85, но с реостатным торможением и единой системой автоматического регулирования. Надежность силовой схемы и узлов системы автоматического управления на предлагаемых к модернизации электропоездах ВЛ80^Т и ВЛ80^С фактически подтверждена эксплуатацией электропоездов ВЛ85.



Расчетная схема рекуперативного торможения на электровозе ДЭ1 на параллельном соединении

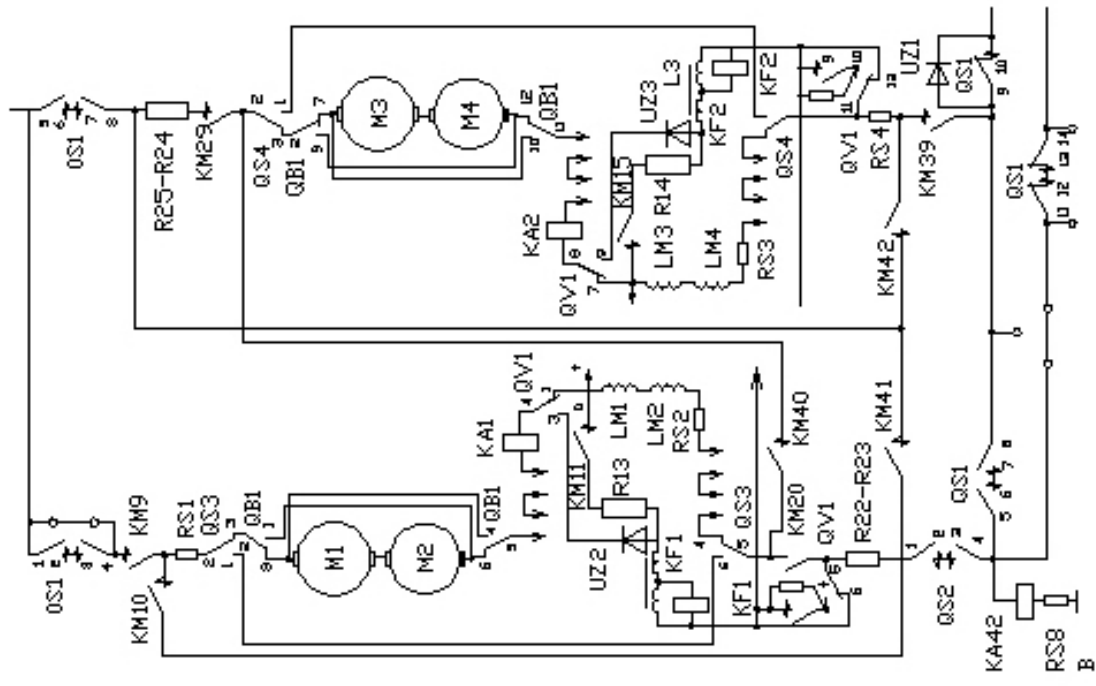


Схема одной секции электровоза ДЭ1 при рекуперативном торможении на параллельном соединении тяговых двигателей с применением быстродействующего контактора

Модернизированные электровозы ВЛ80^{ТМ} и ВЛ80^{СМ} позволяют получить лучшие показатели и преимущества.

Устраняются групповые переключатели типа ЭКГ-8Ж весом 960 кг и два переходных реактора ПРА-48 общим весом 900 кг, облегчается ремонт и уменьшаются затраты на обслуживание электровоза в эксплуатации.

При плавном бесконтактном автоматическом тиристорном регулировании силы тяги увеличивается масса поезда при ограничении ее по сцеплению на 200...400 т [3], повышается скорость движения на 12 %, уменьшается удельный расход электроэнергии на 14 % [4].

Повышается надежность работы тяговых двигателей НБ-418К6 из-за отсутствия толчков тока при регулировании напряжения, особенно при несимметрии фаз, и улучшаются потенциальные условия на коллекторе при их работе.

Как показали расчеты – экономический эффект от модернизации одного электровоза ВЛ80^Т (ВЛ80^С) составит около 85 тыс. грн в год, а окупаемость составит 2,7 года.

По мере освоения электровозов двойного питания с асинхронными тяговыми двигателями можно вполне обновить грузовой парк существ-

ующих электровозов ВЛ80^Т (ВЛ80^С) по выше изложенным разработкам кафедры ЭПС ДИИТа.

Заключение

Модернизированная схема силовой цепи электровозов ВЛ80^Т и ВЛ80^С для осуществления плавного тиристорного автоматического регулирования скорости в режимах тяги и реостатного торможения с единой системой автоматического регулирования напряжения на тяговых двигателях рекомендуется к внедрению в заводских условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихменев Б. Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980.
2. Бочаров В. И. Магистральные электровозы / В. И. Бочаров и др. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Тихменев Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б. Н. Тихменев, В. А. Кучумов. – М.: Транспорт, 1988.
4. Пыров А. Е. Электрические схемы электровоза ВЛ40^П / А. Е. Пыров, А. М. Хотимский. // Локомотив. 2004. – № 7.

Поступила в редколлегию 20.04.2005.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЧКОВ СЛУЧАЙНОЙ ФУНКЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТОКОПРИЕМНИКЕ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОВОЗЕ ДЭ 1

Розроблена математична модель електровоза постійного струму ДЕ 1 для дослідження впливу штовхоподібної зміни напруги на струмоприймачі на перехідні електромагнітні процеси. Проведено числові розрахунки магнітного потоку, струмів.

Разработана математическая модель электровоза постоянного тока ДЭ 1 для исследования влияния толчкообразного изменения напряжения на токоприемнике на переходные электромагнитные процессы. Произведен численный расчет магнитного потока, токов.

A mathematical model of DC electric locomotive series DE 1 has been developed for study of the influence of jolt-like voltage changes on the pantograph on transitional electromagnetic processes. The authors have made numeric calculation of the magnetic flow and the currents involved.

Електровозы постоянного тока ДЭ 1, как и весь электроподвижной состав (ЭПС), эксплуатируются в условиях резкого изменения напряжения на их токоприемниках. Согласно нашим исследованиям, наиболее часто (с вероятностью 0,53) встречаются толчки – возрастание напряжения ΔU величиной 300...500 В, что

составляет 10...16,7 % U_{nom} (рис. 1). Несомненно является актуальным расчет переходных электромагнитных процессов в силовых цепях электровоза с учетом таких изменений напряжения. Автору неизвестны публикации с результатами исследований на такую или подобную тему.

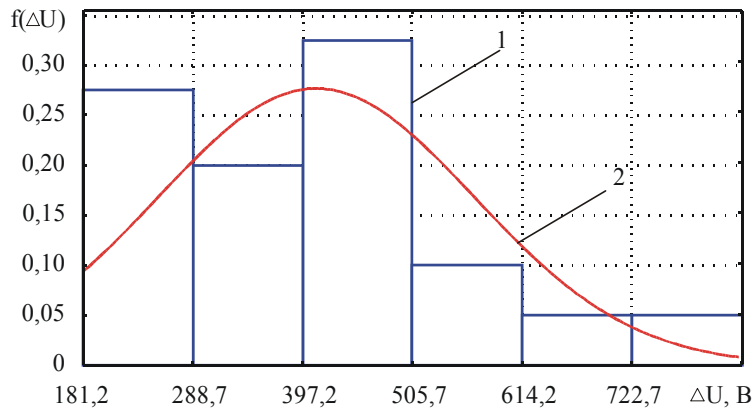


Рис. 1. Статистический (1) и теоретический (2) законы распределения случайного процесса $\Delta U(t)$

С точки зрения электрических систем электровоз представляет собой нелинейную динамическую стохастическую систему, на вход которой подается одно внешнее воздействие – напряжения на токоприемнике U . Приложенное напряжение, являясь по роду постоянным, представляет собой непрерывно изменяющуюся функцию, зависящую от времени, т.е. случайную функцию.

Для анализа переходных процессов с учетом вихревых токов была разработана математическая модель электровоза в режиме тяги на параллель-

ном соединении тяговых двигателей при различных степенях ослабления поля β . С учетом принятой схемы замещения тягового электродвигателя (ТЭД) (рис. 2) эта модель имеет вид:

$$i_{\text{я}} = i_{\text{в}} + i_{\text{ш}},$$

$$2R_{\text{в}}i_{\text{в}} + 2 \cdot 2p\sigma_{\text{в}}w_{\text{в}} \frac{d\Phi}{dt} +$$

$$+ 2R_{\text{я}}i_{\text{я}} + 2L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + 2e(t) = U,$$

$$2R_B i_B + 2 \cdot 2p\sigma_B w_B \frac{d\Phi}{dt} - R_{ш} i_{ш} - L_{ш} \frac{di_{ш}}{dt} = 0,$$

$$2\sigma_{Bx} w_{Bx} \frac{d\Phi}{dt} + 2R_{Bx}(t) i_{Bx} = 0,$$

$$w_B i_B + w_{Bx} i_{Bx} = w_B i_{\mu},$$

или при условии, что $w_B = w_{Bx}$

$$i_B + i_{Bx} = i_{\mu},$$

где и на рис. 2 $i_{я}$, i_B , $i_{ш}$, i_{Bx} – токи соответственно в обмотке якоря, обмотке возбуждения, шунтирующем контуре, вихревой; $R_{дг}$ – активное сопротивление дуги; $R_{я}$ – активное сопротивление якоря; R_B – активное сопротивление обмотки возбуждения; $R_{ш}$ – актив-

ное сопротивление шунта; R_{Bx} – активное сопротивление вихревого контура; p – число пар полюсов обмотки главных полюсов двигателя; σ_B , σ_{Bx} и w_B , w_{Bx} – коэффициенты рассеивания и число витков соответственно обмотки возбуждения (главных полюсов) и контура вихревых токов; i_{μ} – ток намагничивания станины, который является нелинейной функцией Φ :

$$i_{\mu} = 33,601 - 2536,387\Phi(t) + 2,518 \cdot 10^5 \Phi^2(t) - 4,031 \cdot 10^6 \Phi^3(t) + 2,269 \cdot 10^7 \Phi^4(t);$$

Φ , $\Phi_{s.B}$, $\Phi_{s.Bx}$ – магнитные потоки соответственно основной (станины), рассеивания в обмотке возбуждении, вихревом контуре.

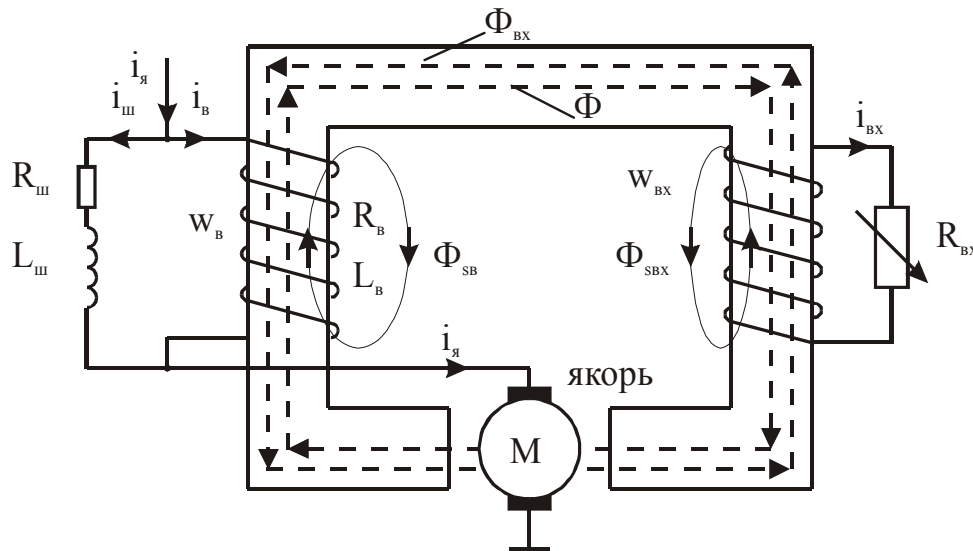


Рис. 2. Электромагнитная схема замещения тягового двигателя

Учет вихревого тока, возникающего в станине и в сердечнике главных полюсов тяговых двигателей, осуществлен эквивалентным короткозамкнутым контуром с количеством витков $w_B = w_{Bx}$ и активным сопротивлением R_{Bx} . Последнее является переменной величиной, зависящей от времени развития переходного процесса, вследствие постепенного проникновения вихревых ЭДС и токов от периферийных частей магнитопровода вглубь его.

Согласно [1] R_{Bx} рассчитывается по формуле

$$R_{Bx}^{HP}(t) = \frac{6w_B^2}{\sigma_B A \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{HP}}}\right)},$$

где A – коэффициент, определяемый как:

$$A = \sum \frac{V_i}{\rho_i \left(\frac{a_i + b_i}{b_i} + \frac{b_i}{a_i}\right)},$$

где V_i , a_i , b_i – объем, размеры сечения i -й части магнитопровода; T_{HP} – постоянная времени нарастания магнитного потока, равная [1]:

$$T_{HP} = \frac{2,7 p \sigma_B w_B}{C},$$

где C – постоянная двигателя,

$$C = \frac{Npn}{60a}.$$

Переходные процессы в двух последовательно соединенных тяговых двигателях определяются в основном характером изменения магнитного потока $\Phi(t)$, который влияет на $i_{я}$, $i_{в}$, $i_{ш}$ и $i_{вх}$.

На (рис. 3, а–д) в качестве примера представлены результаты численных расчетов электромагнитных процессов при степени ослабления $\beta = 0,57$ (ОП 3) и разных начальных условиях тока якоря

$$I_{я.нач} = (0,25; 0,5; 1; 1,1) I_{я.ном}$$

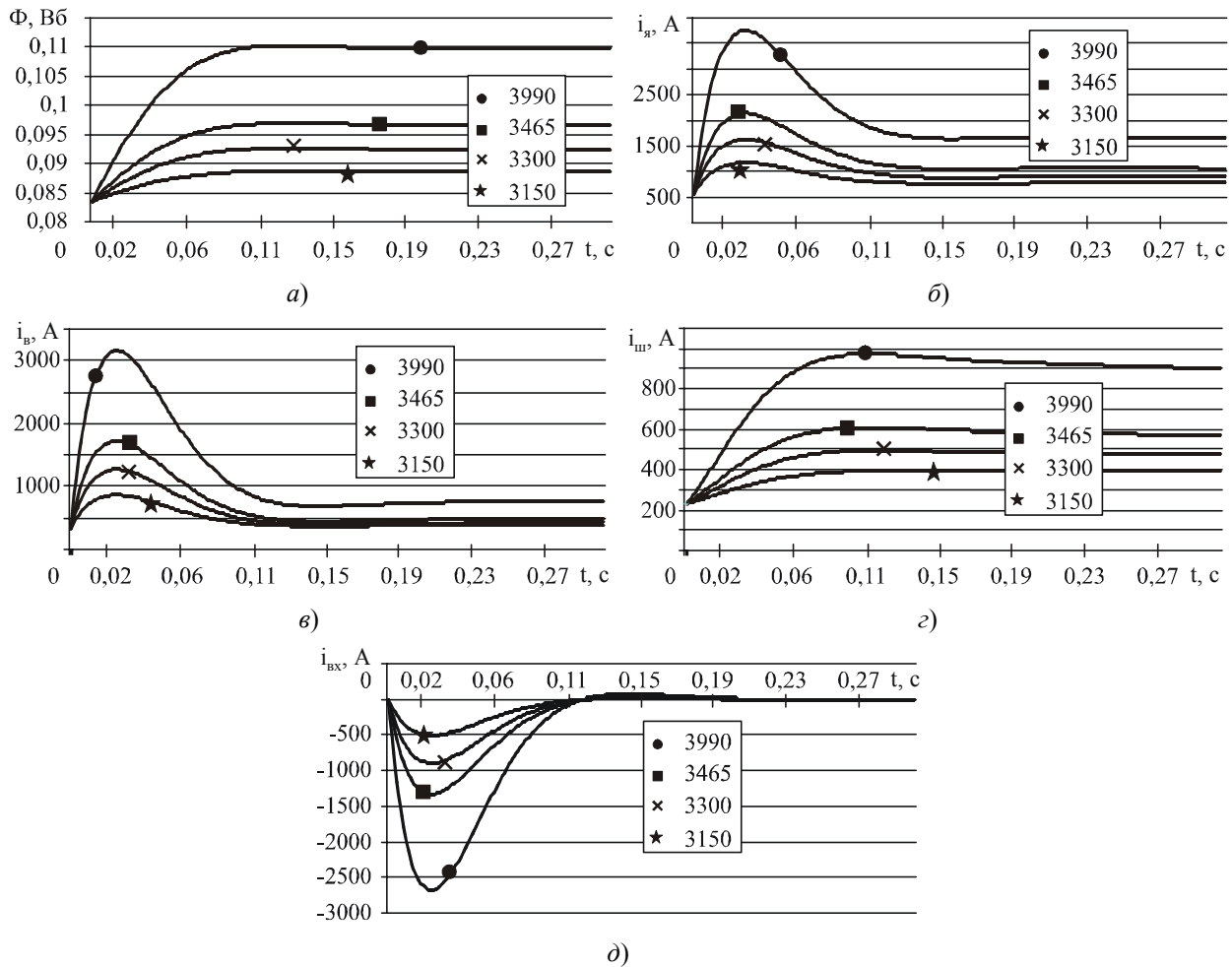


Рис. 3. Временные зависимости изменения переходных магнитного потока Φ (а), тока якоря $i_{я}$ (б), тока обмотки возбуждения $i_{в}$ (в), тока шунтирующей цепи $i_{ш}$ (г) и вихревых токов $i_{вх}$ (д) при различных возможных скачкообразных изменениях напряжения

Вероятность появления толчков, т. е. максимальных значений тока якоря

$$I_{я.мах} = 803,4 \dots 1392 A$$

при различных степенях ослабления поля, а также различных толчках напряжения, составляет 0,3, а вероятность появления максимальных значений

$$I_{я.мах} = 3158,8 A$$

а также при различных возможных скачкообразных изменениях напряжения на токоприемнике

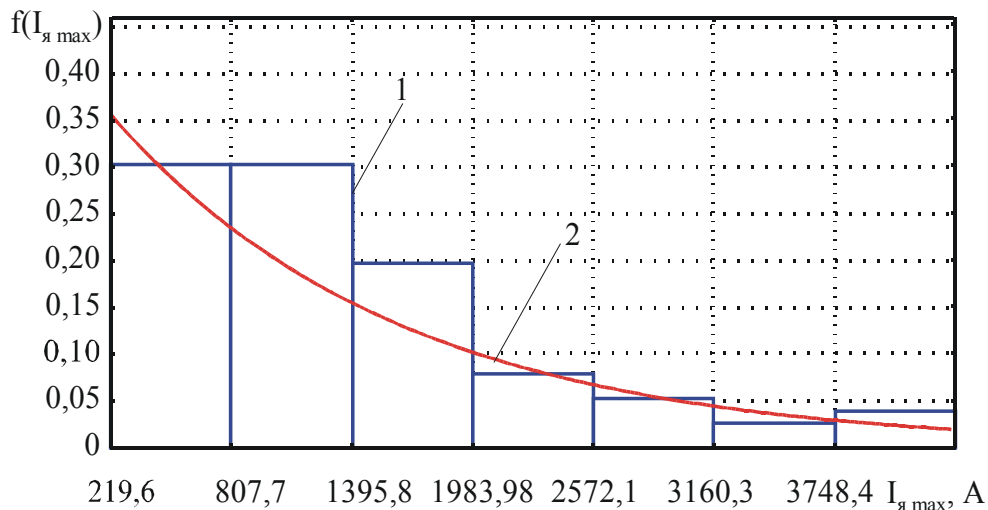
$$\Delta U = (0,05; 0,1; 0,155; 0,33) U_{ном}$$

При этом следует заметить, что в реальных условиях эксплуатации электровозов ДЭ 1 на участках Приднепровской дороги толчки напряжения $0,33U_{ном}$ и выше не зафиксированы, но анализируются в данной работе как на возможное значение согласно [2].

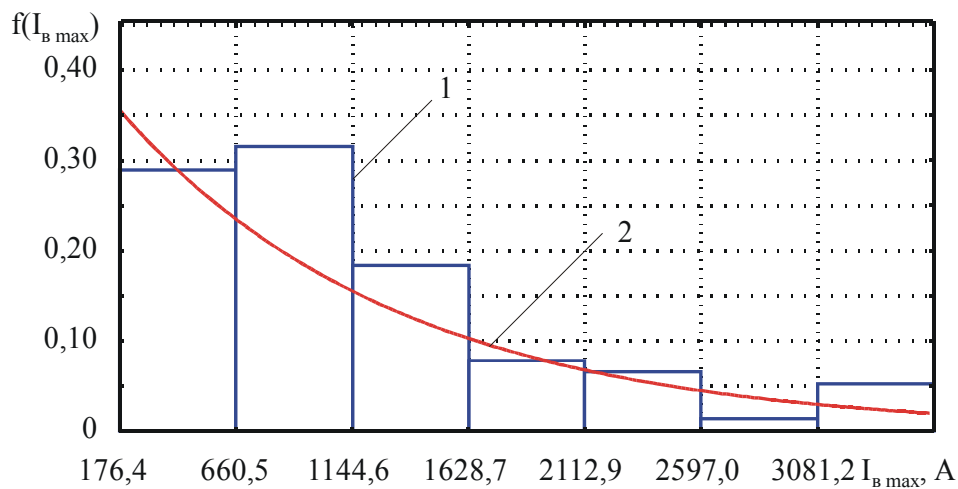
и выше составляет 0,05...0,05 (рис. 4, а). Вероятность появления максимальных значений тока возбуждения

$$I_{в.мах} = 660,5 \dots 1144,6 A$$

составляет 0,32, а $I_{в.мах} = 2594 A$ и выше до 0,05 (рис. 4, б). Такие вероятности появления бросков токов дают основание для анализа переходных процессов в электровозе с целью определения вероятных причин отказов ТЭД.



a)



б)

Рис. 4. Статистический (1) и теоретический (2) законы распределения бросков тока якоря (а) и тока возбуждения (б) при различных степенях возбуждения поля и толчках напряжения

На рис. 5–6, а, б приведены зависимости от-
ношений

$$\frac{I_{я.маx}}{I_{ном}}$$

в функции

$$\frac{I_{я.нач}}{I_{ном}}$$

при

$$\beta = 1, \quad \beta = 0,57,$$

т. е. в режиме ПП (рис. 5) и ОП 3 (рис. 6, а, б) при различных величинах толчков ΔU и начального значения тока $I_{я.нач}$, из которых следует:

Относительное значение максимального тока якоря значительно изменяется при толчкообразном изменении напряжения U и величине $I_{я.нач}$. Так, при

$$I_{я.нач} = I_{я.ном}, \quad \Delta U = 0,05U_{ном}, \quad \beta = 0,57$$

максимальное значение тока составляет

$$I_{я.маx} = 1,75I_{я.ном};$$

при тех же начальных условиях и степени ослабления, но при

$$\Delta U = 0,33U_{ном} \quad I_{я.маx} = 6,55I_{я.ном}.$$

Аналогично толчок тока в обмотке возбуждения (рис. 6, а, б) составляет

$$I_{в.маx} = 1,75I_{я.ном}$$

при

$$\Delta U = 0,05U_{ном}, \quad I_{в.маx} = 5,8I_{я.ном}$$

при

$$\Delta U = 0,33U_{ном}.$$

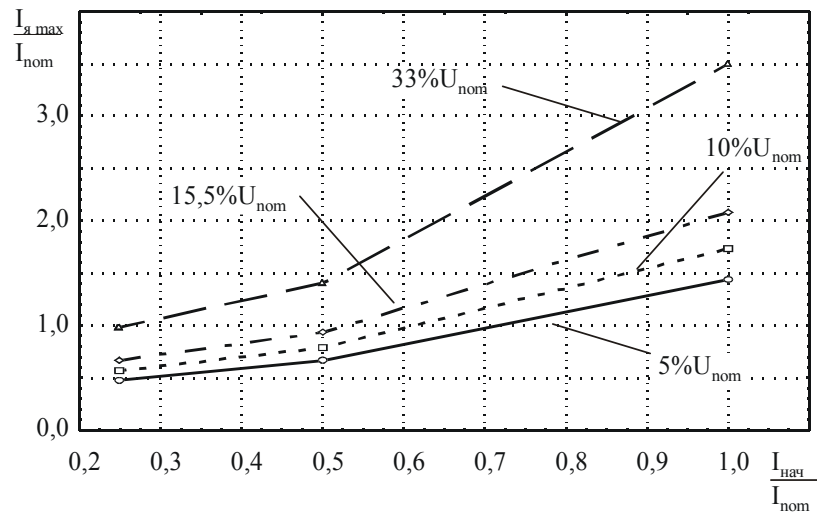
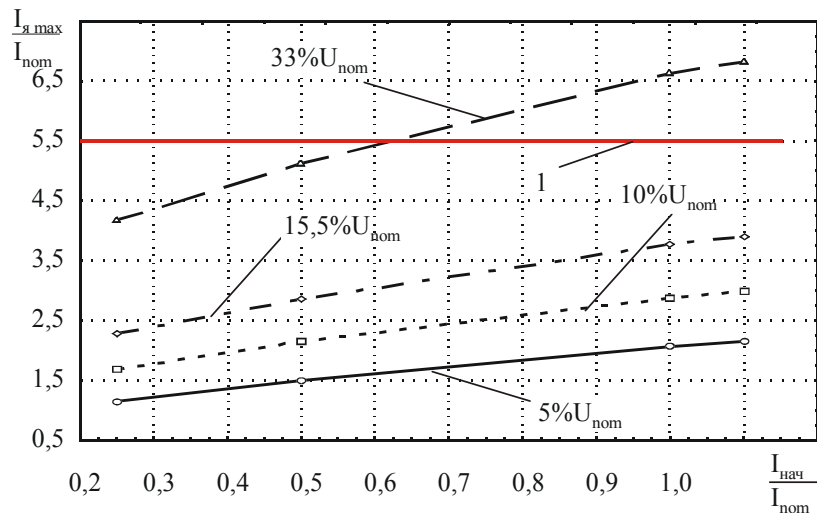
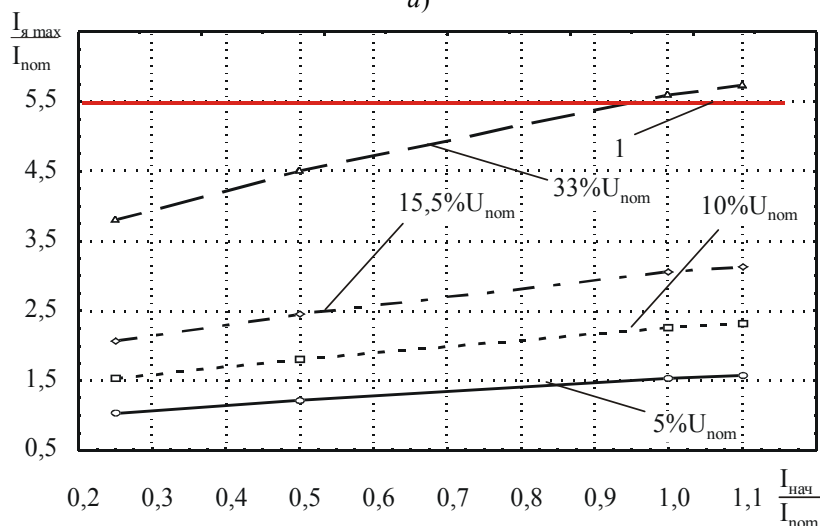


Рис. 5. Графики зависимости кратности токов $\frac{I_{в. max}}{I_{nom}} = \frac{I_{я. max}}{I_{nom}} = f\left(\frac{I_{я. нач}}{I_{nom}}\right)$ при полном поле и различных скачкообразных изменениях напряжения и начальных значениях тока



а)



б)

Рис. 6. Графики зависимости кратности токов якоря (а) и возбуждения (б) $\frac{I_{я. max}}{I_{nom}} = f\left(\frac{I_{я. нач}}{I_{nom}}\right)$ при ослаблении поля (ОП 3) и различных скачкообразных изменениях напряжения и начальных значениях тока. 1 – граница возникновения кругового огня

Такое появление максимальных токов в силовой цепи двигателя обуславливается возникновением значительной разницы между противо-ЭДС и напряжением питания тяговых двигателей, что приводит к увеличению падения напряжения в обмотке возбуждения (по сравнению со стационарным режимом) и стремлению главного магнитного потока машины увеличиваться. Рост потока во время переходного режима сдерживается демпфирующим действием вихревых токов в сплошных участках магнитопровода, а при использовании ОП еще и демпфирующим действием контура «обмотка возбуждения – цепь ослабления поля».

По мере увеличения начальной скорости изменения тока величина отставания потока увеличивается и противо-ЭДС при максимальном токе уменьшается. Изменение потока во времени, по сравнению с изменением тока, существенно отстает. Следовательно, при достижении током максимума величина противо-ЭДС будет меньше, чем при работе машины в стационарном режиме на максимальном напряжении, т. е. в режиме толчка напряжения [2].

При $\beta = 1$ и толчке напряжения

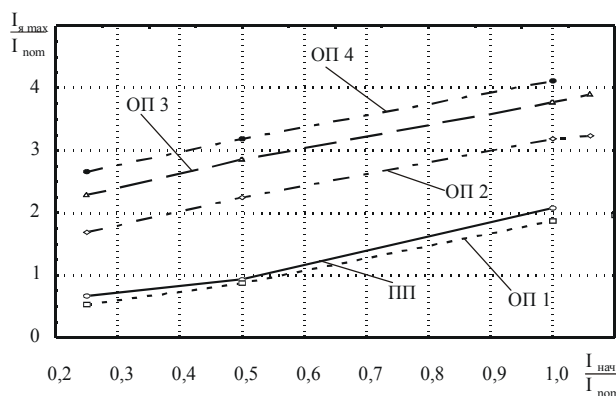
$$\Delta U = 15,5 \% U_{ном}$$

кратность тока практически изменяется в пределах $1,45 \dots 2,1 I_{я.ном}$. При толчке (см. рис. 5)

$$\Delta U = 33 \% U_{ном} \quad I_{я.мах} = 3,5 I_{я.ном}$$

Из сравнения кратности толчков тока якоря при $\beta = 1$ (см. рис. 5) и $\beta = 0,57$ (см. рис. 6), равных

$$I_{я.мах} = 3,5 I_{я.ном}, \quad I_{я.мах} = 6,55 I_{я.ном}$$



а)

при

$$\Delta U = 33 \% U_{ном}, \quad I_{я.нач} = I_{я.ном}$$

видно, что максимальное значение тока на 18,7 % выше в случае применения индуктивного шунта.

Рассматривая влияние индуктивного шунта при разных степенях ослабления поля, на максимальное значение тока якоря, видим, что кратность тока якоря увеличивается с уменьшением степени ослабления поля, например, при начальных условиях

$$I_{я.нач} = I_{я.ном}, \quad \Delta U = 15,5 \% U_{ном}$$

кратность (рис. 7, а, б) составляет:

- на ОП 1

$$I_{я.мах} = 1,75 I_{я.ном}, \quad I_{в.мах} = 1,23 I_{в.ном};$$

- на ОП 4

$$I_{я.мах} = 4,1 I_{я.ном}, \quad I_{в.мах} = 3,2 I_{в.ном}.$$

Аналогично (рис. 8, а, б) при

$$\Delta U = 33 \% U_{ном}$$

получено:

- на П – ОП 1

$$I_{я.мах} = 3,1 I_{я.ном}, \quad I_{в.мах} = 2,25 I_{в.ном};$$

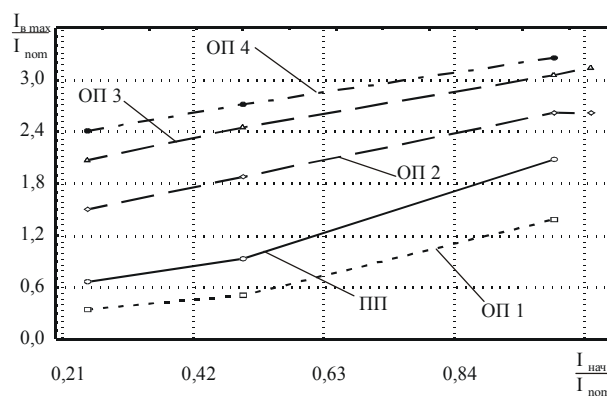
- на П – ОП 4

$$I_{я.мах} = 7,4 I_{я.ном},$$

$$I_{в.мах} = 6,05 I_{в.ном},$$

что в 1,8 раза больше тока якоря, чем при

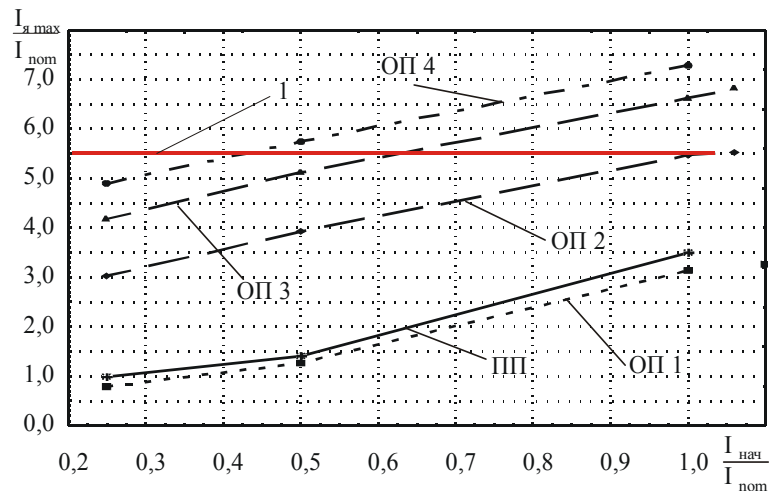
$$\Delta U = 15,5 \% U_{ном}.$$



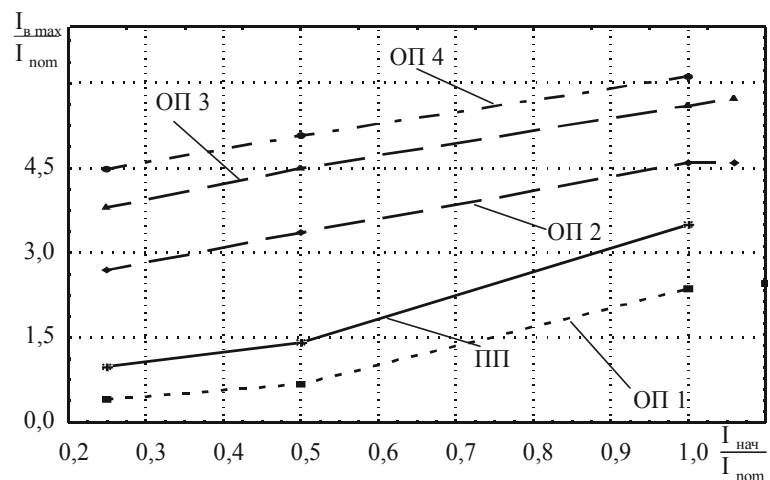
б)

Рис. 7. Графики зависимости кратности бросков токов якоря (а) и возбуждения (б) $\frac{I_{я.мах}}{I_{ном}} = f \frac{I_{я.нач}}{I_{ном}}$

при различном ослаблении поля и $\Delta U = 15,5 \% U_{ном}$



а)



б)

Рис. 8. Графики зависимости кратности бросков токов якоря (а) и возбуждения (б) $\frac{I_{я.мах}}{I_{ном}} = f \frac{I_{нач}}{I_{ном}}$ при различном ослаблении поля и $\Delta U = 33\%U_{ном}$. 1 – граница возникновения кругового огня

Выводы

Толчки питающего напряжения являются опасным режимом для узлов тяговых двигателей, так как максимальные значения тока якоря могут достигать $5,5 \dots 7,75 I_{я.ном}$ при

$$\Delta U = 33\%U_{ном},$$

$$I_{я.нач} = I_{я.ном} = 565 \text{ А},$$

что составляет 3091,9 и 4120,1 А соответственно (рис. 8, а). Практика показывает, что возникающие в силовых цепях электровозов скачкообразные переходные токи носят тяжелый характер. Переходные процессы ухудшают коммутационные и потенциальные условия на коллекторе тяговых двигателей, вследствие чего на них возникает круговой огонь уже при 5,5...6-кратном увеличении тока якоря. В ре-

зультате, последствия изменения напряжения могут вызвать перекрытие изоляционных промежутков на щеткодержателях и корпусах коллекторов, что обуславливает пробой на корпус коллектора. Такие пробой на корпус одного из последовательно включенных тяговых электродвигателей вызывают повышенное напряжение на коллекторах других тяговых двигателей, что может привести к выходу из строя целой группы ТЭД.

Значительная опасность режима при $\beta = 1$ и малое влияние на протекание электромагнитных процессов параметров цепи шунтирования возбуждения показывают, что определяющими факторами являются начальные условия.

Влияние индуктивного шунта на толчкообразное изменение токов малоэффективно, так как из-за насыщения магнитной системы двигателя,

$$\frac{\partial \psi_{\text{в}}}{\partial t}$$

мало отличается от

$$\frac{\partial \psi_{\text{ш}}}{\partial t},$$

где $\psi_{\text{в}}$ и $\psi_{\text{ш}}$ – магнитные потокоцепления обмотки возбуждения и индуктивного шунта.

Разработанная математическая модель позволяет производить многофакторный анализ динамических процессов в силовых цепях любого вида электроподвижного состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рунов Ю. А. Исследование электромагнитных переходных процессов в тяговых двигателях электроподвижного состава. // Труды ЦНИИ МПС. – 1974. – Вып. 516. – С. 78–92.
2. Лозановский А. Л. Оценка максимальной допустимой величины токов тяговых двигателей электровозов в нестационарных режимах. // Электровозостроение. – 1966. – Т. 7. – С. 59–67.

Поступила в редколлегию 27.05.2005.

П. В. КОВТУН, В. В. ТАЛЕЦКИЙ, Е. М. ЭТИН,
П. Ю. ЭТИН (Белорусский государственный университет транспорта)

ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ БЕЗБАЛЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА НА БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Наведено результати обстежень залізобетонних плит безбалластового мостового полотна на Білоруській залізниці. Запропоновано спеціальні форми запису параметрів, що спостерігаються під час експлуатаційних спостережень. Наведені заходи щодо подовження довговічності плит і забезпечення їхньої експлуатаційної надійності.

Представлены результаты обследований железобетонных плит безбалластного мостового полотна на Белорусской железной дороге. Предложены специальные формы записи наблюдаемых параметров при эксплуатационных наблюдениях. Приведены мероприятия по продлению долговечности плит и обеспечения их эксплуатационной надежности.

The article represents results of inspections of reinforced concrete plates of ballastless bridge surfacing on Byelorussian Railway. Special forms of recording the observable parameters in operational supervision have been proposed. Measures have been suggested on increasing the service life and operational reliability of the plates.

Конструкция безбалластного мостового полотна на сборных железобетонных плитах принята по проектам Ленгипротрансмоста, нормативным документам последних лет и рекомендациям, разработанным странами-членами ОСЖД. Плиты являются эффективными и перспективными с точки зрения эксплуатационной надежности и долговечности мостового полотна, а также элементов балочной клетки проезжей части. Плиты получили широкое применение в государствах СНГ при капитальных ремонтах металлических мостов, предусматривающих изменение типа мостового полотна.

На Белорусской железной дороге протяженность безбалластного мостового полотна – более пяти километров, что составляет примерно 32 % от общей протяженности металлических мостов. В дальнейшем предусматривается полная замена деревянных брусьев на железобетонные плиты безбалластного мостового полотна.

Наряду с несомненными преимуществами, особенно в эксплуатации, безбалластное мостовое полотно на железобетонных плитах обладает рядом недостатков, не позволяющих пока считать его конструкцию совершенной.

Наиболее важным и ответственным является узел сопряжения плит со стальными мостовыми балками. Плиты устанавливаются на прокладки и крепятся к стальной балке шпильками. Первоначально это техническое решение предусматривало временное опирание плит на

короткие и узкие деревянные прокладки для выравнивания пути. После чего пространство между плитой и балкой армировалось и заполнялось бетонной смесью через шпилечные отверстия. Ширина бетонного слоя соответствовала ширине поясов балок. Такая конструкция имеет существенные недостатки. Помимо технологической сложности, обусловленной «мокрым» процессом омоноличивания сопряжения, обнаружилась нестойкость в эксплуатации бетонного слоя при толщине свыше 40...50 мм, так как по боковым граням слоя происходит выкрашивание бетона, затем постепенное разрушение его по всей ширине.

Этими обстоятельствами объясняются начавшиеся поиски других решений сопряжения плит с балками.

В Республике Беларусь проектным институтом Промтранспроект предложено сопряжение плит с балками на деревянных (дубовых) антисептированных прокладках шириной 70 мм и натяжением шпилек до 20 тс. Прокладки размещаются вдоль поддерживающих балок между головками двух рядов связующих заклепок (рис. 1). Рекомендуемая толщина прокладок 30...70 мм (минимально допускается 25 мм). При укладке для обеспечения плотного опирания плит по всей длине предполагается тщательная подгонка толщины прокладок по месту. Между подошвой плиты и деревянной прокладкой укладывается армированная резиновая прокладка.

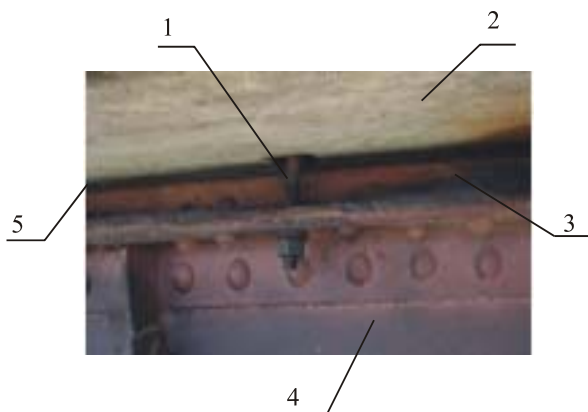


Рис. 1. Сопряжение плит БМП с продольными балками:

1 – шпилька; 2 – плита БМП; 3 – деревянная прокладка;
4 – продольная балка; 5 – резиновая прокладка

Сотрудниками кафедры «Строительные конструкции, основания и фундаменты» БелГУТа проведены обследования состояния желе-

зобетонных плит безбалластного мостового полотна на стальных мостах через реки Днепр, Припять, Сож, Ипуть, Гривда. В процессе обследований фиксировались нарушения в эксплуатируемых плитах (трещины, состояние узлов сопряжения, состояние стыков). Кроме этого, производились измерения натяжений шпилек крепления плит к мостовым балкам. Для систематизации и облегчения дальнейшего анализа результатов обследований авторами были разработаны специальные формы записи наблюдаемых параметров. В них изображалась схема расположения плит одной панели пролетного строения, плиты нумеровались и на плитах наносились обнаруженные нарушения. Рядом со схемой приводилась таблица, в которой записывались результаты измерения натяжения шпилек. Пример такой записи приведен в таблице и на рис. 2.

Таблица

Результаты определения усилия натяжения шпилек крепления плит к верхнему поясу продольной балки

№ панели	№* плиты	Номинальная длина плиты, м	Расположение шпилек по ходу километров		Показания динамометрического ключа, Нм		Усилие натяжения, тс	
			слева	справа	слева	справа	слева	справа
1	1-1-1	1,40	1	1	261	257	6,98	6,87
			2	2	226	217	6,04	5,80
1-1-2	2,00	2,00	1	1	211	199	5,64	5,32
			2	2	248	251	6,63	6,71
			3	3	256	247	6,84	6,60
1-1-3	2,00	2,00	1	1	218	211	5,83	5,64
			2	2	243	225	6,49	6,02
			3	3	257	263	6,87	7,03
1-1-4	1,40	1,40	1	1	225	225	6,02	6,02
			2	2	231	244	6,18	6,52
1-1-5	1,40	1,40	1	1	286	296	7,65	7,91
			2	2	232	223	6,20	5,96
1-1-6	1,40	1,40	1	1	298	320	7,97	8,56
			2	2	311	305	8,32	8,24

Примечание. Первая цифра обозначает номер пролетного строения, вторая цифра обозначает номер панели, третья цифра – номер плиты, расположенной на данной панели данного пролетного строения.

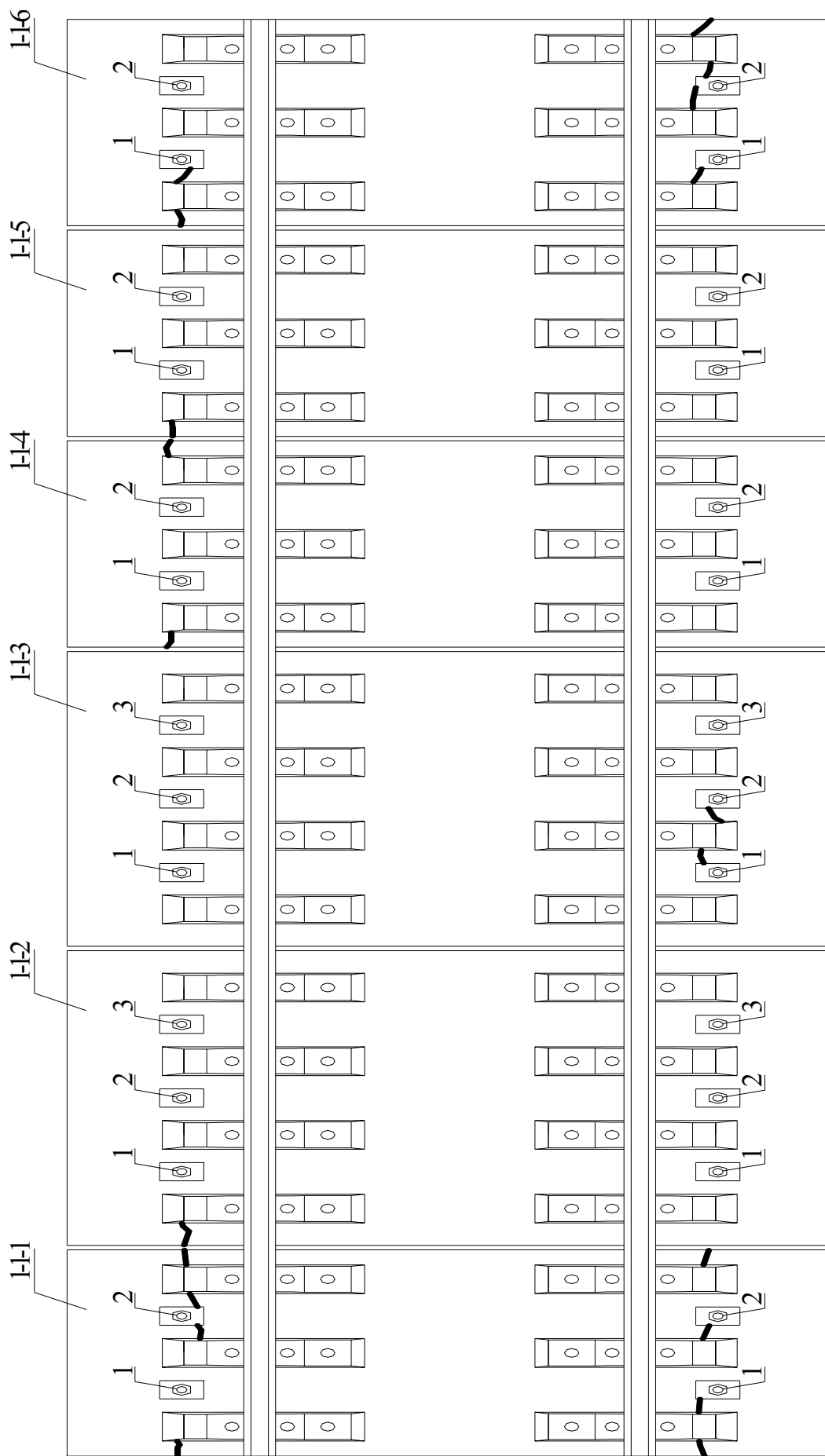


Рис. 2. Раскладка плит и расположение трещин по верхней поверхности плит (ПС-1, панель-1)

Измерение натяжения шпилек крепления плит к главной балке производилось с помощью электронного динамометрического ключа, который был разработан в Белорусской академии наук (рис. 3).



Рис. 3. Электронный динамометрический ключ во время стендовой тарировки:
1 – электронное табло; 2 – ручка (плечо)

В результате проведенных исследований плит установлено следующее:

1. Имеет место несовершенство конструкции сопряжения плит с продольными балками проезжей части или поясами главных ферм. Опирание плит на узкие дубовые прокладки с натяжением шпилек до 20 тс привели к образованию и раскрытию продольных трещин на верхней поверхности плит в зоне закладных болтов и крепления контруголков (рис. 4, а, в). Причем расчетами доказано, что определяющим фактором является усилие натяжения шпилек.

2. Неравномерное натяжение шпилек привело к образованию поперечных трещин (рис. 4, б). При эксплуатации плит не производится инструментальный контроль усилий натяжения шпилек.

3. Имеются нарушения гидроизоляционного слоя или его полное отсутствие. Это способствует проникновению в трещины атмосферной влаги, а также растворяемых осыпей

сыпучих и наливных грузов, в том числе и агрессивных, коррозии бетона и арматуры и снижению прочности плит.

4. Заделка швов между плитами нарушена или отсутствует. Шпилечные отверстия не закрыты шайбами (рис. 4, г). Это приводит к попаданию атмосферной влаги на узел сопряжения и на поверхность мостовых балок.

Выводы

1. Для продления долговечности плит и обеспечения их эксплуатационной надежности необходимо в первую очередь увеличить ширину прокладок до 20 см, снизить усилие натяжения шпилек до 10 тс и установить равномерность их натяжения. При широких прокладках и натяжении шпилек до 10 тс будет достигнута наилучшая стабильность мостового полотна в эксплуатации.

2. Выполнить защиту верхней поверхности плит, имеющих трещины от агрессивных внешних воздействий, полимерным покрытием. Руководством Белорусской железной дороги утверждена эффективная полимерная защита, разработанная компанией Sika.

3. Важное значение для продления долговечности плит и обеспечения их эксплуатационной надежности имеет правильная организация текущего содержания и надзора за верхним строением железнодорожного пути и плитами на мостах. Для этого в первую очередь необходимо обеспечить мостовые бригады специализированным инструментом: измерительными динамометрическими ключами, электроинструментом и пескоструйным оборудованием.

4. Учитывая сложность безупречного сопряжения плит с балками на упругих прокладках из готовых элементов, целесообразна разработка технологии исполнения прокладного слоя из полимерных твердеющих на месте компаундов.



Рис. 4. Характерные нарушения эксплуатации плит безбалластного мостового полотна:
а) продольные трещины по подрельсовой площадке; б) поперечные трещины около подрельсовых площадок;
в) продольные трещины в зоне крепления контруголков; г) открытые шпилечные отверстия

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.05.03–84. Мосты и трубы. Нормы проектирования.
2. Инструкция по применению и проектированию безбалластного мостового полотна на железобетонных плитах на металлических пролетных строениях железнодорожных мостов. – М.: Транспорт, 1995.
3. ОСТ 32.72–97. Стандарт отрасли. Плиты железобетонные безбалластного мостового полотна для металлических пролетных строений железнодорожных мостов. Общие технические условия.
4. Проект 897.1–2.05. Плиты П4–180, П4–190, П4–200. – Л.: Ленгипротрансмост.

Поступила в редколлегию 09.02.2005.

ВИМІРЮВАННЯ НЕЙТРАЛЬНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ РЕЙКОВОЇ ПЛІТИ БЕЗСТИКОВОЇ КОЛІЇ

Актуальною проблемою сьогодення на залізницях є утримання безстикової колії. Зараз на залізницях України використовується неточний метод контролю напруженого стану рейкової пліти, що не дає безпосередньої та правдивої картини розподілу величини напружень вздовж колії. Тому виникає необхідність застосування нового методу контролю, за допомогою якого визначаються напруження не лише температурні та напруження від уgonу, але й початкові та залишкові, тобто сумарні поздовжні напруження. Враховуючи той факт, що рейка виготовлена із феромагнітного матеріалу, в основу вимірювання механічних напружень покладене явище магнітної пружності. На цьому явищі побудований прилад для контролю сумарних поздовжніх напружень статичного характеру в рейці. Технічний результат використання нового методу – підвищення точності, швидкості, зручності та надійності вимірювання механічних напружень.

Актуальной проблемой сегодняшнего дня на железной дороге является содержание бесстыкового пути. Сейчас на железных дорогах Украины используется неточный метод контроля напряженного состояния рельсовой плиты, который не дает непосредственной и правдивой картины распределения величины напряжений. Поэтому возникает необходимость применения нового метода контроля, с помощью которого определяются напряжения не только температурные и напряжения от угона, но начальные и остаточные, т. е. суммарные продольные напряжения. Используя тот факт, что рельс изготовлен из ферромагнитного материала, в основу измерения механических напряжений положено явление магнитной упругости. На этом явлении построен прибор для контроля суммарных механических напряжений статического характера в рельсе. Технический результат использования нового метода – повышение точности, скорости, удобства и надежности измерения механических напряжений.

Nowadays the maintenance of long welded rails track is an urgent problem of railway industry. The inexact diagnostic method of the stressed state of long welded rails is used now on railways of Ukraine. This method does not give a direct and true picture of distribution and mode of the stress. Therefore there is a necessity of application of a new diagnostic method, which determines not only temperature stress and stress from longitudinal moving, but also initial and residual, i.e. total longitudinal stress. Taking into account that the rail is made of ferromagnetic material, the phenomenon of magnetic elasticity is used in measurement of mechanical stress. The device for the diagnostic of total mechanical longitudinal stress of static character in a rail is constructed, based on this phenomenon. The technical result of using the new method is an increase in accuracy, speed, convenience and reliability of mechanical stress measurements.

На залізницях України безстикова колія є основною найбільш прогресивною конструкцією колії.

У вільній від впливу рухомого складу рейці, яка лежить в колії, присутні сумарні напруження, що виникають від різних факторів: нерівномірності остигання рейки по її поперечному перетині після прокату, після правки рейки, транспортування, укладання рейок в криву з використанням ударних приладів, експлуатації та ремонту колії. На залізницях України на безстиковій колії ведеться контроль за температурними напруженнями та напруженнями викликаними угоном, не звертаючи увагу на вище перераховані, що виявляються нерідко одного порядку з напруженнями від впливу рухомого складу. До того ж сам процес контролю має ряд своїх недоліків:

– для визначення напруження в рейці використовується термометр і за формулою для затисненого стрижня розраховуються темпера-

турні напруження без врахування початкових напружень;

– відсутня можливість контролю за початковими напруженнями, оскільки ні термометром, ні за допомогою «маячних» шпал цього зробити неможливо;

– відсутність простого і надійного способу контролю повноти і рівномірності зняття напружень при їх розрядці;

– відсутність контролю напружень, що залишилися після розрядки і призводять до невідповідності температури закріплення нейтральної температури;

– при примусовому вводі рейкових плит в розрахунковий температурний інтервал закріплення регулюванням їх довжини може бути допущена звичайна технологічна похибка, яка не контролюється і призводить до того, що при настанні температури закріплення напруження не дорівнюють нулю, як це передбачалось;

– при примусовому вводі зміна довжини рейкової пліті відбувається з подоланням погонного опору, і тому окрім контролю за рівномірністю подовження пліті потрібно виконувати контроль за залишковими напруженнями, що зараз, на жаль, не виконується;

– ведеться контроль напруженого стану безстикової колії по «маячних» шпалах, але ж це гарантія, що сама «маячна» шпала не зрушиться, тобто безпосередність знижує точність та надійність існуючого методу.

Оскільки зараз на залізницях України використовується неточний метод контролю напруженого стану, що не дає безпосередньої та правдивої картини розподілення напружень в рейковій пліті, то виникає необхідність застосування нового методу контролю, за допомогою якого визначаються напруження не лише температурні та напруження від уgonу, але й початкові та залишкові, тобто сумарні напруження.

Отже, перед нами поставлена задача по вимірюванню сумарних внутрішніх напружень у рейковій пліті безстикової колії. Якщо використовувати традиційний метод наклеювання тензорезисторів, то потрібно було б це робити до моменту укладання рейок. Заклеювати тензодатчиками рейку не раціонально, а наклеювати на вкладену та закріплену рейку даремно. Тому необхідно мати метод вимірювання напружень, який реагував би на стан кристалічної решітки.

Явище магнітної пружності являє собою зміну намагніченості феромагнітного матеріалу під впливом механічних пружних деформацій [1]. Тому саме це фізичне явище покладене в основу контролю зусиль та напружень [2].

У Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна розроблений та побудований авторами прилад на магнітопружному датчику [3]. Індикатором даного приладу є вольтметр змінного струму. Датчик був встановлений на дослідний зразок, у якому створювалися різні напруження, і при цьому фіксувалися показання вольтметра. Результати одного з експериментів наведені на рис. 1.

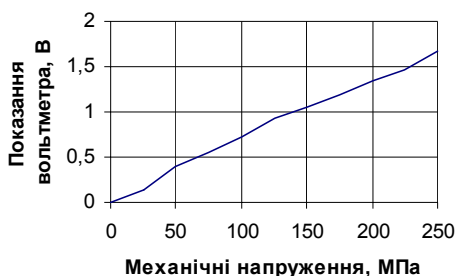


Рис. 1. Залежність показань приладу від механічних напружень отримана з одного експерименту

Після проведення багаторазових експериментів і апроксимації одержуємо лінійну залежність

показань приладу від механічних напружень. Прилад було випробувано в лабораторних умовах та на колії при вимірюванні сумарних механічних напружень статичного характеру. Чутливість приладу складає 0,5 МПа.

Введемо поняття «еквівалентний інтервал температури», під яким будемо розуміти зміну температури, що викликає напруження такої ж величини, як і дія зовнішніх механічних сил. Зараз на залізницях України для підрахунку еквівалентної та нейтральної температури використовуються відповідно формули (1) та (2), що за своїм фізичним змістом враховують лише напруження від уgonу [4].

Відхилення нейтральної температури від температури закріплення знаходиться за формулою

$$\Delta t = 85 \frac{\Delta l}{l}, \quad (1)$$

де Δl – фактично виміряне подовження (+) або вкорочення (–) пліті, мм; l – відстань між «маячними» шпалами, м.

Визначається значення нейтральної температури

$$T_0 = t_3 + \Delta t, \quad (2)$$

де t_3 – температура закріплення пліті, °С.

Перед виконанням колійних робіт на безстиковій колії виконуються такі операції. За наявності уgonу колії визначають зміну довжини даної пліті за зрушеннями її на «маячних» шпалах та підраховують еквівалентну температуру Δt , в якій, до речі, не враховані інші внутрішні напруження. Підраховують значення нейтральної температури T_0 . Кладуть термометр на рейку, отримують її фактичну температуру t_p і визначають перевищення Δt_{p-0} температури рейки відносно її нейтральної температури (рис. 2). Отримане значення зміни температури рейкової пліті Δt_{p-0} порівнюють з допустимим нормативним значенням, після чого приймається рішення про дозвіл на виконання певної роботи.

Але ж ті внутрішні напруження, якими просто нехтують, можуть мати однаковий порядок з напруженнями від рухомого складу і також роблять свій вагомий внесок в пониження стійкості чи міцності колії. Ситуація ускладнюється за наявності можливого зміщення «маячних» шпал. Тому дійсне перевищення Δt_{p-0} температури рейки відносно її нейтральної температури може виявитись більшим за розраховане по існуючому методу і перевищить нормативне значення. У такому разі при виконанні колійних робіт з'являється небезпечний стан порушення міцності чи стійкості. Причина цього знаходиться в неточному визначенні нейтральної температури.

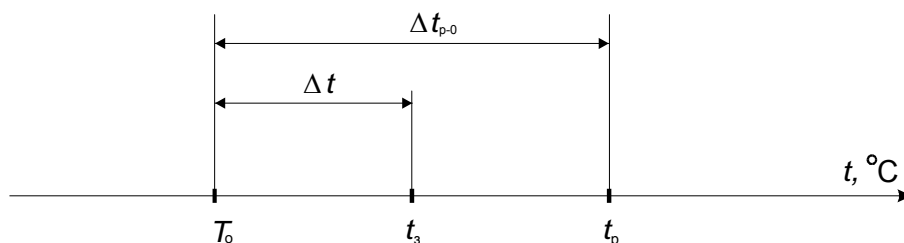


Рис. 2. Процес визначення зміни температури рейкової пліті при існуючому методі

Використовуючи прилад для вимірювання механічних напружень, що побудований на магнітопружному датчику, можна ліквідувати вищевказані недоліки і визначати в будь-якому перетині рейкової пліті, в будь-який час сумарні напруження.

Оскільки еквівалентна температура прямопропорційна напруженню, то, змінивши шкалу приладу отримуємо пристрій для вимірювання відхилення Δt_{p-0} температури рейки відносно її нейтральної температури.

Розробленим приладом вимірюється зміна температури рейкової пліті Δt_{p-0} , що еквівалентна сумарним напруженням в рейці. Кожна складова сумарних напружень може бути представлена у еквівалентному температурному вигляді. Тоді можна записати

$$\Delta t_{p-0} = \Delta t_{\text{темп}} + \Delta t_{\text{уг}} + \Delta t_{\text{остиг}} + \Delta t_{\text{транс}} + \Delta t_{\text{уклад}} + \Delta t_{\text{експл}} + \Delta t_{\text{рем}} \quad (3)$$

де $\Delta t_{\text{темп}}$ – зміна температури, що викликає безпосередньо температурні напруження; $\Delta t_{\text{уг}}$ – еквівалентний інтервал температури викликаний напруженнями угону; $\Delta t_{\text{остиг}}$ – еквівалентний інтервал температури викликаний напруженнями, що виникають від нерівномірності остигання рейки по її поперечному перетині після прокату, після правки рейки; $\Delta t_{\text{транс}}$ – еквівалентний інтервал температури викликаний напруженнями, що можуть виникнути при транспортуванні рейки; $\Delta t_{\text{уклад}}$ – еквівалентний інтервал температури викликаний напруженнями, що виникають при укладанні рейок в колію з використанням

ударних приладів; $\Delta t_{\text{експл}}$ – еквівалентний інтервал температури викликаний напруженнями, що накопичуються при експлуатації колії; $\Delta t_{\text{рем}}$ – еквівалентний інтервал температури викликаний напруженнями, що виникають при виконанні ремонтних робіт.

Отже, для визначення зміни температури рейкової пліті, використовуючи побудований прилад, виконується лише одна операція. Датчик встановлюється на рейку і відразу знімається відлік Δt_{p-0} , що показує зміну температури рейкової пліті відносно нейтральної температури.

Так як сумарні напруження можуть мати різний знак, тобто рейка може знаходитись в напруженому стані стиску чи розтягу, то і показання приладу можуть мати відповідно від’ємні чи додатні значення. При знаходженні нейтральної температури T_0 береться алгебраїчна сума фактичної температури рейки t_p і зміни Δt_{p-0} температури рейкової пліті відносно нейтральної температури.

Тоді значення нейтральної температури будуть знаходитись за формулою

$$T_0 = t_p + \Delta t_{p-0} \quad (4)$$

де t_p – фактична температура рейки додатна (+) або від’ємна (-), °С;

Δt_{p-0} – зміна температури рейкової пліті відносно нейтральної температури при розтягнутому напруженому стані (+) або при стисненому напруженому стані (-), °С.

Процес визначення нейтральної температури рейкової пліті зображено на рис. 3.

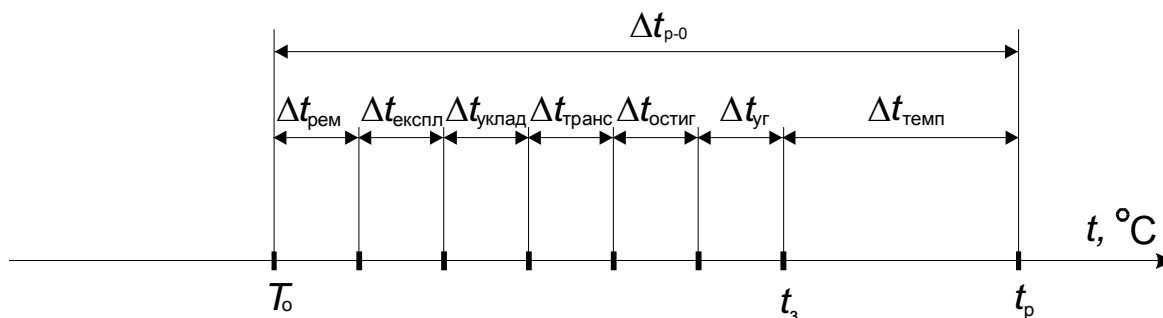


Рис. 3. Процес визначення нейтральної температури рейкової пліті при новому методі

Як ми бачимо з порівняння існуючого (рис. 2) і нового методу (рис. 3) останній виявляється більш точним, так як дозволяє врахувати всі поздовжні напруження, що присутні в рейці безстикової колії. Значно спрощується процес контролю за температурно напруженим станом рейкових плітей. При використанні нового методу зростає точність та надійність отриманих результатів, зменшуються трудовитрати на визначення еквівалентного інтервалу температури рейкової пліті, значно зменшується термін часу на виконання цієї роботи, а разом з тим з'являється широке коло застосування нового методу.

За нормативними документами в усіх випадках фактичні температури закріплення не повинні виходити за межі розрахункового інтервалу закріплення [4]. Як відомо, в результаті нерівномірності остигання рейки по її поперечному перетині після прокату і після її правки в ній виникають залишкові напруження біля 50–100 МПа і навіть більше [5]. При укладанні рейкових плітей в кривих, для поліпшення їх насування, користуються ударними приладами, або іншими засобами примусового поздовжнього переміщення плітей. Тому ще до появи температурних напружень рейка вже напружена. Отже, при закріпленні рейкової пліті вважається, що внутрішніх напружень немає, вимірюють термометром температуру рейки і закріплюють в розрахунковому інтервалі. А насправді, внутрішні напруження присутні і при їх переведенні в еквівалентну температуру може виявитись, що температура закріплення виходить за межі оптимального чи розрахункового інтервалу. Новий метод, на відміну від звичайного, дозволить вести такий контроль.

Розрядка для закріплення рейкових плітей на постійний режим експлуатації є досить відповідальною. Тому необхідно повністю зняти в рейкових плітях напруження [4]. Зараз на залізницях України повноту і рівномірність зняття напружень перевіряють по поздовжніх переміщеннях окремих перерізів пліті, нанесених через 50 м відносно «маячних» шпал, що

влаштовані через кожні 100 м. Показником повноти розрядки є припинення переміщень перерізів після ударів при примусовій дії на звільнену пліть. Але подовження чи вкорочення рейкової пліті відбувається з подоланням погонного опору. Тобто напруження в рейці ще присутні, а вважають, що їх вже немає. Тому новий пристрій є простим і надійним способом контролю повноти та рівномірності зняття внутрішніх напружень при розрядці.

При примусовому вводі рейкових плітей в розрахунковий температурний інтервал закріплення регулюванням довжини плітей за допомогою нового методу можна виконувати контроль за залишковими напруженнями.

Перед виконанням колійних робіт на безстиковій колії, використовуючи розроблений прилад, можна дуже швидко виміряти відхилення температури плітей від температури їх закріплення, і порівняти з допустимим нормативним значенням, що необхідно робити перед багатьма колійними роботами.

Таким чином, для контролю сумарних механічних напружень статичного характеру в рейках безстикової колії повинен використовуватися новий більш точний та надійний метод, який здійснюється за допомогою розробленого способу вимірювання механічних напружень [2] та пристрою для його здійснення [3].

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гуманюк М. Н. Магнитоупругие датчики в автоматике. – К.: Техника, 1972. – 153 с.
2. Заявка на корисну модель № 20041007961 від 01.10.2004; рішення про видачу деклараційного патенту від 18.01.2005.
3. Заявка на корисну модель № 20041109814 від 29.11.2004; рішення про видачу деклараційного патенту від 09.03.2005.
4. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України (ЦП/0081) – К.: // Транспорт України, 2002. – 106 с.
5. Шахуняц Г.М. Железнодорожный путь. – М.: Транспорт, 1987. – 479 с.

Надійшла до редколегії 28.04.2005.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМИХ НАПРУЖЕНЬ В РЕЙКАХ

Наведена методика визначення допустимих напружень в рейках на основі аналізу їх одиночного виходу з колії. Пропонується диференціація допустимих напружень в рейках залежно від категорії лінії.

Предложена методика определения допустимых напряжений в рельсах на основании анализа их одиночного изъятия из пути. Предлагается дифференциация допустимых напряжений в рельсах в зависимости от категории пути.

The article suggests a technique of determining admissible efforts in rails on the basis of the analysis of random removal of a rail from track. The differentiation of admissible efforts in rails is offered depending on a category of track.

На даний час в існуючих правилах розрахунку колії на міцність [1] допустимі напруження в рейках для ланкової колії ($[\sigma] = 240$ МПа) встановлені однозначно для всіх категорій колії. Положенням про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України (ЦП/0113) [2] головні колії поділяються на 7 категорій залежно від вантажнонапруженості та встановленої швидкості руху. Доцільно розглянути, як змінюється величина допустимих напружень в рейках залежно від вантажнонапруженості та встановленої швидкості руху. Також дане «Положення» встановлює умови призначення ремонтно-колійних робіт для цих категорій по основному критерію (пропущений тоннаж) та додаткових критеріях (одиночний вихід рейок).

Періодичність ремонтів залежить від допустимої величини одиночного виходу рейок, яка встановлена для певної категорії колії. Тобто існує диференціація норм залежно від категорії колії. Щоб забезпечити періодичність ремонтно-колійних робіт, встановленої «Положенням», потрібно враховувати навантаження від рухомого складу протягом нормованого періоду експлуатації. З цього слідує, що чим вища категорія колії, тим швидше накопичуються деформації в її елементах. Зв'язавши допустиму величину одиночного виходу рейок з напруженнями в рейках, можна отримати допустиму величину напружень для кожної категорії колії.

Головним критерієм оцінки міцності колії є допустимі напруження в рейках. На нашу думку та думку інших вчених [3] допустимі значення напружень наведені в правилах [1] є необхідною умовою, але не є достатньою. Позначимо допустимі напруження в рейках за достатньою умовою як $[\sigma_p]_{д,у}$ – це допустимі напруження визначенні з умов не перевищення

допустимої кількості відмов рейок, а за необхідною умовою $[\sigma_p]_{н,у}$. Допустимі напруження в рейках $[\sigma_p]_{н,у}$, прийняті як допустимі напруження розтягу в кромках підшви рейки за рахунок її згину і кручення під дією вертикальних і горизонтальних сил від рухомого складу, вирішують тільки першу задачу оцінки міцності.

В інших дослідженнях було запропоновано перейти від нормування допустимих напружень по границі текучості до нормування допустимих напружень в рейках при роботі на витривалість [4]. При цьому умовна межа витривалості при роботі на згинаючі деформації розрахована в лабораторних умовах і не враховує термін та умови експлуатації саме в колії в реальних умовах. Оскільки в реальних умовах рейки зазнають не тільки згин, а витримують складні деформації, то пропонується при визначенні допустимих напружень в рейках використовувати розрахунок за показниками надійності, тому що вони відображають реальні напруження в рейках безпосередньо в колії. Тому, щоб вирішити другу задачу – достатню умову міцності, потрібно враховувати термін та умови експлуатації. Виходячи з цього пропонується розраховувати допустимі напруження в рейках враховуючи додаткові критерії. Отже $[\sigma_p]_{д,у}$ – це функція, яка залежить від умов експлуатації, характеристик рейок, допустимого значення інтенсивності відмов рейок.

Диференціація допустимих напружень в рейках повинна бути залежною від категорії колії. Також опираючись на досвід ВНИИЖТу [5], доцільно розділити допустимі напруження для вагонів і локомотивів.

Враховуючи дві умови – достатню і необхідну, умова міцності прийме такий вигляд:

$$\sigma^{\text{розр}} \leq [\sigma_p]_{\text{д.у}} \leq [\sigma_p]_{\text{н.у}}, \quad (1)$$

де $\sigma^{\text{розр}}$ – розрахункові напруження в рейках.

В основу даної роботи покладена методика визначення допустимих напружень в рейках [5]. До даної методики запропоновано ряд інших величин, які розглянуто нижче.

Допустимі напруження в рейках по достатній умові $[\sigma_p]_{\text{д.у}}$:

$$[\sigma_p]_{\text{д.у}} = f(Kt; [\lambda]), \quad (2)$$

де Kt – категорія колії згідно [2]; $[\lambda]$ – допустима інтенсивність відмов рейок, для кожної категорії колії встановлена [2]. Допустимий одиночний вихід рейок (кількість дефектних місць) змінюються 3...12 шт/км.

В свою чергу інтенсивність відмов рейок λ – функція, яка залежить від багатьох факторів, що було розглянуто в роботі [6]. В результаті факторного аналізу виділено фактори, які значно впливають на інтенсивність відмов рейок – напруження, що виникає в рейках (а напруження залежать від осьового навантаження), пропущений тоннаж, фактична швидкість, та кривизна колії.

Умову не перевищення допустимої інтенсивності відмов залежно від прийнятих факторів можна записати у вигляді:

$$\lambda = \phi(\sigma; T; K; V) \leq [\lambda], \quad (3)$$

де σ – діюче напруження (P – навантаження, кН) в рейці під час проходження рухомого

$$[P] = \sqrt[n]{\frac{(E+FT) \sqrt{2 \ln \frac{1}{[\lambda] \sqrt{2\pi} (E+FT)^2}}}{B} - \frac{TA+CV^2+DK}{B}}. \quad (6)$$

Допустимі напруження за достатньою умовою $[\sigma_p]_{\text{д.у}}$ можна подати у вигляді рівняння, перейшовши від навантажень до напружень

$$[\sigma_p]_{\text{д.у}} = \gamma [P], \quad (7)$$

де γ – коефіцієнт переходу від навантажень до напружень.

У результаті отримуємо $[\sigma_p]_{\text{д.у}}$ – допустимі напруження в рейках, з умови не перевищення допустимої кількості відмов рейок за період нормативного напрацювання. Для безстикової конструкції колії допустимі напруження дорівнюють

складу, МПа; T – пропущений тоннаж, млн т бруто; K – кривизна колії, 1/м; V – фактична швидкість руху рухомого складу, км/год.

На відміну даної роботи в методиці [5] розглядаються два параметри – пропущений тоннаж та напруження в рейках під час проходження рухомого складу. Також двопараметричний критерій міцності h [5] поданий як добуток двох простих функцій (степеневих).

В явному вигляді інтенсивність потоку відмов рейок для різних типів відмов можна подати різними законами розподілу [7]. Згідно з статистикою найбільше поширені відмови контактнотомленого характеру. Тому пропонується взяти нормальний закон розподілу відмов, і функція інтенсивності відмов прийме такий вигляд:

$$\lambda(T, P, K, V) = \frac{e^{\left[\frac{-(T-A+BP^n+CV^2+DK)^2}{2(E+FT)^2} \right]}}{\sqrt{2\pi} (E+FT)^2}, \quad (4)$$

де A, B, C, D, F, n – коефіцієнти апроксимації.

Невідомі коефіцієнти (A, B, n, C, D, E, F) отримані на підставі зібраних даних про відмови рейок на дослідних ділянках [6] за методом найменших квадратів.

Прирівнявши рівняння (4) до $[\lambda]$, і обчисливши відносно осьового навантаження P , отримуємо допустиме значення навантаження $[P]$

$$\frac{e^{\left[\frac{-(T-A+BP^n+CV^2+DK)^2}{2(E+FT)^2} \right]}}{\sqrt{2\pi} (E+FT)^2} = [\lambda], \quad (5)$$

$$[\sigma_p]_{\text{д.у}}^{\text{бк}} = [\sigma_p]_{\text{д.у}}. \quad (8)$$

Для ланкової – потрібно відняти температурні напруження, які не враховуються розрахунком. Тому для тих категорій колії, що передбачають ланкову конструкцію колії, допустимі напруження можна обчислити за формулою

$$[\sigma_p]_{\text{д.у}}^{\text{лк}} = \frac{[\sigma_p]_{\text{д.у}} - \sigma_t}{K_3}, \quad (9)$$

де σ_t – температурні напруження в рейках; K_3 – коефіцієнт запасу. Розрахунок σ_t наведений в [8].

У результаті даних досліджень можна зробити висновок, що допустимі напруження в рейках залежать від терміну та умов експлуатації. Диференціювання по категоріях колії дасть можливість для колій з меншою вантажо-напруженістю встановити більші значення допустимих напружень в рейках. Також важливим пунктом є розподіл напружень для локомотивів та вагонів, для локомотивів більші значення внаслідок меншої долі участі їх у вантажообігу. Результати обчислень допустимих напружень в рейках залежно від категорії колії будуть наведені в наступних публікаціях.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного пути на прочность. Литограф. изд. МПС, 1954.
2. Положення про проведення планово-запобіжних ремонтно-колійних робіт на залізницях України. ЦП/0113. – К., 2004. – 32 с.
3. Вериго М. Ф. Основы методики статистической оценки прочности пути с учетом грузонапряженности / М. Ф. Вериго, В. С. Лысюк // Тр. ВНИИЖТ, 1972. – Вып. 466, – С. 51–67.
4. Вериго М. Ф. Общие предпосылки для корректировки правил расчетов пути на прочность и предложения по изменению этих правил / М. Ф. Вериго, С. С. Крепкогорский // Тр. ВНИИЖТ, 1972. – Вып. 466. – С. 4–50.
5. Лысюк В. С. Прочный и надежный железнодорожный путь / В. С. Лысюк, В. Н. Сазонов, Л. В. Башкатова. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003 – 589 с.
6. Рыбкин В. В. Планирование эксперимента для определения интенсивностей отказов рельсов / В. В. Рыбкин, Е. М. Баль // Современные проблемы путевого комплекса. Повышение качества подготовки специалистов и уровня научных исследований: Труды научно-технической конференции. – М.: МИИТ, 2004. – С. IV–31.
7. Рибкін В. В. Визначення законів розподілу інтенсивностей відмов рейок / В. В. Рибкін, О. М. Баль // Проблеми механіки залізничного транспорту: Динаміка, прочность и безопасность движения подвижного состава: XI Международная конференция. Тезисы докладов. – Д.: Изд-во Полный компьютерный сервис, 2004. – 200 с.
8. Даніленко Е. І. Технічні вказівки по улаштуванню, укладанню, ремонту і утриманню безстикової колії на залізницях України / Е. І. Даніленко, М. І. Карпов, М. Д. Костюк и др. – К.: Транспорт України, 2002. – 101 с.

Надійшла до редколегії 09.02.05.

М. І. УМАНОВ, В. В. ЦИГАНЕНКО,
А. Г. РЕЙДЕМЕЙСТЕР, Н. В. ХАЛШОВА, В. В. КОВАЛЬОВ (ДІПТ)

УСТАНОВЛЕННЯ ДОПУСТИМИХ ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ПОЇЗДІВ ПО ДІЛЯНЦІ КОЛІЇ, ВІДРЕМОНТОВАНИЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУЧАСНИХ КОЛІЙНИХ МАШИН

Наведено результати експериментальних та теоретичних досліджень з визначення допустимих швидкостей руху поїздів по ділянках колії, відремонтованих в умовах тривалого закриття перегону із застосуванням колійних машин RM-80 (або аналогічної), ВПР, динамічного стабілізатора колії, та даються рекомендації відносно розробки технологічних процесів виконання ремонту колії з застосуванням вищезазначеної колійної техніки.

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований по определению допустимых скоростей движения поездов по участкам пути, отремонтированных в условиях длительного закрытия перегона с применением путевых машин RM-80 (или аналогичной), ВПР, динамического стабилизатора пути, и даются рекомендации относительно разработки технологических процессов выполнения ремонта пути с применением вышеперечисленной путевой техники.

The article presents the outcomes of experimental and theoretical research on determination of allowed train running speeds on the segments of track repaired in conditions of long-time section closure, with the use of track maintenance machines RM-80 (or a similar one), VPR or Dynamic Track Stabilizer, and gives the guidelines on development of technological processes of track repair with use of the above-mentioned machinery.

Досі допустимі швидкості руху поїздів визначались в результаті виконання експериментальних досліджень напружень і деформацій типової рейкової колії під дією рухомого складу і теоретично розраховувались для інших типів верхньої будови колії.

На залізницях України допустима швидкість руху поїздів по відремонтованій колії регламентується «Інструкцією з забезпечення безпеки руху поїздів при виконанні колійних робіт». У ній відсутні рекомендації щодо допустимих швидкостей руху поїздів після ремонту колії з застосуванням динамічних стабілізаторів.

У 2003–2004 рр. у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДІПТ) виконувалися наукові дослідження з метою розробки рекомендацій щодо допустимих швидкостей руху поїздів на ділянках колії, відремонтованих в умовах тривалого закриття перегону.

Досліджувалися стан залізничної колії, процеси, що відбуваються в ній при виконанні робіт і їх вплив на динаміку рухомого складу, зміна стану баластової призми і колії в процесі ремонту і після завершення його окремих етапів, а також динаміка рухомого складу під час руху по ділянках колії залежно від технології й етапу виконання ремонту колії.

Для експериментальних досліджень була обрана дослідна ділянка на одному з перегонів Придніпровської залізниці, де планувалося вико-

нати модернізацію колії при тривалому закритті перегону. Випробування по визначенню жорсткості колії проводилися в кривій радіусом $R = 2150$ м після укладання там нової колії з інвентарними рейками типу Р65. Вертикальна жорсткість колії вимірялася в 41 перетині, при цьому перетини розташовувалися через 1 м. Дослідна ділянка знаходилася в середній частині кривої.

Відповідно до програми виміри жорсткості здійснювалися:

- після очищення щебеню машиною RM-80;
- після виправлення колії машиною ВПО-3000 (на першій половині дослідної ділянки) і виправлення колії машиною ВПР-02 (на другій половині дослідної ділянки);
- після повторного виправлення колії машиною ВПР-02 на всій ділянці;
- після першої стабілізації колії динамічним стабілізатором DGS-62N;
- після другої стабілізації колії динамічним стабілізатором DGS-62N;
- після третьої стабілізації колії динамічним стабілізатором DGS-62N.

Характеристики жорсткості рейкових ниток у вертикальній площині визначалися на основі експериментальних вимірів деформацій рейкових ниток від впливу навантажень, що прикладаються до рейок. При цьому вертикальні навантаження на рейку, що викликають осідання колії, передавалися на обидві рейкові нитки за

допомогою спеціальних гідравлічних навантажувальних пристроїв, змонтованих у вантажному вагоні-лабораторії ДПТУ. При вимірах вертикальна сила на одну рейку становила до 160 кН. Запис вертикальних прогинів рейок здійснювався за допомогою прогиномірів, укріплених на спеціальній рамі. Запис залежностей переміщень рейок від навантаження здійснювалася двокоординатними самописними приладами типу ПДС-021. У результаті на планшеті з'являлася петля гістерезису, що дозволяла одержати характеристики жорсткості підрейкової основи.

Для одержання характеристик жорсткості колії розшифровці піддавалася лінія завантаження. При цьому вона попередньо лінеалізувалася у межах 4...8 т. Як показали дослідження ДПТУ [1] величина жорсткості колії при

зміні навантаження в інтервалі 4...8 т добре відповідає її величині при зміні навантаження в інтервалі 0...16 т.

Значення жорсткостей рейкових ниток при вертикальному (β_z) вигині визначаються на основі вимірюваних вертикальних осьових прогинів підосви рейок по залежності:

$$\beta_z = \Delta P / \Delta z,$$

де ΔP – зміна вертикальної сили, (кН); Δz – зміна вертикального осьового прогину рейок (мм).

Отримані дані об'єднувалися й оброблялися статистично. У результаті обчислювалися середні значення жорсткості колії ($\bar{\beta}$) і її середньоквадратичне відхилення (S), що наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати статистичної обробки даних по жорсткості колії (кН/мм), отриманих після роботи колійних машин

Показники	RM-80	ВПО-3000	ВІР-02	ВПО-3000 + ВІР-02	ВІР-02 + ВІР-02	ВПО-3000 + ВІР-02 DGS-62N (1 раз)	ВІР-02 + ВІР-02 DGS-62N (1 раз)	ВПО-3000 + ВІР-02 DGS-62N (2 рази)	ВІР-02 + ВІР-02 DGS-62N (2 рази)	ВПО-3000 + ВІР-02 DGS-62N (3 рази)	ВІР-02 + ВІР-02 DGS-62N (3 рази)
$\bar{\beta}$	30	37	33	37	33	38	35	42	38	43	39
S	9,5	5,6	6,6	5,2	6,3	5,0	5,6	5,0	5,6	5,2	5,6

Крім того, виконувалися виміри стану дослідної ділянки колії вагоном-колійвимірювачем. Вони здійснювалися після виконання таких етапів ремонту:

- після виправлення колії машиною ВПО-3000 (на першій половині дослідної ділянки (перетини $-20...0$) і машиною ВІР-02 на другій половині дослідної ділянки (перетини $0...20$);
- після повторного виправлення колії машиною ВІР-02 на всій ділянці (перетини $-20...+20$);
- після першої стабілізації колії динамічним стабілізатором DGS-62N;
- після другої стабілізації колії динамічним стабілізатором DGS-62N;
- після третьої стабілізації колії динамічним стабілізатором DGS-62N;
- У результаті були отримані такі параметри стану колії:
 - ширина колії;
 - осідання колії;
 - положення колії в профілі та за рівнем;
 - положення колії в плані.

Також з метою визначення величини зміни положення поздовжнього профілю колії після проходу кожної з колійних машин (RM-80, ВІР-

02, ВПО-3000), а також після кожного з трьох робочих проходів машини DGS-62N, здійснювалися виміри стану колії за допомогою нівелірів.

Далі, в зв'язку з відкриттям перегону і пропуску по ньому поїздів, не вдалося продовжити спостереження за осіданнями колії на цій ділянці після пропуску графікових поїздів при різній кількості проходів стабілізатора. Тому з метою визначення величин осідань залізничної колії від графікових поїздів залежно від числа проходів DGS було виконано три цикли геометричного нівелювання на сусідній ділянці цього ж перегону, де слідом за першою ділянкою почали виконувати роботи з модернізації колії при тривалому закритті перегону.

Перший цикл – після укладання рейкошпальної решітки, очищення щебеню, постановки і стабілізації колії. При цьому виділялися ділянки, на яких стабілізація виконувалася 1 раз, 2 рази і 3 рази.

Другий цикл – після того, як по цій ділянці було пропущено близько 1 млн т вантажів.

Третій цикл – після того, як по цій ділянці було пропущено близько 2 млн т вантажів.

Результати вимірів, визначені по різниці в положенні точок, обмірюваних у першому і

другому циклах, наведені на рис. 1. Аналіз результатів показав, що в більшості випадків дійсно відбулися осідання колії. У декількох точках осідання мають знак (+), що свідчить про виконання роботи з виправлення колії в

деяких перетинах, що підтвердив місцевий шляховий майстер. Тому ці точки з розрахунків були виключені. Результати статистичної обробки результатів вимірів наведені в табл. 2.

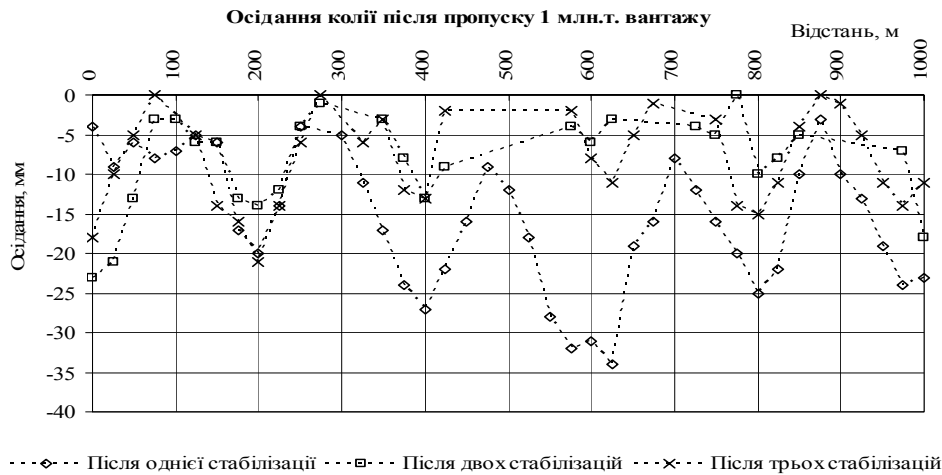


Рис. 1. Величини осідань за результатами геометричного нівелювання залізничної колії залежно від кількості стабілізацій

Таблиця 2

Осідання колії після пропуску графікових поїздів

№ км	Число проходів DGS	Середнє осідання колії після пропуску вантажу, млн т \bar{v}_i (мм)		Середньоквадратическое відхилення після пропуску вантажу, млн т s_i (мм)		Максимальне спостережене осідання колії після пропуску вантажу, млн т V_M^{CT} (мм)		Максимальні вірогідні осідання колії після пропуску вантажу, млн т V_M^B (мм)	
		1	2	1	2	1	2	1	2
964	1	17,4	2,3	8,0	2,1	34,0	6	37,4	7,6
965	2	7,2	1,7	4,5	1,1	18,0	4	18,6	4,5
966	3	7,8	1,9	5,6	1,7	21,0	8	21,8	6,2

Як видно з табл. 2, середня величина осідання колії після одного проходження динамічного стабілізатора і пропуску 1 млн т вантажу добре збігається з результатами досліджень [2], а після двох проходів і пропуску 1 млн т вантажу – з результатами [3]. Ці результати також показують, що осідання колії після одного проходження динамічного стабілізатора значно вище, ніж після його двох або трьох проходів. В останніх випадках осідання колії виявилися практично однаковими.

Це показує, що третю стабілізацію колії необхідно виконувати тільки після заміни інвентарних рейок плітьми і виправлення колії машинами типу ВПР, а інакше вона недоцільна.

Теоретичні дослідження з встановлення допустимих швидкостей руху поїздів на ділянці колії, відремонтованій із застосуванням сучасних колійних машин, виконувалися на основі

моделювання взаємодії колії з пасажирським і вантажним вагонами. У роботі були використані математичні моделі взаємодії колії з пасажирським і вантажним вагонами, раніше розроблені в ДПТі [4–6] й апробовані при виконанні роботи [7]. Ці моделі були доповнені спеціально розробленим математичним забезпеченням, що дозволяє враховувати вплив нерівножорсткості колії з урахуванням силової нерівності, а також додатковий вплив на колію рухомого складу, що має безперервні або ізольовані нерівності на колесах.

Додатково було розроблено математичне забезпечення, що дозволяє оцифровувати отримані нерівності колії для введення цих цифрових масивів у програму.

При виконанні теоретичних досліджень розраховувалися коефіцієнти горизонтальної ($K_{ДГ}$) і вертикальної ($K_{ДВ}$) динаміки і коефіцієнти стій-

кості проти вкочування гребеня колеса на рейку ($K_{ст}$). Аналізувалися максимальні значення коефіцієнтів горизонтальної і вертикальної динаміки і порівнювалися з нормативними значеннями. При оцінці результатів з розрахунку коефіцієнта стійкості виходили з того, що запас стійкості колеса від вкочування на головку рейки забезпечений, якщо значення коефіцієнта не менше 1,3 для вантажного вагона і 1,8 для пасажирського вагона. У протилежному разі вважали, що запас стійкості недостатній. Нормативні значення коефіцієнтів, що розраховувалися та аналізувалися наведені в [8].

Дослідження взаємодії колії і пасажирського вагона в пологих кривих показали, що за винятком коефіцієнта вертикальної динаміки в буксовому підвішуванні і коефіцієнта стійкості, інші досліджувані параметри не перевищують нормативних значень у всьому досліджуваному діапазоні швидкостей 50...90 км/год.

Одержані залежності для параметрів, за якими можливе обмеження швидкості руху, наведені на рис. 2–10 у вигляді графіків, де пунктирною лінією показані нормативні значення досліджуваних параметрів.

Залежності досліджуваних параметрів для пасажирського вагона на етапі після роботи машин ВПО і ВПР без виконання стабілізації приведено на рис. 2–3. На рис. 2 наведено графік зміни коефіцієнта вертикальної динаміки в буксовому ступені при швидкості руху пасажирського вагона 60 км/год. З нього видно, що при цій швидкості значення коефіцієнта досягає нормативного значення. На рис. 3 наведено графік зміни коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки залежно від швидкості руху. Аналіз показує, що нормативні значення досягаються також при швидкості 60 км/год. Таким чином, допустима швидкість руху для пасажирських поїздів на цьому етапі обмежується величиною 60 км/год.

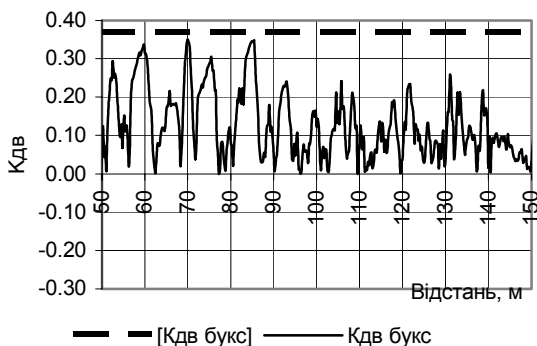


Рис. 2. Коефіцієнт вертикальної динаміки на буксовому ступені для пасажирського вагона при швидкості руху 60 км/год у пологих кривих на етапі після роботи машин ВПО і ВПР

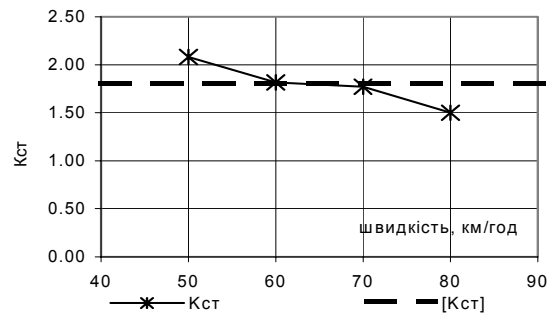


Рис. 3. Залежність коефіцієнта стійкості пасажирського вагона від швидкості руху в пологих кривих на етапі після роботи машин ВПО і ВПР

На рис. 4–5 наведені залежності досліджуваних показників на етапі після однієї стабілізації колії. Динамічні показники досліджувалися в діапазоні швидкостей 60...120 км/год. Наведений графік для коефіцієнта вертикальної динаміки на буксовому ступені підвішування (рис. 4) під час руху вагона зі швидкістю 100 км/год має точки, в яких досягаються нормативні значення коефіцієнта. Аналіз залежності коефіцієнта стійкості від швидкості руху (рис. 5) показав, що обмеження також настає при швидкості руху 100 км/год. Таким чином, на ділянці колії після однієї стабілізації допустима швидкість для пасажирських поїздів складає 100 км/год.

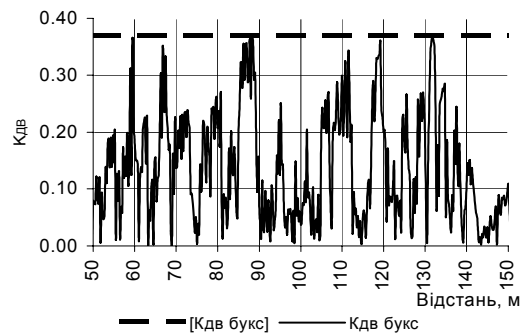


Рис. 4. Коефіцієнт вертикальної динаміки на буксовому ступені для пасажирського вагона при швидкості руху 100 км/год у пологих кривих на етапі після однієї стабілізації

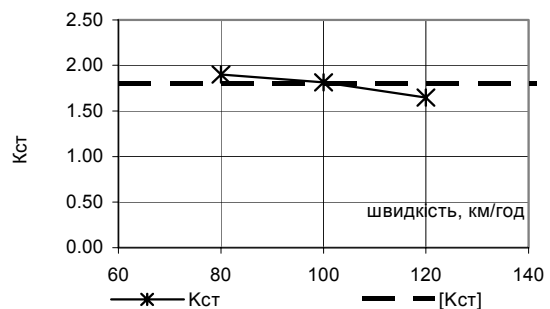


Рис. 5. Залежність коефіцієнта стійкості пасажирського вагона від швидкості руху в пологих кривих на етапі після однієї стабілізації

На рис. 6–8 наведені залежності досліджуваних показників на етапі після двох стабілізацій колії. Діапазон швидкостей складає 80...140 км/год. Графіки коефіцієнта вертикальної динаміки на буксовому і центральному ступенях (рис. 6–7) показують, що ці параметри досягають нормативних значень при швидкості 140 км/год. Обмеження швидкості за коефіцієнтом стійкості (рис. 8) настає при швидкості руху 120 км/год. Таким чином, допустима швидкість для пасажирських поїздів по колії після двох стабілізацій складає 120 км/год.

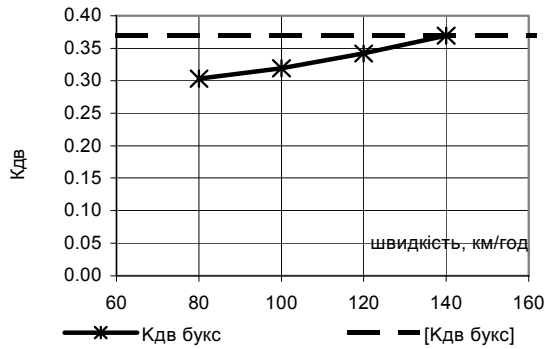


Рис. 6. Залежність коефіцієнта вертикальної динаміки на буксовому ступені пасажирського вагона від швидкості руху в пологих кривих на етапі після двох стабілізацій

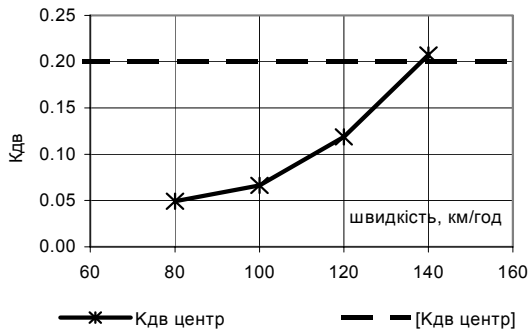


Рис. 7. Залежність коефіцієнта вертикальної динаміки на центральному ступені пасажирського вагона від швидкості руху в пологих кривих на етапі після двох стабілізацій

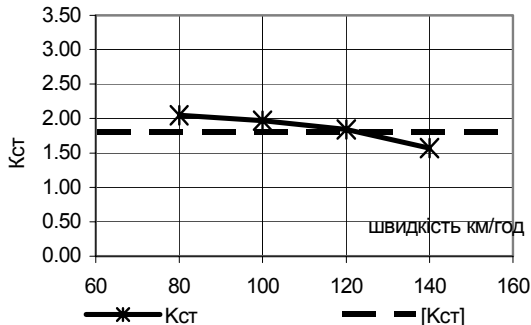


Рис. 8. Залежність коефіцієнта стійкості пасажирського вагона від швидкості руху в пологих кривих на етапі після двох стабілізацій

На рис. 9–10 наведені залежності динамічних показників на ділянці після двох стабілізацій колії і пропуску 1 млн т вантажів. Діапазон швидкостей – 60...140 км/год. Із графіків видно, що обмеження швидкості за значенням коефіцієнта вертикальної динаміки на буксовому ступені ресорного підвішування (рис. 10) і коефіцієнта стійкості (рис. 11) настає при швидкості руху 120 км/год.

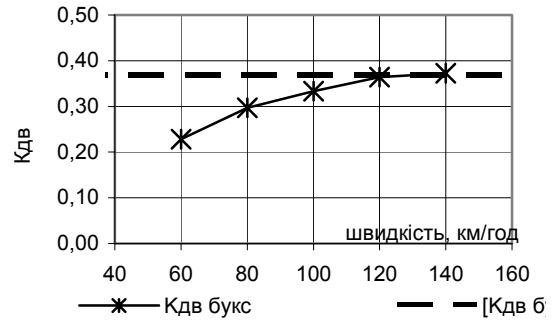


Рис. 9. Залежність коефіцієнта вертикальної динаміки на буксовому ступені пасажирського вагона від швидкості руху в пологих кривих на етапі після двох стабілізацій та пропуску 1 млн т вантажу

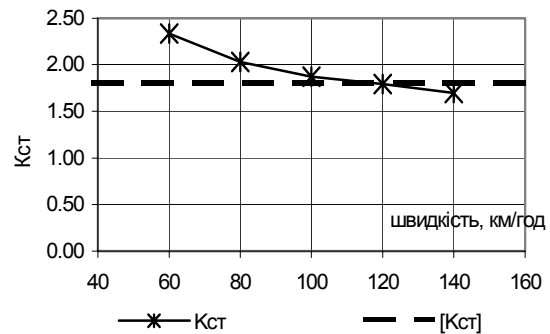


Рис. 10. Залежність коефіцієнта стійкості пасажирського вагона від швидкості руху в пологих кривих на етапі після двох стабілізацій і пропуску 1 млн тонн вантажів

Залежності, одержані при дослідженні взаємодії колії і порожнього вантажного вагона в пологих кривих, наведені на рис. 11–13. Оскільки коефіцієнти вертикальної і горизонтальної динаміки приймають значення значно нижчі нормативних (коефіцієнт вертикальної динаміки не перевищує 0,6 при нормативному значенні 0,85, а горизонтальної – 0,2 при нормативному значенні 0,4), то на рисунках наведені тільки графіки коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки, за яким обмежувалися швидкості руху порожнього вантажного вагона.

Аналіз одержаних залежностей для коефіцієнта стійкості показав, що після всіх етапів робіт допустима швидкість руху порожнього вантаж-

ного вагона складає 60 км/год. Це обумовлено нестійкістю руху порожнього вантажного вагона в горизонтальній площині [9]. Тому на рис. 11–13 наведені залежності коефіцієнта $K_{ст}$ від швидкості та графіки процесів при швидкості руху 60 км/год і 80 км/год тільки на етапі робіт після двох стабілізацій колії.

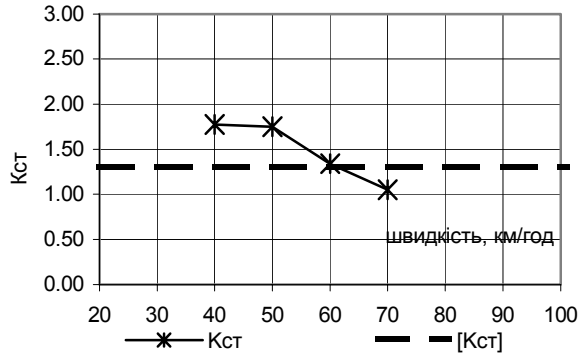


Рис. 11. Залежність коефіцієнта стійкості порожнього вантажного вагона від швидкості руху в пологих кривих на етапі після двох стабілізацій

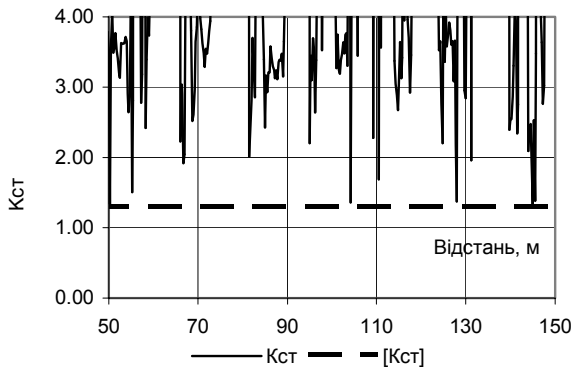


Рис. 12. Залежність коефіцієнта стійкості для порожнього вантажного вагона при швидкості руху 60 км/год на етапі після двох стабілізацій

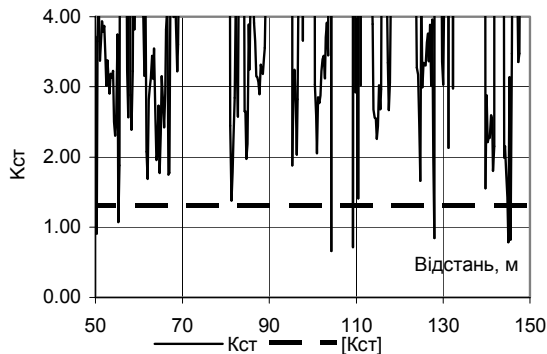


Рис. 13. Залежність коефіцієнта стійкості для порожнього вантажного вагона при швидкості руху 80 км/год на етапі після двох стабілізацій

Дослідження для навантаженого вантажного вагона виконувалися для всіх етапів робіт. В Україні для навантажених вантажних

вагонів з візками моделей 18-100 (ЦНИИ-ХЗ) і 18-101 з буксами на роликових підшипниках і навантаженням на вісь відповідно 235 і 220 кН встановлена допустима швидкість 90 км/год [11]. Тому розрахунки виконувалися при швидкості руху 90 км/год.

Результати розрахунків для навантаженого вантажного вагона після виправки при одній стабілізації колії наведені на рис. 14. Оскільки аналіз результатів показав, що коефіцієнти вертикальної і горизонтальної динаміки не перевищують допустимих значень, а мінімальні значення коефіцієнта стійкості досягають нормативних значень, то на рис. 14 наведені залежності тільки для коефіцієнта стійкості.

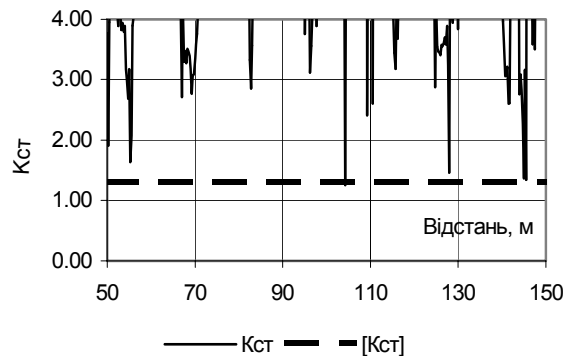


Рис. 14. Залежність коефіцієнта стійкості для навантаженого вантажного вагона при швидкості руху 90 км/год на етапі після однієї стабілізації

Виходячи з цього, для ділянок, де виконувалася одна або дві стабілізації колії, рекомендується встановити для навантаженого вантажного вагона допустиму швидкість руху 90 км/год.

На основі експериментальних та теоретичних досліджень сформульовані наступні практичні пропозиції.

При виконанні вимог [12] відносно стану колії після її ремонту допустима швидкість руху пасажирських вагонів в прямих та пологих кривих по колії, виправленій машинами типу ВПО і ВПР, після одного проходу динамічного стабілізатора складає 100 км/год, а для навантажених вантажних вагонів встановлюється рівною 90 км/год.

При виконанні вимог [12] відносно стану колії після її ремонту допустима швидкість руху пасажирських вагонів в пологих кривих по колії, виправленій машинами типу ВПО і ВПР, після двох проходів динамічного стабілізатора складає 120 км/год, а для навантажених вантажних вагонів встановлюється рівною 90 км/год відповідно до [9].

Аналіз отриманих результатів дозволяє сформулювати наступні пропозиції з технології виконання модернізації колії на довгостроково закритому перегоні.

Після заміни рейкошпальної решітки й очищення щебеню машиною РМ-80 необхідно виконати виправлення колії машиною типу ВПО, потім виправлення колії машиною типу ВПР, а потім її стабілізацію. Після заміни інвентарних рейок плітками і суцільного виправлення колії машинами типу ВПР необхідно виконати другу стабілізацію колії

Крім того, пропонується після пропуску 1 млн т вантажу виконати додаткове суцільне виправлення колії машинами типу ВПР і ще одну стабілізацію колії динамічним стабілізатором.

Це забезпечить сталу роботу колії під поїздами на тривалий термін, а також допустиму швидкість руху поїздів, більшу 120 км/год. Але для визначення конкретного значення допустимої швидкості руху поїздів у таких умовах необхідно додатково виконати спеціальні дослідження.

Розроблена методика визначення допустимих швидкостей руху поїздів може бути застосована в інших випадках. Наприклад, після ремонту колії в кривих середнього та малого радіуса та ін.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Леванков И. С. О выборе расчетных значений модуля упругости подрельсового основания // Исследование взаимодействия пути и подвижного состава: Сб. науч. та. ДИИТа. – Д.: 1967. – Вып. 88. – С. 83–88.
2. Гапеенко Ю. В. Стабилизация пути после глубокой очистки балласта // Путь и путевое хозяйство. 1997. – № 10. – С. 13–16.
3. Цикунов Ю. И. Динамический стабилизатор пути в технологических цепочках / Ю. И. Цикунов и др. // Путь и путевое хозяйство. 2000. – № 6, – С. 22–23.

4. Данович В. Д. О переносном движении вагонов по криволинейным участкам пути / В. Д. Данович, В. Г. Ленивенко, Н. В. Халипова. // Транспорт. – Д.: Нова ідеологія, 1999. – Вып. 4. – С. 31–37.
5. Данович В. Д. Уравнения движения железнодорожного экипажа в переходных и круговых кривых / В. Данович, А. Г. Рейдемейстер, Н. В. Халипова // Транспорт. – Д.: Нова ідеологія, 2002. – Вып. 10. – С. 86–91.
6. Ландау Л. Д. Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 210 с.
7. Уманов М. И. Экспериментальные исследования по воздействию на путь в переходных кривых при наличии несовпадений отводов кривизны и возвышения / М. И. Уманов, Л. Я. Воробейчик, Н. В. Халипова // Транспорт. – Д.: Нова ідеологія, 2001. – Вып. 10. – С. 106–111.
8. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: Гос НИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
9. Волошко Ю. Д. Особенности воздействия на путь длинносоставных поездов из порожних полувагонов / Ю. Д. Волошко, М. И. Уманов // Проблемы механики ж.-д. тр-та: Динамика, прочность и надежность подвижного состава: Тез. док. конф. – Д., 1992. – С. 48–49.
10. Данович В. Д. Определение допускаемых скоростей движения грузовых вагонов по железнодорожным путям колеи 1520 мм / В. Д. Данович, В. В. Рыбкин, С. В. Мямлин и др. // Вестник Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. – Д.: Нова ідеологія, 2003. – Вып. 2. – С. 77–86.
11. Наказ № 233-Ц від 21.11.96 р. Про порядок планування, виконання, прийомки і забезпечення високої якості ремонтно-колійних робіт. 8 с.

Надійшла до редколегії 23.05.2005.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ Ж.-Д. ТРАНСПОРТА И МАРШРУТНЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПРОМЫШЛЕННОГО УЗЛА

Розглянуто питання взаємодії залізничного транспорту та маршрутних засобів доставки вантажу споживачам, забезпечення оптимальних схем функціонування маршрутної мережі у відповідності з можливостями транспортного вузла.

Рассмотрены вопросы взаимодействия железнодорожного транспорта и маршрутных средств доставки грузов потребителям, обеспечения оптимальных схем функционирования маршрутной сети в соответствии с возможностями транспортного узла.

The article is devoted to the issues of interaction between railway transport and fixed route modes of goods delivery to customers, the provision of optimal functional schemes of the route network, in accordance with specific capacities of a transport junction.

Работа любого промышленного узла, особенно на предприятиях непрерывного цикла, связана с необходимостью обеспечения единого надежного и гарантированного от сбоев транспортного обеспечения протекающих процессов. Это особенно актуально для производств, характеризующихся высокой динамикой, крупными или территориально распределенными объектами и, как следствие, интенсивными грузопотоками. Поддерживать необходимый ритм, обеспечивая наличие минимального задела, призван весь транспортный парк, задействованный на предприятии. Особую роль в нем отводится средствам регулярного действия, занятым на периодической, с заданной частотой, доставке груза из мест отправления в места назначения. Это так называемый маршрутный транспорт.

Маршрутизация перевозок. Предыстория вопроса

В [1] указывается, что маршрут – это заранее установленный путь следования или совокупность путей и стрелок, по которым следует поезд или локомотив при многократном повторении операций. Таких операций множество. На железной дороге это и прием/отправление груза, и сквозной проход поезда, и следование по станции и др. операции. Движение при этом осуществляется маршрутными поездами, т. е. грузовыми поездами из специально подобранных вагонов одного назначения, в которых груз перевозится без переработки в ходе транспортировки. Такой метод организации, обеспечивающий быстрее перемещение грузов к пунктам назначения, определяется маршрутизацией, которая на большегрузном транспорте является центральной.

Центральная маршрутизация чаще всего представляет собой сложную систему управления стрелками и сигналами на маршруте, позволяя осуществлять необходимые операции в заданной последовательности, диктуемой центральным пунктом управления. Другие формы маршрутизации применяются для решения местных локальных задач, что объяснимо меньшими объемами и, как следствие, меньшими грузопотоками.

Таким образом, маршрутный транспорт играет значительную роль в достижении стабильного и бесперебойного функционирования предприятий. Однако вследствие многообразия выпускаемой продукции, различных объемов и технологической специфики производства он различен. Для крупных заводов, мест добычи сырья или топлива применяются, как правило, железнодорожные средства доставки. Для средних и мелких производств, сельских объектов доминируют перевозки автомобильным транспортом. В городской черте и пригородных сообщениях развита сеть малых маршрутных средств.

Наряду с этим, значительное развитие и усложнение инфраструктуры производств, высокая насыщенность транспортом дорожной сети приводят к необходимости изменения сложившихся схем организации. Возникновение заторов, рост аварийности, задержки с поставками грузов требуют принятия оперативных мер.

В этой связи представляет интерес изучение взаимодействия различных видов транспорта, их влияние друг на друга и на транспортную проблему в целом. Попробуем на основе моделирования и учета статистических закономерностей проследить наметившиеся тенденции, предложить методики построения оптимальных маршрутных схем.

Железнодорожные сообщения.

Структурные изменения последних лет

Маршрутизация промышленного транспорта наиболее эффективна и заметна именно в сфере железнодорожных перевозок. В первую очередь это касается обслуживания зон добычи полезных ископаемых, доставки сырья для предприятий металлургической и химической промышленности. Большие объемы перевозимых грузов, необходимость соблюдения технологической последовательности процессов, циклические операции обусловили интенсивное развитие железнодорожной сети.

Как правило, при размещении узловых станций, мест погрузки/выгрузки товара учитывалось расположение крупных потенциальных заказчиков. Однако в силу экономических изменений многие из них были расформированы или перешли в другие формы деятельности. Грузооборот стал меньше и эффективность таких перевозок снизилась. Рост числа мелких потребителей привел к расширению сети оптовых баз, где роль железнодорожных перевозок осталась по-прежнему высока. Поэтому для потребителя стало важным определиться с организацией и режимом работы станций, где чаще всего и размещаются оптовые базы и склады.

Выбор мест размещения зон погрузки/выгрузки на ж.-д. промышленном транспорте

Выбор мест погрузки/выгрузки обусловлен наличием подъездных путей и мест хранения грузов. Для этого требуется учесть и особенности погрузочных средств, возможность совершения маневра и перебазирования к разным участкам, технологические различия.

Большое значение для определения скорости и объемов погрузочно/разгрузочных работ играет размер фронта. Согласно [3] он определяется вместимостью железнодорожных путей,

предназначенных для технологических операций с грузом, выраженной числом одновременно обрабатываемых вагонов. Длина фронта зависит не только от характера перевозимых грузов (для сыпучих – по длине состава или приемника; для жидкостей – расположением мест слива; для контейнерных или упакованных изделий – протяженностью подъездных путей и технологической зоны работы кранов), но и от размеров самой станции.

Пути, определяющие трассу движения составов, образуют сложную сеть коммуникаций, структурно делятся на главные (по которым происходит движение транспортных средств между станциями), подъездные (на подходе к станции) и станционные (предназначенные для маневра и перемещения в пределах станции, формирования состава, ремонтных работ). Их протяженность и конфигурация различны и определяются размерами станции, ее месторасположением.

В контексте рассматриваемой задачи для нас более важно знать план размещения станционных путей, поскольку они определяют расположение мест стоянок, зон погрузки/выгрузки, доступ к складам. Такие зоны являются крупными стационарными объектами и в дальнейшем будут использованы как узловые отправные точки плана маршрутизации.

Внутризаводской маршрутный транспорт. Критерии выбора и сферы применения

Структурные сдвиги на производстве находят свое отражение в изменении пропорций участия различных видов промышленного транспорта в освоении внутризаводских перевозок [4]. Это наглядно отражено в табл. 1, где прослеживается тенденция увеличения доли внутризаводских перевозок непрерывным и специальным видами транспорта и соответствующим снижением работы железнодорожных средств.

Таблица 1

Распределение перевозок между различными видами транспорта, %

Вид транспорта	1985	1990	1995	2000	2005
Железнодорожный	11,60	12,50	13,20...13,40	14,20...14,70	15,1...15,7
Автомобильный	19,60	22,00	13,20...23,70	24,10...24,60	25,4...26,1
Непрерывный	4,10	5,20	6,80...7,10	8,60...9,10	10,8...11,5
Водный	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Причем среди самих межцеховых перевозок, согласно [4] заметно преобладает автомо-

бильный транспорт. Эти сведения подтверждаются данными представленными в табл. 2.

Доля участия разных видов транспорта в общем объеме межцеховых перевозок, %

Транспорт	ВАЗ	ЗИЛ	ГАЗ	АЗЛК
Железнодорожный	–	35,0	17	–
Автомобильный	88	38,0	33	20,0
Тягачи с тележками	–	17,0	41	9,0
Электротележки	–	5,5	–	5,8
Конвейерный	9	4,5	5	13,0
Пневмо- и гидротранспорт	3	–	4	–

В этой связи больший акцент следует ставить на планировании работы автомобильных маршрутов, особенно для удаленных пунктов назначения или отправки. Это больше подходит для доставки штучной продукции, где размер партии невелик, но товар востребован. Для технологических линий с непрерывным процессом поставок сырья более эффективен конвейерный транспорт. Он позволяет автоматизировать процесс, математически рассчитать и применить четкие схемы взаимодействия с другими видами транспорта, с погрузочными устройствами, складскими объектами. Издержки его будут зависеть от объемов грузопотока и снижаться с его ростом.

Организация взаимодействия разных видов маршрутного транспорта

Согласованность выполняемых операций перевозки разными видами транспорта достигается, в первую очередь, решением организационных вопросов.

Для учета интересов разных перевозчиков, разных хозяйствующих субъектов требуется наличие достоверной информации [2]:

- картографический план региона и местоположение задействованных объектов;
- сферы интересов поставщиков и потребителей;
- примерные объемы перевозимого груза в течение сезона и за календарный период;
- номенклатура и количество имеющегося подвижного состава.

Эти сведения должны обеспечить переход к комплексной модернизации транспортной сети. В особенности на маршрутных сообщениях, где первым шагом выступает этап планирования.

Планирование маршрутов. Учет зон тяготения и составление картограмм корреспонденций. Построение графа связей

Планирование маршрутной сети и ее построение является многокомпонентным процес-

сом, учитывающим наряду с экономической выгодой и ряд других критериев (социальных, экологических и др.). Таким инструментом, адекватно отражающим интенсивность движения на отдельных участках, служит картограмма [5].

Картограмма – графическая схема распределения грузо- или пассажиропотоков по длине маршрута и участков транспортной сети. В пределах перегонов она постоянна. Ее цель заключается в определении участков большей или меньшей транспортной нагрузки на сеть. Поэтому среди основных характеристик картограмм выделяют грузопоток. Он бывает максимальным, средним или эквивалентным.

Максимальный грузопоток F_{\max} считается грузопоток наиболее загруженного перегона или группы перегонов (участков сети).

Средний грузопоток $F_{\text{ср}}$ определяется по формуле

$$F_{\text{ср}} = \sum_{s=1}^{s=n} \frac{F_s l_s}{l_m}, \quad (1)$$

где n – количество перегонов маршрута; l_s – длина s -го маршрута; l_m – длина маршрута (в целом).

Эквивалентный грузопоток рассчитывается по формуле, предложенной А. Х. Зильберталем:

$$F_{\text{э}} = m \sqrt{\frac{F_s l_s}{l_m}}, \quad (2)$$

где $m = 4 \dots 5$ – эмпирический коэффициент.

Для реальной оценки степени сбалансированности маршрутов и увязки их расположения с крупными станциями, местами погрузки или выгрузки товаров, сырья (железнодорожными) необходимо располагать графом трасс следования. Для его подложки применяется картографическая основа или генплан территории (масштаба 1:500 – 1:100 000, что зависит от размеров исследуемой зоны). На ней указыва-

ются места выгрузки, точки базирования заказчиков продукции, склады (возле железной дороги – пакгаузы). В дальнейшем идет построение связного графа, где определяются зоны тяготения и накладываются связи (графически это отражено своим цветом и индивидуальным слоем).

Критерии зональной обеспеченности. Определение и расчет

В ходе исследования было предложено несколько критериев, которые должны позволить получить численные характеристики качества функционирования маршрутных транспортных средств. Это так называемые зональные коэффициенты обеспеченности, т. е. коэффициенты, характеризующие отдельные районы и участки маршрутной сети:

- коэффициент K_{Dm} дублирования трассы, рассчитываемый по формуле

$$K_{Dm} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^k L_{inc_j} - \sum_{u=1}^t \frac{L_{cross_u}}{u} \right)}{L_m}, \quad (3)$$

где n_i – количество i -х проходящих по данной трассе маршрутов; k – количество j -х дублирующих трассу участков маршрута; t – количество u -х пересекающихся участков маршрутов; L_{inc_j} – протяженность j -го участка совпадения маршрутов; L_{cross_u} – протяженность u -го участка пересечения маршрутов; L_m – цикловая протяженность трассы данного маршрута.

- транспортная емкость маршрута E_{Tm} , рассчитываемая по формуле

$$E_{Tm} = K_{cp.m} + L_m \sum_{i=1}^n K_{Dm_i} K_{cp.Dm_i} \sum_{j=1}^k \frac{1}{L_{Dm_j}}, \quad (4)$$

где $K_{cp.m}$ – среднее количество единиц транспорта на маршруте; K_{Dm_i} – коэффициент дублирования трассы i -м маршрутом; $K_{cp.Dm_i}$ – среднее количество единиц дублирующего i -го транспорта на исследуемом маршруте; L_{Dm_j} – протяженность j -го, дублирующего трассу участка, принадлежащего i -му маршруту.

- удельная плотность маршрутного обеспечения ρ_{MO} , рассчитываемая как

$$\rho_{MO} = \frac{m \sum_{f=1}^F (L_{fm} I_{f3n})}{S_{тер}}, \quad (5)$$

где m – количество маршрутов, проходящих через зону исследуемой территории или находящихся внутри; L_{fm} – длина участка f -го маршрута на исследуемой территории, км; I_{f3n} – индекс значимости f -го маршрута; $S_{тер}$ – общая площадь исследуемой территории, км².

Данные критерии применены для оценки размещения и функционирования маршрутной сети любого промышленного узла.

Для их практического применения необходимо выделить характерные зоны (участки плана) и определить их границы. Форма зон определялась функциональной принадлежностью территории. Обязательным условием было несовпадение границ зон с дорогой в тех местах, где она имеет одностороннее движение на смежных участках маршрутов.

Дальнейшие процедуры связаны с оценкой полученных значений свойств каждого из участков и их сведение в общую таблицу. Анализ такой таблицы (таблиц, если присутствует фактор сезонности или временные отличия) проводится с помощью средств математической статистики. В частности, предлагается определение и сравнение дисперсий для получения модели распределения маршрутизации региона/промышленного узла.

Оптимизационная модель транспортного взаимодействия различных средств

Предлагаемая модель взаимодействия различных транспортных средств предусматривает решение следующих задач:

- получение картографического/схемного материала и установление узловых точек тяготения (ж.-д. станций, складов, потребителей и пр.);
- определение характеристик и возможностей подъездных путей;
- построение графа связей на основе карт следования;
- планирование грузопотоков, расчет и анализ маршрутной сети с разработкой корректив по формулам (1)–(5) и в соответствии с рисунком;
- построение схемы маршрутизации промышленного узла.

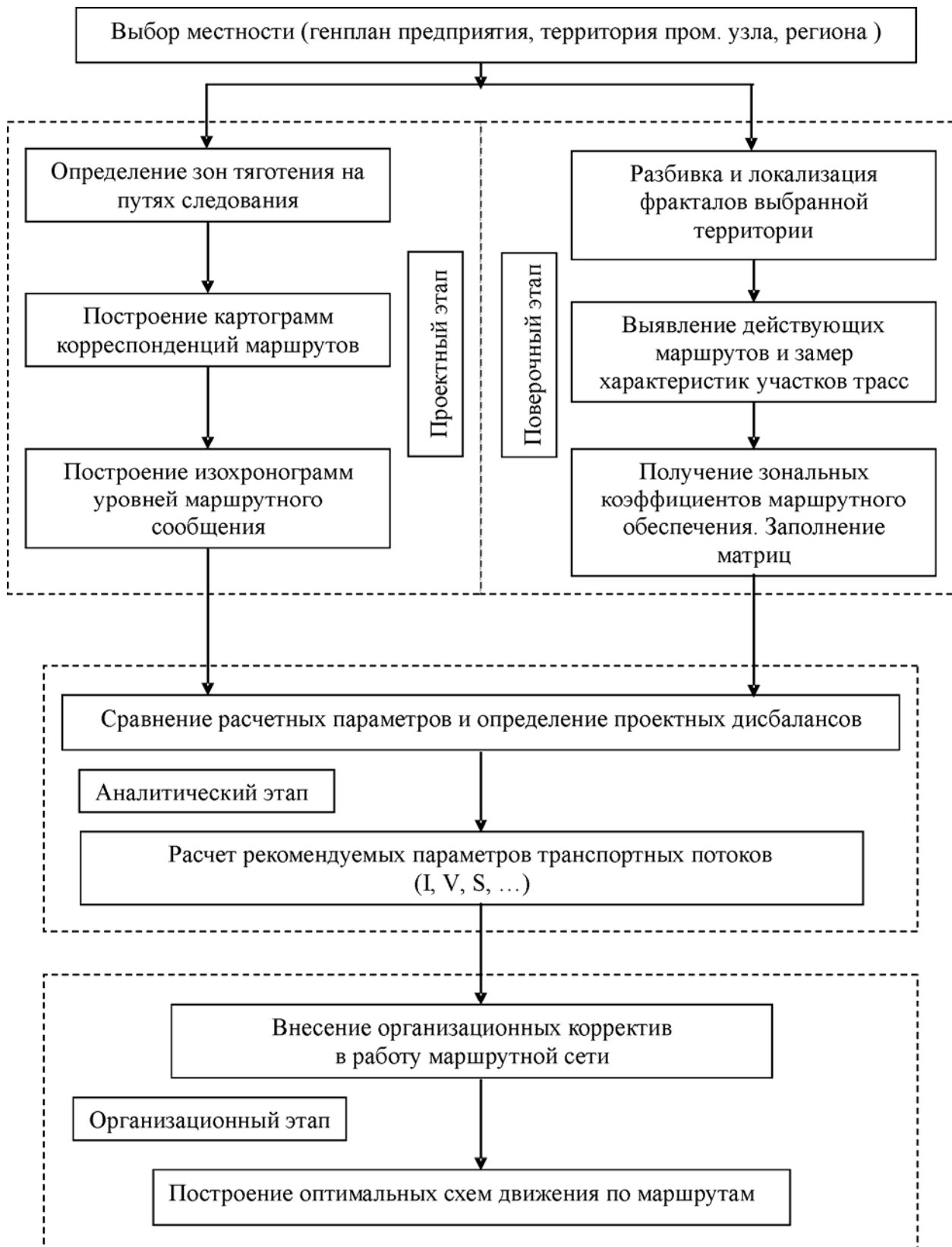


Рис. Логистическая схема разработки/корректировки маршрутного сообщения

Выводы.

Перспективы дальнейших исследований

Оценивая данный подход, следует сказать, что за рамками обзора остались не рассмотрены те

транспортные факторы, которые требуют систематизации (категории используемых транспортных средств, интенсивность движения на трассах, сезонные и конъюнктурные отличия рынка и ряд др.). Их детальное изучение на конкрет-

ной информационной базе, выделение наиболее значимых и модернизация полученных моделей должны послужить тематикой дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Першин С. П. Азбука железнодорожного дела: термины, понятия, определения: Словарь. – М.: Транспорт, 1990. – С. 102, 168.
2. Повороженко В. В. Основы взаимодействия железных дорог с другими видами транспорта: Учебн. для вузов / В. В. Повороженко, Н. К. Сологуб, Н. А. Тимошин, В. Г. Галабурда;

Под ред. В. В. Повороженко. – М., Транспорт, 1986. – С. 123–124.

3. Перевозка грузов по железным дорогам: Справочник / Под общ. ред. Н. А. Гундобина – 2-изд, пер. и доп. – М.: Транспорт, 1978. – С. 55–58.
4. Акулиничев В. М. Генеральный план и транспорт промышленных предприятий: Учебн. для вузов / В. М. Акулиничев, А.С. Гельман и др. – М.: Стройиздат, 1990 – С. 8, 257.
5. Акулиничев В. М. Организация перевозок на промышленном транспорте: Учебн. для вузов – М.: Высш. шк., 1983 – С. 69–77.

Поступила в редколлегию 30.05.2005.

В. В. ГАРБАРУК, П. В. ГЕРАСИМЕНКО, С. В. ЕЛИЗАРОВ,
В. А. ХОДАКОВСКИЙ (ПГУПС, Россия)

ОЦЕНКА ЧИСЛЕННОСТИ УЧЕБНО-ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ПЕРСОНАЛА ЛАБОРАТОРИЙ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАФЕДР

Викладені методичні вказівки щодо побудови математичної моделі оцінювання кількості навчально-допоміжного персоналу для забезпечення учбових практик всіх видів.

Изложены методические указания по построению математической модели оценивания количества учебно-вспомогательного персонала для обеспечения учебных практик всех видов.

The article provides methodical guideline on construction of mathematical model for evaluation of the number of auxiliary educational staff for provision of training workshops of all kinds.

В связи с существенными изменениями связей вузов с внешними организациями, обеспечивавшими учебные практики всех видов, потребовалось изменение внутренней штатной структуры учебных лабораторий, на которые возложены функции по обеспечению учебного процесса, в том числе в той части, которая ранее обеспечивалась внешними организациями.

В статье предлагается методический аппарат по построению математической модели оценивания количества учебно-вспомогательного персонала на основе опыта, определившего структуру и численность лабораторий в вузе. С этой целью на первом этапе надлежало провести анализ штатной структуры существующих лабораторий, которая сложилась до 90-х гг., установить факторы, определившие количество сотрудников лабораторий, и смоделировать зависимости между количеством сотрудников лабораторий и определяющими их число факторами.

Как известно, на количество штатных сотрудников учебных лабораторий влияет большое число факторов. Из числа этих факторов руководители кафедр и преподаватели, прежде всего, выделяют следующие: стоимость материальной базы кафедры, в рублях; количество лабораторий на кафедре; трудозатраты на проведение лабораторных работ, в часах; трудозатраты на проведение расчетно-графических работ, в часах; трудозатраты на проведение курсового и дипломного проектирования (курсовых и дипломных работ), в часах; общий объем занятий, проводимых кафедрой, в часах; объем производственной практики, в часах.

Построение методического аппарата и оценки влияния на штат перечисленных факторов осуществлялись на основе обработки выборки статистических данных по 53 кафедрам ПГУПС

Первоначально в качестве регрессионной зависимости между численностью учебно-вспомогательного персонала и каждой из девяти независимых переменных была выбрана линейная связь. Тогда при наличии девяти объясняющих переменных модель множественной линейной регрессии имеет вид

$$\hat{y}_{x_i}^{(1)} = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_7 + b_8x_8 + b_9x_9,$$

где $\hat{y}_{x_i}^{(1)}$ – теоретическое значение численности штата лабораторий, чел.; x_1 – сумма материальных ценностей, тыс. руб.; x_2 – число лабораторий; x_3 – объем лабораторных работ, час; x_4 – объем расчетно-графических работ, час; x_5 – объем курсового проектирования, час; x_6 – объем дипломного проектирования, час; x_7 – объем производственной практики, час; x_8 – общая нагрузка, час; x_9 – численность преподавательского состава, чел.

На основании выполненных расчетов с помощью метода наименьших квадратов получена функция множественной регрессии:

$$\hat{y}_{x_i}^{(1)} = 2,28946 + 0,00003x_1 + 0,38697x_2 + 0,00101x_3 - 0,00067x_4 + 0,00006x_5 + 0,00002x_6 - 0,00172x_7 + 0,00001x_8 + 0,12135x_9.$$

Поскольку в модели множественной регрессии принято 9 объясняющих переменных, то для выявления качества линейной зависимости результата от факторов используется коэффи-

циент множественной детерминации. Он представляет собой отношение суммы квадратов отклонений функции регрессии от среднего значения и полной суммы квадратов отклонений:

$$r_{\hat{y}_x, 1, 2, \dots, k}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_{x_i} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где \hat{y}_{x_i} – теоретическая численность штата; y_i – реальная численность штата; \bar{y} – среднее значение реальной численности штата.

Как известно, для моделей множественной регрессии целесообразно вычислять скорректированный коэффициент детерминации $r_{\hat{y}_x, 1, 2, \dots, k}^2$, чтобы учесть влияние как объясняющих переменных, так и объема выборки. Скорректированный коэффициент множественной детерминации вычисляется по формуле

$$r_{\text{корр}}^2 = 1 - \left[\left(1 - r_{\hat{y}_x, 1, 2, \dots, k}^2 \right) \frac{n-1}{n-k-1} \right],$$

где k – количество независимых переменных в регрессионной модели.

Хотя метод наименьших квадратов позволяет вычислить численность штата с минимальным отклонением от наблюдаемых значений, наличие суммы квадратов ошибок свидетельствует о том, что линейная регрессия не дает абсолютной точности прогноза, если конечно, точки прогноза не лежат на регрессионной прямой. Следовательно, необходима статистика, которая позволила бы оценить отклонение предсказанных значений штата кафедры от его реальных значений. В качестве такой статистики принято использовать среднеквадратическую ошибку результата

$$S_{\hat{y}_x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{x_i})^2}{n-2}},$$

где \hat{y}_{x_i} – теоретическая численность штата; y_i – реальная численность штата.

В табл. 1 представлены значения коэффициентов множественной корреляции, множественной детерминации, скорректированного коэффициента детерминации и среднеквадратической ошибки рекомендуемого штата для полученной модели.

Таблица 1

Регрессионная статистика

Коэффициент множественной корреляции	Коэффициент множественной детерминации	Скорректированный коэффициент детерминации	Среднеквадратическая ошибка результата
0,736	0,541	0,446	2,986

Из результатов представленных в табл. 1 следует, что 54 % изменения численности штата объясняется изменением всех девяти независимых переменных, а 46 % изменчивости числа работников кафедры определяется другими факторами, не учтенными в регрессионной модели. Причем значение скорректированного коэффициента детерминации равно 0,45 свидетельствует, что 45 % вариации числа работников кафедры объясняется изменчивостью факторов, а также выбранным их количеством и объемом выборки.

Среднеквадратичная ошибка результата равна 2,986. Она указывает на статистически значимую зависимость, существующую между переменными и помогает найти интервальные значения искомой переменной.

На рисунке приведены остатки регрессионной модели, то есть отклонения теоретической численности штата работников от реального числа работников вспомогательного персонала кафедр.

Из анализа графика отклонений, представленного на рисунке видно, что они одинаково часто принимают как положительные, так и отрицательные значения. Это позволяет предполагать, что регрессионные остатки не имеют автокорреляции. Для подтверждения этого предположения используется статистика Дарбина-Уотсона. Эта статистика оценивает корреляцию между соседними отклонениями по соотношению

$$D = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2},$$

где e_i – остаток, соответствующий i -ому уровню.

Если между соседними отклонениями существует положительная автокорреляция, значение D будет близким к нулю. Если остатки не коррелируют между собой, значение D стремится

к 2. В случае отрицательной автокорреляции значение статистики Дарбина-Уотсона близко к 4.

Для рассматриваемой модели табличные нижнее и верхнее критические значения статистики Дарбина-Уотсона соответственно равны 1,22 и 2,78. Расчетное значение D -статистики равно 1,40. Поскольку $1,22 < D < 2,78$, то авто-

корреляция между остатками отсутствует, а следовательно, данный критерий подтверждает вывод, что линейная функция регрессии адекватно описывает опытные данные. Результаты дисперсионного анализа при уровне значимости $\alpha = 0,05$ представлены в табл. 2.

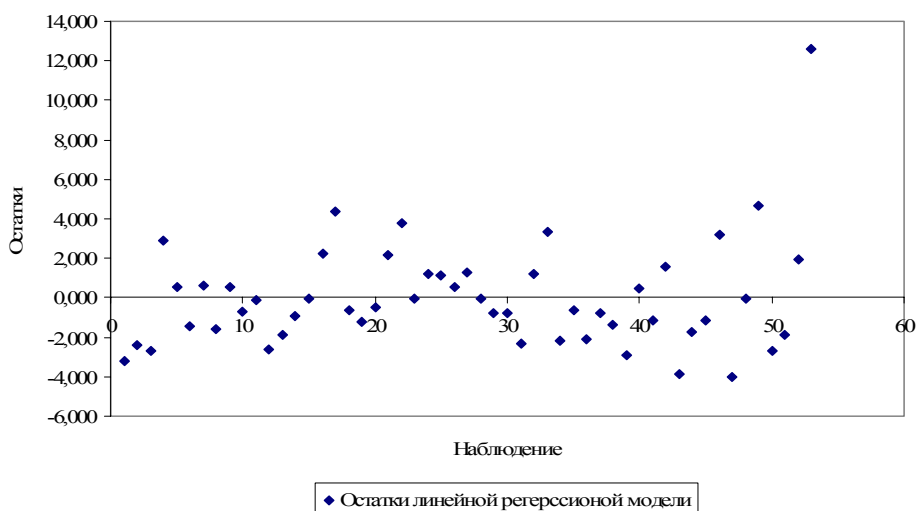


Рис. 1. Отклонения теоретической численности штата от реальной

Таблица 2

Дисперсионный анализ

	Степени свободы	Сумма квадратов	Дисперсия	F -статистика
Регрессия	9	452,617	50,291	5,642
Остаток	43	383,277	8,913	значимость F
Общее	52	835,894		0,000039
Коэффициент a	2,28946	1,15331	1,98512	0,05353
Коэффициент b_1	0,00003	0,00009	0,34373	0,73272
Коэффициент b_2	0,38697	0,21437	1,80515	0,07806
Коэффициент b_3	0,00101	0,00028	3,63468	0,00074
Коэффициент b_4	-0,00067	0,00090	-0,74164	0,46234
Коэффициент b_5	0,00006	0,00032	0,17815	0,85944
Коэффициент b_6	0,00002	0,00047	0,04499	0,96432
Коэффициент b_7	-0,00172	0,00135	-1,26826	0,21153
Коэффициент b_8	0,00001	0,00015	0,06846	0,94574
Коэффициент b_9	0,12135	0,11553	1,05038	0,29941

Для проверки нулевой гипотезы – об отсутствии линейной связи между штатом и объясняющими параметрами – использован F -критерий.

Расчетная F -статистика равна среднему квадрату, обусловленному регрессией, деленному на дисперсию ошибок

$$F = \frac{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_{x_i} - \bar{y})^2}{\frac{1}{n-k-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{x_i})^2},$$

где \hat{y}_{x_i} – теоретическая численность штата; y_i – реальная численность штата; \bar{y} – среднее значение реальной численности штат.

Тогда, если $F > F_{k,n-k-1}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$, то нулевая гипотеза отклоняется, в противном же случае нулевая гипотеза принимается. Здесь $F_{k,n-k-1}$ табличное критическое значение F -статистики, k – число переменных регрессионной модели, а n – количество кафедр.

Критическое значение F -статистики с 9 и 43 степенями свободы равно 2,11. Расчетная F -статистика равная 5,64 больше критического 2,11, p -значение равно $0,00004 < 0,05$. Следовательно, нулевая гипотеза отклоняется, и штат

кафедры линейно связан хотя бы с одной из объясняющих переменных.

В дальнейшем по аналогичной схеме выполнено построение линейной множественной функции регрессии с различным числом факторов. С помощью критерия Фишера установлены факторы, которые оказывают наиболее сильное влияние на результат. К таким факторам относятся количество лабораторий, количество часов лабораторных работ, стоимость материальной базы и суммарная нагрузка кафедры. В этом случае функция регрессии имеет вид

$$\hat{y}_{x_i}^{(2)} = 2,13114 + 0,41583x_2 + 0,00101x_3 - 0,00114x_7 + 0,12685x_9.$$

В табл. 3 представлены значения коэффициентов множественной корреляции, множественной детерминации, скорректированного коэффициента детерминации и среднеквадратической ошибки рекомендуемого штата для полученной модели.

Таблица 3

Регрессионная статистика

Коэффициент множественной корреляции	Коэффициент множественной детерминации	Скорректированный коэффициент детерминации	Среднеквадратическая ошибка результата
0,729	0,532	0,493	2,855

Для рассматриваемой модели показано, что расчетное значение D -статистики сохраняет значение равное 1,40 и находится в допустимых пределах, а следовательно, регрессионные остатки являются независимыми. Отсутствие автокорреляции между остатками свидетельствует, что данная линейная функция регрессии сохраняет адекватное описание зависимости.

Критическое значение F -статистики с 4 и 48 степенями свободы равно 2,57. Расчетная F -статистика равна 11,02, т. е. больше критического, которое равняется 2,57. Следовательно, нулевая гипотеза отклоняется, и штат кафедры линейно связан хотя бы с одной из объясняющих переменных.

При уровне значимости равном 0,05 с помощью t -статистики с 47 степенями свободы установлена статистическая значимость коэффициентов функции регрессии.

При поиске более качественной модели рассматривались нелинейные зависимости учебно-вспомогательного персонала от указанных четырех факторов. На основании выполненных расчетов получены функции степенной и показательной множественных регрессий. В частности, степенная функция множественной регрессии имеет вид:

$$\hat{y}_{x_i}^{(3)} = 10^{0,446} \cdot 10^{0,027} \cdot 10^{0,00006x_3} \times 10^{0,00002} \cdot 10^{0,009x_9}.$$

В табл. 4 представлены значения коэффициентов множественной корреляции, множественной детерминации, скорректированного коэффициента детерминации и среднеквадратической ошибки рекомендуемого штата для полученной модели.

Таблица 4

Регрессионная статистика

Коэффициент множественной корреляции	Коэффициент множественной детерминации	Скорректированный коэффициент детерминации	Среднеквадратическая ошибка результата
0,764	0,584	0,550	0,164

Для рассматриваемой модели значение статистики Дарбина-Уотсона, то есть расчетное значение D -статистики равно 1,983. Данный критерий подтверждает вывод, что степенная функция регрессии отражает существующую связь между факторами и результатом. Критическое значение F -статистики с 4 и

48 степенями свободы равно 2,57. Расчетная F -статистика равная 16,869.

На основании выполненных расчетов получена также показательная функция множественной регрессии.

В табл. 5 представлены аналогичные значения коэффициентов для показательной функции.

Таблица 5

Регрессионная статистика

Коэффициент множественной корреляции	Коэффициент множественной детерминации	Скорректированный коэффициент детерминации	Среднеквадратическая ошибка результата
0,739	0,545	0,508	0,171

Для рассматриваемой модели значения статистики Дарбина-Уотсона 1,581, кроме степенной и показательной функций регрессии, оценивались и полиномиальные функции вида:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{j=1}^k b_j x_j^n + \varepsilon,$$

где $n = 1, 2, 3$.

Анализ регрессионных функций, устанавливающих зависимость количества сотрудников учебных лабораторий от различных факторов, а также оценки точности и надежности полученных соотношений позволяют сделать следующие выводы.

1. Выполненные корреляционный и регрессионный анализы показали, что факторами, наиболее существенно влияющими на количество сотрудников, в предположении линейной зависимости, являются количество лабораторий, количество часов лабораторных работ, стоимость материальной базы и суммарная нагрузка кафедры.

2. Линейная множественная регрессионная зависимость количества сотрудников от всех включенных кафедрами факторов объясняет только на 51 % эту зависимость (коэффициент

детерминации равен 0,51). Нелинейные зависимости существенно результат не изменили.

3. Линейная множественная корреляционная зависимость количества сотрудников от четырех определяющих факторов (количество лабораторий, количество часов лабораторных работ, стоимость материальной базы и суммарная нагрузка кафедры) практически на такую же величину объясняет зависимость, как и с 9 факторами, что также совпадает с результатом корреляционного анализа.

4. Точечные оценки количества сотрудников, выполненные по построенным функциям регрессии, накрываются достаточно широким доверительным интервалом. Это свидетельствует о том, что при заданной надежности оценок (коэффициент значимости равен 0,05) имеет большую погрешность.

5. Повышение точности может быть достигнуто за счет снижения надежности расчетов или за счет поиска более качественных регрессионных функций и факторов, оказывающих в большей степени влияние на количество сотрудников лабораторий.

Поступила в редколлегию 21.06.2005.

АППРОКСИМАЦИЯ ПЕРЕХОДНОЙ ФУНКЦИИ

Розглянута апроксимація перехідної функції рішенням диференціального рівняння другого порядку і визначена оцінка погрешності передавальної функції.

Рассмотрена аппроксимация переходной функции решением дифференциального уравнения второго порядка и определена оценка погрешности передаточной функции.

Approximation of transitive function by means of solution of second order differential equation has been examined and estimation of the error of transfer function has been determined.

Если функция дифференцируема по всем своим аргументам, то она может быть разложена в ряд Тейлора в окрестности произвольно выбранной точки.

При линеаризации уравнений элементов системы автоматического регулирования (САР) эта точка должна соответствовать установившемуся режиму [1]. В этом режиме $x_1 = x_1^0$, $x_2 = x_2^0$ и $y = y^0$ есть постоянные величины и $\dot{x}_1 = \dot{y} = \ddot{y} = 0$. Тогда после разложения функции φ в ряд получим

$$\begin{aligned} \varphi(0, 0, y^0, 0, x_1^0, x_2^0) + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\ddot{y}}\right)^0 \Delta\ddot{y} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\dot{y}}\right)^0 \times \\ \times \Delta\dot{y} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^0 \Delta y + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\dot{x}_1}\right)^0 \Delta\dot{x}_1 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_1}\right)^0 \Delta x_1 + \\ + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_2}\right)^0 \Delta x_2 + \Phi = 0, \quad (1) \end{aligned}$$

где отклонения переменных от установившихся значений

$$\Delta x_1 = x_1 - x_1^0, \quad \Delta\dot{x}_1 = \dot{x}_1, \quad \Delta x_2 = x_2 - x_2^0,$$

$$\Delta y = y - y^0, \quad \Delta\dot{y} = \dot{y}, \quad \Delta\ddot{y} = \ddot{y};$$

частные производные от функции φ при

$$x_1 = x_1^0, \quad x_2 = x_2^0, \quad y = y^0, \quad \dot{x}_1 = \dot{y} = \ddot{y} = 0$$

$$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_1}\right)^0, \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\dot{x}_1}\right)^0, \dots;$$

Φ – сумма членов, которые содержат различные произведения отклонений и отклонения во второй и более высоких степенях с коэффициентами в виде смешанных частных производных и част-

ных производных второго и высших порядков от функции φ по соответствующим аргументам.

В устойчивых системах автоматического регулирования отклонения переменных достаточно малы, поэтому сумма Φ в уравнении содержит лишь члены высшего порядка малости, и ею можно пренебречь. Кроме того, следует принять во внимание уравнение установившегося режима

$$\varphi(0, 0, y^0, 0, x_1^0, x_2^0) = 0.$$

В результате получим линеаризованное уравнение

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\ddot{y}}\right)^0 \Delta\ddot{y} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\dot{y}}\right)^0 \Delta\dot{y} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^0 \Delta y + \\ + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\dot{x}_1}\right)^0 \Delta\dot{x}_1 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_1}\right)^0 \Delta x_1 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_2}\right)^0 \Delta x_2 = 0. \quad (2) \end{aligned}$$

Уравнение (2) – линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами, но оно приближенное, так как отброшена сумма Φ и уравнение (2) содержит не переменные x_1 , x_2 и y , а их отклонения от установившегося режима. При $x_1^0 = x_2^0 = y^0 = 0$, линеаризованное уравнение становится уравнением для переменных x_1 , x_2 , y :

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\ddot{y}}\right)^0 \ddot{y} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\dot{y}}\right)^0 \dot{y} + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial y}\right)^0 y + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial\dot{x}_1}\right)^0 \dot{x}_1 + \\ + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_1}\right)^0 x_1 + \left(\frac{\partial\varphi}{\partial x_2}\right)^0 x_2 = 0. \quad (3) \end{aligned}$$

Уравнение (3) в операторной форме запишется так:

$$Qy = k_1 R_1 x_1 + k_2 x_2,$$

где

$$Q = a_0 p^2 + a_1 p + 1; R_1 = b p + 1;$$

$$a_0 = \frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \ddot{y}}\right)^0}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^0}; a_1 = \frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \dot{y}}\right)^0}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^0};$$

$$k_1 = -\frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_1}\right)^0}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^0}; b = \frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial \dot{x}_1}\right)^0}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^0}; k_2 = -\frac{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_2}\right)^0}{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)^0}.$$

Как известно [2], динамические свойства объекта приближенно могут быть описаны передаточной функцией следующего вида:

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (4)$$

где τ – время чистого запаздывания; k – коэффициент усиления объекта; T_1 и T_2 – постоянные времени.

Переходную функцию объекта аппроксимируем решением линейного дифференциального уравнения второго порядка (3)

$$h(t) = h(\infty) \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right); \quad (5)$$

$$h(t) = h(\infty) \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t-\tau}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t-\tau}{T_2}} \right);$$

$t \geq \tau.$

Время чистого запаздывания τ и коэффициент усиления k определяются обычными приемами по переходной функции, следовательно, для решения поставленной задачи необходимо определить постоянные времени T_1 и T_2 .

Наиболее распространенными способами определения коэффициентов дифференциального уравнения второго порядка являются следующие: определение постоянных времени T_1 и T_2 с помощью графических построений; определение постоянных времени T_1 и T_2 интерполяционными методами; определение постоянных времени T_1 и T_2 с использованием асимптоты переходной функции.

При аппроксимации экспериментальной переходной временной кривой, изображенной на рисунке, постоянные времени T_1 и T_2 определим с помощью асимптоты переходной функции.

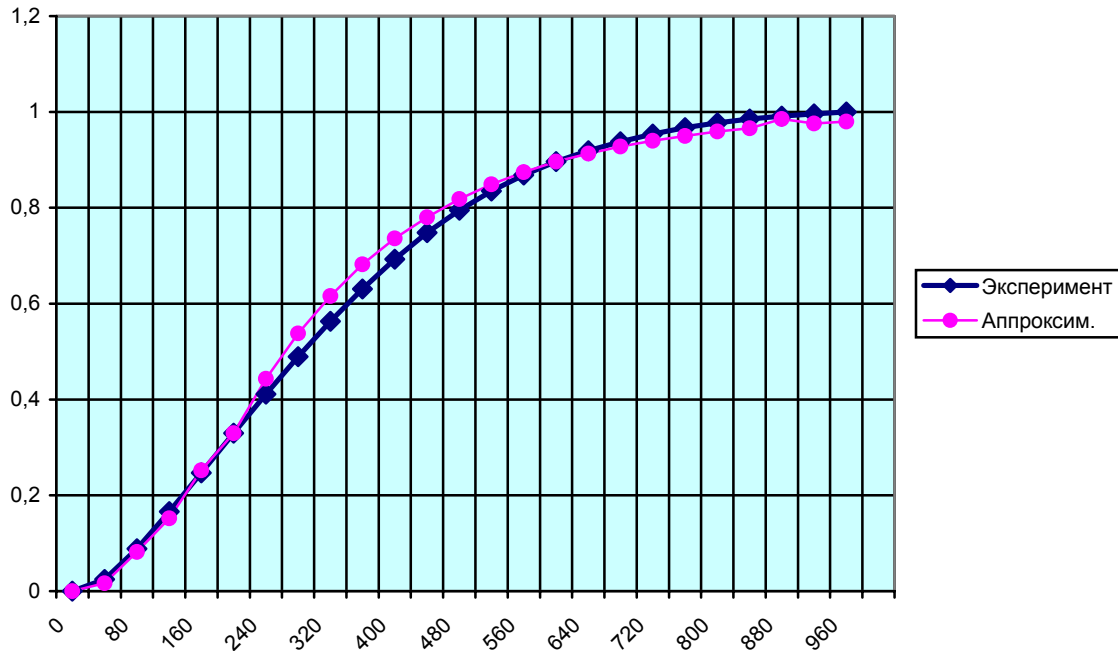


Рис. Аппроксимация экспериментальной переходной временной кривой решением дифференциального уравнения второго порядка

Сущность данного метода заключается в аппроксимации переходной функции данной кривой, две точки которой могут быть легко

определены при определенных величинах времени t . Третье уравнение может быть получено из условия, что интеграл функции

$$\frac{1}{h(T_y)} [h(T_y) - h(t)]$$

равен сумме постоянных времени T_1 и T_2 и τ_d [3].

Передачная функция (4), преобразуемая к виду

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau_d}}{[T_1T_2p^2 + (T_1 + T_2)p + 1]},$$

при больших значениях p близка к функции

$$W(p) = \frac{ke^{-p\tau_d}}{(\sqrt{T_1T_2}p + 1)^2}.$$

Так как большим значениям p в изображении соответствуют малые значения t оригинала, то начальный участок функции (5) близок к функции

$$h(t) \approx h(T_y) \cdot \left[1 - \frac{\sqrt{T_1T_2} + t - \tau_d}{\sqrt{T_1T_2}} e^{-\frac{t - \tau_d}{\sqrt{T_1T_2}}} \right]. \quad (6)$$

Для определения неизвестных T_1 , T_2 и τ_d воспользуемся соотношением (6). При

$$t = t_1 = \sqrt{T_1T_2} + \tau_d,$$

$$t = t_2 = 0,5\sqrt{T_1T_2} + \tau_d$$

функция $h(t)$ принимает значения:

$$h(t_1) = h(T_y)(1 - 2e^{-1}) = 0,26h(T_y);$$

$$h(t_2) = h(T_y)(1 - 3e^{-1}) = 0,09h(T_y).$$

Для нахождения величин t_1 и t_2 необходимо провести горизонтальные прямые на расстояниях $0,26h(T_y)$ и $0,09h(T_y)$ от оси абсцисс и из точек пересечения их с $h(t)$ опустить перпендикуляры на ось времени.

Графическим методом определяем корни уравнений

$$h(t_1) = 0,26 \cdot 1 = 0,26,$$

$$h(t_2) = 0,09 \cdot 1 = 0,09.$$

В частности, получаем: $t_1 = 180$ с, $t_2 = 100$ с.

Определив величины t_1 и t_2 , вычислим время дополнительного запаздывания $\tau_d = 2t_2 - t_1$, а также получим уравнение

$$\sqrt{T_1T_2} = 2(t_1 - t_2).$$

Воспользуемся формулой трапеций

$$S = \frac{1}{h(T_y)} \int_0^{T_y} [h(T_y) - h(t)] dt = T_1 + T_2 + \tau_d.$$

Определим время дополнительного запаздывания:

$$\tau_d = 2 \cdot 100 - 180 = 20 \text{ с.}$$

По формуле трапеций определяем $S = 26$ с.

Получаем два уравнения:

$$\sqrt{T_1T_2} = 2(t_1 - t_2) = 2(180 - 100) = 160$$

$$c = 2,67 \text{ мин,}$$

$$T_1 + T_2 = S - \tau_d = 26 - 20 = 6.$$

После решения системы уравнений получим, что $T_1 = 4,368$ мин, $T_2 = 1,632$ мин. Следовательно, передачная функция объекта имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{e^{-20p}}{(4,368p + 1)(5,144p + 1)}.$$

После определения T_1 и T_2 необходимо произвести оценку погрешности путем вычисления выражения (2) при разных значениях t и сравнить их с ординатами экспериментальной переходной функции:

$$\delta_g = \frac{h(t_g) - h_3(t_g)}{h_3(T_y)} 100\%.$$

Было выполнено сравнение ординат экспериментальной переходной функции с результатами, полученными с помощью вычислений.

После выполненных расчетов и оценки погрешности передачной функции, значения которой находятся в допустимых пределах, аппроксимацию динамических свойств данного объекта передачной функцией можно считать допустимой. Расчеты выполнялись с помощью математического пакета Mathcad и табличного редактора Excel.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров И. М. Линейные автоматические системы / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – М.: Машиностроение, 1982.
2. Розенвассер Е. Н. Операторные методы и колебательные процессы / Е. Н. Розенвассер, С. К. Воловодов. – М.: Наука, 1985.
3. Балакирев В. С. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления / В. С. Балакирев, Е. Г. Дудников, А. М. Цирлин. – М.: Энергия, 1967.

Поступила в редколлегию 05.07.2005.

МОДЕЛЬ ПІДТРИМКИ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СКЛОПАКЕТІВ НА ПІДСТАВІ «ІНДИВІДУАЛЬНИХ ДАНИХ ЗАМОВНИКА»

Наведена оцінка задачі розробки і впровадження систем підтримки рішень при проектуванні склопакетів. Спрогнозовано загострення суперечностей, які характеризують процес проектування. Пропонується на розгляд підхід до рішення питання інформаційного моделювання процесу ухвалення проектного рішення при проектуванні склопакетів в будівельних конструкціях на підставі «індивідуальних вимог замовника», який наведений у вигляді математичної постановки задачі ухвалення рішення і загальної послідовності її розв'язування. Реалізація запропонованого підходу дозволить підвищити не тільки якість проектних рішень зокрема, а і ефективність проектування склопакетів у будівельних конструкціях, загалом.

Представлена оцінка задачі розробки і впровадження систем підтримки рішень при проектуванні склопакетів. Спрогнозовано загострення суперечностей, які характеризують процес проектування. Пропонується на розгляд підхід до рішення питання інформаційного моделювання процесу прийняття проектного рішення при проектуванні склопакетів в будівельних конструкціях на основі «індивідуальних вимог замовника», який представлений в формі математичної постановки задачі прийняття рішення і загальної послідовності її розв'язування. Реалізація запропонованого підходу дозволить підвищити не тільки якість проектних рішень в частині, а і ефективність проектування склопакетів в будівельних конструкціях, в цілому.

The article gives estimation to the task of development and introductions of the decisions support systems in the process of designing glass packages. The forecasts have been made of sharpening of contradictions, characterizing the process of designing; submitted for consideration is an approach to solving the task of informational simulation of the process of making design solution in designing the glass packages in building constructions on the basis of «individual requirements of customer», which is presented in the form of mathematical setting of decision-making task and general sequence of its solution. Realization of the proposed approach will allow not only to improve the quality of project decisions in particular, but to increase efficiency of designing glass packages in building constructions in general.

Аналіз досягнень в галузі автоматизації проектування будівельних конструкцій, вивчення досвіду проектування склопакетів, а також проведений аналіз фізичних характеристик складових склопакетів дозволяють зробити висновок про актуальність систем підтримки проектних рішень (СППР) [1; 2] при проектуванні склопакетів. При цьому існує можливість здійснити прогноз щодо загострення протиріччя, притаманного процесу проектування, яке виявляється в такому: зростання, з одного боку, номенклатури комплектуючих та варіантів використання склопакетів; з іншого – загострення конкуренції на ринку проектних послуг та, як наслідок, скорочення терміну проектування і зростання ролі замовника в прийнятті проектних рішень [3].

Нові умови роботи проектувальних органів глибоко впливають на організацію процесу проектування та взаємодію в ланці «замовник–проектувальник». Існуючі підходи до моделювання процесу в своїй більшості не дозволяють комплексно використовувати кількісну і якісну інформацію при прийнятті проектних рішень, що суперечить сучасному стану роз-

витку предметної галузі. Виникла практична необхідність створення та впровадження методичного апарату підтримки проектних рішень, який дозволив би найповніше враховувати особисті вимоги та переваги Замовника, а також був би спроможним гнучко адаптуватися до динамічних змін, що відбуваються на ринку проектування склопакетів. Протиріччя в питаннях процесу вироблення рішення при проектуванні склопакетів у будівельних конструкціях вимагають від теорії пошуку шляхів підвищення якості та ефективності проектних рішень.

Виходячи із всього вищевказаного, автором в даній статті пропонується на розгляд підхід до питання інформаційного моделювання процесу прийняття рішення при проектуванні склопакетів у будівельних конструкціях.

Аналіз предметної галузі проектування склопакетів, особливостей роботи проектувальника та його взаємодії із замовником проектних рішень (надалі Замовник) показав, що процес проектування із використанням системи підтримки проектних рішень як підсистеми СППР доцільно організувати за інформаційною моделлю, що наведена на рисунку.

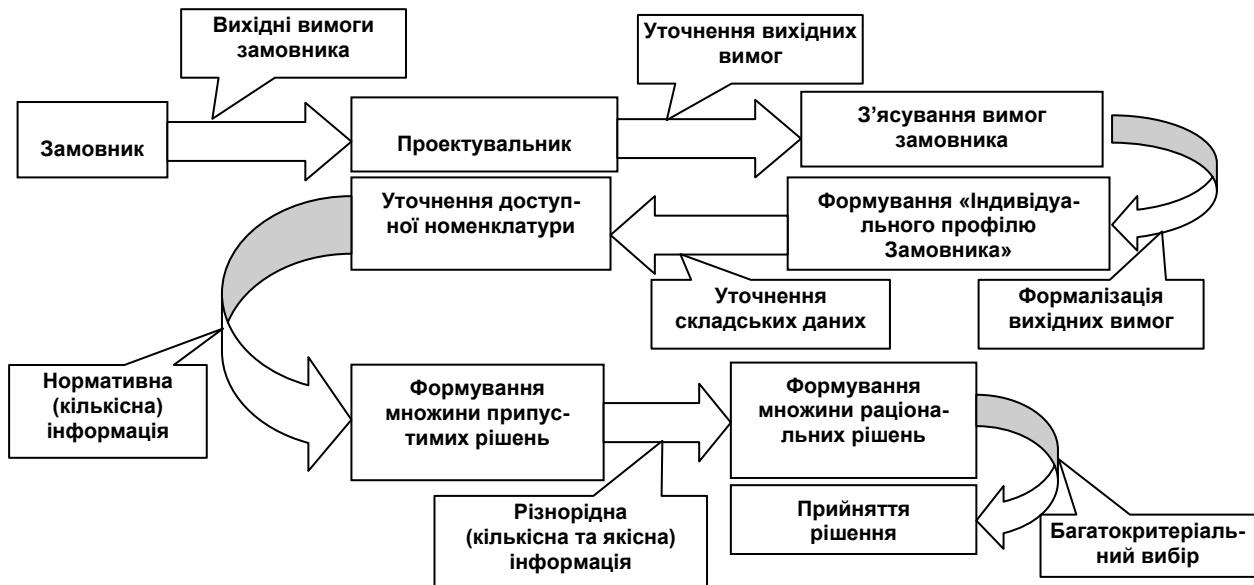


Рис. Інформаційна модель процесу прийняття проектних рішень при проектуванні склопакетів

Математична постановка задачі прийняття рішення може бути зроблена в такий спосіб.

Нехай ϵ – множина варіантів рішення задачі проектування $V = \{v_i\}$ і ϵ – множина показників якості проектних рішень $P = \{p_j\}$.

Кожний з варіантів v_i характеризується множиною значень

$$v_i = \{p_{ij}\},$$

де $i = \overline{1, I}$; I – кількість варіантів проектних рішень; $j = \overline{1, J}$; J – кількість показників якості проектних рішень.

На етапі замовлення Замовник формулює вихідні дані проектування у вигляді вектора:

$$W = \{p_j^*\}, \quad (1)$$

де p_j^* – значення, j -го показника якості проектних рішень що очікується.

Крім того, Замовник формулює свої вимоги щодо показників якості, які Проектувальником оформлюються у вигляді вектора:

$$\Omega = \{\omega_j\}, \quad (2)$$

де ω_j – відносна важливість, j – показник якості проектних рішень;

$$\sum_{j=1}^J \omega_j = 1.$$

Необхідно на підставі переваг Замовника обрати такий варіант рішення задачі проектування, щоб виконувалось співвідношення:

$$\exists v_i: \forall p_j \in P: |p_j^* - p_{ij}| \leq \alpha, \quad (3)$$

де α – порогові значення розсогласовування.

Розкриємо загальну послідовність вирішення задачі вибору проектних рішень.

1. Після з'ясування вихідних даних (умов та переваг Замовника) Проектувальник здійснює їх формалізацію, формулюючи «Індивідуальний профіль Замовника» (ІПЗ) у вигляді:

$$W = \left\langle \left\{ P^*, M(P), \mu(p_j^*), \Omega(P^*), \alpha_p, a, b \right\} \right\rangle, \quad (4)$$

де $P^* = \{p_j^*\}$ – множина бажаних значень показників якості проектних рішень;

$M(P) = \{\mu(p_j)\}$ – сім'я функцій належності $\mu(p_j): p_j \in [0, 1]$ варіантів проектних рішень до нечітких множин «якісних проектних рішень за j -м показником якості» [3];

$\mu(p_j^*)$ – бажане для Замовника значення функції належності варіанта рішення до нечіткої множини якісних проектних рішень за j -м показником якості; α_p – критерій раціональності вибору варіантів проектних рішень; a, b – відповідно верхня і нижня межі потужності множини раціональних варіантів проектних рішень (визначають скільки варіантів рішення пропонується на розгляд Замовнику).

2. Після формування «ІПЗ» й уточнення інформації про наявність комплектуючих формується множина можливих варіантів рішення задачі вибору проектних рішень:

$$V = \{v_i\}. \quad (5)$$

Після цього здійснюється фазифікація множини варіантів, тобто перехід до її відображення у вигляді

$$v_i = \tilde{V}_i = \left\{ \left\langle p_{ij}, \mu(p_{ij}) \right\rangle \right\}, \quad (6)$$

де p_{ij} – значення j -го показнику якості для i -го варіанта проектних рішень; $\mu(p_{ij})$ – значення функції приналежності i -го варіанта рішення до нечіткої множини якісних проектних рішень за j -м показником якості.

3. На множині лінійно упорядкованих за показником надійності варіантів рішення здійснюється формування множини припустимих проектних рішень за критерієм:

$$V_{\pi} = \{v_i\} : \mu(p_{ij}) \geq \alpha_{\pi}, \quad (7)$$

де α_{π} – порогові значення функції приналежності i -го варіанта проектного рішення нечіткій множині припустимих проектних рішень за j -м показником якості.

4. Для усіх варіантів припустимих проектних рішень формуються оцінки, що характеризують ступінь відповідності конкретного варіанта «ІДЗ»:

$$O_i = \max_i \min_j \omega_j \mu(p_{ij}). \quad (8)$$

5. На множині припустимих рішень формується множина раціональних рішень:

$$V_p = \{v_i\} : O_i \geq \alpha_p, \quad (9)$$

де α_p – порогове значення функції приналежності варіанта рішення нечіткій множині раціональних проектних рішень за j -м показником якості.

6. Замовнику пропонується на розгляд лексикографічно упорядкована α_p – множина раціональних проектних рішень.

Викладений загальний порядок вирішення задачі вибору раціональних варіантів проектних рішень при проектуванні склопакетів відбиває лише загальні аналітичні залежності у взаємозв'язку із інформаційною моделлю процесу прийняття рішення. Поряд з цим, реалізація запропонованого підходу дозволяє підвищити якість проектних рішень, та підвищити ефективність проектування склопакетів у будівельних конструкціях взагалі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Державний стандарт України /скло, склопакети, блоки віконні зі склопакетами/. – К.: ДКБАЖПУ, 2001. – 111 с.
2. Герасимов Б. Н. Системы поддержки принятия решений, проектирование, применение, оценка эффективности / Б. Н. Герасимов, М. М. Дивизинов, И. Ю. Субач. – Севастополь: изд. НИЦ ВСУ «Государственный океанариум», 2004. – 318 с.
3. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 208 с.

Надійшла до редколегії 16.06.2005.

СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ БУДІВЕЛЬНО-ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ДЕРЖАВНОЇ СПЕЦІАЛЬНОЇ СЛУЖБИ ТРАНСПОРТУ МІНІСТЕРСТВА ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ

Проведена оцінка технічного рівня будівельно-відновлювальної техніки, на основі якої розроблені методика технічного оснащення Державної спеціальної служби транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України і практичні рекомендації щодо її технічного оснащення.

Проведена оценка технического уровня строительно-восстановительной техники, на основе которой разработаны методика технического оснащения Государственной специальной службы транспорта Министерства транспорта и связи Украины и практические рекомендации по ее техническому оснащению.

The article gives estimation of technical level of building and handling machinery, on the basis of which it develops a method of technical equipment of the State Special Transport Service of the Ministry of Transport and Communication of Ukraine and provides practical recommendations thereto.

Оцінка технічного рівня будівельно-відновлювальної техніки є підставою для розробки методики технічного оснащення Державної спеціальної служби транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України і вироблення практичних рекомендацій щодо її технічного оснащення.

У загальному вигляді оцінка технічного рівня включає:

- вибір номенклатури показників якості і обґрунтування їх необхідності і достатності;
- вибір або розробку методів визначення числових значень показників якості;
- вибір базових значень показників якості техніки і початкових даних для визначення фактичних значень показників;
- визначення фактичних значень показників якості і їх порівняння з базовими;
- порівняльний аналіз варіантів можливих рішень і знаходження якнайкращого;
- обґрунтування рекомендацій для ухвалення рішення по технічному оснащенню підрозділів, загонів і об'єднаних загонів будівельно-відновлювальною технікою.

Якість виробів військової техніки і будівельно-відновлювальної техніки Державної спеціальної служби транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України, зокрема, відповідно до роботи [1] – сукупність властивостей техніки, обумовлюючих її здатність задовольняти потреби країни в обороні.

Якість техніки [2] характеризується показниками і рівнем якості. Кількісні значення показників якості використовуються при оцінці

рівня якості виробів. Слід зазначити, що розгляд показників і рівня якості будівельно-відновлювальної техніки необхідно виконувати на стадії її експлуатації. Звідси основними цілями оцінки рівня якості техніки є оптимізація складу з урахуванням показників призначення, живучості, транспортабельності, технічного обслуговування і ремонту, а також вартості.

У загальному вигляді відповідно до [1] структура і характеристика груп показників якості, будівельно-відновлювальної техніки Державної спеціальної служби транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України наведена в таблиці. Оскільки ергономічні показники і показники технічної естетики для техніки, яка використовується в господарстві України, дотримуються при проектуванні і виготовленні виробів і не мають визначального значення для комплексного методу оцінки якості виробів, вони винесені в кінець таблиці.

Аналізуючи номенклатуру і характеристики груп показників якості техніки, необхідно відзначити, що за ознакою оцінки якості в період експлуатації такі групи показників як технологічності, стандартизації і уніфікації, ергономічні і показники технічної естетики можна не розглядати. Ці групи показників використовуються на стадіях розробки і виготовлення виробів.

Не є можливим врахувати і показники надійності [3; 4], вимагаючи статистичні дані з безвідмовності, довговічності, збереження, ремонтоздатності більше 133 одиниць вітчизняної і зарубіжної техніки.

**Номенклатура і характеристика груп показників якості будівельно-відновної техніки
Державної спеціальної служби транспорту**

№ пор.	Групи показників якості	Показники якості
1	Показники призначення	Продуктивність; тягове зусилля; вантажопідйомність; потужність; швидкість; прохідність; запас ходу (заправна місткість паливного бака); застосування для мирного і воєнного часу; дальність зв'язку; кількість виконаних поточних і середніх ремонтів
2	Живучості і стійкості до зовнішніх дій	Час введення в дію засобів збереження живучості; обсяг земляних робіт на інженерному обладнанні укриття; трудовитрати на інженерне обладнання укриття; середній час відновлення виробу після пошкодження в типовій бойовій ситуації; використання при негативних температурах; мінімальна товщина льоду для роботи або пропуску машини
3	Надійності	Безвідмовність; довговічність; можливість збереження; справний стан
4	Зручності технічного обслуговування	Коефіцієнт технічного використання виробу; середня тривалість технічного обслуговування (ремонт); середня трудомісткість технічного обслуговування (ремонт); час підготовки виробу до використання за призначенням в різних умовах (до роботи на плаву, на комбінованому ході та ін.); коефіцієнт готовності
5	Транспортабельності	Допустимі дальність і швидкість; способи транспортування; середня тривалість підготовки виробу до транспортування; середній час установки виробу на транспортний засіб; середній час приведення виробу в стан бойової готовності після транспортування; середні енергетичні витрати транспорту для транспортування виробу на певну відстань; коефіцієнт заповнення об'єму засобів транспортування
6	Безпеки	Вірогідність випадків, в яких завдається шкода здоров'ю людини; вірогідність пошкодження виробом об'єкту, що сполучається; час спрацьовування аварійної сигналізації; кратність захисту від радіації і при роботі на зараженій місцевості; температурна межа, що забезпечує включення засобів пожежегасіння; електрична міцність ізоляції і частин, з якими можливе зіткнення людини
7	Скритності і маскуванню	Вірогідність виявлення виробу противником, що використовує певні технічні засоби виявлення; середній час виявлення виробу противником; рівень демаскуючих випромінювань виробу; рівень активних і пасивних перешкод; максимальна дальність вірогідного виявлення виробу
8	Стандартизації і уніфікації	Коефіцієнт застосування; коефіцієнт повторності; коефіцієнт міжпроектної уніфікації
9	Технологічні	Показники витрат матеріалів, технічних засобів, праці і часу при технологічній підготовці виробництва і виготовлення виробу
10	Конструктивні	Маса виробу; габаритні розміри виробу; установочні розміри виробу; коефіцієнт використання корисного об'єму виробу; число найменувань кріпильних елементів у виробі (вузлів, блоків і ін.); місткість паливного бака (резервуарів, цистерн та ін.)
11	Економічні	Вартість виробу; вартість виготовлення виробу; вартість обслуговування функціонуючого виробу; вартість експлуатації виробу; середня вартість технічного обслуговування
12	Ергономічні і показники технічної естетики	Показники населеності; антропологічні; фізіологічні; психологічні; узгодженості і відповідності форми; відповідності колірного рішення оточуючого середовища

Показники решти груп вимагають розгляду стосовно видів техніки і навіть по марках машин.

Найважливішими показниками групи призначення є продуктивність, тягове зусилля, ван-

тажопідйомність, потужність, швидкість, прохідність, застосовність у мирний і воєнний час.

Слід визначити, що для такої техніки як траншейні екскаватори, корчувачі, розпушува-

чі, компресори, колієукладачі, палейне обладнання, бетонозмішувальні та розчинозмішувальні машини, лісопилні рами показники продуктивності визначаються паспортними даними, нормативними документами і довідковими даними за досвідом застосування. У той же час для ковшових екскаваторів, бульдозерів, скреперів, автогрейдерів, бурильно-кранових машин, автобетонозмішувачів, вантажопідйомних машин продуктивність може бути врахована з використанням супутніх показників. Так, продуктивність ковшових екскаваторів буде залежати від місткості ковша, максимальних глибини і радіуса копання, висоти вивантаження, тривалості робочого циклу.

Продуктивність бульдозерів визначається максимальним тяговим зусиллям, об'ємом пририми волочиння, розмірами відвалу, максимальними заглибленням і висотою підйому відвала, швидкістю різання і переміщення ґрунту, швидкістю поворотного руху заднім ходом.

Продуктивність вантажопідйомних машин (автомобільні крани) характеризується не тільки максимальною вантажопідйомністю, але і швидкістю підйому і опускання вантажу, частотою обертання поворотної платформи, найбільшим вильотом стріли і висотою підйому крока.

Для інших видів техніки є свої показники, що впливають на продуктивність.

Оскільки абсолютна більшість технічних засобів базується на гусеничному або автомобільному шасі, такі показники якості групи призначення як потужність, прохідність, запас ходу (по витраті палива), застосування у мирній і військовій час є загальними і їх слід розглядати окремо. При цьому найважливішими показниками прохідності будівельно-відновлювальної техніки є здатність в подоланні ухилів, дорожній просвіт, кількість ведучих осей, глибина броду, який техніка здатна подолати, питома потужність автомобіля або технічного засобу на гусеничному шасі [5].

Такі показники прохідності, як зчїпна маса автомобіля, передній і задній звиси, найбільший кут подоланого узгїр'я, сила тяги на гаці, потужність опору коченню не є типовими при використанні будівельно-відновлювальної техніки служби за штатним призначенням, а тому в подальшому не використовуються.

Розглядаючи групу живучості і стійкості до зовнішніх дій [1], слід зупинитися на розгляді показників, властивих будівельно-відновлювальній техніці. Показники живучості: середній час відновлення виробу після пошкодження в певній бойовій ситуації, ступінь порушення функціонування виробу, внаслідок дій в бойовій або

аварійній ситуації, середній час функціонування виробу при вибуху ядерного боєприпасу в основному відносяться до бойової техніки. Для даної техніки служби важливими показниками, що визначають живучість, є час введення в дію засобів збереження живучості і ступінь забезпечення виробу засобами збереження живучості. Враховуючи, що термін введення в дію засобів збереження живучості, а це в першу чергу захисні укриття і споруди, залежить від обсягів земляних робіт, можна цим показником і обмежитися. Ступінь забезпечення виробу засобами збереження живучості підтверджується обов'язковою вимогою обладнання укриттів для всіх машин і механізмів, виключаючи техніку, що використовується тільки в мирний час.

З показників стійкості до зовнішніх дій для даної техніки найважливішими є можливість використання при негативних температурах і оцінка мінімальної товщини льоду для роботи або пропуску машин. Такі показники як напруженість магнітного поля, рівень активних перешкод, рівень заповненої повітря не надають істотного впливу на виробничі можливості технічних засобів Державної спеціальної служби транспорту Міністерства транспорту та зв'язку України.

У групі показників зручності технічного обслуговування і ремонту реально можуть бути визначені і використані середня тривалість і трудомісткість технічного обслуговування і ремонту, а також час підготовки виробу до використання за призначенням в різних умовах. Так, для палейної кранової техніки важливим є час підготовки для роботи на плаву, а для колійної кранової техніки і деяких бурильно-кранових машин – час підготовки для роботи на комбінованому ході.

Коефіцієнт готовності [6] як вірогідність того, що виріб опиниться в працездатному стані в будь-який момент часу, окрім планованих періодів, протягом яких застосування виробу за призначенням не передбачається, при оцінці технічного рівня в даний час практично не враховується через відсутність необхідних для розрахунку характеристик. Це ж відноситься і до коефіцієнта технічного використання машин і механізмів.

Показники транспортабельності характеризують пристосованість будівельно-відновлювальної техніки до переміщення. Для різних видів техніки вони можуть мати свою структуру і важливість. Загальним показником транспортабельної будівельно-відновлювальної техніки є швидкість переміщення своїм ходом. Необхідним є включення в структуру показників транспортабель-

ності – кількість можливих способів транспортування, які враховували б можливість переміщення техніки не тільки своїм ходом, але і автомобільним (зокрема, на трейлерах), залізничним, повітряним і річковим транспортом.

Слід зазначити, що для землерийної техніки, автомобільних кранів, бурильно-кранової і іншої техніки, що представляє одну одиницю, показники середньої тривалості підготовки до транспортування, середній час установки на транспортний засіб і коефіцієнт заповнення об'єму будуть приблизно однаковими.

У той же час для консольних кранів, колієукладачів, палейної техніки (комплекти машин і технічних пристроїв), необхідно враховувати потребу в залізничному рухомому складі, авто-транспорті, баржах.

Середні енергетичні витрати транспорту для транспортування можуть бути виражені через витрату палива на 100 км шляху – загальноприйнятий показник для автотранспорту.

Таким чином, показник транспортабельності для різних видів техніки – це комплекс, куди входять приватні показники, склад і кількість яких може бути різним.

З групи показників безпеки для техніки служби одним з найважливіших є кратність захисту від радіації під час роботи на зараженій місцевості. Проте ослаблення радіації можна врахувати тільки захисними властивостями кабін землерийної, колійної, мостової та ін. техніки. Такі показники, як вірогідність пошкодження виробом об'єкту, що сполучається, час спрацьовування аварійної сигналізації, температурна межа, що забезпечує включення засобів пожежегасіння і електрична міцність ізоляції і струмоведучих частин, з якими можливе зіткнення людини, для даної техніки не є визначаючими.

Серед конструктивних показників загальними для всіх видів машин і механізмів є маса і габаритні розміри [7]. Це відноситься як до самої техніки, так і до окремих її вузлів і агрегатів, наприклад, місткості паливного бака, резервуару, цистерни та ін.

Важливу роль в умовах ринкової економіки набувають економічні показники техніки. На стадії експлуатації [8] – це вартість машин і механізмів, середня вартість технічного обслуговування і ремонту, чисельність обслуговуючої команди, кількість вживаних масел і мастил та ін.

Структурний аналіз груп показників якості дозволяє зробити такі висновки:

1. Для оцінки рівня оснащення служби будівельно-відновлювальною технікою слід використовувати показники якості 1, 2, 4, 5, 7, 10 і 11 груп (див. таблицю).

2. Внаслідок різної значущості показників якості, що входять до даних груп, з 48 можна обмежитися 16-18 найважливішими, які найбільшою мірою впливають на виробничі можливості загонів.

3. З метою обґрунтування застосування комплексного методу оцінки якості продукції [2] стосовно технічного оснащення служби надалі необхідно виявити важливість окремих показників якості (ранг) по видах будівельно-відновлювальної техніки.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. ГОСТ В 20.57.102-77. Показатели качества изделий военной техники. – М.: Изд-во стандартов, 1977.
2. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1979.
3. ГОСТ 13377-75. О номенклатуре основных показателей надежности. – М.: Изд-во стандартов, 1975.
4. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
5. ГОСТ 22653-77. Автомобили. Параметры проходимости. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1977.
6. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1978.
7. ГОСТ 27782-88. Материалоемкость изделий машиностроения. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
8. ГОСТ 25866-83. Эксплуатация техники. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1983.

Надійшла до редколегії 13.04.2005.

РОЗВИТОК НАУКОВИХ УЯВЛЕНЬ ЩОДО РОЗМІЩЕННЯ СОРТУВАЛЬНИХ СТАНЦІЙ НА МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЦЬ

Розглянуто розвиток наукових уявлень системи організації вагонопотоків на мережі залізниць з моменту їх будівництва та становлення. Наведені основні етапи та аспекти технологічного та економічного характеру, які зумовили розвиток та вплинули на становлення наукових положень щодо розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць. Показана роль провідних вчених, наукових та проектних організацій в розвитку системних уявлень щодо становлення системи організації вагонопотоків, плану формування поїздів і розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць.

Рассмотрено развитие научных представлений системы организации вагонопотоков на сети железных дорог с момента их строительства и становления. Приведены основные этапы и аспекты технологического и экономического характера, которые определили развитие и повлияли на становление научных положений относительно размещения сортировочных станций на сети железных дорог. Показана роль выдающихся ученых, научных и проектных организаций в развитии представлений относительно становления системы организации вагонопотоков, плана формирования поездов и размещения сортировочных станций на сети железных дорог.

The article examines historical development of scientific ideas about the system of carflow organization on the railway network since the moment of its appearance and establishment and enumerates main stages and aspects of technological and economic character, which have determined development and influenced establishment of scientific fundamentals as for distribution of marshalling yards on the railway network. The role of eminent scientists and research & designing institutions has been shown in development of ideas as regards establishment of the carflow organization system, train make-up configurations and distribution of marshalling yards within the railway network.

1. Постановка проблеми

Одним із головних питань ефективного функціонування залізничного транспорту є проблема організації вагонопотоків і розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць, яка знаходилася під постійною увагою провідних вчених та інженерів вже з кінця XIX сторіччя. Узагальнення і аналіз набутого за період функціонування сортувальних станцій вагомого досвіду дає можливість оцінити сучасний стан з позицій історичного розвитку і оцінити майбутні перспективи вирішення питання розбудови сортувальних станцій на мережі залізниць України.

Аналіз досліджень і публікацій останнього періоду в галузі розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць свідчить про те, що вони були направлені на вирішення технологічних питань організації поїздопотоків на підставі оптимізації економічних показників діяльності залізничного транспорту. Окремі розробки щодо розміщення сортувальних станцій виконувалися авторами в межах своїх наукових досліджень і полягали у вдосконаленні взаємодії станцій з прилеглими дільницями (С. В. Нагорний), розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць України в контексті концентрації сортувальної роботи і зменшення числа сортувальних станцій, підвищення ефективності системи організації вагонопотоків (Т. В. Бутько, Н. В. Липовець).

Виходячи із сучасного стану розвитку експлуатаційної науки цілями статті є систематизація та висвітлення основних історичних моментів тієї частини науки про залізничні станції та вузли, яка стосується питань становлення, розвитку та розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць (місце і значення сортувальних станцій в системі формування поїздів).

2. Система формування поїздів на перших залізницях. Історичні передумови виникнення сортувальних станцій

З моменту виникнення в Росії залізничного транспорту і до 1889 р. передача вагонів на стикових пунктах провадилася на правах приватного користування – вагон з вантажем йшов на суміжну залізницю і повертався порожняком на залізницю-власницю на підставі домовленостей про термінове повернення вагонів [6].

Ідея загального користування була вперше висунута в Росії в 1869 р. і реалізована в 1889 р., після видання в 1888 р. «Закона об общем пользовании (обезличенное пользование вагонами)». Ця прогресивна технологія набагато випередила організацію вантажних перевезень в інших країнах [4]. Впровадження названої технології стало причиною значного зростання вантажного і пасажирського руху.

Недостатня кількість колій на станціях і дефіцит рухомого складу на залізницях створили ряд утруднень, які призвели до значної кількості запізнень поїздів на тривалий час, що в свою чергу стало причиною великої заборгованості вагонів «чужим» залізницям. Засобом для усунення утруднень в роботі станцій вважалося відокремлення операцій із сортування вагонів від операцій навантаження і вивантаження [4].

Облаштування окремих станцій для виконання сортування вагонів давало можливість мати меншу кількість колій на станціях і отримати місце для подальшого розвитку вантажних пристроїв, дефіцит яких на той час вже суттєво відчувався [6]. Таким чином, питання технологічного характеру об'єктивно підвели до необхідності будівництва сортувальних станцій як системних об'єктів. Перша ж сортувальна станція Петербург-Сортувальній була збудована в 1877–1878 рр. [3].

На мережі залізниць царської Росії до 1890 р. не існувало загальних положень щодо формування вантажних поїздів, в зв'язку з чим збірні поїзди із загального вагонопотоку не виділялися. Таким чином, маневри із сортування вагонів відбувалися на всіх дільничних і вузлових станціях на всьому шляху їх прямування. Вагони підбиралися до найближчого попутного пункту, де вони знову підлягали переробці.

У зв'язку з цим поїзди проходили без переробки незначну відстань, а багаторазова переробка вагонів призводила до значної маневрової роботи і простоях на станціях, уповільнення руху вагонів на мережі залізниць і надмірних витрат в експлуатаційній роботі.

Наприкінці XIX сторіччя система формування поїздів на мережі залізниць Росії вже передбачала утворення на великих станціях спеціалізованих груп вагонів, які прямували в одному напрямку. Відправлення цих груп відбувалося прямими поїздами на одну і ту ж станцію призначення вантажів або на одну із станцій в районі вивантаження вантажів.

Таким чином забезпечувався більший пробіг підібраних груп вагонів без роз'єднання їх на шляху прямування, що усувало надмірні маневри на попутних станціях і скорочувало термін доставки вантажів. До таких підібраних груп вагонів на попутних станціях могло здійснюватися причіплювання вагонів тільки того ж напрямку (залишаючи недоторканим ядро) [1].

На початковому періоді застосування такої схеми досить часто на станціях формування виникали труднощі внаслідок недостатнього колійного розвитку і маневрових засобів. Для

попередження таких утруднень на деяких станціях почали будувати запасні і витяжні колії та так звані «особливі» для формування поїздів [3].

Впровадження вантажних поїздів з підбором вагонів за пунктами їх призначення, тобто формування поїздів з їх спеціалізацією, вперше було введено на Південно-Західній залізниці в 1893р. Спеціалізація поїздів з виділенням збірних і формуванням прискорених поїздів проводилась пізніше і на інших залізницях. Однак і після 1893 р. в Росії зберігалась «дільнична» система організації вагонопотоків в якості основної системи і тільки незначна кількість поїздів формувалась зі спеціалізацією їх за пунктами призначення [1].

Такий стан речей пояснювався тим, що на той час існували як приватні, так і державні залізниці, які дбали тільки про свої інтереси. Підбір вагонів для сусідніх доріг здійснювався за окремими угодами. Така ситуація ускладнювала роботу станцій, на яких відбувався перехід вагонів з однієї дороги на іншу (пункти переходу), і призводило до значної затримки вагонів. Лише у 1904–1905 рр. повстало питання про спрощення технічних і комерційних операцій у вузлах примикання, що призвело до розробки «вузлової угоди», яка регламентувала порядок обміну між сусідніми дорогами рухомим складом і зобов'язання щодо формування прямих поїздів.

Незважаючи на те, що ідея формування прямих вантажних поїздів із збільшеною відстанню їх пробігу без переробки була правильною, однак поїзди фактично прямували до вихідної станції (стикової). Причина полягала в тому, що залізниці не бажали нести додаткові витрати з формування дальніх маршрутів, щоб сусідні залізниці безкоштовно користувалися такою послугою.

Вирішення цього питання було ініційовано на XVI з'їзді представників служб руху в 1906 р., але його розгляд відбувся лише на XVII з'їзді в рамках питання «О выявлении положительных и отрицательных сторон объединения узловых станций». Через місяць Міністерство шляхів сполучення видало розпорядження, в якому було викладено основні принципи, яких необхідно дотримуватися при об'єднанні вузлових станцій. У цьому розпорядженні зверталась увага залізниць на необхідність значного розвитку колійного господарства та інших супутніх пристроїв дільничних станцій як вихідних пунктів, де відбувається групування вантажів і вагонів за тим чи іншим призначенням.

Таким чином, була чітко сформульована задача технологічного характеру (формування дальніх маршрутів) і були визначені технічні

способи її вирішення (збільшення числа станційних колій на вузлових станціях, де відбувається формування дальніх маршрутів).

Існуюча на той час система організації вагонопотоків не сприяла розгляду питання щодо розподілу сортувальної роботи, а відтак і розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць. Першим, хто в теоретичному плані виконав ґрунтовні розробки щодо розподілу сортувальної роботи, був професор А. Фролов, який у 1901 р. у праці «Общие соображения о простое вагонов на сортировочных станциях» вперше встановив залежність між величиною простою вагонів під накопиченням і числом призначень.

В. М. Образцов у своєму докладі «Уплотнение транспорта как один из методов тейлоризации дорог» пропонував: «...для усиления производительности железнодорожного транспорта...восстановить и развить применение идей Воскресенского по уплотнению работы железных дорог. В частности..., сократить потребность в развитии путей и, где это возможно, уменьшить их количество,...широко развить объединение узловых станций» (1921 р.).

У 1922 р. В. М. Образцов висловив ідею, яка полягала в тому, щоб формування поїздів у вузлах і на технічних станціях здійснювати не тільки за напрямками, але й формувати маршрутні поїзди і маршрутні групи на окремі станції вивантаження [2]. У цій роботі була вперше обґрунтована необхідність виділення в плані формування поїздів окремо транзитних призначень із дальніх струменів вагонопотоків з метою скорочення маневрової роботи і простою вагонів, що по суті було початком складання плану формування поїздів на рівні як залізниці, так і мережі [2].

3. Розміщення сортувальних станцій

Незважаючи на велике практичне значення питання розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць, йому не приділялося належної уваги ні серед практиків, ні серед дослідників. Вперше про значення правильного розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць згадувалося вже наприкінці XIX сторіччя. Слід зазначити, що в цих працях не вказувалися шляхи вирішення даної задачі, а постановка питання зводилася до спрощеної класифікації сортувальних станцій з розбивкою їх на групи залежно від обсягів роботи з переробки вагонів.

Перші статті щодо конкретних пропозицій із розміщення сортувальних станцій були опубліковані в 1919–1922 рр. інженером Лапшинським та

професорами А. Фроловим і В. Образцовим. Перші два автори названих статей практично обмежилися постановкою питання. Фролов у своїй роботі «К вопросу о взаимодействии сортировочных станций» вказував, що «при составлении проекта сортировочной станции ее работа должна рассматриваться не изолировано, а в совокупности с работой всех других распорядительных станций данной дороги, находящихся с ней в том или ином взаимодействии». На конкретних прикладах проектів Вітебського та Яновського вузлів А. Фролов показав доцільність розрахунків варіантів розподілу сортувальної роботи між станціями з підрахунком експлуатаційних витрат на перестановку вагонів для порівняння двох можливих варіантів розміщення сортувальних станцій конкретних вузлів [1]. Роботу Фролова можна віднести до першого етапу вирішення питання розміщення сортувальних станцій – етап постановки питання в теоретичному плані.

Велике значення являла собою опублікована в 1922 р. стаття професора В. М. Образцова «Проект распределения узлов на русской железнодорожной сети и сортировочной работы узлов с целью сокращения маневровой работы и простоя вагонов» [2]. У цій статті В. М. Образцов виклав основні положення розробленого ним проекту стосовно розміщення сортувальних станцій на залізницях Європейської частини Росії. Автор детально розглянув питання розміщення сортувальних станцій в Донбасі, де на той час спостерігалось найбільше напруження в роботі залізничної мережі. Образцов висунув пропозицію щодо концентрації роботи станцій Камишеваха, Славянськ і Красний Лиман в одному вузлі – Куп'янськ. З метою зменшення обсягів сортувальної роботи рекомендувалося збільшити відстань між сортувальними станціями з 80...150 до 300...500 км, а розміщення станцій здійснювати в пунктах масового навантаження і вивантаження.

Розроблений В. М. Образцовим проект ґрунтувався на даних фактичного вантажопотоку за 1913 р. і на принципах максимально можливого об'єднання роботи у вузлах, що являє собою принцип концентрації. Таким чином, визначені і сформульовані положення об'єднання роботи в теоретичному плані набули конкретного вираження в терміні «принцип концентрації» і практичної реалізації на залізничних вузлах України. Дослідження В. М. Образцова можна віднести до другого етапу вирішення питання раціонального розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць: визначення принципу концентрації роботи.

Третій етап вирішення питання розміщення сортувальних станцій пов'язаний з роботами Науково-дослідного інституту експлуатації залізниць, підпорядкованого Народному комісаріату шляхів сполучення, якому була доручена робота розробки плану розміщення основних сортувальних станцій на мережі залізниць. Відомі лише результати розробок першого етапу, які були опубліковані в брошурі «Размещение основных сортировочных станций по сети железных дорог СССР» у 1932р. У роботах цього інституту розглядалися два можливих способи вирішення задачі розміщення сортувальних станцій [1]:

- складання на підставі планових вантажних потоків схем маршрутизації і спеціалізації поїздів, виявлення обсягів перспективної роботи вузлів з подальшою класифікацією станцій, виходячи з їх значення в сортувальній роботі;
- попереднє складання схеми розміщення сортувальних станцій на основі окремих міркувань експертного порядку з подальшим розподілом сортувальної роботи між станціями.

У цій роботі Науково-дослідного інституту експлуатації залізниць, так само як у всіх попередніх теоретичних і практичних розробках до 1935 року, всі питання розподілу сортувальної роботи між станціями і розміщення самих сортувальних станцій зводилося виключно до складання схем маршрутизації і спеціалізації поїздів.

Автори цієї роботи зупинилися на другому способі, запропонувавши схему перспективного розміщення сортувальних станцій на підставі відбору варіантів розміщення станцій за признаками та характеристиками. Признаки і характеристики не були визначені і конкретизовані, що в наступному стало предметом суттєвої і справедливої критики з боку Всесоюзного науково-дослідного інституту залізничного транспорту [1].

Всесоюзним науково-дослідним інститутом залізничного транспорту, безумовно, не могли бути прийнятими вказівки, методи і положення, як обґрунтовані, які мали такий вигляд формулювання: «...Более правильным является путь намечки, исходя из ряда соображений, отдельных сортировочных станций, существование которых в перспективе как сортировочных станций бесспорно определилось и которые будут работать как сортировочные станции также при изменениях грузовых потоков. Идея этим путем к малому числу станций, устойчивость которых в перспективе уже определилась по мере большего уточнения намечки генерального плана развития народного

хозяйства, добавлялись бы новые бесспорные сортировочные станции – опорные пункты перспективной специализации поездов» [1].

Безумовно, правильним є те, що значна кількість сортувальних станцій буде зберігати свою роль і на перспективу (цей факт знаходить своє підтвердження на всьому періоді становлення та розвитку схеми розміщення сортувальних станцій на мережі). Однак обсяг і характер їх роботи можуть суттєво змінюватися, (що мало місце в попередні періоди і буде мати в майбутньому). Всесоюзний науково-дослідний інститут залізничного транспорту в роботі [1] чітко встановив, що визначити ці зміни без знання планових вантажних потоків неможливо. Таким чином, на рівні експлуатаційних вимог було зафіксовано, що розміщення сортувальних станцій залежить не тільки і не стільки від розподілу вагонопотоків на мережі, а в першу чергу – від планових вантажних потоків. Таким чином, визначальним фактором розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць стали планові вантажні потоки, а похідним – вагонопотоки на мережі, що в повній мірі відповідає сучасним логістичним принципам організації товарних потоків.

Висновки Інституту експлуатації залізниць, щодо розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць були признані неправильними Всесоюзним інститутом залізничного транспорту, про що свідчила схема розміщення сортувальних станцій, яка на практиці себе не підтвердила [1].

Невідповідність схеми розміщення сортувальних станцій реальній ситуації призвела до необхідності її перегляду. У 1936 році на Пленумі Ради при Народному комісарові шляхів сполучення питання розміщення сортувальних станцій було поставлено кардинально: «...сейчас эти станции расположены неудачно, случайно. В одном месте сортировочные станции имеются чуть ли не через 40...50 км., а в другом и на тысячу километров нет сортировочной станции, нет горки. Придется внимательно учесть грузопотоки, перспективу их развития и в зависимости от этого пересмотреть размещение (дислокацию) сортировочных станций, строительство горок и полугорок, в том числе и механизированных» [1].

Виконуючи рішення пленума Науково-дослідний інститут залізничного транспорту в 1939 р. виконав роботу, в якій було розглянуто питання розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць на перспективу 1942–1947 рр. Ця робота суттєво відрізнялася від розробок, які виконувалися Науково-дослідним інститу-

том експлуатації залізниць (1932 р.), своєю закінченістю, фундаментальністю та за методами дослідження [1]. У цій роботі були виконані економічні обґрунтування перспективних обсягів перевезень, здійснено ґрунтовний аналіз фактичної роботи сортувальних станцій та розподілу між ними сортувальної роботи. Глибина та масштабність розробок дає право вважати, що робота Науково-дослідного інституту залізничного транспорту 1939 р. являла собою суттєвий крок вперед в теоретичному плані щодо розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць.

Початок Великої Вітчизняної війни не дозволив реалізувати на практиці наукові підходи з розміщення сортувальних станцій. Повоєнний розвиток залізничного транспорту було зорієнтовано на прогресивні технічні і технологічні рішення. Все це, а також розвиток теорії організації вагонопотоків, спричинили необхідність нового дослідження проблеми розміщення сортувальних станцій, яке було виконано Всесоюзним науково-дослідним інститутом залізничного транспорту в 1948 році «Эксплуатационные требования к размещению сортировочных станций» [1; 5]. У цій роботі питання раціональної побудови сортувальної роботи і розміщення сортувальних станцій тісно пов'язані з методологією складання планів формування поїздів. Вирішення цих питань базувалося як на міркуваннях раціональної побудови мережі, так і на правильній побудові перспективних планів формування поїздів.

Таким чином, у роботі Всесоюзного науково-дослідного інституту залізничного транспорту було здійснено системний підхід щодо вирішення питання розміщення сортувальних станцій в логічній єдності складових – плану формування поїздів і раціональної схеми побудови залізничної мережі.

У роботі [1] були сформульовані основні принципи розміщення сортувальних станцій, а в [3] – здійснено узагальнення і викладено у доступному і зручному для практичного використання вигляді. Основні принципи розміщення сортувальних станцій було зведено до двох груп: перша група визначала місце розташування сортувальних станцій, виходячи з їх географічного положення, а друга група – визначала технологічну складову (організацію вагонопотоків і технологію роботи станцій).

Загальні вимоги щодо розташування сортувальних станцій на мережі залізниць визначалися місцями масового зародження і погашення вантажних потоків, що, в свою чергу, пов'язано

з розміщенням і потребами промисловості, великих населених центрів і сільського господарства; таким чином, було констатовано, що розташування сортувальних станцій повинно відповідати розміщенню продуктивних сил країни і в повній мірі задовольняти потреби виробництва [2].

В роботі [4] П. В. Бартечев доповнив основні принципи щодо розміщення сортувальних станцій ще й економічними факторами, які зводилися до наступного: при виборі місця для розташування сортувальних станцій на мережі залізниць враховуються можливості використання і розвитку існуючих станцій, а також повинні враховуватися капітальні затрати на будівництво станцій і експлуатаційні витрати, з подальшим прийняттям рішення за результатами порівняння можливих конкурентоспроможних варіантів [4].

Враховуючи особливості залізничного транспорту і те, що рішення, які приймаються на стадії проекту, можуть мати серйозні наслідки в майбутньому, П. В. Бартечев конкретизував і навіть вимоги щодо розміщення сортувальних станцій на перспективу, які зводилися до таких принципів [4]:

- створення умов для здійснення найбільш раціональної організації вагонопотоків;
- раціональний розподіл сортувальної роботи між великими вузлами;
- концентрація всієї сортувальної роботи у вузлах по можливості на одній сортувальній станції (виняток може становити тоді, коли така концентрація призводить до значних додаткових пробігів і збільшенню простоїв у вузлі, а також у вузлах з великою кількістю примикань);
- забезпечення всіх вимог раціональної організації місцевої роботи;
- максимальне використання існуючих сортувальних станцій та їх пристроїв;
- створення максимальних експлуатаційних зручностей, необхідних резервів потужності і маневреності в роботі залізничної мережі;
- мінімальні капітальні витрати на реконструкцію існуючих і будівництво нових сортувальних станцій.

Таким чином, П. В. Бартечев, розвиваючи ідеї своїх попередників, у лаконічній формі сформулював конкретні принципи розміщення сортувальних станцій на мережі залізниць, які враховували всі основні складові: географічні, технологічні, економічні, що являє собою зразок комплексного, системного підходу до вирішення складних технологічних задач.

Висловлені на початку ХХ сторіччя наукові положення стосовно системи організації ваго-

но потоків і розміщення сортувальних станцій, зокрема, ідеї доцільності концентрації сортувальної роботи на великих станціях з високим рівнем технічного оснащення, використовується і в наш час. Вітчизняний і закордонний досвід підтверджує, що найбільш високі економічні показники в системі організації вагонопотоків досягаються при дотриманні принципу концентрації сортувальної роботи [5].

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Эксплуатационные требования к размещению сортировочных станций. // Труды Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – М.: Трансжелдориздат, 1948. – Вып. 25. – С. 289
2. В. Н. Образцов. Проект распределения узлов на русской железнодорожной сети и сортировочной работы узлов с целью сокращения маневро-

вой работы и простоя вагонов. // Техника и технология путей сообщения., 1922. – № 12.

3. Образцов В. Н. Станции и узлы / В. Н. Образцов, В. Д. Никитин, Ф. И. Шаульский, С. П. Бузанов. – М.: Трансжелдориздат, 1949. – 540 с.
4. П. В. Бартенев. Железнодорожные станции и узлы. – М.: Трансжелдориздат, 1953 – 504 с.
5. Изучение опыта технических изысканий, проектирования и строительства транспортных сооружений ж. д. узлов и станций (сортировочные станции) // Труды Киевгипротранса. – К., 1965. – 126 с.
6. Савченко И. Е. Развитие железнодорожных станций и узлов / И. Е. Савченко, К. Ю. Скалов. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – 296 с.
7. А. И. Платонов. Взаимодействие процессов на сортировочных станциях. – М.: Трансжелдориздат, 1955. – 221 с.

Надійшла до редколегії 25.05.2005.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМЫ ЗАЩИТЫ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ПРИ РЕКУПЕРАТИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ ДЭ1

Наведено аналіз роботи системи захисту тягових двигунів від зовнішніх і внутрішніх коротких замикань при рекуперативному гальмуванні на електровозах ДЕ1. На підставі розрахунків встановлено, що прийнята заводом вищезазначена система захисту не відповідає вимогам захисту тягових двигунів від коротких замикань при рекуперативному режимі.

Автори пропонують доповнити систему захисту тягових двигунів від зовнішніх і, особливо, від внутрішніх коротких замикань при рекуперативному гальмуванні встановленням швидкодіючих контакторів на боці «землі» з автоматичним примусовим розмагнічуванням обмоток збудження тягових двигунів, які працюють в режимі генератора, струмом рекуперації за час спрацювання захисту.

Представлен анализ работы системы защиты тяговых двигателей от внешних и внутренних коротких замыканий при рекуперативном торможении на электровозах ДЭ1. Расчетами установлено, что принятая заводом вышеуказанная система защиты не отвечает требованиям защиты тяговых двигателей от коротких замыканий при рекуперативном режиме.

Авторами предлагается дополнить систему защиты тяговых двигателей от внешних и, особенно, от внутренних коротких замыканий при рекуперативном торможении установкой быстродействующих контакторов со стороны «земли» с автоматическим принудительным размагничиванием обмоток возбуждения тяговых двигателей, работающих в генераторном режиме, током рекуперации за время срабатывания защиты.

The article deals with the analysis of the work of Traction Motor Protecting System on electric locomotives DE1, which protects the motors from inner and outer short circuits in the mode of recuperative breaking. The calculations have revealed that the system in question, installed by the producer, does not meet the requirements of protecting the motors from short circuits in the recuperative mode.

For extra protection of the motors from outer, and especially – from inner short circuits, the authors suggest complementing the system by quick-acting contactors from the «earth» side, with automatic forced demagnetization of traction motor excitation windings, operating in generator mode, with the recuperative current during the protection activation.

Как известно, к быстродействующей защите двигателей от токов коротких замыканий при рекуперативном режиме предъявляются следующие требования [1]:

а) защита должна быть быстродействующей, чтобы максимальный якорный ток не превышал 3–4-кратного часового тока;

б) скорость спада тока при его отключении, определяемая характеристикой дугогашения быстродействующего выключателя, должна быть такой, чтобы при этом не возникало опасных перенапряжений (максимальное напряжение между разноименными щеткодержателями не должно превышать 2–5-кратного номинального напряжения двигателя);

в) должна быть обеспечена защита тяговых двигателей от токов короткого замыкания как вне электровоза, так и на самом электровозе.

Процесс короткого замыкания тягового двигателя при рекуперативном торможении очень сложен. Характерным при этом является чрез-

вычайно быстрое нарастание тока, обусловленное малой индуктивностью якорной цепи. Чрезвычайно быстрое нарастание тока приводит к полному расстройству коммутации двигателя, так как увеличению магнитного потока дополнительных полюсов препятствуют вихревые токи, а при больших токах якоря дополнительные полюса насыщаются. Этот процесс в конечном итоге приводит к круговым огням на коллекторах тяговых двигателей.

От характера протекания переходных процессов в значительной степени зависит надежность и работоспособность электрической машины в эксплуатации. Поэтому очень важно уметь предопределить характер протекания переходных процессов, оценивать их количественно, уметь управлять этими сложными процессами.

Исследование переходных процессов, как теоретическое, так и экспериментальное, дело сложное и трудоемкое. Трудности в теоретическом плане связаны с необходимостью решения

сложных нелинейных дифференциальных уравнений, а принимаемые допущения для упрощения решений вносят ту или иную погрешность, которую очень трудно оценить. Трудности экспериментального порядка связаны с необходимостью одновременного измерения многих параметров, характеризующих переходные процессы.

При изменении токов и магнитных потоков в нерасслоенном магнитопроводе индуцируются вихревые токи, которые во многих случаях значительно влияют на течение переходных процессов.

На основании исследований Е. В. Горчикова [2] и Ю. А. Рунова [3], учитывая в переходных процессах сильное действие вихревых токов в магнитной цепи тяговых двигателей во время

внешних и внутренних коротких замыканий в режиме рекуперации, можно принять, что за время переходного процесса $t = 0,015$ с магнитный поток в машине уменьшается незначительно и составляет от начального значения

$$C\Phi = 0,92C\Phi_0 = \text{const}.$$

Произведем расчет переходных процессов в силовой цепи тяговых двигателей от внешних и внутренних коротких замыканий в режиме рекуперативного торможения на электровозе ДЭ1.

Расчетная схема рекуперативного торможения на электровозе ДЭ1 на параллельном соединении тяговых двигателей представлена на рис. 1.

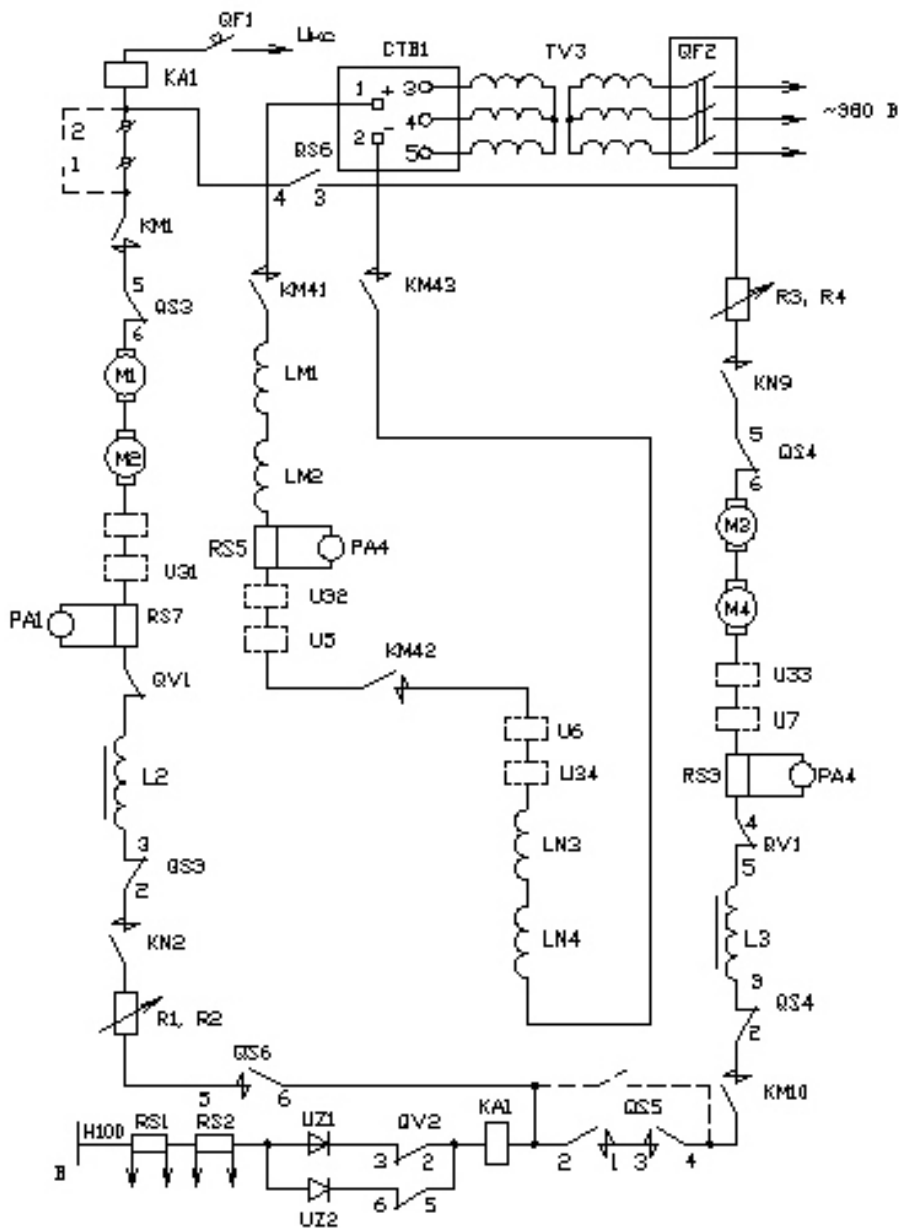


Рис. 1. Расчетная схема рекуперативного торможения на электровозе ДЭ1 на параллельном соединении тяговых двигателей

1. Переходной процесс при коротком замыкании в контактной сети описывается уравнением

$$2C\Phi_p V_p - U_{кв}^1 = L_{общ} \frac{dI}{dt} + R_{общ} I, \quad (1)$$

где

$$L_{общ} = L_{я} + (L_{ко} + L_{дп}) L_{иш} = \\ = 0,83 + (0,73 + 4,5) 10^{-3} = 7,62 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

где $L_{я}$ – индуктивность якоря, Гн, $L_{ко}$, $L_{дп}$ – индуктивность компенсационных и дополнительных обмоток соответственно, Гн, $L_{иш}$ – индуктивность индуктивного шунта обмоток возбуждения двух тяговых двигателей, Гн;

$$R_{общ} = R_{я} + (R_{ко} + R_{дп}) R_{иш} + R_{ст} = \\ = 0,098 + 0,022 + 0,378 \approx 0,6 \text{ Ом},$$

где $R_{я}$ – сопротивление якоря при 115 °С, Ом, $R_{ко}$ – сопротивление компенсационной обмотки при 115 °С, Ом, $R_{дп}$ – сопротивление дополнительных полюсов при 115 °С, Ом, $R_{иш}$ – сопротивление индуктивного шунта, Ом, $R_{ст}$ – величина стабилизирующего сопротивления, Ом; скорость, при которой произошло короткое замыкание, км/ч

$$V_p = V_0 = \text{const}.$$

За время протекания переходного процесса ($t = 0,015$ с) скорость практически не может измениться.

Уравнение (1) необходимо записать в следующем виде:

$$2 \cdot 0,92 C \Phi_0 V_0 = L_{общ} \frac{dI}{dt} + R_{общ} I. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) имеет вид

$$I(t) = I_{уст} - (I_{уст} - I_0) e^{-\frac{t}{T}}, \quad (3)$$

где

$$I_{уст} = \frac{2 \cdot 0,92 C \Phi_0 V_0}{R_{общ}} = \\ = \frac{2 \cdot 0,92 \cdot 1900}{0,6} = 5826 \text{ А};$$

$$T = \frac{L_{общ}}{R_{общ}} = \frac{7,62 \cdot 10^{-3}}{0,6} = 12,7 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$I_0 = 500$ А – начальный ток рекуперации.

Подставляя данные в уравнение (3) получим следующий результат:

$$I(t) = 5826 - (5826 - 500) e^{-\frac{t}{12,7 \cdot 10^{-3}}} = \\ = 5826 - 5326 e^{-78,7t}.$$

Время отключения тока короткого замыкания быстродействующим выключателем составляет $t = 0,015 \dots 0,02$ с [1].

Тогда максимальный ток в цепи тяговых двигателей при коротком замыкании в контактной сети может достигнуть 4180 А.

$$I(t) = 5826 - 5326 e^{-78,7 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} \approx 4180 \text{ А}$$

Превышение максимального тока рекуперации перед часовым током составит

$$\gamma = \frac{I_{p(\max)}}{I_{час}} = \frac{4180}{565} = 7,4,$$

т. е. больше допустимого.

При этом в силовой цепи тяговых двигателей возникнут перенапряжения при отключении тока быстродействующим выключателем:

$$U_L = 2 \cdot 0,92 C \Phi_0 V_0 + L_{общ} \frac{\Delta I}{\Delta t} = \\ = 3496 + 7,62 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{4180}{0,015} = \\ = 3496 + 2123 = 5600 \text{ В} = 5,6 \text{ кВ}.$$

2. Аналогичные явления произойдут и при внутреннем коротком замыкании в цепи первого тягового двигателя (например, пробой щеткодержателя). Ток рекуперации достигнет недопустимой величины за тоже время (0,015 с) хотя быстродействующий выключатель сработает. А защита от тока короткого замыкания линейными контакторами приведет к их сгоранию, так как на это линейные контакторы не рассчитаны и сработают через 100 мс, т. е. в 10 раз позже.

3. Особо неблагоприятный случай короткого замыкания – это возникновение его в цепи 3-го тягового двигателя в режиме рекуперации.

В этом случае в параллельной цепи М4-М3 не включено стабилизирующее сопротивление $R_{ст} = 0,378$ Ом. Поэтому расчетные величины составят:

$$I_{уст} = \frac{2 \cdot 0,92 \cdot 1900}{R_{общ}^*} = \frac{3496}{0,218} = 16036 \text{ А},$$

где

$$R_{общ}^* = R_{общ} - R_{ст} = 0,596 - 0,378 = 0,218 \text{ м}.$$

$$T = \frac{7,62 \cdot 10^{-3}}{0,218} = 34,95 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

Выводы

$$I(t) = 16036 - (16036 - 500)e^{-\frac{t}{34,95 \cdot 10^{-3}}} =$$

$$= 16036 - 15536e^{-28,6t}.$$

При $t = 0,015$ с, $I(t) = 5920$ А кратность составит:

$$\gamma = \frac{I_{p(\max)}}{I_{\text{час}}} = \frac{5920}{565} = 10,4,$$

т. е. значительно больше.

Перенапряжение составит $U_{\sim} = 6,5$ кВ.

Произведенные аналогичные расчеты защиты тяговых двигателей от внешних и внутренних коротких замыканий при рекуперативном торможении на электровозах ДЭ1, но при начальном токе 400 А (вместо 500 А), показали практически такие же кратности превышения предельного разрываемого максимального тока рекуперации по сравнению с часовым током и составили соответственно 7,4 и 10,3.

1. Защита с помощью только поляризованного быстродействующего выключателя типа UR26-64 тяговых двигателей от внешних и внутренних коротких замыканий при рекуперативном торможении электровоза ДЭ1 не соответствуют требованиям, предъявленным к защитным аппаратам.

2. Необходимо дополнить систему защиты БВ установкой быстродействующего контактора со стороны «земли» после стабилизирующего сопротивления последовательно с тяговыми двигателями в каждой параллельной ветви. При отключении БК обмотки возбуждения двигателей должны быть включены последовательно с якорными обмотками через шунтирующие сопротивление $R_{\text{ш}}$ с принудительным автоматическим размагничиванием их током рекуперации за время срабатывания защиты (рис. 2).

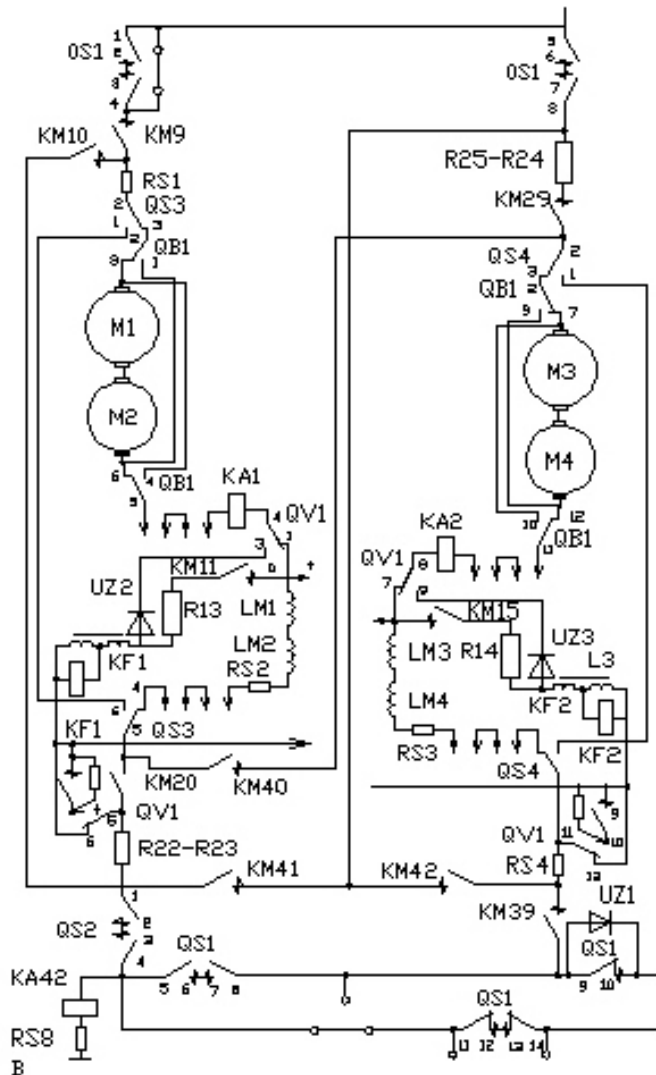


Рис. 2. Схема одной секции электровоза ДЭ1 при рекуперативного торможения на параллельном соединении тяговых двигателей с применением быстродействующего контактора

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мацне В. Д. Исследование электрооборудования электроподвижного состава постоянного тока / В. Д. Мацнев, А. С. Курбасов, Б. С. Сухо-руких, Ю. И. Чуверин // Труды ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1959. – С. 21
2. Захарченко Д. Д. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые машины и трансформаторы / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков, П. Н. Шляхто. – М.: Транспорт, 1968. – С. 104–108.
3. Рунов Ю. А. Исследование электромагнитных переходных процессов в тяговых двигателях электроподвижного состава // Труды ЦНИИ МПС «ВНИИЖТ». – М.: Транспорт, 1974. – Вып. 516. – С. 78–92,

Поступила в редколлегию 23.03.2005.

Л. В. ПЕТРОВИЧ, С. М. ГОЛІК (ДІТ)

ВИКОРИСТАННЯ ГРАФ-МОДЕЛЕЙ У ЗАДАЧАХ ДІАГНОСТУВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ В КОЛАХ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОВОЗА ЧС7

Наведено пропозиції щодо модернізації бортових діагностичних пристроїв електровоза ЧС7 на підставі використання граф-моделей електричних кіл управління для розрахунку мінімальної кількості і місця розташування контрольних точок.

Предложен вариант модернизации бортовых диагностических устройств электровоза ЧС7 на основе использования граф-моделей электрических цепей управления для расчета минимального количества и места расположения контрольных точек.

A modernization option of onboard test units of the electric locomotive ChS7 on the basis of use of control electric circuits flow-charts for calculation of the minimal number and location of the control points has been proposed in the article.

Залізничний транспорт України займає провідне місце в єдиній транспортній системі країни. Важливу роль він відіграє у перевезенні пасажирів, приймаючи на себе велику частку всього пасажиропотоку, який розподіляється між всіма видами транспорту. Для задоволення потреб населення у перевезеннях необхідно перш за все забезпечити безпеку руху поїздів та комфортність пасажирів. Все це вимагає ефективного використання технічних засобів, підвищення якості обслуговування пасажирів і поліпшення експлуатації та ремонту рухомого складу, зниження собівартості перевезень та відшукування резервів для виконання цих завдань.

На електрифікованих залізницях СНД і України в пасажирському русі широко використовуються електровози постійного струму серії ЧС7 виробництва фірми Шкода (Чехія).

У інвентарному локомотивному парку Укрзалізниці на даний час знаходиться близько 60 електровозів ЧС7.

На електровозах даної серії для полегшення пошуку відмов у електричних колах управління локомотивними бригадами чи ремонтним працівниками передбачено бортовий засіб технічного діагностування «ПУМ-Шкода» типу 2KSL1.

Використання цього діагностичного пристрою сприяє зменшенню кількості непланових ремонтів, внаслідок покращення якості перевірки рухомого складу під час проведення технічного обслуговування та ремонту. Також знижується кількість аварійних зупинок поїздів на перегонах, затримок відправлення поїздів тощо, які викликані неспроможністю локомотивної бригади відшукати та

усунути несправність, яка виникла в низьковольтних колах електровоза. Таким чином, дані переваги сприяють зменшенню втрат, що несе Укрзалізниця через потребу виконання непланових ремонтів тягового рухомого складу та порушення графіка руху.

Проте, крім наведених переваг, засіб технічного діагностування «ПУМ-Шкода» типу 2KSL1 має певні недоліки. Даний пристрій дозволяє перевіряти низьковольтні кола лише під час стоянки електровоза та при відсутності струму в його електричних колах, що перешкоджає слідкуванню за станом кіл управління під час руху. Крім того, панель керування знаходиться в машинному відділенні, що викликає незручності в експлуатації. Слід додати, що під час аналізу технічного стану бортових діагностичних пристроїв «ПУМ-Шкода» типу 2KSL1 на електровозах ЧС7 серій 82E1...82E8 було виявлено, що на даний час ці пристрої знаходяться в несправному стані або взагалі демонтовані.

На підставі вищесказаного пропонується під час проведення капітального ремонту з подовженням ресурсу електровозів ЧС7 заводського типу 82E1...82E8 встановити діагностичні пристрої, які б забезпечили здатність безперервного контролю за станом низьковольтних кіл управління основними електричними апаратами електровоза з можливістю якнайшвидшого виявлення місця обриву чи короткого замикання в даних електричних колах.

Для розробки діагностичних пристроїв необхідно визначити кількість і місце розташування контрольних точок, які необхідні для локалізації несправностей та забезпечення стику-

вання пристрою з об'єктом діагностування, тобто електричним колом. З цією метою скористаймося методикою визначення і мінімізації контрольних точок, що наведена у [1].

Низьковольтні електричні кола електровоза ЧС7 можуть бути класифіковані як об'єкти з дискретним принципом дії, процеси функціонування яких можуть бути виражені певною зміною деяких кодових комбінацій. Для елементів цих кіл справедливе співвідношення

$$m_i^{\text{вих}} = F_i(m_i^{\text{вх}}; m_i^{\text{вн}}), \quad (1)$$

де $m_i^{\text{вих}}$ – вихідний параметр i -го елемента; $m_i^{\text{вх}}$ – вхідний параметр i -го елемента; $m_i^{\text{вн}}$ – внутрішній параметр i -го елемента; F_i – правило перетворення вхідного параметра у вихідний при заданих значеннях внутрішнього параметра.

Вхідні та вихідні параметри можна визначити за напрямом поширення потенціального сигналу.

Якщо елемент i зв'язаний з елементом j та можна знехтувати завадами, то повинно бути справедливо:

$$m_i^{\text{вих}} = m_j^{\text{вх}}. \quad (2)$$

Кожен стан електричної схеми повинен розрізнятися на деякій сукупності контрольних точок без безпосереднього контролю внутрішніх параметрів елементів.

Внутрішні параметри призначаються залежно від типу елемента. Основними елементами низьковольтних кіл управління електровоза ЧС7 є блок-контакти, для яких внутрішніми параметрами є провідність у двох граничних випадках – нуль та безмежність. У випадку несправності будь-якого елемента на його виході може бути зафіксована або «константа 1» або «константа 0». До такого роду несправностей відносяться: коротке замикання, обрив кола і несправності, які призводять до них, наприклад, заїдання або псування рухомої частини електромагнітного реле.

Для визначення кількості та місця розташування контрольних точок Представимо структуру електричного кола управління певним апаратом за допомогою граф-моделі, яка складена з скінченної множини потужністю η елементів

$$N = \{ n_1, n_2, \dots, n_\eta \}.$$

Якщо множину N розбити на підмножини $N_1 \subset N, N_2 \subset N, \dots, N_\gamma \subset N$, причому для будь-яких $N_i N_j$

$$\bigcap_{\substack{i=1; j=1 \\ i \neq j}}^{\gamma} N_i N_j = \emptyset, \quad (3)$$

то отримаємо скінченну множину потужністю γ гілок граф-моделі

$$Q = \{ N_1, N_2, \dots, N_\gamma \}.$$

Ці гілки породжують структуру електричного кола, перетинаючись між собою в певних вузлах. Сукупність вузлів буде визначена множиною P потужністю σ

$$P = \{ p_1, p_2, \dots, p_\sigma \}.$$

Необхідно визначити потужність χ множини T контрольних точок

$$T = \{ t_1, t_2, \dots, t_\chi \}.$$

Потужність множини контрольних точок визначається за формулою

$$\chi = \sigma + \eta - \gamma. \quad (4)$$

Вихідну кількість контрольних точок χ можна зменшити. Розглянемо процес мінімізації з використанням орієнтованого графа, вершинами якого є всі контрольні точки, які визначені за (4), а кожна дуга – це деякий елемент електричного кола. Напрямок дуги відповідає напрямку руху сигналу від входу елемента до його виходу. Кожній вершині графа відповідає число вихідних параметрів, яке рівне кількості вхідних дуг. Внутрішні параметри ідентифікуються тільки з дугами. Через вихідні параметри опосередковано оцінюються внутрішні параметри елементів електричного кола. Тому скороченню підлягають вершини графа, які входять у підмножину $T_1 \subset T$

$$T_1 = \{ t/t \in T, \Gamma t \cup \Gamma^{-1} t \neq \emptyset; [\mu_1 \geq 2] \vee [\mu_{-1} \geq 2] \}, \quad (5)$$

де μ_1 – потужність Γt ; μ_{-1} – потужність $\Gamma^{-1} t$, тобто ті вершини, які вище були класифіковані як вузли. За винятком тих вершин, котрі відповідають точкам подачі впливів в електричному колі. Звідси, першим обмеженням є заборона скорочення контрольних точок, що належать елементам впливу. Також не підляга-

ють скороченню контрольні точки, які забезпечують перевірку «землі» у однопровідних електричних схемах.

Мінімально можлива кількість контрольних точок в електричному колі, що підлягає контролю, може бути визначена на підставі (4) як:

$$\chi_{\min} = \sigma + \eta - \gamma - \sigma_1, \quad (6)$$

де σ_1 – потужність підмножини T_1 , елементи якої відповідають умові (5), і тому виключаються з врахуванням обмежень.

На підставі описаної моделі було розроблено граф-моделі електричних кіл управління швидкодіючим вимикачем (рис. 1) і електропневматичними вентилями приводу про-

міжного контролера першої секції електровоза ЧС7 (рис. 2) та визначено мінімальну кількість та місце розташування контрольних точок. Ці точки на рисунках позначені чорними крапками з суцільними пронумерованими стрілками.

Наприклад, у колі котушки контактора 479 управління швидкодіючим вимикачем – точки 5, 8, 26 і 38. У колі утримуючої котушки швидкодіючого вимикача – 5, 8, 18 і 33. Дані контрольні точки необхідно зв'язати із світлодіодами, які будуть знаходитися на спеціальній панелі в кабіні машиніста, по аналогії з діагностичним пристроєм застосованим на електровозах ЧС7 серії 82Е9.

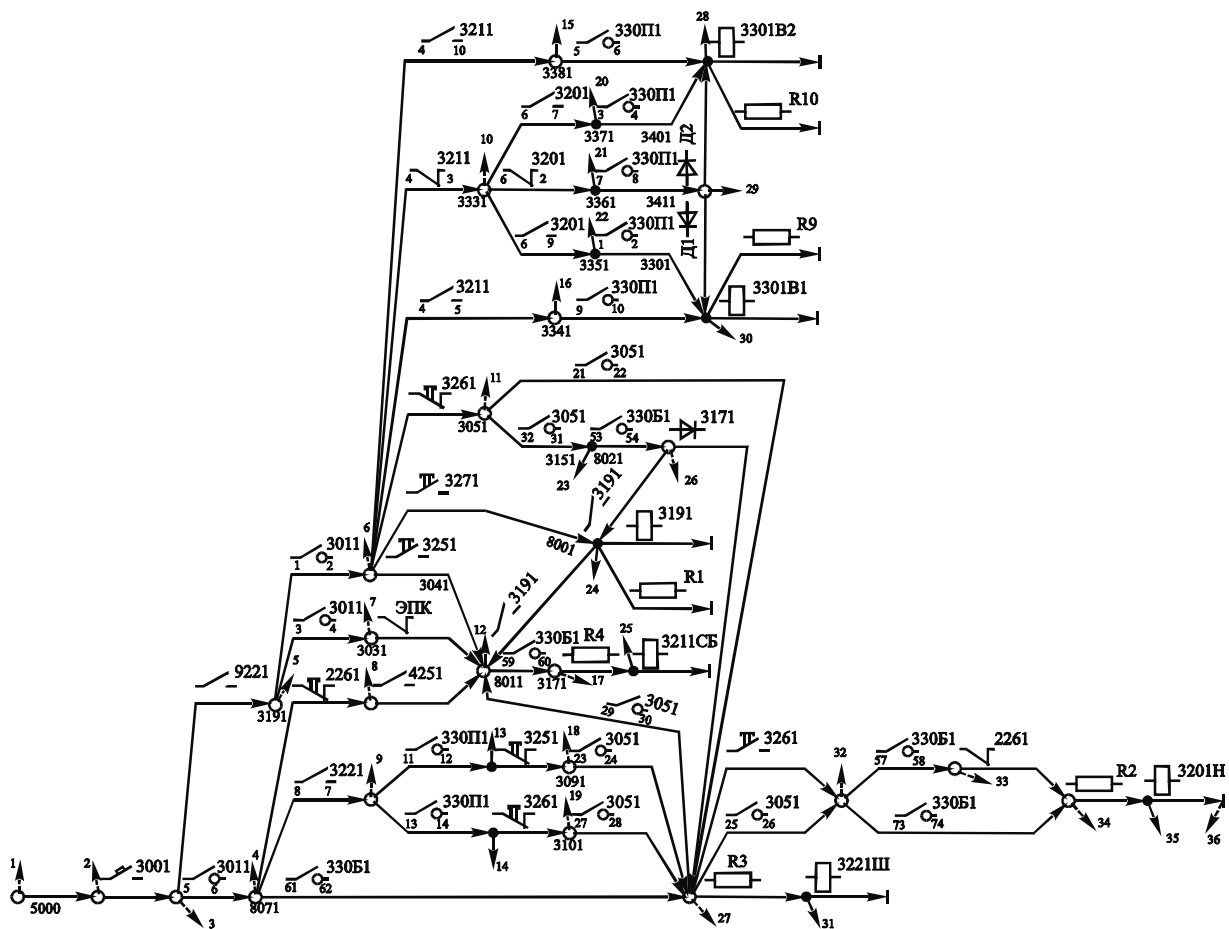


Рис. 1. Граф-модель електричних кіл управління швидкодіючим вимикачем електровоза ЧС7

Граф-моделі схеми кіл управління електровоза зображені у вигляді ліній, над якими наведено умовне позначення елемента згідно з принциповою схемою. Проводи, що з'єднують елементи умовно показані крапками з номерами відповідно до принципової електричної схеми. Напрямок розподілу потенціалу і протікання струму вказано стрілками з врахуванням взаємодії апаратів кіл управління при їх

спрацюванні. Раніше подібна методика побудови граф-моделей використовувалась в цілях діагностування кіл управління електровоза ВЛ80^К [2].

Крім того граф-моделі електричних кіл можуть бути використані для побудови програм пошуку несправностей локомотивними бригадами і ремонтними працівниками.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бородин А. А. Сокращение числа контрольных точек в электрических цепях ЭПС методами анализа графической модели / А. А.Бородин , В. В. Привалов , Ю. К. Чудаков // Труды ВЗИИТа. – М., 1972. – Вып. № 61 – 193 с.
2. Андреев А. А. Техническое обслуживание электровозов переменного тока / А. А. Андреев, В. В. Крошнев. – М.: Транспорт, 1982. – 156 с.
3. Карасев И. И. Машинисту об электровозе ЧС7 / И. И. Карасев , Л. П. Ратомский. – М.: Транспорт, 1994. – 223с.

Надійшла до редколегії 22.03.2005

USING OF SMART DUST IN TRANSPORT SERVICES

Smart dust – концепція майбутнього, яка розглядає використання мікроскопічного устаткування на залізничному транспорті. Ця технологія найближчого майбутнього заснована на крихітних датчиках, здатних збирати, обробляти і передавати інформацію на підставі бездротового зв'язку.

Smart dust – концепция будущего, которая рассматривает использование микроскопического оборудования на железнодорожном транспорте. Эта технология ближайшего будущего основана на крошечных датчиках, способных собирать, обрабатывать и передавать информацию на основе беспроводной связи.

Smart dust utilization is futuristic concept that thinks over the use of microscopic equipment called «smart dust» on railway transport. It appears from the technology of near future, whose base should be tiny sensors able to collect, process and wirelessly transfer information.

Introduction

The main idea of this technology is the possibility in some space (for example inside the wagon) to recreate hundreds of tiny sensors that are designed to sense, measure and transmit data like temperature, humidity or the power of frequency of vibrations, so they would allow to detect some devices, people manners in some space or detail check given surrounding.

Definition of smart dust

Originally part of a larger project funded by the U. S. Department of Defense central research and development group, Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), the Santa Clara, Calif, – based chip making giant has worked with the University of California, Berkeley – Kris Pister and Randy H. Katz – to create cubic millimetre-sized sensors, or «motes». Micro-electromechanical sensor (MEMS), which is the base of smart dust, is called mot. First prototypes of mot were not like dust, their size were approximately 100 mm³. So they were called macro motes. The technology was tested with the macro motes and is full functionally. Current motes are about 4 mm³ and the goal for researchers is to get these chips down to 1 mm on a side, to be like the grain of sand though each would contains sensors, computing circuits, bidirectional wireless communications technology and a power supply. Motes would gather scads of data, run computations and communicate that information using two-way band radio between motes at distances approaching 250 meters.

Devices called smart dust are able to

- communicate wirelessly with surroundings,
- communicate wirelessly among each other,
- create distributed network.

The motes create together one big network, which is able to evaluate situation on high-level and then send processed analyses to information system.

Basic components of smart dust

Current motes are about 4 mm³ and in this really small space are all devices, needed for its function. The basic components of the mot are sensors. They collect information about temperature, humidity, intensity of the light, vibrations and air pressure. In the future will be added another types like sensors for sound and video.

Microprocessor serves for processing of information obtained by sensors of the mot as well as by communication device. Memory SRAM saves the program for microprocessor and transferred or detected data. Communication with other motes or main device proceeds by sophisticated communication device. Device also need power supply and batteries.

Function and components of smart dust

Device is able to perform function, which is determined by types of sensors installed in it and by the type of program saved in the microcontroller. Mot is created to save the power. Mot is almost 99 % in stand-by mode and only 1 % of the time is performed its activity. Timer counts out time, which elapsed from particular activity of the mote. When the timer reaches zero value, it starts appropriate part of the mot. It could be communication channel, sensor, analog-digital converter or microprocessor. Given device after the end of its activity sets the timer to given value. This is the principle of the work of the mot. Device in stand-by mode obtains the energy. Sensors scan values of physical quantity from the space and send them to the analog-digital converter, when they are converted to the digital form and saved to the memory SRAM. Microcontroller analyses them and defines, what to do with them: delete, archive or send a notice. Microcontroller can also receive through the communication channel new program, so it is possible to program the device for new type of tasks.

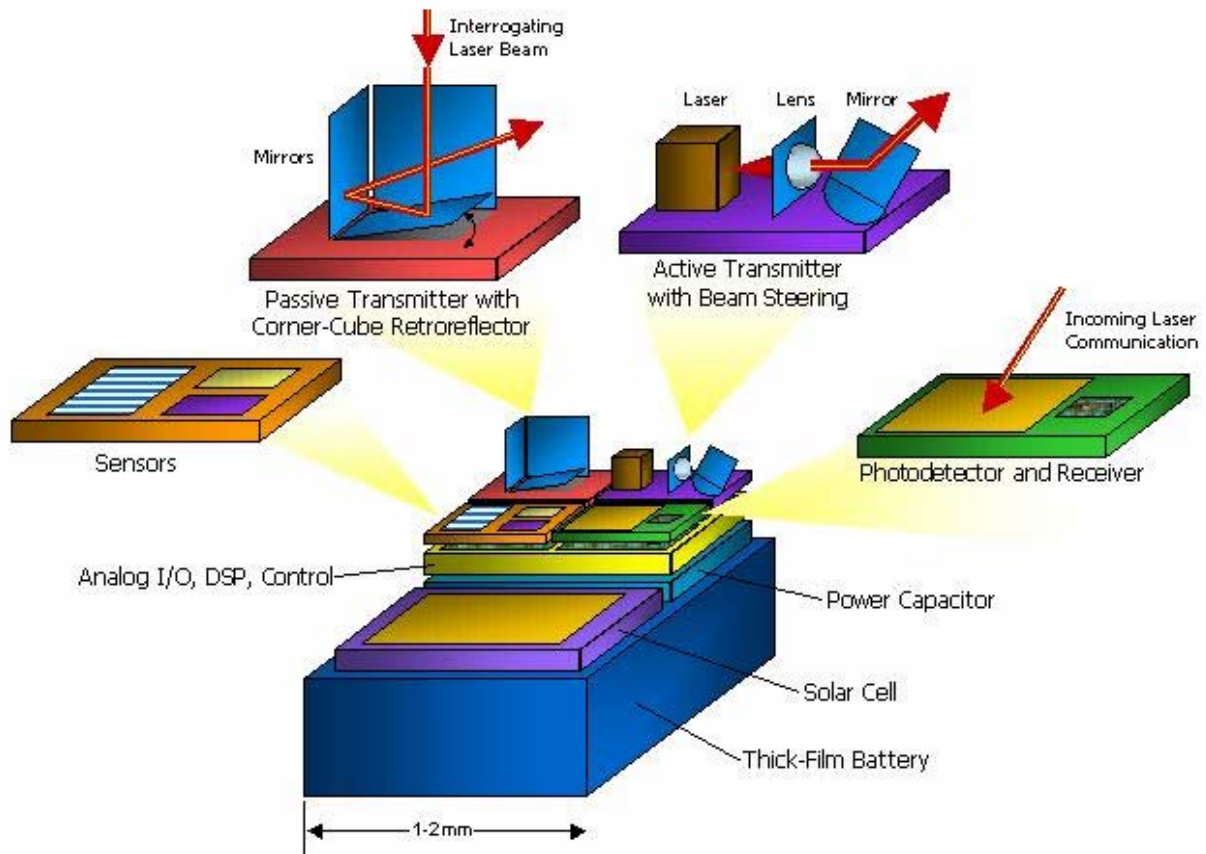


Fig. Multifunctional mote

Battery is able to save the energy with the grossness 1J for 1 mm³. Because of the small size of the mot, its capacity is very small. Researches want to minimize power drain by particular components of the mot. Except the battery, other power source is solar collector, which is able to supply energy by sunlight but also in the room. Another way is a little bit unconventional: mot can supply energy from the change of air pressure from quake. Due to this fact, its lifetime can be several years.

Very interesting is communication channel. It can use for the data transport ray of light, because it's more useful than using of radio communication. Every mot has the light emitter, which has micro mechanic controlled mirror, so it can relay to arbitrary direction. Other communication device is passive, but his function is not only to receive but also to relay information. Major system relays towards mot a ray of light and mot modulate information to it and then, through the use of mirrors system reflects it back. Mirror system is made by three square mirrors placed to right-angle, so we can compare it to a corner of a room. Ray of light

is that's why reflected to the same direction as it came from. By the minimal movements of one of the mirror is possible to modulate information to the ray. Such system of communication is very effective, whereas while using of macro motes were made 20 kilometres transfers.

Smart dust utilization

For the smart dust is in present a lot of potential commercial applications, so it can be used in different areas of our life. It can be also used in military sphere and in espionage. In the field of transport, logistic and forwarding, there are these applications:

- weather/seismological monitoring,
- using of sensors in the packing – for example at automatic stock-taking in a stock,
- monitoring of vehicle and commodity move,
- monitoring of vehicle parameters in all types of transport,
- monitoring of traffic at frequented communications,
- detection of errors at manufacturing via vibration trapping, which are outside the given range,

- monitoring of the clients in company,
- like a part of technology of so-called intelligent buildings – by simply addition to building coat – by means of smart dust would be possible to collect information about building state and manage it,
- monitoring of a power drain in companies, what could help to reform power sources management,
- monitoring of surrounding – for example smart dust can be pulverized round chemical and atom manufactures and its main task would be immediate to inform about possible accident.

Smart dust can be also used like protection against theft and forfeit and provision of security at stocking or transportation. It is very difficult to spring smart dust. It is possible to dust it over huge territory and observe movement of people, or focus on small space of bureau or stock. It is not required to install it, you can only dust it.

This concept applies and uses this system in railway transport.

Smart dust utilization in railway freight transport

Dust of smart dust (condition is: dusting in enclave) in:

- wagon,
- container,
- swap body.

It is thinking over the smart dust utilization mostly in dispatches, which involve increased attention-transportations on special conditions:

- transportation of easily spoiled goods,
- transportation of animals,
- transportation of dangerous commodity,
- transportation of valuable dispatches.

Smart dust utilization at transportation of easily spoiled goods

Easily spoiled goods are commodities, which go fast bad and which involve individual precautions during the railway carriage, to be sheltered from cold or warm impact. So the easily spoiled goods involve during the transportation icing, aerating, fumigation or other protection against cold or warm impact.

Smart dust has in wagon these functions:

- monitoring of humidity, temperature, vibrations, dustiness, aeration,
- distant regulation of temperature, humidity as necessary,
- protection of sending against abstraction,
- signalization of technical fault of refrigeration, freezing, or warming equipment,
- signalization of inconvenient conditions for given transportation.

Smart dust utilization at transportation of animals

Transportation of animals is specific, because it involves individual precautions of transportation.

Smart dust inspects setting of wagon, in which are animals transported:

- diagnostic of airing,
- monitoring of humidity and temperature,
- diagnostic of wagon sanctity during transportation,
- diagnostic of animal health,
- snapping of animal kill,
- signalization of setting defiance,
- distant regulation of temperature, humidity according to weather eventually as necessary.

Smart dust utilization at dangerous commodity transportation

It includes:

- monitoring of setting changes inside wagon,
- signalization of unexpected changes of settings, which could affect adversely transported dangerous commodity,
- monitoring of physical statements (temperature, humidity, vibrations), which could affect adversely to transported dangerous commodity,
- signalization of emergency conditions,
- diagnostic of wagon sanctity during transportation.

Smart dust utilization at valuable dispatches transportation

Valuable sending is sending, which has high financial value, eventually has other value (personal, artistic, historical etc.). Smart dust is there used for security, but also is able other monitoring if necessary.

Utilization:

- monitoring of setting inside of wagon, container or swap body,
- signalization at specific situation (damage of traffic or transportation vehicle),
- signalization of unexpected change of setting,
- in the case of a sending transported by specific conditions: monitoring of specific functions.

Conclusion

«Smart dust» devices are tiny wireless microelectromechanical sensors (MEMS) that can detect everything from light to vibrations. Thanks to recent breakthroughs in silicon and fabrication techniques, these «motes» could eventually be the size of a grain of sand, though each would contain sensors, computing circuits, bidirectional wireless

communications technology and a power supply. Motes would gather scads of data, run computations and communicate that information using two-way band radio between motes at distances approaching 300 metres. Potential commercial applications are varied, ranging from catching manufacturing defects by sensing out-of-range vibrations in industrial equipment to tracking patient movements in a hospital room. Huge range of smart dust utilization can be also in the railway transport.

BIBLIOGRAPHY

1. MADOŠ, B.: Smart dust, PC REVUE 9/2003
2. <http://www.computerworld.com/mobiletopics>
3. <http://www.bsac.eecs.berkeley.edu/archive>
4. <http://siliconvalley.internet.com/news/article>

Submitted to the editorial board 18.02.05.

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС

Розглянуті фактори, які впливають на міцнісні параметри, та інші характеристики залізничних коліс.

Рассмотрены факторы, влияющие на прочностные параметры, и другие характеристики железнодорожных колес.

Factors have been examined that influence the strength parameters and other characteristics of railway wheels.

Повышение долговечности железнодорожных колес играет важную роль в экономии металла и снижении металлоемкости изделий для транспорта. Решение этой задачи весьма затруднительно из-за того, что показатели внешней нагрузки вагонов неуклонно повышаются: растут скорости и нагрузки на ось, мощность и величина работы, совершаемой в единицу времени [1].

Если противопоставить увеличение количества выпускаемых колес ежегодному изъятию их по различным дефектам, то для сохранения общего количества пришлось бы ежегодно увеличивать поставки на 5...10 %.

Неприемлемость такого экстенсивного пути развития требует постоянного повышения надежности железнодорожных колес. Многолетний опыт потребителей и производителей данной продукции свидетельствует, что комплексный учет многих факторов представляет одно из направлений решения этой задачи.

Из наиболее важных направлений, позволяющих хотя бы частично приблизиться к решению указанной проблемы, следует выделить, кроме сугубо металлургических факторов, направленных на повышение качества стали в целом (уменьшение загрязненности по неметаллическим включениям различной физико-химической природы, снижение вредных примесей, окручивающих металл и т. д.), во-первых, использование низколегированных сталей типа 60ГФ, 65Г взамен средне- и высокоуглеродистых. Второе по значимости направление – это широкое внедрение разнообразных схем термического упрочнения, в том числе за счет повышения интенсивности теплоотвода при охлаждении, дифференцированного подхода к режиму охлаждения отдельных узлов конструкций изделий. Далее следуют разработки, направленные на получение новых критериев оценки надежности изделий, их конструктивных особенностей, учитывающих специфи-

ку назначения: грузовые или пассажирские вагоны, скоростной транспорт или обычные скорости движения, специального назначения и т. д.

Однако, несмотря на то, что вышеперечисленные направления составляют всего лишь незначительную часть из вопросов, требующих неотлагательного решения, но даже они не будут решаться если не провести принципиальные изменения в нормативной документации [2]. Одно из необходимых изменений – это внедрение принципа соответствия каждого вида изделия конкретным условиям эксплуатации, отказавшись от действующих в настоящее время подходов, основанных на соответствии средних потребительских свойств изделий к усредненным условиям их использования. Действительно, если учитывать, что как свойства изделия, так и условия эксплуатации имеют интервал изменения, то в случае комплекса свойств, соответствующих минимальному уровню значений интервала, а нагрузки при использовании изделий неизбежно могут достигать максимально допустимых (для повышенного уровня свойств) или даже превышать их, вероятность разрушения в этом случае в значительной мере возрастет.

Примером, подтверждающим приведенные положения, могут служить данные, посвященные анализу зависимости усталостной прочности металла от равномерности структуры, как на промежуточных, так и на конечной стадиях обработки.

Известно, что одним из важнейших критериев, определяющих уровень усталостной прочности стали является интенсивность процессов скольжения, сопровождающихся накоплением дефектов кристаллического строения, которые после достижения определенной плотности формируют субмикротрещины способные к росту. Наиболее распространенным типом препятствий для развития процессов скольжения в гетеро-

фазных системах являются границы зерен, например, межфазные, феррито-цементитные границы в углеродистых сталях. Однако на основании того, что границы зерен феррита являются не только местами аннигиляции, но и зарождения дислокаций, формирование структурной неоднородности в виде микрообъемов металла с заметно различающимися размерами зерен или морфологией карбидных частиц способствуют снижению усталостной прочности металла в целом. Обусловлено приведенное положение прежде всего различиями в уровне напряжений, при которых начинается необратимое движение дислокаций. В металле, обладающем практически равномерной зеренной структурой, уровень результирующего напряжения, необходимый для начала перемещения дислокаций в отдельных зернах, определяется в основном ориентацией преимущественных кристаллографических систем скольжения относительно направления приложения нагрузки. В этом случае разница между максимальными и минимальными значениями напряжений не превышает 50 %.

В случае, когда в стали формируются области с заметно различающимися размерами зерен, помимо влияния на уровень результирующего напряжения кристаллографической ориентации скольжения добавляется еще и влияние размеров зерен феррита. Действительно, как следует из [3] напряжение необратимого движения дислокаций (σ_0), при появлении первых актов пластического течения, определяется не только величиной зерна феррита, но и состоянием твердого раствора:

$$\sigma_0 = \sigma_i + \Delta + \frac{k_y}{\sqrt{2d}} + \alpha\mu b\sqrt{\rho}, \quad (1)$$

где σ_i – напряжение трения кристаллической решетки (порядка 12 Н/мм² [4]); Δ – упрочнение феррита атомами углерода; k_y – коэффициент уравнения типа Холла-Петча, показывающий проницаемость границ зерен распространяющемуся скольжению; d – размер зерна; α – постоянная; μ – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса; ρ – плотность подвижных дислокаций. Учитывая, что

$$\rho = \frac{\varepsilon_L}{bd},$$

где ε_L – деформация Людерса [5], соотношение (1) принимает вид

$$\sigma_0 = \sigma_i + \Delta + \frac{k_y}{\sqrt{2d}} + \alpha\mu\sqrt{\frac{\varepsilon_L b}{d}}. \quad (2)$$

Анализ соотношения (2) показывает, что с ростом размера зерна феррита относительное влияние k_y и ρ на уровень значений σ_0 снижается, в тоже время известно, что количество атомов внедрения при этом в твердом растворе растет [6].

На основании этого можно полагать, что с увеличением d становится возможным получение такого состояния, когда уровень напряжения, при котором начнется необратимое движение дислокаций, будет определяться в основном напряжением трения кристаллической решетки и состоянием твердого раствора (Δ). Однако приведенное положение может иметь место в случае, когда размер зерна феррита достигнет сотен мкм. В среднеуглеродистых сталях, хотя разнотерность в структурно свободном феррите в основном не превышает нескольких раз, изменение σ_0 может заметно меняться. Если подставить в соотношение (2) $d = 10$ и 30 мкм, даже при неизменных σ_i и Δ , величина σ_0 снизится 310...132 Н/мм².

На основании того, что в средне- и высокоуглеродистых сталях поставщиков атомов углерода для твердого раствора достаточно (цементит как при нагреве, так и в процессе пластической деформации, в том числе и низкотемпературной, способен растворяться [7]) развитие процессов динамического деформационного старения (ДДС) может в значительной мере изменять комплекс свойств металла.

Действительно, переход атомов внедрения на дислокации снижает их подвижность, что приводит к повышению результирующего напряжения для продолжения деформирования [8]. Нечто подобное наблюдается и в процессе знакопеременного нагружения. Увеличение предварительной деформации сжатием, по мере роста объемной роли цементита сопровождается при последующем растяжении сначала снижением σ_0 , а затем ростом (рис. 1). Причем, чем выше содержание углерода в стали, тем больше снижение σ_0 . С учетом того, что основное влияние на напряжение необратимого перемещения дислокаций обусловлено четвертым слагаемым соотношения (2), для условий развития ДДС можно записать:

$$\sigma_0 \sim \sqrt{\rho}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при реверсивном деформировании уменьшение σ_0 обусловлено в основном снижением плотности подвижных дислокаций. В этом случае неизбежно изменяется

соотношение между временем ожидания (от момента зарождения дислокаций до взаимодействия с атомами углерода) τ_0 и временем свободного пробега дислокации τ_1 . Для развития ДДС необходимо выполнение условия $\tau_0 = \tau_1$ [9]. Однако при уменьшении ρ для выполнения указанного условия ($\tau_0 = \tau_1$) необходимо понизить скорость деформации $\dot{\varepsilon}$

$$\dot{\varepsilon} = \rho \frac{lb}{\tau_0},$$

где l – длина свободного пробега дислокации. В случае постоянства $\dot{\varepsilon}$, для поддержания условий непрерывности распространения деформации при пониженных уровнях ρ повысятся локальные скорости перемещения дислокаций и, как следствие этого, снизится τ_1 . При $\tau_0 > \tau_1$ процессы ДДС будут проявляться в меньшей степени (рис. 2).

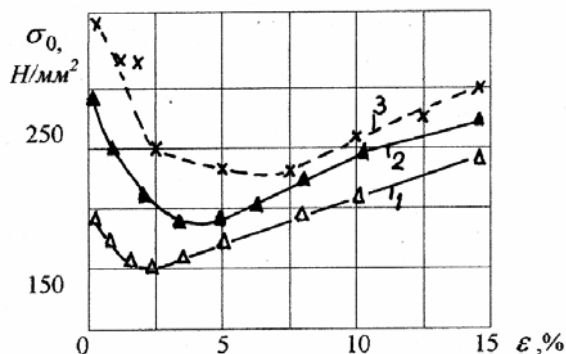


Рис. 1. Влияние содержания углерода в стали (1...0,1; 2...0,3; 3...0,6 %) и степени предварительной деформации сжатием (ε) на величину σ_0 при растяжении. Температура испытания $+20^\circ\text{C}$

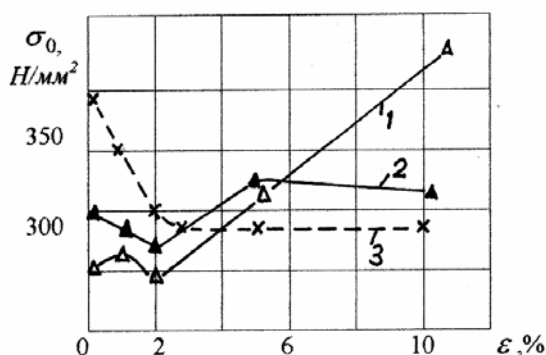


Рис. 2. Влияние степени предварительной деформации сжатием на изменение σ_0 при растяжении углеродистой стали с содержанием углерода стали (1...0,1; 2...0,3; 3...0,5 %). Температура испытания 250°C [11]

Аналогичное поведение металла наблюдается и при усталостном нагружении. Развитие указанных процессов сопровождается неизбежными субструктурными изменениями внутреннего строения металла, которые окончательно определяют условия формирования и роста субмикротрещин. Действительно, при развитии ДДС в процессе усталостного нагружения, в областях с более крупными зёрнами создаются более благоприятные условия (по сравнению с мелкозернистой структурой) для формирования узких полос скольжения, прорезающих упрочненную структуру [10], которые резко понижают запас пластичности металла.

Вследствие этого процесс разрушения значительно ускоряется. Если анализировать ускорение процессов развития ДДС, то уже начиная от температур $50...60^\circ\text{C}$ обнаруживаются качественные изменения субструктурного строения металла, подвергнутого усталостному нагружению [10]. Еще более сложное поведение металла имеет место при изменении температурно-деформационных условий. Последовательное развитие ДДС и СДС (статическое деформационное старение) при временном прекращении циклических нагрузок существенно снижают допустимую амплитуду деформации до предельно низких значений и при возобновлении нагружения происходит понижение запаса пластичности металла.

На основании приведенных результатов представляется необходимым создание банка данных, в которых будут отмечаться причины отказа колес по результатам ежегодной статистики. Это позволит дифференцировать методику проведения экспертных исследований и облегчит поиск оптимальных путей улучшения качества транспортного металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технические условия ТУУ 27.1-4-571-2004.
2. ГОСТ 10791 Колеса цельнокатаные. Технические условия.
3. Вакуленко И. А. О связи величины σ_0 кривой деформации с параметрами уравнения Холла-Петча. *Металлофизика* / И. А. Вакуленко, В. А. Пирогов, В. К. Бабич. 1986, т. 8, № 6, – С. 61–64.
4. Christ B. W., Smith G. V. Comparison of the Hall-Petch parameters of zone refined iron determined by the grain size extrapolation methods / *Acta met.* 1967, v15, №5, p. 809-816.
5. Garofalo F. Factors affecting the propagation of a Luders band and the lower yield and flow stresses in iron. / *Met. Trans.* 1971, v 2, № 8, p. 2315–2317.

6. Фаст Дж. Д. Взаимодействие металлов с газами. / В кн. Кинетика и механизм реакций. – М.: Металлургия, 1975, т. 2. – 352с.
7. Гриднев В. Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В. Н. Гриднев, В. Г. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков. – К.: Наук. дум., 1974. – 232 с.
8. Бабич В. К. Деформационное старение стали / В. К. Бабич, Ю. П. Гуль, И. Е. Долженков – М.: Металлургия, 1972. – 320 с.
9. Schoeck G. The Portevin –Le Chatelier effect a kinetic theory./ Acta met., 1984, №8, p. 1229–1234.
10. Pickard S. M., Guiu F. Strain-ageing behaviour of fatigued Fe-N-C alloys/Acta met. 1990, v38, №3, p. 397–401.
11. Вакуленко И. А. Динамическое деформационное старение углеродистой стали при реверсивном деформировании / И. А. Вакуленко, В. К. Бабич; Докл. АН УССР. Материаловедение. 1991. – № 10. – С. 97–101.

Поступила в редколлегию 22.03.2005.

ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНАЦІЙНИХ ЕПЮР ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ФАКТОРІВ У КОНСТРУКЦІЯХ МОСТІВ

Метод комбінаційних епюр використовується для уточнення значень деформаційних або силових факторів в конструкціях автодорожніх мостів, запроектованих під багатосмуговий рух автомобілів.

Метод комбинационных эпюр используется для уточнения значений деформационных или силовых факторов в конструкциях автодорожных мостов, запроектированных под многополосное движение автомобилей.

The method of combinational profiles is used for refining the values of deformational and force factors in the designs of automobile bridges, intended for multi-lane road traffic.

Вступ

Розрахунки динаміки займають окреме місце в розділах класичної будівельної механіки штучних споруд. Проте до недавнього часу, не дивлячись на бурхливий розвиток електронно-обчислювальної техніки, значна частина динамічних розрахунків мостових конструкцій, особливо регламентованих діючими нормами за звичним порядком розрахунку, остається не переглянутаю з точки зору нових підходів до проектування, хоча комп'ютерна інженерна база пропонує для цього достатньо широкий спектр програмних інструментів. У ситуації, що склалася, не можуть бути повністю реалізовані економічні підходи до конструювання нових і експлуатації старих будівельних матеріалів, елементів будівель і споруд, застосування машин і механізмів тощо. Нехтуючи сучасним комп'ютерним моделюванням і спрямовуючи розрахунки до збільшення запасів міцності несучих елементів, інженер віддаляється від доцільності застосування тих чи інших методів проектування.

Класична теорія розрахунку мостів

Загальна теорія врахування динамічного навантаження на будівельну конструкцію виглядає таким чином:

- фіксування конкретного перерізу несучого елемента розрахункової схеми;
- введення як навантаження одиничної зосередженої сили і визначення траєкторії її руху;
- побудова графіка лінії впливу для обраного перерізу.

Для простих конструкцій припущення їх розрахункових схем (однопрогонова балка, рама, розрізна ферма тощо) не суттєво впли-

ватимуть на результат розрахунку. Розрахункове зусилля отримують шляхом множення значення розрахункового силового фактора на відповідну ординату лінії впливу чи площу її ділянки (рис. 1).

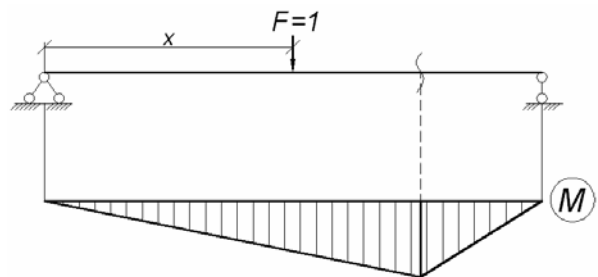


Рис. 1. Лінія впливу згинального моменту в балці

Однак для складних мостових конструкцій, особливо для багатопрогонових нерозрізних балок, вантових та висячих мостів, які належать до класу високонелінійних споруд, подібні спрощення не припустимі.

Більш того, для споруд, які постійно отримують короткострокові імпульси, важливим є поняття комбінації навантаження. У випадку мостів ці комбінації регламентуються нормами [1; 2].

Як правило, для мостів основним тимчасовим навантаженням прийнято вважати вагу транспорту, який рухається по прогонових будовах. У випадку автодорожнього моста, запроектованого під багатосмуговий рух кількох колон автомобілів, нормами встановлюються правила розташування колон поперек проїжджої частини моста згідно з обраним габаритом, а довжину смуги вздовж моста проектувальник має розрахувати власноруч з отриманням максимальних силових та деформаційних факторів у вузлах системи (рис. 2).

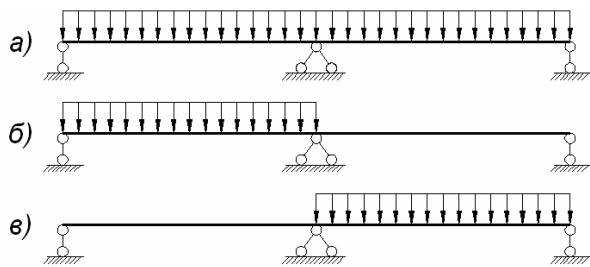


Рис. 2. Варіанти завантаження прогонової будови

У мостах різних конструктивних схем різні схеми завантаження прогонових будов тимчасовим навантаженням будуть викликати різні зусилля. У таких випадках проектувальник або користується загальними принципами розрахунків, або розраховує всі можливі варіанти завантаження.

Ці обидві ситуації пов'язані з витратою значного часу для розрахунку складних конструкцій, а інженер не має технічної можливості врахувати невідгідніше положення навантаження. У таких випадках, як правило, використовують метод скінченних елементів або подібний йому (наприклад, метод скінченних смуг).

Використання МСЕ для визначення зусиль

Метод скінченних елементів протягом багатьох років зарекомендував себе як потужний універсальний апарат розрахунку будівельних конструкцій. Довіра до нього дозволила інженерам з усього світу об'єднувати зусилля у проектах для створення програмних комплексів широкого застосування.

У сучасній постановці питання про розрахунок конструкції методом скінченних елементів набуває значення термін «модель», на відміну від класичного розрахунку, де реальній системі протиставлялася розрахункова схема (рис. 3). Модель МСЕ – це в загальному випадку просторова об'ємна конструкція, яка відображає не тільки основні властивості реального об'єкту (як розрахункова схема), а й додаткові: властивості конкретного матеріалу, наявність та характер розташування дрібних деталей, просторова конфігурація навантаження тощо.

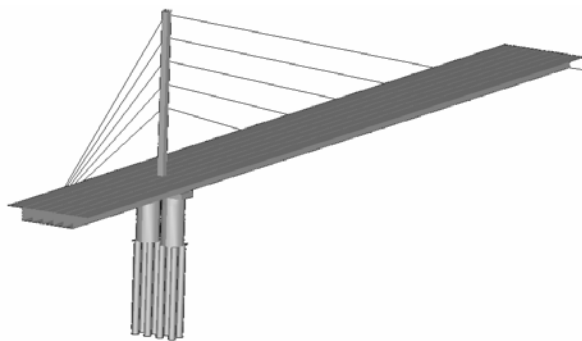


Рис. 3. Модель вантового моста у програмі Robot

Основним недоліком багатьох програмних пакетів, створених на базі МСЕ, є неможливість динамічного розрахунку споруди від кількох рухомих типів навантаження. Значним досягненням, звичайно, є введення як навантаження транспортної моделі (системи зв'язаних сил), проте кілька таких моделей задіяти часто не вдається (програма Robot Millennium). Комбінації ж постійного навантаження, до яких можна віднести цілий ряд другорядних тимчасових навантажень (лід, навал судів, сніг, вітер) підтримуються подібними системами в необмеженому обсязі.

У цьому аспекті доречним для проектування інженерних систем, до складу розрахунків яких надходять комбінації рухомих навантажень (особливо це стосується конструкцій автодорожніх мостів зі значною шириною проїжджої частини), можна вважати спосіб комбінаційних епюр, який дозволяє визначити екстремальні (максимальні, мінімальні) силові або деформаційні фактори системи з подальшим використанням їх значень в перевірках за обома граничними станами.

Принцип комбінаційних епюр

У розрахунках складної моделі автодорожнього моста вздовж його проїжджої частини одночасно можуть розташовуватися до восьми смуг автомобілів. Це означає, що у розрахунковій схемі необхідно одночасно врахувати до восьми смуг рівномірно розподіленого навантаження на окремих ділянках прогонових будов за умови виникнення в перерізах несучих конструкцій екстремальних значень силових факторів. У класичній «плоскій» постановці це завдання вирішити майже неможливо.

Апарат МСЕ, який є головним «посередником» при побудові комбінаційних епюр, дозволяє швидко визначити одразу кінцеві величини силових факторів для обраних вузлів системи, не «завантажуючи» інженера проміжними розрахунками з визначення ординат відповідної лінії впливу. Більш того, сучасні програмні пакети, які використовують МСЕ (наприклад, Robot Millennium), автоматично визначають максимальні і мінімальні значення силових факторів по всіх вузлах системи, які зводяться до результуючої таблиці.

Отже, на першому етапі побудови комбінаційних епюр визначаються екстремальні значення для кожного вузла системи від кожного окремого типу рухомого навантаження (максимум і мінімум). Ці значення інженеру необхідно звести до окремої таблиці для подальшого визначення комбінаційного фактора. Схематично це виглядає таким чином (табл.).

Таблиця

Приклад таблиці порівняння зусиль

№ вузла	Екстремальні значення зусилля, кН			
	лінія впливу 1	лінія впливу 2	лінія впливу 3	лінія впливу 4
1	345,6	-138,2	0	218,9
	167,2	-267,3	300,1	-12,6
2	0	-287,8	321,2	-197,4
	119,5	-366,6	213,8	197,4
3	-183,6	-13	147,2	0
	0	69,0	-99,1	132,2
4	272,2	78,2	245,3	187,2
	188,6	-34,0	243,9	19,7

Необхідно приділити особливу увагу знаку відповідного зусилля, який може змінюватися залежно від того, яка в даний момент ділянка розрахункової моделі завантажена рухомим навантаженням.

Другим етапом побудови комбінаційних епюр є власне алгебраїчне додавання відповідних значень силових чи деформаційних факторів системи в кожному вузлі та побудова графічної інформації. Універсальність методу полягає в тому, що значення силових факторів, які надходять до табл. 1, вже є екстремальними для окремого типу навантаження, а отже, не виключений випадок, коли всі вони займуть найневигодніше положення для конкретного вузла системи. Ця обставина пояснює необхідність додавання значень зусиль, яка іноді ігнорується в класичному розрахунку. Звичайно, необхідно уважно слідкувати за реальним характером змодельованого навантаження і контролювати випадки, коли кілька типів навантаження не можуть виникнути одночасно або їх врахування заборонено діючими нормами.

Якщо уважно придивитись до таблиці, то стає зрозумілим, що алгебраїчне додавання зусиль по вузлах системи не надасть екстремального значення в цілому. Тому врахування того чи іншого типу навантаження, навіть в умовах можливості його виникнення, не завжди доцільне. Інженер повинен власноруч перевіряти, за яких саме типів навантаження в конкретному вузлі виникає екстремальний фактор.

Графічна інформація для відображення комбінаційної епюри будується за загальними правилами побудови епюр (рис. 4), але за однієї умови. Користуючись даними комбінаційної епюри, необхідно постійно пам'ятати, що це лише теоретичний графік і кожна його ордината відображає екстремальний стан системи, який може виникну-

ти тільки для конкретного вузла. Для іншого вузла розраховане екстремальне значення може виникнути тільки в іншій комбінації навантажень.

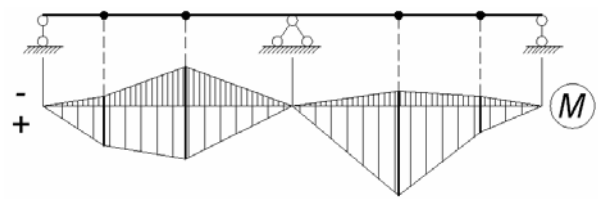


Рис. 4. Приклад комбінаційної епюри

Це суттєво впливає на характер розрахунків і використання значень ординат комбінаційних епюр в розрахунках. Наприклад, необхідно використати екстремальні значення зусиль у вузлах системи «А» та «Б» (рис. 5).



Рис. 5. Вузли теоретичної конструкції

Для цього необхідно ускладнити розрахунки, а саме, провести їх двічі. Перший раз слід ввести в розрахунок екстремальне значення зусилля для вузла «А» (визначене за допомогою комбінаційної епюри), а для вузла «Б» залишити те значення, яке відповідає екстремальній комбінації вузла «А», яке звичайно, не буде екстремальним. Вдруге розрахунок повторюється, але екстремального значення тепер набуває зусилля у вузлі «Б».

Висновок

Використання методу комбінаційних епюр пов'язане з рядом труднощів, по-перше, в аспекті комп'ютерного моделювання. Однак сучасні вимоги, які ставляться до методів розрахунку, аналізу та конструювання інженерних систем зобов'язують проектувальника в повному обсязі використовувати нові технології, якісні, передові і високоточні засоби для відтворення реальних будівельних об'єктів в електронних моделях. Ця методика застосовується, в основному, для розрахунків складних мостових конструкцій, але її бази можуть бути закладені в розрахунки багатьох інших споруд транспортного, цивільного й промислового будівництва.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы.
2. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия.
3. Петропавловский А. А. Вантовые мосты / Петропавловский, Е. И. Крыльцов. – М: Транспорт, 1985.

Надійшла до редколегії 15.06.2005.

Д. О. БАННИКОВ (ДИИТ)

СНИЖЕНИЕ ПЛОЩАДИ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА СТАЛЬНЫХ ЕМКОСТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сталеві ємнісні конструкції у теперішній час є одним з найбільш розповсюджених типів тонкостінних листових конструкцій. Одна з головних проблем їх експлуатації полягає у підвищеному рівні корозійного зносу. Як показує накопичений досвід, міри захисту, які використовуються, є недостатньо ефективними. Автором пропонується інший підхід, що полягає в оптимізації конструктивної форми ємнісних споруд за критерієм мінімуму маси. За оцінкою автора, це дозволяє зменшити площу бокової поверхні конструкцій на 30 % порівняно із існуючими традиційними конструктивними схемами.

Стальные емкостные конструкции в настоящее время являются одним из наиболее распространенных типов тонкостенных листовых конструкций. Одна из главных проблем их эксплуатации заключается в повышенном уровне коррозионного износа. Как показывает накопленный опыт, применяемые меры защиты недостаточно эффективны. Автором предлагается иной подход, заключающийся в оптимизации конструктивной формы емкостных сооружений по критерию минимума массы. По оценке автора, это позволяет уменьшить площадь боковой поверхности конструкций на 30 % по сравнению с существующими традиционными конструктивными схемами.

Steel reservoir-type constructions are now some of the most widespread types of thin-walled structures. One of the biggest problems with them now is the increased level of corrosion wear during the operation. All the used methods, as practice shows, are not fully efficient. The author suggests another way: it is optimization of the structural shape on the basis of minimization of wall mass criteria. According to the author's data, it allows reducing the side surface area of the reservoirs by 30% in comparison with conventional designs.

1. Виды стальных емкостных конструкций

Стальные емкостные конструкции являются одним из наиболее распространенных видов листовых конструкций. Они предназначены для хранения, аккумуляции и, в некоторых случаях, предварительной переработке разнообразных веществ – сыпучих материалов, жидкостей, газов – на транспорте, а также во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства. К ним относятся такие сооружения, как бункера, силосы, резервуары, газгольдеры, скрубберы, пылеуловители.

Конструктивно все сооружения такого типа являются вертикальными сосудами, состоящими из нескольких взаимосвязанных частей. Форма каждой части определяется особенностями того технологического процесса, в котором используется конструкция. Чаще всего она представляет собой правильные вертикальные призмы, цилиндры либо конусы, имеющие вертикальную ось симметрии.

На рис. 1 приведены наиболее распространенные виды и формы стальных емкостных конструкций, широко применяемых в настоящее время.

Как следует из приведенных иллюстраций, форма и геометрические размеры таких конструкций достаточно разнообразны. Между тем,

выбор формы емкостной конструкции в плане, а также назначение основных размеров каждой из частей конструкции традиционно выполняется с учетом целого ряда специальных рекомендаций. Их суть сводится к приданию емкости такой формы, которая с одной стороны обеспечила бы требуемый объем сооружения, а с другой стороны – равномерную и бесперебойную выгрузку из нее хранимого вещества.

Заметим, что для жидкостей и газов второй аспект является менее определяющим, для сыпучих материалов – именно он предопределяет внешнюю форму сооружения [1–3]. В основном эти рекомендации касаются воронки, а их точное выполнение, как показывает практика эксплуатации, действительно позволяет обеспечить требуемое качество разгрузки сооружения. В дальнейшем размеры вертикальных частей назначают исходя из требуемого объема конструкции, определяемого соответствующим технологическим процессом.

Одной из главных проблем сооружений такого класса в настоящее время является их повышенный коррозионный износ, обусловленный, во многих случаях, достаточно агрессивной внешней средой в условиях действующего производства и повышенной химической активностью самого вещества, находящегося внутри емкости.

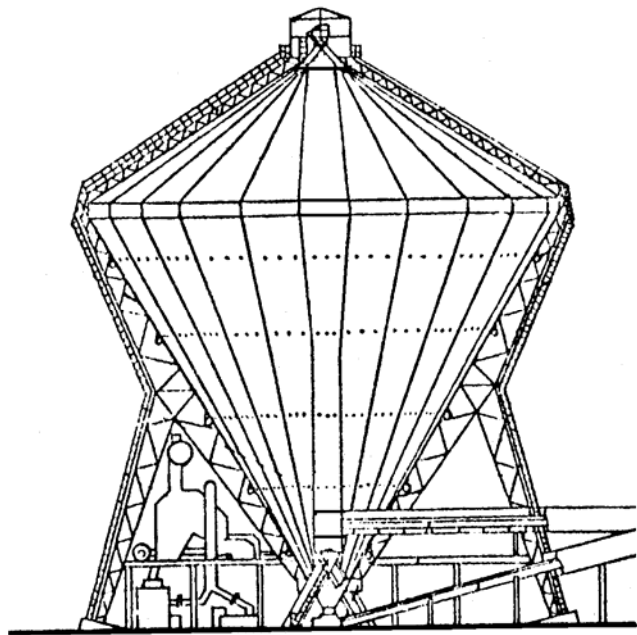
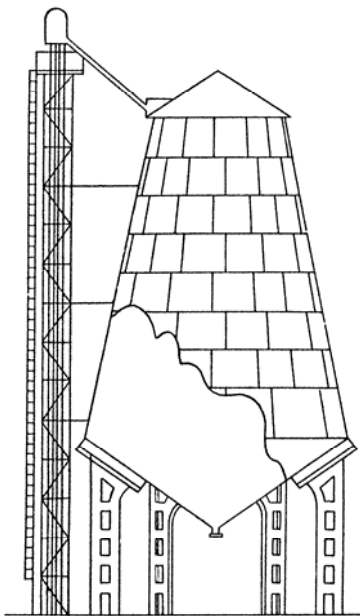


Рис. 1. Применяемые стальные емкостные конструкции

Как показывает накопленный опыт эксплуатации такого типа конструкций, применяемые меры защиты от коррозии (окраска, периодический ремонт и пр.) не обеспечивают полной защиты сооружений даже при их регулярном проведении [4]. Кроме этого, выполнение такого рода мероприятий связано с повышенными материальными затратами.

В связи с этим автором предлагается альтернативный подход к решению данной проблемы. Его суть заключается в оптимизации конструктивной формы емкости по критерию минимизации массы оболочечной части сооружения. Поскольку рассматриваемые конструкции представляют собой емкости, в которых 50...100 % материала сосредоточено именно в этой части, то выбор ее рациональной формы еще на стадии проектирования позволяет снизить площадь поверхности, подверженную воздействию внешней агрессивной среды.

2. Существующие подходы к снижению площади боковой поверхности стальных емкостей

Несмотря на очевидную важность и практическую ценность решения проблемы рационального выбора формы емкостной конструкции, ее решению на протяжении всей истории формирования и развития теории стальных емкостных конструкций уделялось исключительно мало внимания.

Впервые, в общем виде данная идея применительно к возможности снижения площади конструкции, подверженной коррозионному износу, была сформулирована в работе [5]. Здесь же было указано, что данный подход является «...основным способом снижения потерь металла от коррозии...» [5, с. 306]. Однако конкретных количественных результатов и выражений, позволяющих проектировать оптимальные конструкции, приведено не было.

Одним из первых количественных решений, изложенным безотносительно к возможности его использования для снижения коррозионного износа, является решение, предложенное еще в начале XX века известным своими работами в области бункеростроения исследователем В. Г. Алферовым. В своей монографии [6] он рассмотрел простейший случай квадратного в плане пирамидально-призматического бункера и пришел к выводу о том, что минимальную боковую поверхность будет иметь емкость в виде пирамиды, т. е. без вертикальной части.

Как показывают результаты анализа, выполненные автором настоящей публикации,

такой вывод не соответствует действительности, хотя он был сделан на основе абсолютно верных математических выкладок, не доведенных, однако, до логического завершения. Тем не менее, данная идея господствовала в теории проектирования емкостных конструкций примерно до конца XX века и неоднократно дублировалась в ряде работ [7].

Отметим, что в течение этого промежутка времени сама затронутая тематика рационализации геометрической формы сооружений данного класса математически не разрабатывалась, что связано, по нашему мнению, не только сложностью математической постановки и описания задачи в общем виде, но и отсутствием серьезных полномасштабных исследований работы емкостных конструкций как таковых.

В конце XX – начале XXI века рассматриваемый вопрос начал освещаться в работах известного в России исследователя по теории бункерных конструкций Х. Ягофарова и его сына А. Х. Ягофарова [8; 9]. Ими были получены выражения, позволяющие указать оптимальные соотношения геометрических размеров отдельных частей упрощенных квадратного пирамидально-призматического и круглого бункеров соответственно. В качестве критерия оптимизации выбран критерий минимума расхода конструкционного материала. Полученные результаты подтвердили ошибочность вывода В. Г. Алферова и позволяют с достаточной для практических целей точностью выполнять оценку оптимального решения для рассмотренного случая.

Таким образом, все имеющиеся на сегодняшний день исследования позволяют рассмотреть лишь некоторые частные задачи оптимизации геометрической формы стальных емкостных конструкций. Для более сложных случаев сооружений, состоящих, например, из трех и более вертикальных частей или имеющих непрямолинейное очертание стенок, решения не получены.

В связи с этим, целью настоящей публикации является описание математической модели, позволяющей оптимизировать форму и размеры стальных емкостных конструкций.

3. Формулировка математической задачи

Математическая модель, разработанная и предлагаемая автором настоящей публикации, получена на основе несложных геометрических построений.

Рассмотрим емкость, состоящую из произвольного количества k отдельных частей, свя-

занных конструктивно (рис. 2). Каждая часть представляет собой пространственную объемную фигуру, имеющую горизонтальное поперечное сечение в любом месте в виде правильного многоугольника с количеством сторон n или, в предельном случае, круга. Боковые поверхности образованы кривыми, описываемыми функцией $R(y)$, которые в частном случае могут быть прямолинейными. Вся конструкция предполагается двояксимметричной относительно вертикальной оси Y .

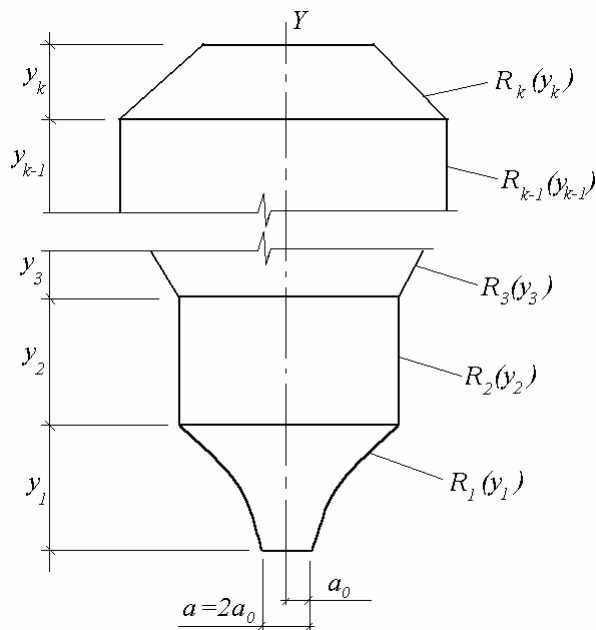


Рис. 2. Произвольная емкость

В качестве заданных параметров предполагаются следующие величины: ширина выпускного отверстия a в нижней части емкости, определяемая технологическими параметрами емкости, такими как производительность, отсутствие сводообразования и пр. [2]; форма боковой стенки произвольной i -й части емкости $R_i(y_i)$, также определяемая технологическими параметрами; толщина i -й части емкости t_i , назначаемая в первом приближении на основе накопленного опыта проектирования (заметим, что для емкостей с оребрением боковой поверхности в качестве толщины стенки может быть принята условная величина, с учетом материала ребер жесткости). Заданными по технологическим и конструктивным соображениям предполагаются количество отдельных частей емкости k и количество сторон многоугольника в горизонтальном поперечном сечении n_i . При этом предполагается, что в каждой части может быть принята своя форма поперечного сечения, не обязательно единообразная для

всей емкости. Например, воронка может быть выполнена в виде фигуры с сечением в форме круга, а следующая часть емкости – иметь поперечное сечение в форме квадрата. Вопросы конструктивной стыковки таких частей в данной публикации не рассматриваются.

Еще одним заданным по технологическим соображениям параметром является объем емкости V , который и определяет возможность постановки математической задачи. Величина объема на практике может определяться конструктивными параметрами, связанными, например, с условиями размещения емкости на территории, где предположительно проходит технологический процесс.

Условимся также, что в дальнейших выкладках нумерация отдельных частей емкости будет выполняться последовательно снизу вверх, начиная с нижней выпускной части (см. рис. 2).

В ходе решения задачи требуется определить оптимальные высоты отдельных частей емкости y_i при условии получения минимальной массы сооружения.

Для количественного описания сути сформулированной задачи рассмотрим пространственную фигуру, изображенную на рис. 3.

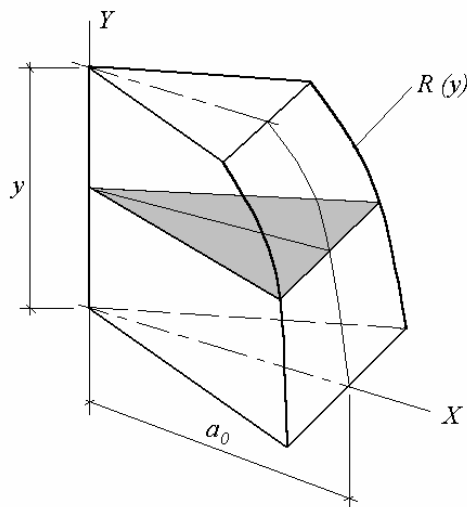


Рис. 3. Произвольный сегмент емкости

Она представляет собой произвольный сегмент емкости, образованный двумя горизонтальными плоскостями, ограничивающими фигуру сверху и снизу, двумя вертикальными плоскостями, выделяющими сегмент из всей части емкости, а также боковой поверхностью, описываемой уравнением $R(y)$. Произвольное горизонтальное сечение фигуры (на рис. 3 показано более темным цветом) является сектором n -угольника для поперечного сечения соответствующей части емкости (рис. 4).

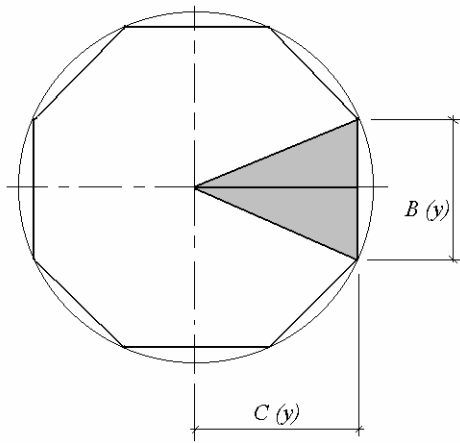


Рис. 4. Поперечное сечение i -й части емкости

Величина радиуса вписанной окружности, необходимая для дальнейших преобразований, определится по условию

$$C(y) = a_0 + R(y).$$

Площадь поперечного сечения фигуры (см. рис. 3) в приведенных обозначениях будет равна

$$A(y) = C^2(y) \operatorname{tg}(\pi/n).$$

Тогда ее объем определится выражением (1):

$$V_1 = \int_0^y A(y) dy = \int_0^y C^2(y) \operatorname{tg}(\pi/n) dy. \quad (1)$$

Соответственно для фигуры составленной из n аналогичных сегментов объем определится выражением (2):

$$\begin{aligned} V = nV_1 &= n \int_0^y C^2(y) \operatorname{tg}(\pi/n) dy = \\ &= n \operatorname{tg}(\pi/n) \int_0^y C^2(y) dy. \quad (2) \end{aligned}$$

Рассуждая аналогично, выражение для площади боковой поверхности сегмента (см. рис. 3) определится выражением (3), а для фигуры составленной из n аналогичных сегментов – выражением (4):

$$\begin{aligned} S_1 &= \int_0^y B(y) \sqrt{1 + \left[\frac{dC(y)}{dy} \right]^2} dy = \\ &= \int_0^y 2C(y) \operatorname{tg}(\pi/n) \sqrt{1 + \left[\frac{dC(y)}{dy} \right]^2} dy, \quad (3) \end{aligned}$$

$$S = nS_1 = 2n \operatorname{tg}(\pi/n) \int_0^y C(y) \sqrt{1 + \left[\frac{dC(y)}{dy} \right]^2} dy. \quad (4)$$

Масса всего сегмента будет равна площади боковой поверхности, по выражению (4), умноженной на толщину стенки сегмента t и определится выражением (5):

$$V_m = St = 2nt \operatorname{tg}(\pi/n) \int_0^y C(y) \sqrt{1 + \left[\frac{dC(y)}{dy} \right]^2} dy. \quad (5)$$

Для емкостей, состоящих из произвольного количества k отдельных частей, выражение для нахождения массы конструкции примет вид (6)

$$\begin{aligned} V_m = St &= 2 \sum_{i=1}^k t_i n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) \times \\ &\times \int_0^{y_i} C_i(y_i) \sqrt{1 + \left[\frac{dC_i(y_i)}{dy_i} \right]^2} dy_i. \quad (6) \end{aligned}$$

Полученное выражение (6) и является той функцией, которая должна быть минимизирована для решения сформулированной ранее задачи об отыскании оптимальных высот всех частей емкостного сооружения.

Ограничениями при этом являются выражения, отражающие взаимосвязь отдельных частей конструкции между собой. При условии связанности частей данное условие математически запишется в виде (7), при отсутствии такой связанности – в виде (8):

$$C_i(y_i) = a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j), \quad (7)$$

$$C_i(y_i) = a_{0i} + R_i(y_i). \quad (8)$$

Заметим, что в последнем случае исходная задача трансформируется в задачу отыскания оптимальных высот отдельных геометрических пространственных фигур, например, конусов или цилиндров, между собой не соединенных.

4. Решение поставленной задачи

Сформулированная в предыдущем разделе публикации математическая задача представляет собой задачу на отыскание условного экстремума при заданных ограничениях. При этом исследуемая функция является функцией нескольких переменных, вид которой к тому же заранее неизвестен, т. е. она может быть как линейной, так и являться полиномом высших степеней или же содержать трансцендентные функции и пр. В каждом конкретном случае емкости вид функции, конечно, будет известен и определится заданной формой боковой поверхности – функцией $R(y)$.

Как правило, при решении подобных задач поступают примерно следующим образом. Все ограничения вносят в исследуемую функцию и далее находят для нее условные экстремумы, пользуясь известными из курса дифференциального исчисления необходимым условием наличия экстремума [10; 11]. После этого найденные точки исследуют на характер экстремума, для чего используют уже достаточное условие. Основной трудностью при этом является внесение ограничений в исходную функцию, доставляющий массу проблем и ограничивающий возможности исследований.

Для обхождения данной проблемы воспользуемся достаточно известным методом неопределенных множителей Лагранжа [10], который является одним из частных приложений теории неявных функций. Суть метода заключается в необходимости сформировать вспомогательную функцию L в виде выражения (9)

$$L = F + \sum_{i=1}^n \lambda_i O_i, \quad (9)$$

где F – исследуемая функция; λ_i – вспомогательный параметр; O_i – ограничение, записанное в виде уравнения, правая часть которого равна 0.

Поскольку в общем виде ограничений может быть несколько, то в правой части выражения (9) они суммируются.

Для рассматриваемого нами случая выражение (9) может быть записано в виде выражения (10), в котором исследуемая функция F опишется выражением (6), а ограничение будет иметь вид уравнения (2), записанного для конструкции емкости, состоящей из произвольного количества k частей:

$$F_m = \sum_{i=1}^k S_i t_i = 2 \sum_{i=1}^k t_i n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) \times \\ \times \int_0^{y_i} C_i(y_i) \sqrt{1 + \left[\frac{dC_i(y_i)}{dy_i} \right]^2} dy_i + \\ + \lambda \left[\sum_{i=1}^k n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) \int_0^{y_i} C_i^2(y_i) dy_i - V \right]. \quad (10)$$

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_i} = 2n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) t_i \left[a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j) \right] \times \sqrt{1 + \left[\frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \right]^2} + 2 \frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \sum_{m=i+1}^k n_m \operatorname{tg}(\pi/n_m) t_m \times \\ \times \int_0^{y_m} \sqrt{1 + \left[\frac{dR_m(y_m)}{dy_m} \right]^2} dy_m + \lambda n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) \left[a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j) \right]^2 + \lambda \frac{dR_i^2(y_i)}{dy_i} \sum_{m=i+1}^k n_m \operatorname{tg}(\pi/n_m) y_m + \\ + \lambda 2 \frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \sum_{m=i+1}^k n_m \operatorname{tg}(\pi/n_m) \int_0^{y_m} \left[a_0 + \sum_{l=1, l \neq i}^k R_l(y_l) \right] dy_m = 0. \quad (12)$$

Следуя далее методу неопределенных множителей Лагранжа, для вновь сформированной функции (10) отыскиваем ее экстремумы. Как известно из теории математического анализа, экстремумами функции могут являться либо стационарные точки, обращающие ее первые частные производные в нуль, либо точки разрыва. Это формулировка необходимого условия.

Для функции (10) точками разрыва являются только те точки, в которых функция $\operatorname{tg}(\pi/n)$ является разрывной, т. е. выполняется следующее условие (11):

$$\pi/n_i = \pi/2 + \pi N, \quad \text{при } N \in Z. \quad (11)$$

Математически данное выражение означает, что количество сторон в многоугольнике, являющемся поперечным сечением любой i -й части емкости, не должно равняться числам дробного ряда

$$2/3, 2/5, 2/7 \dots 2/(2N+1).$$

Физически такие многоугольники, естественно, не существуют, поэтому данные точки не могут нас интересовать с позиций решения поставленной задачи.

Попробуем отыскать стационарные точки. Для этого необходимо решить систему уравнений вида $\partial F_m / \partial y_i = 0$ совместно с уравнением связи $\partial F_m / \partial y = 0$.

Для получения общего вида первого уравнения используем выражение (7) для случая емкости, состоящей из полностью конструктивно связанных между собой частей, которое подставляем в выражение (10). Далее, взяв первую частную производную по произвольному i -му члену y_i и выполнив ряд преобразований, заключающихся в удалении нулевых членов в имеющихся суммах, а также анализе и упрощении вида интегралов и производных, получим общий вид решения в виде выражения (12):

Полученное выражение является достаточно громоздким и при практическом использовании требует значительной доли внимания, однако, его применение позволяет значительно сократить процесс отыскания оптимальных решений для самых разнообразных случаев, поскольку получаемые уравнения являются алгебраическими, а не дифференциальными.

Кроме этого, полученное решение является универсальным в плане возможности учета в нем самых разнообразных видов ограничивающих боковых поверхностей, которые возможно описать аналитически, а также количества и конструктивного решения отдельных частей емкости, из которых она составлена.

Уравнение связи фактически представляет собой исходное ограничение, записанное в виде выражения (13):

$$\sum_{i=1}^k n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) \int_0^{y_i} \left[a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j) \right]^2 dy_i - V = 0. \quad (13)$$

Дальнейшее решение системы уравнений вида (12) совместно с уравнением связи (13) и позволяет получить искомое оптимальное решение. Для упрощения решения может быть рекомендована процедура, заимствованная из метода неопределенных множителей Лагранжа. Ее суть сводится к отысканию вначале параметра λ , а затем подстановки его в выражения для отыскания значений y_i . Такой подход, как показывает накопленный автором опыт, действительно позволяет сократить время решения.

Общего универсального решения в замкнутом виде сразу для выражений оптимальных высот y_i , по всей видимости, получено быть не может, поскольку оно определяется видом функции боковой поверхности $R_i(y_i)$, которое в свою очередь и определяет характер разрешения системы уравнений (12) и (13).

Отметим и еще одну особенность полученного решения: оно является лишь необходимым условием наличия экстремума. Доказательство его достаточности в общем виде является довольно сложным и в настоящей работе не приводится. Во многих случаях по смыслу полученного решения можно оценить, является ли оно искомым минимумом, что и выполняется на практике.

5. Практическое применение полученного решения для ряда частных случаев

Рассмотрим применение полученного решения для ряда частных случаев, имеющих наиболее важное практическое значение. Для них достаточно просто могут быть получены гото-

вые аналитические зависимости в замкнутом виде, позволяющие отыскать требуемые оптимальные размеры конструкции, и пригодные для непосредственного практического применения.

Одним из достаточно распространенных видов емкостей для хранения сыпучих материалов являются пирамидально-призматические бункера. Они представляют собой емкость, составленную из двух частей – верхней призматической и нижней – в форме усеченной пирамиды (рис. 1 и 5).

На практике, для возможности восприятия давления сыпучего материала, стенки стальной емкости подкрепляются горизонтальными либо вертикальными ребрами жесткости. Их учет в рассматриваемой математической модели выполняется за счет задания приведенной (увеличенной) толщины стенок. Так, по данным исследователей [8] масса ребер получается примерно равной массе стенок конструкции независимо от ее размеров и габаритов.

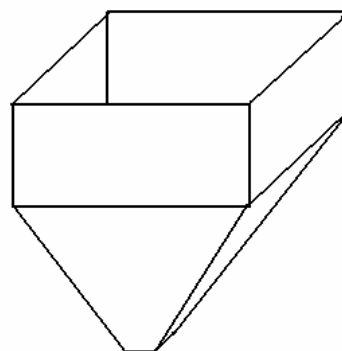


Рис. 5. Геометрическая схема пирамидально-призматического бункера

Для данного частного случая исходные параметры, подставляемые в общее решение, будут следующие: количество частей $k = 2$; количество сторон многоугольника в поперечном сечении $n_1 = n_2 = 4$; выражения, определяющие форму боковой поверхности нижней пирамидальной части и верхней призматической, будут описываться соотношениями (14) соответственно:

$$R_1(y_1) = y_1 / \operatorname{tg} \alpha, \quad R_2(y_2) = 0, \quad (14)$$

где α – угол наклона стенок нижней пирамидальной части к горизонту, а a_0 – половина ширины выпускного отверстия (см. рис. 2).

Величины угла α , размеров выпускного отверстия a_0 , толщин стенок емкости t_1 и t_2 , а также объема емкости V предполагаются заданными и фиксированными постоянными величинами.

Подставив все оговоренные величины в выражение (12) и выполнив промежуточные преобразования, получим два уравнения (15) и (16):

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_1} = \frac{8t_1}{\sin \alpha} \left(\alpha_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) + \frac{8t_2}{\operatorname{tg} \alpha} y_2 +$$

$$\lambda \left[4 \left(\alpha_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2 + \frac{8y_1 y_2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{8a_0 y_2}{\operatorname{tg} \alpha} \right] = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_2} = 8 \left(\alpha_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) t_2 + \lambda 4 \left(\alpha_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2 = 0. \quad (16)$$

Уравнение связи (13) для данного случая с учетом оговоренных параметров может быть преобразовано к виду (17):

$$\frac{\partial F_m}{\partial \lambda} = 4 \left(\alpha_0^2 y_1 + \frac{a_0 y_1^3}{\operatorname{tg} \alpha} + \lambda \frac{y_1^3}{3 \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) +$$

$$+ \left(4 \alpha_0^2 y_2 + \frac{2 a_0 y_1 y_2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{y_1^2 y_2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} \right) - V = 0 \quad (17)$$

Далее, решив совместно уравнения (16) и (17), можно получить окончательное решение для отыскания оптимальной величины высоты нижней пирамидальной части в виде выражения (18). Все промежуточные вычисления в данной публикации опускаются.

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4a_0^3 \operatorname{tg}^3 \alpha t_2 \sin \alpha + 3t_2 \operatorname{tg}^2 \alpha \sin \alpha V}{4(3t_1 - 2t_2 \sin \alpha)}} -$$

$$- a_0 \operatorname{tg} \alpha. \quad (18)$$

Соответственно величина оптимальной высоты верхней призматической части может быть найдена из выражения (17) и, опуская промежуточные математические вычисления, может быть представлена в виде выражения (19):

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4 \left[a_0^2 y_1 + a_0 y_1^2 / \operatorname{tg} \alpha + y_1^3 / (3 \operatorname{tg}^2 \alpha) \right]}{4(a_0 - y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2} \quad (19)$$

Приведенные зависимости (18) и (19) также могут быть представлены более наглядно в графическом виде. Для этого зададимся конкретными числовыми значениями основных параметров рассматриваемой емкости. Пусть объем ее будет равен $V = 120 \text{ м}^3$, толщины стенок пирамидальной и призматической частей примем одинаковыми и равными $t_1 = t_2 = 6 \text{ мм}$, размер выпускного отверстия $a_0 = 0,3 \text{ м}$, угол наклона стенок пирамидальной части $\alpha = 60^\circ$.

График зависимости объема конструктивного материала емкости V_m от величин высот

нижней пирамидальной y_1 и верхней призматической y_2 частей представлен на рис. 6 и 7 соответственно.

Видно, что оба графика имеют явно выраженный минимум, который в количественном отношении (с использованием выражений (18) и (19)) равен: $y_1^{opt} = 5,17 \text{ м}$, $y_2^{opt} = 0,74 \text{ м}$.

Попутно заметим, что как уже было отмечено в разделе 2 настоящей публикации, вывод В. Г. Алферова о том, что оптимальной является пирамидально-призматическая емкость с нулевой верхней частью, не подтверждается математически (см. увеличенный фрагмент графика на рис. 7).

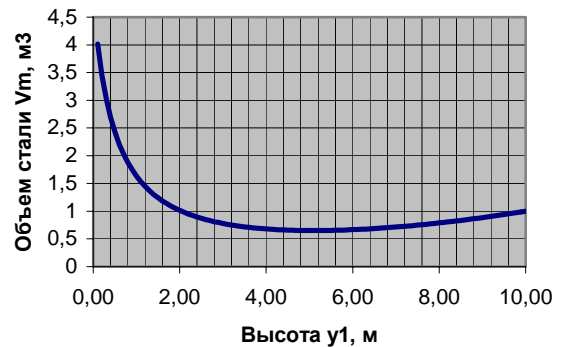


Рис. 6. График изменения высоты пирамидальной части емкости

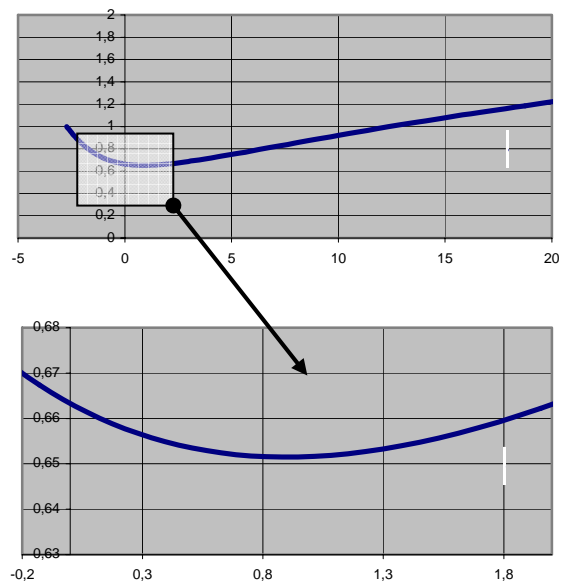


Рис. 7. График изменения высоты призматической части емкости

Для более простого частного случая пирамидально-призматической емкости, в которой условно принята ширина выпускного отверстия $a_0 = 0$, решения (18) и (19) упрощаются до вида соответственно (20) и (21):

$$y^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3t_2 \operatorname{tg}^2 \alpha \sin \alpha V}{4(3t_1 - 2t_2 \sin \alpha)}}, \quad (20)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4y_1^3 / (3 \operatorname{tg}^2 \alpha)}{4(y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2}. \quad (21)$$

Именно такое решение было получено исследователем Х. Ягофаровым в работе [8].

Заметим также, что вычисленные значения оптимальных высот пирамидальной и призматической частей емкости по формулам (20) и (21) отличаются от результатов, подсчитанных по формулам (18) и (19), на незначительную величину: $y_1^{opt} = 5,69$ м (против 5,70 м в подкоренном выражении формулы (18)), $y_2^{opt} = 0,88$ м (против 0,74 м). Это согласуется с выводами работы [8], сделанными путем приближенной оценки.

На основе приведенных на рис. 6 и 7 графиков, возможно достаточно просто оценить экономичность реальных проектных решений. Так, например, если конструкция пирамидально-призматического бункера будет принята с развитой по высоте призматической частью (см. пример на рис. 1), равной, допустим, 10 м, тогда высота пирамидальной части при рассмотренных ранее остальных конструктивных параметрах будет равна 2,30 м. При этом объем стали увеличится с величины $0,65 \text{ м}^3$ (для оптимальных размеров емкости) до величины $0,92 \text{ м}^3$, что в процентном отношении составит приблизительно 40 %. Дальнейшее развитие вертикальной части бункера по высоте приведет к еще более неэкономичному решению.

Еще одним интересным случаем, имеющим немаловажное практическое значение, является случай конусно-цилиндрической емкости (см. рис. 1 и 8).

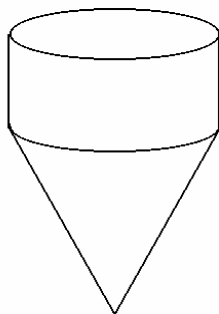


Рис. 8. Геометрическая схема упрощенного конусно-цилиндрического бункера

Для частного случая упрощенного бункера (при ширине выпускного отверстия $a_0 = 0$, выражения для оптимальных величин высот ко-

нусной и цилиндрической частей сооружения (выражения (22) и (23) соответственно) оказываются практически тождественны соответствующим выражениям для случая пирамидально-призматического бункера. Все различие между ними сводится к различию в одном коэффициенте, характеризующем количество сторон в поперечном сечении емкости.

$$y^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3t_2 \operatorname{tg}^2 \alpha \sin \alpha V}{\pi(3t_1 - 2t_2 \sin \alpha)}}, \quad (22)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4y_1^3 / (3 \operatorname{tg}^2 \alpha)}{\pi(y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2}. \quad (23)$$

Из полученных решений можно заключить, что для емкостей с количеством сторон многоугольника в поперечном сечении емкости больше 4, аналогичные решения будут заключаться в пределах, установленных полученными решениями (20), (21) с верхней стороны и (22), (23) с нижней стороны.

Так, например, для принятых ранее конструктивных параметров емкости величины оптимальных высот, рассчитанные по формулам (22) и (23) составят: $y_1^{opt} = 6,17$ м, $y_2^{opt} = 1,17$ м.

Как видно, границы изменения высот невелики, поэтому при проведении практических вариантов прикидочно-оценочных расчетов как для многоугольных, так и для круглых в плане емкостей вполне возможным оказывается использовать только какие-либо однотипные выражения, например, (22), (23), как для стального конусно-цилиндрического бункера.

6. Заключительные замечания

Таким образом, представленный в настоящей публикации подход к снижению уровня коррозионного износа проектируемых стальных емкостных конструкций является несколько нетрадиционным, однако, при определенных условиях – достаточно эффективным.

Сравнение с традиционными существующими проектными решениями позволяет заключить, что в них имеются резервы снижения материалоемкости конструкции на величину до 30...40 %, а в отдельных случаях и больше, только за счет выбора оптимальной геометрической формы конструкции при ее проектировании. При этом площадь боковой поверхности может быть уменьшена практически на такую же величину. Это позволит значительно снизить потери от коррозионного износа в условиях действующего производства.

Сама же предложенная в работе математическая модель, являясь достаточно общей относительно геометрии и структуры стальных емкостных конструкций, может быть с успехом применена также для любых иных сооружений, имеющих сходную геометрическую форму, например, воздухонагревателей, пылеуловителей, скрубберов, декомпозеров, сгустителей и даже конструкций кожуха доменной печи. Замечательной особенностью предложенной модели является также и ее безотносительность к материалу сооружения, что открывает достаточно широкие перспективы по ее использованию в сфере создания железобетонных или деревянных аналогичных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна. – Введ. 01.07.98. – Вид. офіц. – К.: Держбуд України, 1988. – 41 с. – Укр. та рос. мовами.
2. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
3. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: В 3 т. / Под ред. В.В. Кузнецова. – Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 526 с.
4. Криворожский государственный горно-металлургический комбинат «Криворожсталь». Доменная печь № 9. Бункерная эстакада. Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций: Отчет о НИР, в 3 т. / ОАО «Проектный институт «Днепрпроектстальконструкция». – Д., 1997.
5. Лессиг Е. И. Листовые металлические конструкции / Е. И. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М.: Стройиздат, 1970. – 488 с.
6. Алферов К. В. Бункеры, затворы и питатели. – Л.: Изд-во машиностроительной лит-ры, 1946. – 178 с.
7. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. А. П. Величина и В. Ш. Козлова. – К.: Будівельник, 1973. – 552 с.
8. Ягофаров Х. Стальной пирамидально-призматический бункер как пространственная система: Приложение к дис... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Уральская гос. акад. путей сообщ. – Екатеринбург: УрГАПС, 1998. – 315 с. (рукопись).
9. Ягофаров А. Х. Совершенствование конструкции, уточнение расчета и оптимальные параметры стального круглого бункера: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Уральская гос. ун. путей сообщ. – Екатеринбург, 2005. – 23 с.
10. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: В 3 т. – М.: Наука, 1969.
11. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн; Пер. с англ. И. Г. Абрамовича, А. М. Березмана, И. А. Вайнштейна и др.; Под общ. ред. И. Г. Абрамовича. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

Поступила в редколлегию 07.06.2005.

Ю. В. БЕЛЯВСКИЙ, А. В. МИШУТИН

(Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВОДОПРОПУСКНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ

Аналіз роботи системи «високий насип–водопропускна труба–основа» виявляє причини деформації розтягу уздовж осі труби, просідання тіла труби щодо оголовків, тощо. Для вирішення даної проблеми пропонуються нові конструкції водопропускних труб.

Анализ работы системы «высокая насыпь–водопропускная труба–основание» выявляет причины деформации растяжения вдоль оси трубы, проседания тела трубы относительно оголовков и др. Для решения данной проблемы предлагаются новые конструкции водопропускных труб.

The analysis of work of the system «high filling – water-carrying pipe – the base» reveals the causes of stretch deformation along the pipe axis, deflection of the pipe body in relation to its heads, etc. For solution of these problems new designs of water-carrying pipes have been suggested.

В процессе эксплуатации водопропускные трубы воспринимают постоянные и временные нагрузки (от массы насыпи и транспортных средств), изменяющиеся в времени, зависят от температуры и влажности окружающей среды, действий водного потока и льда, сейсмических нагрузок. [1].

Анализ работы системы «высокая насыпь–водопропускная труба–основание» показывает, что закладка трубы в систему «насыпь–основа» имеет существенное влияние на ее напряженно-деформированное состояние, вызывая при этом явления разуплотнения грунта в области трубы (рис. 1).

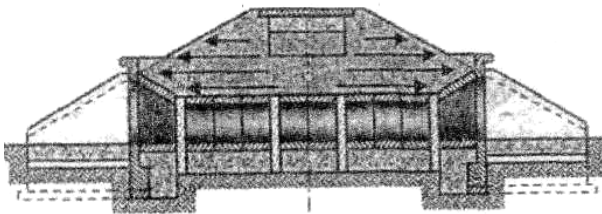


Рис 1. Растяжения трубы вдоль оси

Эти явления являются одной из главных причин возникновения таких деформаций: растяжения трубы вдоль оси; проседания тела трубы относительно оголовков; проседания отдельных колец в теле трубы; проседания насыпи над трубой; деформация оголовков (отсовывания оголовков в результате давления насыпи, образования трещин и др.); заиливание отверстий в результате попадания грунта через образованные щели между кольцами при растяжении труб и др. [2].

Для решения данной проблемы предлагаются следующие варианты конструкций труб: металлические гофрированные трубы, железобетонные сборно-монолитные трубы.

Гофрированная труба – естественная геотехническая конструкция. Вместе с окружающей ее засыпкой она образует сопряженную конструкцию, которая воспринимает действующие на нее нагрузки. Гофрированная труба обладает упругостью, вследствие чего в засыпке образуется равномерное пассивное давление. По контуру трубы давление также равномерное. При этом на нее действуют нормальные силы, а изгибающие моменты отсутствуют. Работая совместно с грунтом, труба сохраняет свою форму в результате образовавшегося в грунте устойчивого состояния. В то же время возможны продольные смещения и деформации, обеспечиваемые гофрированной формой металла. Стабилизирующий эффект грунта уменьшает нагрузки, действующие на трубу, по сравнению с расчетными. Об этом свидетельствует диаграмма зависимости коэффициента нагрузки от плотности окружающего грунта (рис. 2).

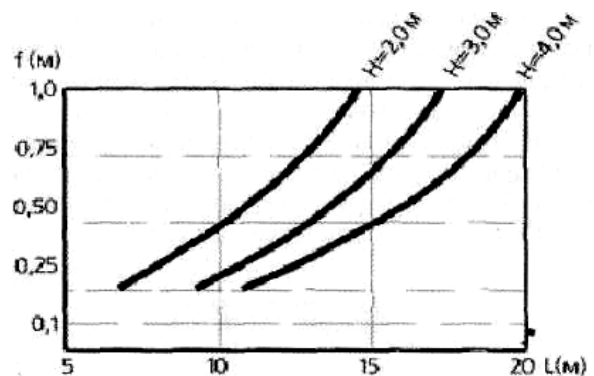


Рис. 2. Диаграмма зависимости коэффициента нагрузки от плотности окружающего грунта

На диаграмме по оси ординат приведен коэффициент нагрузки, по оси абсцисс плотность

по Проктору, % (АА8НТО Т-99). При высоких откосах и проседающих грунтах часто возникают обусловленные деформациями, неравномерные понижения, которые в большинстве случаев располагаются в средней части трубы. Гофрированная стальная труба допускает появление больших продольных понижений без угрозы ее работоспособности.

По приведенной диаграмме можно определить допустимую величину вертикальных деформаций гофрированной металлической трубы (рис. 3).

На железных дорогах чаще всего используют трубы эллиптического поперечного сечения с вертикальной большой осью (табл. 1). Максимальная нагрузка на ж.-д. ось 32 т.

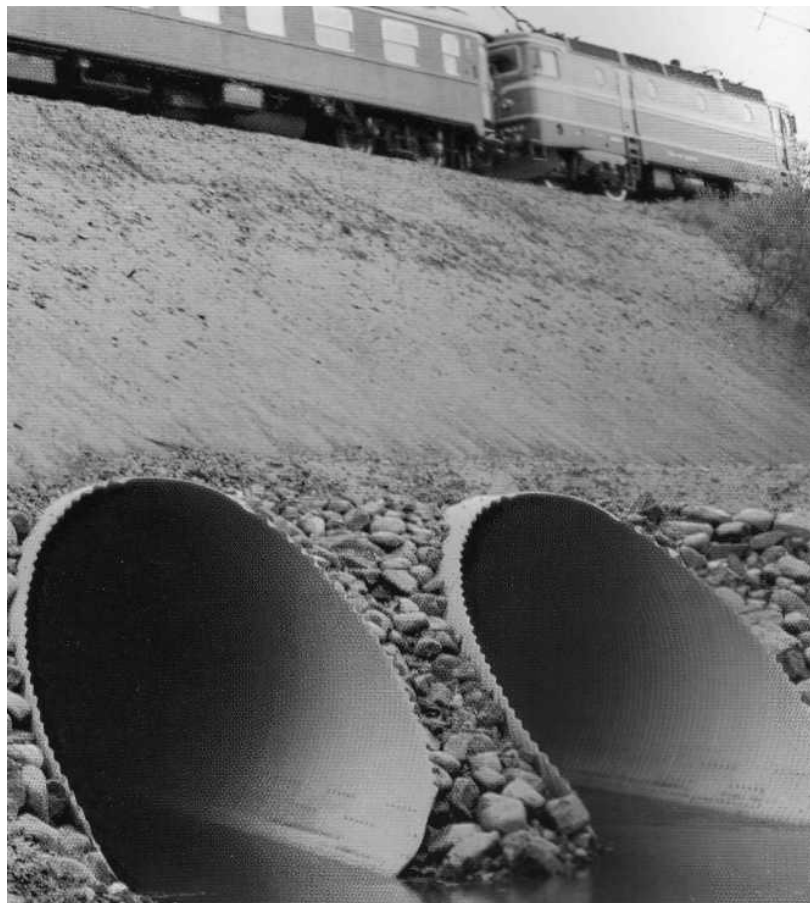


Рис. 3. Гофрированная металлическая труба

Таблица 1

Основные параметры металлических труб

Тип трубы	Горизонтальный диаметр	Вертикальный диаметр	Площадь поперечного сечения, м ²
Е4	1,92	2,12	3,20
Е5	2,06	2,28	3,70
Е16	3,61	3,99	11,33
Е17	3,75	4,15	12,20

Круглые и эллиптические гофрированные металлические трубы наиболее экономичны по площади поперечного сечения. Их конструктивная прочность по отношению к нагрузкам наибольшая. В итоге они в большей степени подходят для высоких насыпей. Сборно-монолитный вариант железобетонной конструкции водопропускной трубы является наибо-

лее долговечным и надежным в эксплуатации решением (рис. 4).

Удовлетворение комплекса требований по технологии приготовления и эксплуатации позволят получить бетон прочностью 30,0..60,0 МПа, плотностью 2400 кг/м³, водонепроницаемостью при толщине конструкции 4..6 см не менее В-8, морозостойкостью не менее 400 циклов.

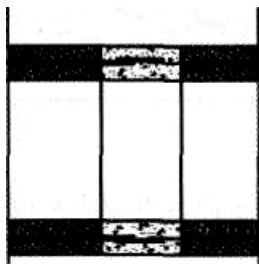


Рис. 4. Сборно-монолитный вариант конструкции водопрпускной трубы

Долговечность бетонов является определяющей характеристикой бетонов и складывается из таких качественных характеристик как морозостойкость и коррозионная стойкость. Длительность службы бетона в конструкции объясняется естественными перерывами в замораживании и оттаивании бетона весной, летом и осенью, в течение которых восстанавливается структура бетона в результате физико-химических процессов твердения, т. е. происходит естественное самозалечивание бетона. Учитывая восстановление структуры бетона и количество циклов замораживания и оттаивания, которым подвергается бетон в конструкции корпуса в течение одного зимнего сезона, установлена степень морозостойкости бетона по количеству переходов температуры через 0 по метеорологическим данным и агрессивности воды.

Коррозионная стойкость бетона является функцией его сопротивляемости различным видам воздействий внешней среды и определяется структурой и свойствами цементного камня, а также структурными особенностями бетона как материала.

При действии агрессивной среды в цементном камне, растворе или бетоне возникают процессы коррозии, которые по данным В. М. Москвина классифицируются следующим образом [5]:

Коррозия первого вида. Ведущим признаком коррозии первого вида является растворение и вымывание составных частей цементного камня соприкасающейся с ним водной средой.

Коррозия второго вида. Ведущим признаком коррозии второго вида является развитие химических обменных реакций между солями, растворенными в водной среде, и составными частями новообразований цементного камня. Продукты реакции выносятся водной средой. Остающиеся на месте плохо растворимые продукты реакции не вызывают возникновения растягивающих напряжений в стенках пор и капилляров.

Коррозия третьего вида. Ведущим признаком коррозии третьего вида является накопление в порах-капиллярах и других пустотах цементного камня, раствора или бетона, кристаллов солей, образовавшихся за счет химических реакций взаимодействия агрессивной среды и составных частей новообразований цементного камня. Кристаллы солей, расширяясь, разрушают стенки пор цементного камня.

Коррозия первого вида возможна, когда под действием одностороннего напора возникает фильтрация воды сквозь толщу бетона. Коррозионные процессы значительно усиливаются под влиянием климатических условий, многократного замораживания и оттаивания, увлажнения и высушивания, коррозии за счет усадки и набухания цементного камня. Необходимо учитывать ветровую и биологическую коррозию, а также различные механические воздействия.

Для повышения качества и надежности работы бетона и железобетонных конструкций используется защита I и II видов. К защите I вида относится использование специальных видов цемента и комплексных химических добавок. Используется, в основном, при строительстве новых и восстановлении эксплуатируемых сооружений. К защите II вида относится использование покрытий для бетонов, когда методы I вида защиты недостаточны или малоэффективны.

Развитая современная строительная индустрия предлагает большой комплекс по видам цемента и комплексных химических добавок для решения подвижности бетонной смеси, регулирования сроков схватывания и твердения бетона, повышения его прочности, плотности, коррозионной стойкости, водонепроницаемости, а также всевозможные покрытия (типа «Сайпекс», «Пенетрон» и т. д.), которые необходимо использовать для восстановления конструкций и реконструкции сооружений для повышения срока их эксплуатации.

После проведения комплексного технического обследования бетона конструкций водопрпускных труб разрабатываются рекомендации по восстановлению защитного слоя арматуры, повышению водонепроницаемости бетона, коррозионной стойкости, уплотнения структуры, используя методы I и II видов защиты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савенко В. Я. Проблеми будівництва та експлуатації системи «висока насип-водопрпускна труба-основа» / В. Я. Савенко В. В. Петрович, В. І. Каськів // Автошляховик України. – 1999. – №3(157). – С. 39–40.
2. Артамонов Е. А. Водопрпускные трубы под насыпями / Е. А. Артамонов, Г. Я. Волченков и др. / Под ред. О. А. Янковского. – М.: Транспорт, 1982. – 232 с.
3. Сборные металлические гофрированные конструкции. – М.: Via Con Baltik. 2001. – 16 с.
4. Мишутин А. В., Повышение долговечности бетонов тонкостенных конструкций плавучих и портовых гидротехнических сооружений / А. В. Мишутин, Н. В. Мишутин, – Одесса, 2003. – 292 с.
5. Москвин В. М. Коррозия бетона / В. М. Москвин и др. – М.: Стройиздат, 1986. – 530 с.

Поступила в редколлегию 15.06.2005.

С. В. БОРЩЕВСКИЙ (Донецкий национальный технический университет)

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА ДЛЯ ТРАНСПОРТНОГО И ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХРАНЕНИЯ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ

Розглянуто методику і результати експериментів, проведених на бетонних зразках, по вивченню зміни міцностних характеристик бетонного каменю залежно від часу й умов збереження заповнювачів. За отриманими результатами зроблені практичні висновки.

Рассмотрены методика и результаты экспериментов, проводимых на бетонных образцах, по изучению изменения прочностных характеристик бетонного камня в зависимости от времени и условий хранения заполнителей. По полученным результатам сделаны практические выводы.

Are considered a technique and results of experiments spent on concrete samples, on study of change durability of the characteristics of a concrete stone depending on time and conditions of a storage of containing components. By the received results the practical conclusions are made.

Основными видами крепи капитальных горных выработок со сроком службы более 15 лет, в том числе и транспортных тоннелей, являются монолитная бетонная, сборная железобетонная и набрызг-бетонная крепь. При креплении вертикальных стволов шахт монолитная бетонная крепь является основным видом крепи (98 % всех стволов крепится монолитной бетонной крепью). В горизонтальных и наклонных горных выработках угольных шахт Донбасса бетонная и металлобетонная крепь имеют объем применения 15...21 % [1; 2].

Монолитная бетонная крепь относится к типу поддерживающих и подпорных, обладает достаточно высокой несущей способностью. При возведении крепи применяют механизацию всех операций, начиная с приготовления бетонной смеси и кончая укладкой ее за опалубку. Степень механизации достигает 84...88 %. Например, при возведении бетонной крепи в вертикальных стволах стоимость крепи из бетона в 1,3...1,5 раза дешевле, чем из железобетонных тубингов и в 5...7 раз по сравнению с чугунными тубингами. Бетон обладает хорошей адгезией практически со всеми видами горных пород. Гладкая внутренняя поверхность бетонной крепи обладает малым аэродинамическим сопротивлением. Так, коэффициент аэродинамического сопротивления бетонной крепи в 3...4 раза меньше по сравнению с тубинговой. Срок службы бетонной крепи обеспечивает эксплуатацию стволов в течение десятков лет. Материал крепи огнестоек, для его приготовления можно использовать дешевые местные материалы.

Бетонную смесь изготавливают на портландцементе (обычный гидрофобный и быстротвер-

деющий) и шлакопортландцементе марки не ниже М400. При пересечении вертикальным стволом водоносных пластов, воды которых обладают сульфатной агрессией, применяют сульфатостойкий портландцемент и бетон повышенной плотности.

Бетон сложен и многообразен. Он представляет смесь воды, песка, гравия и вяжущего материала, обычно портландцемента. Огромное значение при этом принимает бетон большой прочности. Прежде всего необходимо уточнить, что понимать под определением «высокопрочный бетон». К сожалению, в этом вопросе еще нет единого мнения.

Так, немецкий исследователь А. Хуммель предлагал считать высокопрочным бетон прочностью в 70 МПа и выше [3]. С. А. Миронов считал высокопрочными бетоны марок 300...500 [4]; А. Е. Десов, В. М. Москвин и Б. Г. Скрамтаев предлагали считать бетоны высокопрочными, если предел их прочности при сжатии выше 60 МПа и, кроме того, другие показатели (прочность при растяжении, морозостойкость) должны быть, по их мнению, также соответственно высоки [5]. Международная комиссия по высокопрочному бетону предлагает считать высокопрочными бетоны прочностью выше 100 МПа. Можно было бы продолжить подобные примеры, однако разница будет только в предлагаемой цифре – марке бетона, определяющей понятие «высокопрочный».

Таким образом, несмотря на различие в величине прочности бетона, все эти предложения объединяет одно: в качестве определяющего фактора принимается лишь показатель марочной прочности бетона.

По нашему мнению, это не совсем верно, так как количественные характеристики прочности не учитывают целого ряда особенностей высокопрочных бетонов, качественно отличающих их от обычных. Можно привести конкретный пример, показывающий несостоятельность перечисленных выше предложений по определению высокопрочного бетона. Так, например, бетон марки В50, который можно отнести к высокопрочным, возможно получить и на цементе марки 800, и на цементе марки 400 (и даже 300). И если по показателям прочности в обоих случаях получатся совершенно одинаковые бетоны, то составы смесей, их расчет, технология приготовления, изменение прочности во времени, а также и другие показатели, например, плотность, морозостойкость, водопроницаемость, объемный вес будут совершенно различными.

В первом случае марка бетона намного ниже марки исходного цемента, т. е. имеет место типичный для рядового бетона факт и, следовательно, расчет состава, технология приготовления и свойства бетона обычны. Поэтому полученный бетон есть все основания считать обычным. Во втором случае марка полученного бетона превышает марку исходного цемента. Расчет состава в этом случае не может быть произведен общепринятыми методами – свойства бетонной смеси и технология ее укладки существенно отличаются. Иными будут нарастание прочности бетона во времени, а также его плотность и другие свойства. Таким образом, бетоны, имеющие одинаковую прочность, в приведенных примерах будут резко отличаться по структуре. Поэтому, несмотря на одинаковую прочность, следует отдать предпочтение бетону, полученному во втором случае, как более плотному и, следовательно, более морозостойкому, водонепроницаемому и долговечному. Однако следует учитывать тот факт, что приготовить и уложить такой бетон труднее.

Приведенные примеры показывают, что связывать понятие о высокопрочном бетоне с конкретными показателями его прочности без учета марки исходного цемента и технологии приготовления бетона принципиально неверно, так как при этом искажается сам смысл термина «высокопрочный бетон». В это понятие, по нашему мнению, следует вкладывать физический смысл, а не регламентировать его цифровыми различиями. Высокопрочные бетоны следует рассматривать так же, как и «высокоплотные». Таким образом, высокопрочными следует считать бетоны, марка которых равна или выше активности исходного цемента. Такое определение, связывая конечную прочность бетона с активностью исходного цемента, предопределяет

технологию получения и, до некоторой степени, свойства бетона. Единственным недостатком такого определения является то, что предположив, например, наличие исходного цемента активностью в 5 МПа, следует признать высокопрочным бетон такой же прочности. Во избежание этого следует оговорить нижний предел прочности, который для большинства выпускаемых в настоящее время цементов составляет 50 МПа.

Таковы, вкратце, соображения о термине «высокопрочный бетон». Однако в настоящее время создание высокопрочного бетона осуществлялось в основном за счет повышения активности цемента и применения более совершенной технологии изготовления бетона. При этом совершенно не учитывались реологические свойства компонентов, входящих в состав бетонной смеси.

В тоже время известно, что при дроблении твердых материалов на их поверхности образуются активные короткоживущие центры (КЖЦ), которые делают химические реакции с их участием более активными [6]. Вместе с тем, при контакте с атмосферой эти КЖЦ погибают. Если это так, то бетонирование следует выполнять до начала глобальной «гибели» короткоживущих активных центров, т.е. до покрытия поверхности твердых тел пленкой адсорбированных веществ, снижающей химическую активность компонентов бетонной смеси.

Для протекания химического взаимодействия между веществами необходимо обеспечить сближение атомов на расстояние действия межатомных сил, а также сообщить им энергию, при которой распределение электронной плотности атомов станет благоприятным для элементарного акта взаимодействия. При взаимодействии газов и жидкостей с твердыми телами физический контакт между ними за счет их высокой подвижности достигается сравнительно легко.

Относительно же того, каким образом достигается активация поверхностных атомов в этих процессах, существуют различные мнения. По этому вопросу наметилось три подхода [6].

В первом подходе, который можно назвать «тепловым», считается, что энергия активации химических процессов, протекающих при измельчении, обеспечивается теплом, выделяющимся при трении или соударении частиц измельчаемого вещества.

Во втором, «дислокационном», считается, что активация происходит за счет энергии выходящих на поверхность дислокаций при пластической деформации частиц измельчаемого вещества.

В третьем подходе активации химических процессов связывается со «сбросом» упругой энергии в момент разрушения твердого тела и с образованием короткоживущих активных центров – КЖЦ (теория короткоживущих активных центров).

Для выяснения степени влияния этого эффекта на прочностные характеристики бетона нами были проведены специальные эксперименты, опубликованные в работе [5]. Все компоненты бетонной смеси (цемент, песок, щебень) были расфасованы на две части: одна часть в герметичные целлофановые мешки (условное обозначение КЖЦ), вторая же была оставлена в открытом состоянии в бумажных мешках (условное обозначение БКЖЦ). Через каждые семь суток в течение 70 суток (10 разных замесов) производилось изготовление серии балочек и кубиков из компонентов с обеих групп, а по истечению не менее 28 суток производилось их испытание на изгиб и сжатие.

Анализ полученных зависимостей позволил сделать следующие выводы. Независимо от способа хранения компонентов происходит со временем постоянное ухудшение их качества, приводящее к снижению предела прочности получаемого бетона. Однако снижение прочности бетона, полученного из компонентов, хранившихся в полиэтиленовой таре, менее интенсивное, чем полученного из компонентов, хра-

нившихся на открытом воздухе и в открытых бумажных мешках. В результате был сделан вывод, что в процессе бетонообразования короткоживущие активные центры на поверхности твердых компонентов играют положительную роль – их наличие повышает прочность бетона. Снижение прочности бетона в образцах, изготовленных из компонентов, хранившихся в полиэтиленовых сосудах, объясняется потерей химической активности компонентов в результате реакции с кислородом воздуха, находящемся в межкусковом пространстве наполнителей.

Целью данной работы является установление продолжительности потери компонентами своей бетонозатворительной эффективности в зависимости от условий их хранения. Методика исследования была принята та же, что и в работе [5].

На первом этапе работы был изучен этот процесс для условий хранения наполнителей бетона в воздушном окружении. Полученные зависимости представлены на рис. 1 и 2. По оси абсцисс размещается время опыта, по оси ординат – прочность бетона на сжатие.

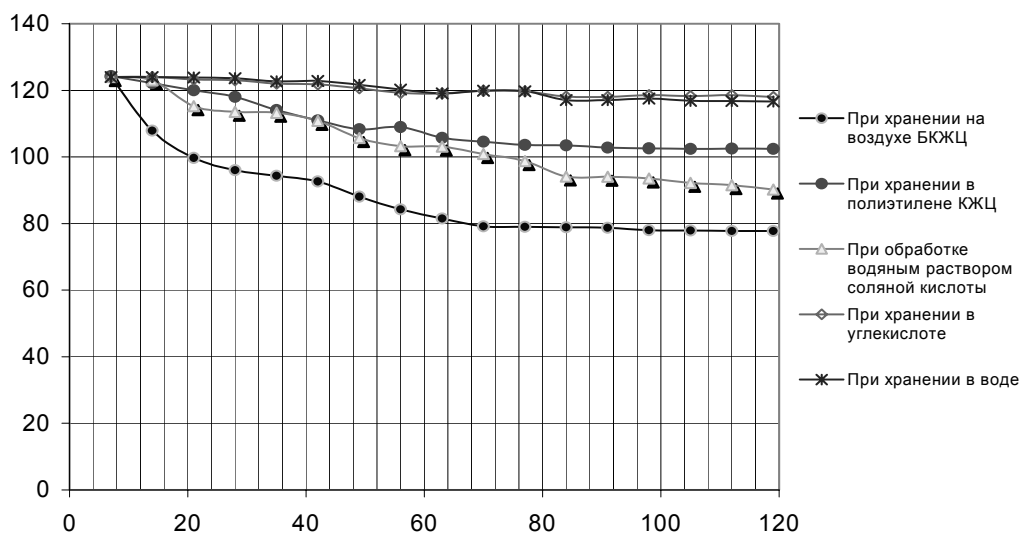


Рис. 1. Изменение предела прочности бетона на изгиб с возрастанием времени хранения исходных компонентов в различных условиях

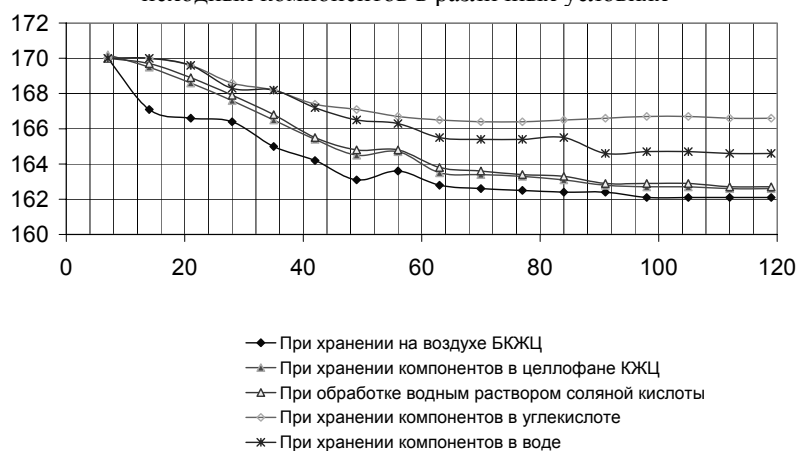


Рис. 2. Изменение предела прочности бетона на сжатие с возрастанием времени хранения исходных компонентов в различных условиях

Из рис. 1 и 2 следует, что через 80...100 суток после изготовления (добычи, дробления) твердых компонентов прочностные характеристики полученного на их основе бетона остаются постоянными, причем прочность бетона на изгиб снизилась (по сравнению с величиной, полученной из «свежих» компонентов) примерно на 20 % при хранении компонентов в полиэтиленовых мешках и на 35 % при хранении на открытом воздухе. Прочность бетона на сжатие снизилась на 4,6 и 4,8 % соответственно.

Возникает законный вопрос: почему все же сохранилось различие между прочностными характеристиками бетона, полученного из компонентов, хранившихся в различных условиях? Для ответа на этот вопрос щебень и песок перед бетонированием были обработаны 40 % водным раствором соляной кислоты. Идея этого эксперимента состояла в том, чтобы снять окисную пленку с поверхности компонентов. Предварительные опыты были сделаны в работе [5] и полностью завершены в данной работе. Так, например, в работе [5] было показано, что предел прочности бетона на изгиб, полученного из обработанных кислотой твердых компонентов через 28 и 35 суток от их получения, практически остался таким же, каким был он через 7 суток из необработанных компонентов. Хотя через 28...35 суток его прочность снизилась на 12,7...11,9 % при использовании компонентов, хранившихся на открытом воздухе, и на 2,7...3,0 % – хранившихся в полиэтиленовых мешках. В данной работе влияние кислотной обработки твердых компонентов через различное время их хранения на прочность бетона было прослежено в течение 120 суток (рис. 1, 2).

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что со временем не все КЖЦ на поверхности твердых компонентов сразу же «погибают» при соприкосновении с окружающей средой. В те или иные химические реакции вступает только часть КЖЦ, величина которой зависит от условий хранения компонентов, с образованием пленки адсорбированных веществ. Эта пленка как бы окутывает частицы порошка и защищает от гибели остальные КЖЦ. При обработке таким сильным растворителем, как соляная кислота – оставшаяся активность компонентов возрождается.

Завершающим этапом работы данного направления явилось установление влияния свойств среды, в которой хранятся наполнители, на получение бетона высокой прочности. Особенность методики проведения дальнейших исследований состояла в следующем. Партия

свежеполученных наполнителей разделялась на две группы, одна из которых закладывалась на хранение в стандартной упаковке (в бумажных мешках) или на открытом воздухе, т. е. выполняла функцию эталона в данной серии экспериментов. Вторая группа компонентов расфасовывалась в полиэтиленовые мешки, часть из которых заливалась водой, а часть продувалась диоксидом углерода таким образом, чтобы произошло полное замещение инертной средой находящегося в межкусковом пространстве воздуха. Цемент продувался только диоксидом углерода. Периодически, через каждые 7 суток из обеих групп наполнителей и цемента изготавливались кубики и балочки, которые не раньше чем через 28 суток испытывались по описанной в работе [5] методике.

Из анализа полученных результатов (см. рис. 1 и 2) вытекает следующее.

При хранении наполнителей бетона в инертной среде (как в воде, так и в диоксиде углерода) предел прочности бетона на изгиб не зависит от времени их хранения (с момента получения) и остается на уровне, достигнутом при бетонозатворении свежеприготовленных компонентов. В то же время предел прочности бетона на сжатие даже при хранении исходных компонентов в инертной среде через 120 суток от начала получения снижается: при хранении в диоксиде углерода – на 1,4 %, а в воде на 3,2 %. Вместе с тем он остается выше по сравнению с хранением в полиэтиленовых мешках с воздушным межкусковым пространством на 1,2...2,4 %. Различие (хотя и незначительное) в характере влияния фактора хранения компонентов в инертной среде на прочность бетона можно объяснить тем, что предел прочности бетона на сжатие зависит не только от прочности сцепления наполнителей между собой, но и от целого ряда других физических факторов, например, наличия пор (пустот) внутри бетонной смеси.

Выводы

1. Впервые экспериментально установлено, что эффективность цемента и наполнителей (песка и щебня) бетонной смеси, хранившихся на открытом воздухе в первые 80...100 суток после их получения (добычи, измельчения) ухудшается, а затем стабилизируется, причем предел прочности на изгиб полученного на их основе бетона снижается через этот отрезок времени на 20...30%, а на сжатие – на 4,6...4,8 % по сравнению с характеристиками, полученными из «свежих» компонентов. Это явление объясняется, на наш взгляд, наличием на по-

верхности твердых компонентов химически активных короткоживущих центров (КЖЦ), которые с течением времени вступают в реакции с атмосферным воздухом и погибают, в результате чего поверхность твердых частиц покрывается защитной пленкой.

2. Экспериментально показано, что после обработки песка и щебня 40 %-м водным раствором соляной кислоты их бетонозатворительная эффективность повышается, например, через 28...35 суток после получения восстанавливается до начальных пределов. Это свидетельствует о том, что гибнут не все КЖЦ, а только какая-то их часть оставшихся КЖЦ изолируются от окружающей среды окисной пленкой, после снятия которой прочностные показатели бетона, полученного на их основе, возрастают, хотя и не до начальных пределов.

3. При хранении компонентов в герметичной полиэтиленовой таре также наблюдается снижение их эффективности, но в меньшей степени. Однако, если наполнители хранить в инертной среде, то прочность полученного на их основе бетона на изгиб не снижается и остается такой же, как у бетона, полученного из «свежих» компонентов, а прочность на сжатие, хотя и снижается, но в гораздо меньшей степени по сравнению с величиной, установленной для условий хранения в кислородсодержащей среде.

Перечисленные экспериментально установленные факты убедительно свидетельствуют о существенном влиянии на прочностные характеристики бетона короткоживущих активных центров на поверхности твердых компонентов (наполнителей).

Работа будет продолжена в направлении установления доли вклада химической активности поверхности каждого из наполнителей на прочностные характеристики бетона и установления влияния КЖЦ на адгезионные свойства бетонной крепи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошелев К. В. Состояние крепи капитальных выработок глубоких шахт Донбасса и направление ее совершенствования / К. В. Кошелев, Ю. И. Антоневиц // Горный журнал. – 1976. – № 11. – С. 32–34.
2. Кошелев К. В. Межремонтный период крепи капитальных выработок глубоких шахт / К. В. Кошелев, Ю. И. Антоневиц // Уголь Украины. – 1976. – № 2. – С. 23–24.
3. Хуммель А. О технологии высокопрочного бетона. / Сборник иностранных переводов, 1955. – № 2.
4. Миронов С. А. Вопросы технологии высокопрочного бетона / С. А. Миронов, Г. А. Аробелидзе // Бетон и железобетон, 1955. – № 4.
5. Десов А. Е. Высокопрочные бетоны для предварительно напряженных конструкций / А. Е. Десов, В. М. Москвин, Б. Г. Скрамтаев. – М.: Стройиздат, 1965. – 320 с.
6. Аввакумов Е. Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1979. – 256 с.
7. Шевцов Н. Р. Оценка влияния времени и условий хранения компонентов на прочность получаемого бетона / Н. Р. Шевцов, С. В. Боршевский // Известия горного института. – 2003. – № 1. – С. 29–30.

Поступила в редколлегию 15.06.2005.

С. А. БОКАРЕВ, А. Н. ЯШНОВ, С. С. ПРИБЫТКОВ,
А. В. СЛЮСАРЬ (Сибирский государственный университет путей сообщения)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАДЗОРА ЗА ИСКУССТВЕННЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

Розглянуто питання удосконалення врахування та діагностики споруд. Як основний параметр діагностики прийняті власні частоти коливань конструкцій. Моделювання динамічної роботи прогонової будови реалізовано на підставі методу скінченних елементів.

Рассмотрены вопросы совершенствования учета и диагностики сооружений. В качестве основного диагностируемого параметра приняты собственные частоты колебаний конструкций. Моделирование динамической работы пролетного строения реализовано на основе метода конечных элементов.

The article examines the questions of improving supervision and diagnostic techniques of facilities. Natural frequency of superstructure is selected as a primary diagnostic parameter. Modeling of dynamic behavior of a span superstructure has been based on the finite-element method.

Одним из главных направлений совершенствования системы надзора за искусственными сооружениями является в настоящее время внедрение автоматизированных управляющих систем. За рубежом в 80-х гг. прошлого века начали широко внедрять автоматизированные информационные системы по мостам и другим искусственным сооружениям на железных и автомобильных дорогах. Например, в США начиная с 1984 г. проводили работы по созданию «Системы управления эксплуатацией железнодорожных мостов» штата Пенсильвания [1]. В Финляндии к разработке первой компьютерной реляционной базы данных по мостам на сети автомобильных дорог («Регистр мостов») приступили в 1986 г., а в 1990 г. ее стали применять в Центре дорожной администрации и во всех дорожных округах [2]. В Польше в 1993 г. для управления содержанием железнодорожных мостов была разработана и внедрена автоматизированная система, названная «SMOK» [3]. В дальнейшем развитие этой системы привело к созданию автоматизированной системы управления мостами (BMS-Bridge management system) [4]. В Великобритании разработана автоматизированная экспертная система управления автодорожными мостами (BMX), в Японии – автоматизированная экспертная система диагностики состояния железнодорожных тоннелей, во Франции – автоматизированная система диагностики мостов (GERETO). Этот перечень можно было бы продолжить.

В России внедрению вычислительной техники (по сути, информатизации) в процесс эксплуатации искусственных сооружений на железных, автомобильных и городских дорогах

всегда придавали большое значение. Одна из первых попыток по созданию автоматизированной информационной системы (ИПС «Мост», Гипродорнии) была предпринята в начале в 80-х гг. годов прошлого века для автодорожных мостов. Для содержания мостов и других искусственных сооружений на автомобильных дорогах разработаны автоматизированные системы, в большинстве своем упомянутые в [5]: «Монстр» (МАДИ, Москва), АИС ИССО (СГУПС и СибНИТ, Новосибирск), PassInfo (ВГАСУ, г. Воронеж), КАСУ (Терра, Воронеж) и др. В 2002 г. была закончена разработка и начато внедрение «Системы управления мостами» (СУМ) для г. Москвы, выполненная международным консорциумом в составе фирм «Промос» (Россия) и «AGA, Inc.» (США) при участии компаний «Cambridge Systematic Inc», (США) и «Ove Arup & Partners. Ltd» (Великобритания) [6].

В НИИ мостов ЛИИЖТа совместно с НИИЖТом (ныне СГУПС) в 1987 г. по заданию ЦП МПС было начато создание автоматизированной информационной системы по искусственным сооружениям [7], эксплуатирующимся на железных дорогах (АИС ИССО, Ленинград). В 1989 г. НИИЖТом начата самостоятельная разработка автоматизированной системы [8] (АСУ ИССО v.1, Новосибирск). В 2002 г. все 17 железных дорог перешли на АСУ ИССО v.2, разработанную в СГУПСе при участии НИИ мостов. В 2004 г. начато внедрение третьей сетевой версии программы реализованной в клиент-серверной технологии.

Важнейшая задача, потребовавшая принятия взвешенного решения – выбор архитектуры

автоматизированной системы. Объекты системы рассредоточены на территории огромной страны, организации, связанные с содержанием мостов имеют иерархическую структуру, их общее количество более четырехсот и они также распределены по территории России от Сахалина до Калининграда. Для таких сложных распределенных автоматизированных систем необходимо создание отраслевой системы передачи данных и наиболее целесообразна сетевая архитектура с использованием трехзвенной клиент-серверной технологии. Содержание мостов – это не самостоя-

тельная отрасль, а составная часть путевого хозяйства, и по одной этой причине не может рассматриваться изолировано от других систем, связанных с содержанием железных дорог и путевого хозяйства в целом. Выходная информация, формируемая в одной подсистеме, используется в качестве входной или справочной – в другой. Являясь относительно независимыми, все подсистемы должны быть жестко объединены базами полигона сети железных дорог и нормативно-справочной информации. Архитектура АСУ ИССО v.3 показана на рис. 1.

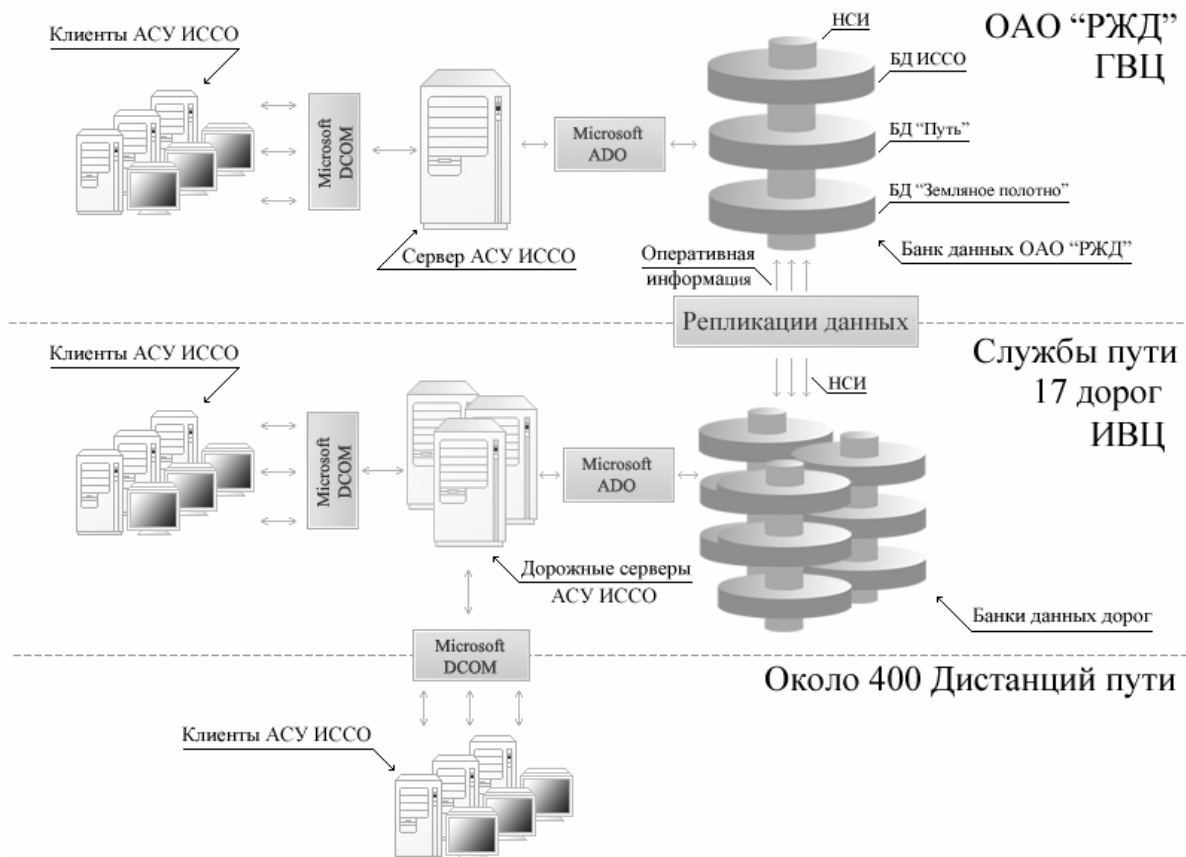


Рис. 1. Архитектура АСУ ИССО

Структура и способы организации данных автоматизированной системы содержания мостов определяются, в первую очередь, соответствующими требованиями головной системы железных дорог к своим подсистемам. Разработчики автоматизированной системы путевого хозяйства (АСУ ПХ) на железнодорожном транспорте прошли долгий путь от разрозненных систем, работающих на базе различных СУБД (систем управления базами данных – Dbase, Paradox, FoxBASE, SQL и др.), до принятия жесткого указания, регламентирующего порядок корректировки структуры базы данных. Изменение структуры баз данных может осуществляться только администратором БД

путевого хозяйства. Все остальные пользователи прав на изменение структуры БД не имеют.

Данные, приведенные выше, показывают, что в настоящее время накоплен более чем 20-летний опыт разработки и внедрения различных автоматизированных информационно-аналитических систем, предназначенных для эксплуатации мостов, труб и других искусственных сооружений на железных, автомобильных и городских дорогах. Анализ приведенных разработок показал, что цель разработки во многом определяет принятые технические и организационные решения, реализованные при ее создании. На наш взгляд, основная цель внедрения новых информационных технологий – это по-

вышение уровня управленческих решений для оптимизации эксплуатационных расходов и обеспечения заданных потребительских свойств искусственных сооружений. Оптимизация расходов может быть достигнута за счет автоматизации планирования ремонтов на основе фактического состояния сооружения и прогноза его изменения. Обеспечение потребительских свойств – за счет автоматизации контроля и оценки технического состояния. Для достижения поставленной цели необходимо решить целый ряд задач. Не останавливаясь на каждой из них, сформулируем две основополагающие.

Первой в этом ряду, несомненно, стоит задача научно-методического обеспечения разработки и внедрения автоматизированной системы по содержанию искусственных сооружений. Такая система создается не только и не столько для подготовки банка данных по карточкам искусственных сооружений (такой взгляд на автоматизированные системы был характерен для 90-х гг.). Автоматизированная система должна быть полноценной составляющей технологического процесса содержания и эксплуатации мостов, начиная с его сдачи в эксплуатацию, а может быть даже раньше – со времени составления технико-экономического обоснования необходимости строительства сооружения и далее на стадиях его проектировки, строительства, эксплуатации и демонтажа или реконструкции. Сообразуясь с современными воззрениями, это должна быть процессно-ориентированная система – отражающая протекающие процессы (контроль состояния, оценка технического состояния, прогноз его изменения, определение условий пропуска временной нагрузки, планирование ремонтных работ и т. д.), а не функции специалиста или организации. В связи с таким подходом должны быть кардинальным образом пересмотрены нормативные документы, ориентированные на «ручную» обработку информации и подготовку соответствующих форм учета и отчетности. Два примера: Министерство путей сообщения РФ еще в 2002 году пересмотрело формы документов первичного учета – карточки на мост, водопропускные трубы и другие искусственные сооружения по причине внедрения АСУ ИССО на всей сети железных дорог России; для рациональной организации осмотров городских транспортных сооружений города Москвы при работе с системой СУМ были созданы совершенно новые формы учета повреждений и дефектов, обеспечивающие их автоматизированный ввод в компьютер.

Однако при выполнении обследований запись обнаруженных неисправностей продолжают выполнять вручную, в произвольном виде, чрезмерно кратко. В лучшем случае заполняются специальные формы, в которых фиксируются результаты визуальных наблюдений, показания приборов и пр. Неправильная интерпретация значения полей заполняемых бланков, ошибки операторов при переносе этой информации в компьютер приводят к значительным искажениям в базе данных. Другая проблема – недостаточная обеспеченность линейных подразделений, занимающихся эксплуатацией искусственных сооружений, средствами диагностики. Если диагностика верхнего строения пути осуществляется с помощью специальной путеизмерительной аппаратуры, то основой оценки технического состояния мостов до сих пор остаются осмотры. Таким образом, важной становится задача приборного обеспечения диагностики искусственных сооружений.

В Сибирском государственном университете путей сообщения разработаны малогабаритные автоматизированные диагностические системы для исследования работы мостовых конструкций. В настоящее время успешно эксплуатируются одноканальная измерительная система «Тензор-М» на базе карманных компьютеров (КПК) из семейства Palm и многоканальная система «Тензор-8.128» на базе Notebook, позволяющие работать с датчиками линейных перемещений, деформаций и вибродатчиками, разрабатываются многоканальные системы, основанные на технологии беспроводной передачи данных Bluetooth.

Внедрение новых информационных технологий позволяет осуществлять эксплуатацию искусственных сооружений на качественно новом уровне. В памяти карманного компьютера хранятся данные по искусственным сооружениям дороги, совместимые с базой данных АСУ ИССО, а также необходимая справочная информация по нормативным документам, регламентирующим вопросы эксплуатации. Измерительный блок системы позволяет диагностировать напряженно-деформированное состояние конструкции под воздействием временной нагрузки с записью получаемых результатов. В результате специалисты, проводящие обследование, получают возможность не только оценить техническое состояние, но и сразу же занести полученные результаты в базу данных КПК с последующей синхронизацией (автоматическим добавлением) в базу данных АСУ ИССО.

Автоматизация работ, выполняемых при обследовании, несомненно, ускорит процесс диагностики и повысит объективность оценки технического состояния сооружений. Если в качестве основного диагностируемого параметра рассматриваем частоту собственных колебаний основного тона, в который входят частоты колебаний с простой формой (одна полуволна) в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также колебания кручения – «боковая качка», то на основании анализа изменения собственных частот колебания конструкции может про-

водиться экспресс-диагностика. Разработанная аппаратура записывает виброграммы колебаний при проходе подвижной нагрузки по сооружению (рис. 2). Спектральный анализ записанного сигнала позволяет выделить частоты собственных колебаний, которые соответствуют пикам на спектрограмме (рис. 3).

Так как одним из самых массовых сооружений на железных дорогах являются железобетонные мосты, то отработка методики экспресс-диагностики осуществляется на примере железобетонных пролетных строений.

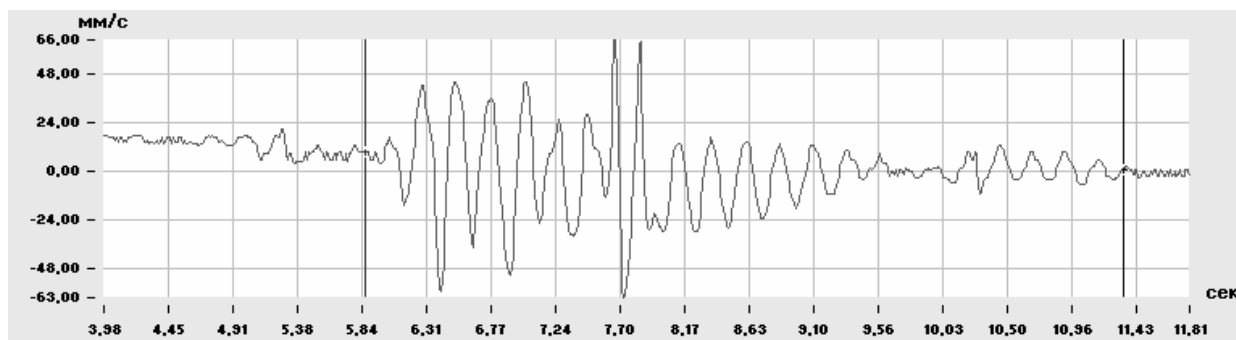


Рис. 2. Пример записи виброграммы колебаний железобетонного пролетного строения

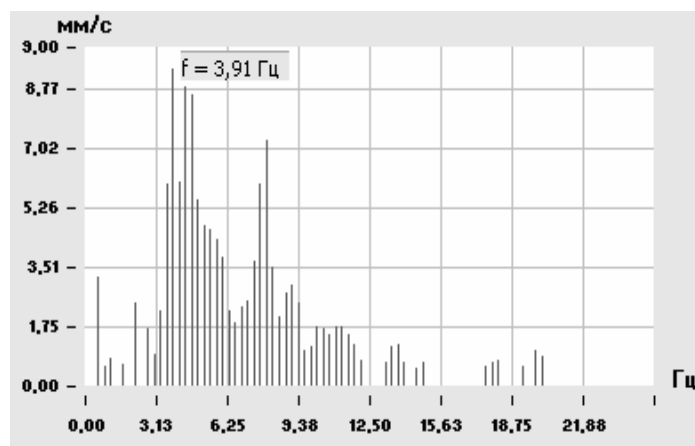


Рис. 3. Пример спектрограммы колебаний железобетонного пролетного строения

Теоретические исследования динамической работы железобетонных конструкций выполнены с использованием метода конечных элементов. Моделирование в конечно – элементной среде Cosmos/m дало возможность учесть влияние неисправностей различного вида (сколы, трещины, различная толщина балластного слоя, коррозионные повреждения материалов конструкции, изменения условий опирания) на динамическую работу конструкции. Проведенные расчеты позволили оценить степень влияния различных факторов на основной диагностируемый параметр. Например, заклинка опорных частей приведет к изменению частот вертикальных колебаний более чем в полтора раза. Существенное влияние на собственные частоты

оказывает изменение толщины балластного слоя (до 10 % при увеличении толщины на 50 см), коррозионные повреждения – до 3 %, менее существенно влияют трещины и сколы – 0,3...1,2 % на каждую неисправность.

Анализ различных моделей позволил создать систему упрощений для задания различных неисправностей. Но следует отметить, что при исследованиях динамической работы пролетного строения для того, чтобы избежать значительных погрешностей в результатах определения частот, необходимо детально задавать арматуру в балках, как показано на рис. 4. Естественно, что такое моделирование потребует существенных затрат времени. Однако их можно избежать, если использовать автомати-

зированный банк данных по типовым пролетным строениям [9], интегрированный в АСУ ИССО. Банк создавался для автоматизации расчетов грузоподъемности железобетонных пролетных строений в соответствии с действующим нормативным документом [10] и содержит всю необходимую для подробного описания конструкции информацию.

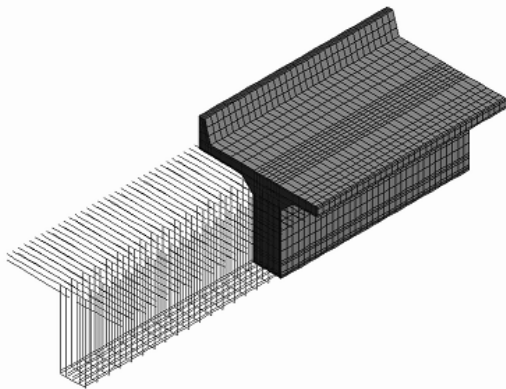


Рис. 4. Конечно-элементная модель балки железобетонного пролетного строения

Таким образом, в результате проведенных исследований созданы предпосылки для внедрения системы экспресс-диагностики технического состояния искусственных сооружений на железных дорогах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hoffman G. Bridge management: computer aided propitiates / Civil Engineering. 1985. – № 6. – С. 62–64.

2. Кахонен А. Регистр мостов и системы менеджмента мостов. Ремонт и содержание мостов: Докл. Российско-финского семинара. – Сургут, 2002. – С. 3–16.

3. Sawicki V. Polish Railway Bridge Management system. Istanbul, 1997. – 36 с.

4. Bien J. Expert Functions in Bridge Managements Systems. Transportation Research Circular, № 498, 2000. – pp. 1–8.

5. Щетинкина Е.Н. Проблемы отраслевого автоматизированного банка данных на современном этапе. // Дороги России XXI века. 2004,– № 12. – С. 42–48.

6. Екимов В. К. Методика и опыт проведения стандартной инспекции мостов / В. К. Екимов, В. Н. Федосеев, Г. С. Бродский и др. // Наука и техника в дорожной отрасли, 2003. – № 4. – С. – 13–17.

7. Астрахан А. Х. Автоматизированная система управления содержанием искусственных сооружений / А. Х. Астрахан, С. А. Бокарев, Н. М. Седова др. // Совершенствование искусственных сооружений на ж.д. Новосибирск, 1989. – С. 5–8.

8. Бокарев С. А. Управление техническим состоянием искусственных сооружений на железных дорогах России на основе новых информационных технологий. – Новосибирск, 2002. – 276 с.

9. Бокарев С. А. Автоматизированный банк данных по железобетонным пролетным строениям железнодорожных мостов / С. А. Бокарев, А. М. Усольцев, Д. Н. Цветков и др. // Научные труды общества железобетонщиков Сибири и Урала. – Новосибирск, 1995. – Вып. 3.– С. 77–81.

10. Руководство по определению грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов / МПС. – М.: Транспорт, 1989. – 125 с.

Поступила в редколлегию 30.05.2005.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ВАНТ ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ ВОЗМУЩЕНИИ

Досліджено вплив кінематичного збурення на динамічну поведінку вант. Кінематичне збурення подано у вигляді коливань вершини пілона. Побудовано математичну модель коливань вант. Як основний метод дослідження був прийнятий метод гармонійного балансу. Були отримані й оцінені вирази для визначення амплітуди і частоти змушених коливань.

Исследовано влияние кинематического возмущения на динамическое поведение вант. Кинематическое возмущение представлено в виде колебаний вершины пилон. Построена математическая модель колебаний ванты. В качестве основного метода исследования принят метод гармонического баланса. Получены и оценены выражения для определения амплитуды и частоты вынужденных колебаний.

The article examines the questions of improving supervision and diagnostic techniques of facilities. Natural frequency of superstructure is selected as a primary diagnostic parameter. Modeling of dynamic behavior of a span superstructure has been based on the finite-element method.

Введение

Исследованию статического и динамического поведения вантовых мостов посвящен широкий ряд работ как зарубежных, так и отечественных авторов.

В частности, в работах [1; 2] рассматриваются статические и динамические расчеты各式各ых мостов, приведены наиболее удачные примеры конструктивных схем.

В работе [3] исследуются собственные и вынужденные колебания гибких нитей.

Данная статья посвящена исследованию динамического поведения вант под действием кинематического возмущения.

Ранее, в работе [4] рассматривались поперечные колебания струны, вызываемые периодическим смещением опор. Точки крепления струны были размещены на одном уровне. Для решения дифференциального уравнения колебаний струны оно было приведено к дифференциальному уравнению Матье, дополненному членом, учитывающим демпфирование, и кубическим членом.

В данной работе в качестве основного метода исследования принят метод гармонического баланса.

1. Постановка задачи

Рассмотрим ванту, точки которой расположены на разных уровнях. Предположим, что нагрузка, действующая на ванту, является равномерно распределенной по длине ванты. В качестве кинематического возмущения примем колебания вершины пилон.

Необходимо исследовать динамическое поведение ванты под действие кинематического возмущения.

2. Дифференциальное уравнение колебания ванты под действием кинематического возмущения

Исследуем поперечные колебания ванты, расчетная схема которой представлена на рис. 1, а происхождение можно представить в виде уравнения второго порядка в частных производных:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\langle T_0 \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{EA}{l} \left(\frac{dy}{dx} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\rangle \times \left\langle \int_0^l \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{dy}{dx} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] dx \right\rangle = m \ddot{v}, \quad (1)$$

где T_0 – максимальное растягивающее усилие в сечении нити; l – расстояние между опорами в направлении ванты (рис. 1); E – модуль упругости материала ванты; m – масса единицы длины ванты; $y(x)$ – уравнение кривой провисания нити; $v(x, t)$ – вертикальные перемещения местной координаты системы, u – составляющая вдоль оси x горизонтального смещения пилон.

В данном случае предполагалось, что вершины пилон совершают горизонтальные колебания и, учитывалась только их составляющая вдоль оси.

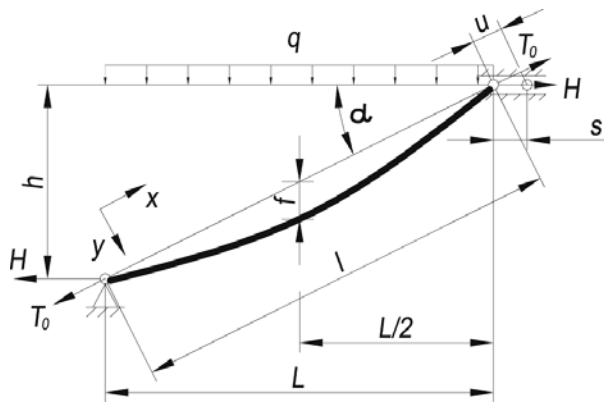


Рис. 1. Расчетная схема ванты

Проинтегрировав $\frac{\partial u}{\partial x}$ по x при неизменном t по всей длине ванты при $0 \dots l$, получим

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\langle T_0 \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{EA}{l} \left(\frac{dy}{dx} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left\{ u(l, t) - u(0, t) + \int_0^l \left[\frac{dy}{dx} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] dx \right\} \right\rangle = m \ddot{v},$$

где $u(x, t)$ – перемещение точек ванты вдоль оси x . Расчетная схема ванты принята такой, что нижняя опора ванты – шарнирно-неподвижная, а верхняя – шарнирно-подвижная.

Выразим продольные колебания верхней опоры ванты $u(t)$ через горизонтальные колебания вершины пилона:

$$u(t) = s(t) \cos \alpha.$$

Примем уравнение горизонтальных колебаний вершины пилона в виде

$$s(t) = S \cos(\omega t + \theta), \quad (2)$$

где S – амплитуда колебаний; ω – частота колебаний, θ – фазовый угол.

Предполагая, что нижняя точка кривой провисания нити находится вне пролета ванты (на значительном расстоянии от левой опоры), примем уравнение кривой провисания нити в виде

$$y(x) = Y \sin \frac{\pi x}{l}, \quad (3)$$

где Y – максимальное значение провисания нити.

Так как оба конца ванты шарнирно оперты, представляем функцию $v(x, t)$ в виде

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) \sin \frac{\pi n x}{l}. \quad (4)$$

Подставив вышеприведенные зависимости в выражение (1) и выполнив необходимые преобразования, получаем при $n = 1$

$$\ddot{q} + \alpha q + \gamma q^2 + \beta q^3 + c q \cos(\omega t + \theta) + c Y \cos(\omega t + \theta) = 0, \quad (5)$$

где

$$\alpha = \left(T_0 \frac{\pi^2}{l^2} + \frac{1}{2} EAY^2 \frac{\pi^4}{l^4} \right) / m;$$

$$\gamma = \frac{3 EA \pi^4}{4 m l^4}; \quad \beta = \frac{1 EA \pi^4}{4 m l^4};$$

$$c = \frac{S}{m} \cos(\alpha) EA \frac{\pi^2}{l^3}.$$

Перепишем уравнение, добавив в него вязкое сопротивление

$$\ddot{q} + \varepsilon \dot{q} + \alpha q + \gamma q^2 + \beta q^3 + c q \cos(\omega t + \theta) + c Y \cos(\omega t + \theta) = 0. \quad (6)$$

3. Аналитическое исследование колебаний ванты

Для решения уравнения (6) воспользуемся заменой

$$q = \psi + \Delta,$$

где Δ – статическое смещение.

Выполнив подстановку новой переменной в уравнение (6) и выполнив математические преобразования, получим

$$\ddot{\psi} + \varepsilon \dot{\psi} + \mu \psi + \vartheta \psi^2 + \beta \psi^3 + \eta + c \psi \cos(\omega t + \theta) + c(\Delta + Y) \cos(\omega t + \theta) = 0, \quad (7)$$

где

$$\mu = \alpha + 2\gamma\Delta + 3\beta\Delta^2,$$

$$\vartheta = \gamma + 3\beta\Delta,$$

$$\eta = \alpha\Delta + \gamma\Delta^2 + \beta\Delta^3.$$

Решение уравнения (7) будем искать в виде гармонического колебания на основной частоте возмущения:

$$\psi = A \cos \omega t. \quad (8)$$

Приближенное решение будем искать используя метод гармонического баланса.

Подставим выражение (8) в уравнение (7):

$$\begin{aligned}
& -\omega^2 A \cos \omega t - \varepsilon \omega A \sin \omega t + \mu A \cos \omega t + \\
& \quad + 9A^2 \cos^2 \omega t + \beta A^3 \cos^3 \omega t + \\
& + cA \cos \omega t \cos(\omega t + \theta) + \\
& \quad + c(Y + \Delta) \cos(\omega t + \theta) + \eta = 0. \quad (9)
\end{aligned}$$

Вспользуемся известными тригонометрическими соотношениями:

$$\cos^3 \omega t = \frac{1}{4} \cos 3\omega t + \frac{3}{4} \cos \omega t;$$

$$\cos^2 \omega t = \frac{1}{2} \cos 2\omega t + 2;$$

$$\cos(\omega t + \theta) = \cos \omega t \cos \theta - \sin \omega t \sin \theta.$$

Пренебрегая комбинационными тонами и свободными членами уравнения и, приравнявая члены при $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ в левой части уравнения (9) к нулю, получим систему уравнений:

$$\begin{cases}
-\omega^2 A \cos \omega t + \mu A \cos \omega t + \\
+ \frac{3}{4} \beta A^3 \cos^3 \omega t = -c(Y + \Delta) \cos \omega t \cos \theta, \\
-\varepsilon \omega A \sin \omega t = c(Y + \Delta) \sin \omega t \sin \theta.
\end{cases} \quad (10)$$

Преобразуя систему уравнений (10), получим выражения для определения фазового угла и частоты вынужденных колебаний системы:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\varepsilon \omega}{\mu + \frac{3}{4} \beta A^2 - \omega^2}, \quad (11)$$

$$\omega^2 = \mu + \frac{3}{4} \beta A^2 - \frac{\varepsilon^2}{2} \pm$$

$$\pm \sqrt{\frac{\varepsilon^4}{4} - \varepsilon^2 \left(\mu + \frac{3}{4} \beta A^2 \right) + \frac{c^2 (Y + \Delta)^2}{A^2}}. \quad (12)$$

Выражения для кривых, ограничивающих области неустойчивости колебаний:

$$\omega_1 = \sqrt{\mu + \frac{3}{4} \beta A^2 - \frac{\varepsilon^2}{2}}, \quad (13)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\mu + \frac{3}{4} \beta A^2 + \frac{2c^2 (Y + \Delta)^2}{3\beta A^4}}. \quad (14)$$

В качестве примера рассмотрим систему со следующими параметрами:

- пролет ванты $L = 70$ м;
- угол наклона $\alpha = 45^\circ$;

- диаметр ванты $d = 140$ мм;
- прогиб посередине пролета $f = \frac{1}{100} L$;
- максимальное значение провисания нити $Y = f \cos \alpha$;
- материал ванты – сталь класса С345 ($\gamma = 7850$ кг/м³, $E = 2,1 \cdot 10^{10}$ кг/м²);
- коэффициент вязкого демпфирования $\varepsilon = 0,1$.

Площадь поперечного сечения ванты

$$F = 0,0154 \text{ м}^2,$$

момент инерции сечения

$$I = 1,89 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4.$$

Нагрузка от собственного веса, действующая на ванту: $p_1 = \gamma F$. Статически эквивалентная нагрузка, распределенная вдоль пролета: $p_2 = p_1 / \cos(\alpha)$. Высота крепления ванты $h = L \operatorname{tg}(\alpha)$. Расстояние между опорами в направлении ванты $l = L / \cos(\alpha)$. Горизонтальная составляющая растягивающего усилия

$$H = \frac{p_2 L^2}{8f}.$$

Максимальное растягивающее усилие

$$T_0 = \sqrt{H^2 + \left(H \frac{h}{L} + p_2 \frac{L}{2} \right)^2}.$$

Амплитуду горизонтальных колебаний вершины пилона принимаем равной максимальному нормативному значению отклонения вершины пилона от вертикали [1]:

$$S = \frac{h}{500}.$$

Амплитудно-частотная зависимость системы, полученная методом гармонического баланса, приведена на рис. 2. Также на рис. 2 приведена амплитудно-частотная зависимость, полученная в результате численного моделирования колебаний ванты под действием кинематического возмущения.

Анализ зависимостей показывает, что частота срыва при аналитическом исследовании составила $\omega_{\text{ср}} = 12,05$ рад/с, а при численном моделировании частота срыва составила $\omega_{\text{ср}} = 11,5$ рад/с. Сравнивая полученные значения частот, следует отметить, что их отличие составляет 5 %.

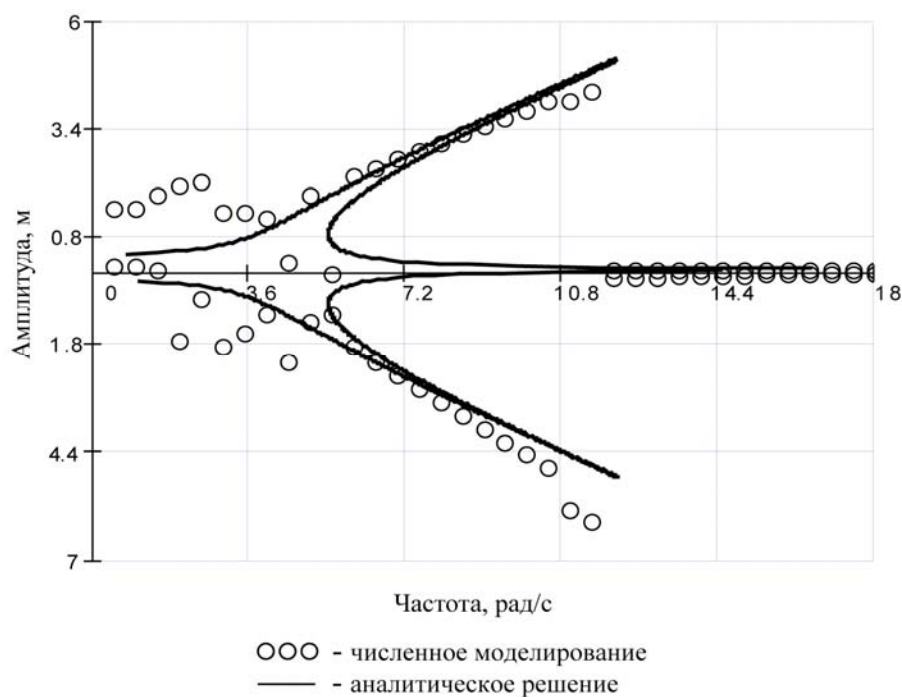


Рис. 2. Амплитудно-частотные зависимости системы:
 $\alpha = 20,899 \text{ с}^{-2}$; $\gamma = 9,881 \text{ мс}^{-2}$; $\beta = 6,654 \text{ м}^{-2}\text{с}^{-2}$; $\varepsilon = 0,1 \text{ с}^{-1}$; $S = 0,14 \text{ м}$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петропавловский А. А. Вантовые мосты. – М.: Транспорт, 1985. – 224 с.
2. Смирнов В. А. Висячие мосты больших пролетов. – М.: Высшая школа, 1975. – 368 с.
3. Ивович В. А. Динамический расчет висячих конструкций. – М.: Стройиздат, 1975. – 384 с.
4. Каудерер Г. Нелинейная механика. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1961. – 778 с.

Поступила в редколлегию 23.05.2005.

А. А. ГОНЧАРЕНКО (ДИИТ)

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА «HEATISOL-2» НА ОСНОВЕ СТЕКЛОБОЯ И ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Викладено концептуальний підхід до організації виробництва та технології отримання теплоізоляційного матеріалу «Heatisol-2». Наведено відомості про отриманий теплоізоляційний матеріал.

Изложен концептуальный подход к организации производства и технологии получения теплоизоляционного материала «Heatisol-2». Приводятся сведения о полученном теплоизоляционном материале.

This article describes conceptional approach to the organization of production and manufacturing technique of the insulative material «Heatisol-2» and gives general information on the new material.

Рациональное применение отходов промышленности в производстве теплоизоляционных материалов позволяет не только снизить их себестоимость, но и получить изделия с хорошими эксплуатационными свойствами.

Улучшение теплоизоляционных свойств материалов позволяет снизить объем высокотемпературной теплоизоляции, теплотерю через изоляцию, а использование в их производстве техногенных продуктов промышленности – снизить энергозатраты на подготовку сырья и содействует охране окружающей среды.

Основой разработанного материала является бой листового стекла, пыль газоочистки ферросилиция (ПГПФ) и пыль газоочистки производства металлического марганца (ПГПММ).

В настоящее время на многих ферросплавных заводах внедрены эффективные установки для очистки промышленных выбросов. Ежегодно только на одном заводе ими улавливается более 50 тыс. м³ пыли различного химического состава. Следует отметить, что с экологической точки зрения стекло считается наиболее трудноутилизируемым отходом. Оно не подвергается разрушениям под воздействием воды, атмосферы, солнечной радиации. Кроме того, стекло – это коррозионно-стойкий материал, который не разрушается под воздействием подавляющего количества сильных и слабых органических, минеральных и биокислот, солей, а также бактерий. Поэтому если органические отходы полностью разлагаются уже через 1–3 года, полимерные материалы – через 5–20 лет, то стекло способно сохраняться без особых разрушений десятки и даже сотни лет.

Из этого следует, что применение стеклобоя и пыли газоочистки сопровождаются такими факторами как экономичность, экологичность и эффективность [1; 2].

Способом производства материала «Heatisol-2», обеспечивающим получение равномерной струк-

туры, является порошок способ. По этому способу шихту составляют из 95...99 стекольного порошка с примесями и 5...1 частей пенообразователя. В качестве последнего применяют вещества, разлагающиеся при нагревании смеси с выделением газовой фазы. При дальнейшем нагревании массы начинается разложение пенообразователя. Выделяющиеся газы образуют в стекломассе поры, диаметр которых постепенно возрастает, что и приводит к значительному объему стекломассы [3; 4].

В качестве основного сырья применялся порошок листового оконного стекла состава, %: SiO₂ – 72,9; Al₂O₃ – 1,57; Fe₂O₃ – 0,29; CaO – 8,79; MgO – 2,2; Na₂O – 15,15.

К числу основных требований к химическому составу стекла следует отнести его кристаллизационные и вязкостные характеристики. Устойчивость стекла к кристаллизации в температурном интервале вспенивания необходима для получения теплоизоляционного материала с замкнутой и однородной структурой, поскольку в ходе процесса кристаллизации изменяется состав стекловидной фазы и в ее легкоплавкой менее вязкой фазе возрастает возможность образования каналов в стенках ячеек теплоизоляционного материала или пенообразование прекращается полностью. Поскольку присутствие внутренних поверхностей (границ зерен) оказывает каталитическое влияние на образование центров новой фазы [5], то рентгенографический анализ целесообразно проводить на образцах стекла, измельченных до тонины пенообразующих шихт и подвергнутых термообработке при температуре вспенивания. Проводились испытания порошка стекла с удельной поверхностью 6000 см²/г. Результаты, полученные при нагревании этого порошка в течение 2 часов в лабораторной муфельной печи, приведены в таблице.

Спекание порошка стекла с удельной поверхностью 6000 см²/г

Температура, °С	Вязкость стекла, пз	Состояние стекла после двухчасового нагревания
< 560	> 10 ¹¹	Свободный порошок
560...630	10 ¹¹ – 8·10 ⁸	Прогрессирующее спекание
630	8·10 ⁸	Появляется жидкая стеклообразная фаза
630...670	8·10 ⁸ – 8·10 ⁷	Прогрессирующее стеклообразование
670	8·10 ⁷	Заглушенное стекло с блестящей поверхностью, пронизанное мелкими пузырьками воздуха
> 670	< 8·10 ⁷	Постепенное осветление и превращение в прозрачное стекло

Для получения материалов «Heatisol-2» и «Heatisol-2» нами использовались такие пенообразователи – кокс, технический углерод и пиролизит. Как правило, температура разложения пенообразователя должна быть на 150...200 °С выше температуры размягчения стекла. Исходя из этого и рассмотрев термограммы этих и других пенообразователей мы пришли к выводу о том, что использование известняка в качестве пенообразователя будет способствовать достижению лучших резуль-

татов, так как эндотермические эффекты, наблюдающиеся при нагревании шихты, содержащей известняк, в интервале 600...800 °С протекают реакции силикатообразования.

На термограмме известняка эндотермический тепловой эффект отмечается при 875 °С и особенно заметен в интервале 910...950 °С (рисунок). По данным различных авторов упругость диссоциации углекислого кальция достигает 760 мм. рт. ст. при 910...925 °С. В нашем случае диссоциация начинается при 875 °С.

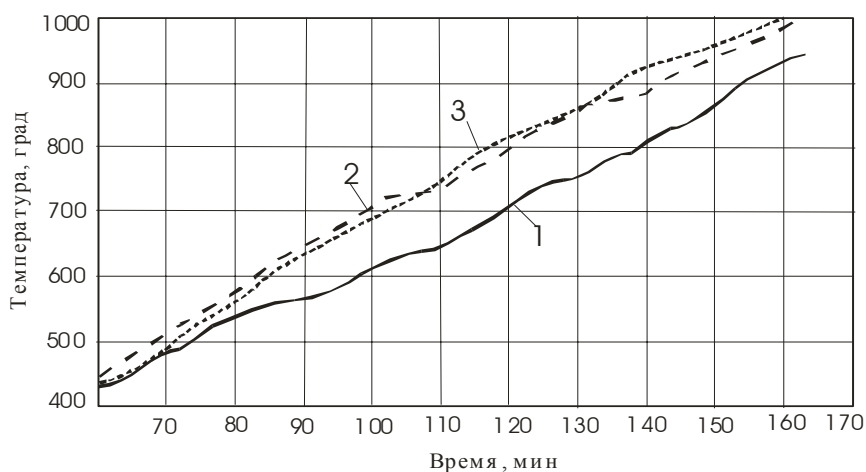


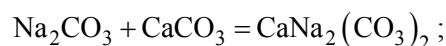
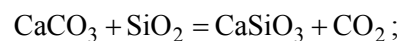
Рис. Термограммы известняка и шихты с известняком:
1 – шихта с известняком; 2 – известняк; 3 – эталон (шихта материала «Heatisol-2»)

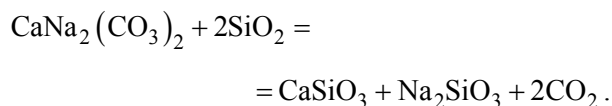
На термограмме шихты с известняком участки эндотермических эффектов сдвинуты в сторону более низких температур. Заметные отклонения от кривой нагрева эталона наблюдаются при 795...818 °С, т. е. почти на 100 °С температуры разложения известняка. Менее заметный термический эффект мы наблюдаем при 560...575 °С.

Эндотермические эффекты, можно объяснить тем, что протекают реакции силикатообразования. Начало взаимодействия между

SiO₂ и CaCO₃ относят к температуре 600 °С. При 800 °С реакции взаимодействия между SiO₂, CaCO₃ и Na₂CO₃ становятся более интенсивными.

Тепловые эффекты термограмм шихты наблюдается в температурной области следующих реакций:





В результате этих реакций известняк в присутствии порошка стекла разлагается при температуре ниже 900 °С, а именно – при 795...818 °С, начиная примерно с 600 °С, что позволяет соблюдать требования к вязкостным свойствам стекла и ограничения максимальной температуры на уровне 900 °С с целью эффективной эксплуатации жаростойких стальных форм и экономии электроэнергии.

ПППФ включает в основном аморфный диоксид кремния (75...90 %) и незначительное количество оксида железа (4...8 %), а ее удельная поверхность составляет 20 000...25 000 см²/г. ПППММ содержит в своем составе в основном карбонат марганца, а также окислы кальция и кремния. Его удельная поверхность – 10 000...15 000 см²/г [6].

В процессе нагрева аморфный кремнезем в ПППФ при 800 °С переходит в кристобалит, а малотермостабильный карбонат марганца в интервале температур 300...740 °С разлагается с выделением CO₂ и образованием MnO. Поэтому введение пылей газоочистки должно приводить к повышению прочности материала при нагревании более 300 °С за счет упрочнения контактных зон между частицами шихты, вследствие образования связей электростатической природы.

Благодаря оптимизации состава теплоизоляционного материала «Heatisol-2», путем подбора пенообразователя и введения пылей газоочистки ПППФ в количестве 1...5 % и ПППММ – 1...2 % нами были достигнуты такие результаты, а именно – повышение прочности на 20%, снижение коэффициента теплопроводности на 2 %, при объемном весе материала 280...350 кг/м³.

Таким образом, полученные результаты позволяют расширить применение теплоизоляционного материала «Heatisol-2» в развитии строительства и железнодорожного транспорта, учитывая все его признаки: качественные (теплопроводность, водопоглощение, теплопроводность), эксплуатационные (транспортабельность, складирование, монтаж, укладка), экономические (низкая себестоимость) и экологические.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пшинько А. Н. Решение вопросов энерго- и ресурсосбережения путем организации производства и технологии получения теплоизоляционного материала / А. Н. Пшинько, Н. В. Савицкий, С. А. Корецкая и др. // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: Сб. науч. тр. – Д.: ПГАСиА, 2003. – Вып. № 25. – С. 29–31.
2. Пшинько А. Н. Использование отходов металлургической промышленности при получении модифицированного теплоизоляционного материала «Heatisol 2» / А. Н. Пшинько, Н. В. Савицкий и др. // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: Сб. науч. тр. – Д.: ПГАСиА, 2004. – Вып. № 7–8. – С. 81–85.
3. Китайгородский И. И. Пеностекло / И. И. Китайгородский, Т. Н. Кешишян. – М.: Промстройиздат, 1953. – 77 с.
4. Шилл Ф. Пеностекло. – М.: Стройиздат, 1965. – 307 с.
5. Пилецкий В. И. Исследование процесса формирования структуры и свойств пеностекла при различных условиях его получения. Канд. дисс. – Минск, 1972. – 176 с.
6. Пшинько А. Н. Решение вопросов энерго- и ресурсосбережения путем организации производства и технологии получения теплоизоляционного материала / А. Н. пшинько, Н. В. Савицкий, С. А. Корецкая и др. // Вестник Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. – Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп., 2004. – Вып. 4. – С. 200–202.

Поступила в редколлегию 22.03.2005.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ КВАЗИРЕГУЛЯРНОЙ ТРЕХПРОЛЕТНОЙ БАЛКИ

У роботі на прикладі трипрогінної нерегулярної балки досліджено вплив нерегулярностей лінійних, жорсткісних та масових параметрів на зміну власних частот. Доведено, що при окремих визначених параметрах нерегулярностей у практичних розрахунках можливо використовувати прості рішення для регулярних систем, отримані приблизні залежності, графіки та номограми.

В работе на примере трехпролетной нерегулярной балки исследовано влияние нерегулярностей линейных, жесткостных и массовых параметров на изменение собственных частот. Показано, что при определенных параметрах нерегулярности в практических расчетах можно использовать простые решения для регулярных систем, получены приблизительные зависимости, графики и номограммы.

The article, using the example of a three-flight irregular beam, studies the influence of irregularities of linear, stiffness- and mass-related parameters on the change of own frequencies. It has been shown that at certain parameters of irregularity it is possible to use in practical calculations simple solutions for regular schemes, the obtained approximated dependences, charts and nomograms.

Данная статья является логическим продолжением исследований, отраженных ранее в работах [1; 2], влияния незначительных нерегулярностей по длинам пролетов, массе и жесткости пролетов на частоту собственных колебаний.

В данном случае фундаментальные исследования с двухпролетных балок четырнадцати типов, в том числе и на упругих опорах, перенесены на трехпролетную балку на жестких опорах. Как отмечено в указанных выше работах, нерегулярность по весовым и жесткостным параметрам оказывает влияние на изменение собственных частот неразрезных балок на жестких и упругих опорах значительно меньше, чем нерегулярность по длинам пролетов.

Данное исследование выполнено для квази-регулярной балки путем сравнения решений для собственных частот с аналогичной регулярной балкой. При этом задачей исследований устанавливались предельные границы линейных (l), жесткостных (EI) и массовых (μ) значений параметров, при которых вычисления частот можно производить по значительно более простым решениям для регулярной балки. Нерегулярность задавалась в диапазоне влияния на частоту до 10...15 %, которую можно считать при расчетах допустимой.

Для исследования записано уравнение для нерегулярной трехпролетной балки (рис.1) и использовано полученное ранее решение для многопролетной регулярной [3].

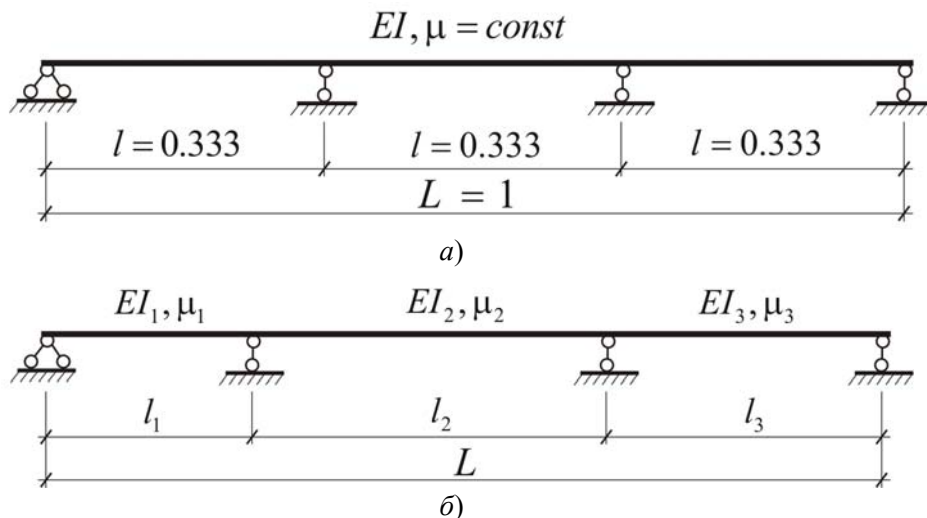


Рис. 1. Расчетная схема трехпролетной балки:
а – регулярная балка; б – нерегулярная балка

В связи с громоздкостью уравнения для нерегулярной балки была составлена программа для определения частотного параметра λ_i , который в данных исследованиях является основным. Данная программа позволяет исследовать изменение собственной частоты в зависимости от изменения любого из приведенных выше параметров в широком диапазоне и, таким образом, пригодна и для систем имеющих сильную нерегулярность.

В общем случае частота собственных колебаний балки определялась по известной формуле

$$\omega_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\mu}}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала балки, кПа; μ – погонная масса балки, кг·с²/м²; I – момент инерции сечения, см⁴; ω_i – частота свободных колебаний i -й формы колебаний, Гц; l – пролет балки, м; λ_i – частотный параметр определяемый по уравнению (2).

Уравнение трехпролетной нерегулярной балки на жестких опорах, записанное в функциях Прагера [4] с помощью метода подробно изложенного в [5], имеет вид (2) и позволяет задать любую степень нерегулярности по длинам пролетов, погонной массе и жесткости, определить частотный параметр λ_i по формуле (2), и определить частоту по формуле (1):

$$\frac{\rho_{31}}{\varepsilon_{31}^3} \frac{\rho_{21}}{\varepsilon_{21}^3} B_1 B_2 B_3 - \frac{\rho_{31}}{\varepsilon_{31}^3} S_1 S_3 D_2 + \frac{\rho_{21}^2}{\varepsilon_{21}^6} B_1 B_3 S_2 + \frac{\rho_{21}}{\varepsilon_{21}^3} S_1 B_2 B_3 = 0, \quad (2)$$

где $B_1, B_2, B_3, S_1, S_2, S_3, D_2$ – функции Прагера, имеющие вид:

$$B(\lambda) = ch\lambda \sin \lambda - sh\lambda \cos \lambda,$$

$$S(\lambda) = 2sh\lambda \sin \lambda; \quad D(\lambda) = ch\lambda \cos \lambda - 1;$$

$\rho_{21}, \rho_{31}, \varepsilon_{21}, \varepsilon_{31}$ – коэффициенты нерегулярности, которые для систем регулярных равны 1; коэффициенты нерегулярности соответственно по массе и по жесткости 1-го и 2-го пролетов будут иметь вид

$$\rho_{21} = 4\sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}}, \quad \varepsilon_{21} = 4\sqrt{\frac{E_1 I_1}{E_2 I_2}}.$$

Для рассматриваемого случая, когда отсутствует нерегулярность между крайними симметричными пролетами

$$\rho_{31} = 4\sqrt{\frac{\mu_3}{\mu_1}} = 1, \quad \varepsilon_{31} = 4\sqrt{\frac{E_1 I_1}{E_3 I_3}} = 1.$$

В общем случае процент погрешности при определении частот нерегулярной балки по уравнениям для регулярной определялся по формуле, %

$$\frac{\omega_{р.б.} - \omega_{нр.б.}}{\omega_{р.б.}} 100, \quad (3)$$

где $\omega_{нр.б.} = \omega_l, \omega_\mu, \omega_{EI}, \omega_{EI/\mu}$ – частоты нерегулярной балки, имеющие нерегулярность соответственно по $l, \mu, EI, EI/\mu$.

При анализе были рассмотрены решения для четырех случаев, которые могут иметь место, а именно:

- $\mu, EI - \text{const}, l$ – переменная;
- $l, EI - \text{const}, \mu$ – переменная;
- $l, \mu - \text{const}, EI$ – переменная;
- $l - \text{const}, EI/\mu$ – переменная.

Используя формулу (3), запишем для указанных четырех случаев выражения для определения погрешности, которая возникает в том случае, если для нерегулярной системы использовать решения для регулярной системы (балки), которые имеют соответственно приведенный ниже вид. Все вычисления частотных коэффициентов ведутся для первого пролета балки. В случае необходимости по известной формуле – равенства круговых частот балки (1).

Для первого случая выразим через коэффициент k_l величину нерегулярности пролета балки

$$l_{р.б.}^2 = l_l^2 k_l^2.$$

Исходя из этого коэффициент нерегулярности равен

$$k_l = \frac{l_{р.б.}}{l_l}.$$

Так как для регулярной по длине балки (равнопролетной) можно записать

$$l_{р.б.} = \bar{l}_{р.б.} L,$$

где $\bar{l}_{р.б.}$ – относительная длина пролета, L – полная длина балки, следовательно,

$$k_l = \frac{\bar{l}_{р.б.}}{l_l} = \frac{0,3333}{\bar{l}_l}.$$

Значения относительной величины первого \bar{l}_l пролета приведены в табл. 1 (столбец 2).

$$\frac{\omega_{p.б.} - \omega_l}{\omega_{p.б.}} = \frac{\frac{\lambda_{p.б.}^2}{l_{p.б.}^2} \sqrt{EI} - \frac{\lambda_l^2}{l_l^2} \sqrt{EI}}{\frac{\lambda_{p.б.}^2}{l_{p.б.}^2} \sqrt{EI}} = 1 - \frac{\lambda_l^2 k_l^2}{\lambda_{p.б.}^2}, \quad (4)$$

Для следующих трех случаев формула определения погрешности относительно регулярной балки запишется следующим образом:

$$\frac{\omega_{p.б.} - \omega_{нр.б.}}{\omega_{p.б.}} = \frac{\frac{\lambda_{p.б.}^2}{l_{p.б.}^2} \sqrt{EI_{p.б.}} - \frac{\lambda_{нр.б.}^2}{l_{нр.б.}^2} \sqrt{EI_{нр.б.}}}{\frac{\lambda_{p.б.}^2}{l_{p.б.}^2} \sqrt{EI_{p.б.}}} = 1 - \frac{\lambda_{нр.б.}^2}{\lambda_{p.б.}^2}. \quad (5)$$

Как было указано выше частотный коэффициент λ определяется для первого пролета, в то время как отличие балки от регулярной состоит в том, что масса и жесткость центрального пролета отличается от крайних. В первом пролете (крайнем) данные параметры идентичны. Таким образом, для определения погрешности нерегулярной системы, при рассмотрении ее как регулярной, достаточно сравнить частотные параметры (выражение справедливо также для случая не равных по всем характеристикам пролетов).

В табл. 1 приведены результаты расчета первых трех частот для случая, когда $\mu, EI - \text{const}, l - \text{переменная}$. Ввиду того, что жесткостные и весовые характеристики пролетов одинаковы, коэффициенты ε и ρ в данном случае соответственно равны 1.

Таблица 1

№ типа	$\frac{l_1}{L}$	$\frac{l_2}{L}$	λ_l^2	$\lambda_{p.б.}^2$	$\left(1 - \frac{\lambda_l^2 k_l^2}{\lambda_{p.б.}^2}\right) 100, \%$
1	0,26	0,48	4,420676	9,869604	26,38
			10,57068	12,648041	-37,37
			12,78321	18,468761	-13,77
2	0,27	0,46	5,056369	9,869604	21,91
			11,09914	12,648041	-33,75
			13,09019	18,468761	-8,03
3	0,29	0,42	6,534927	9,869604	12,52
			11,79418	12,648041	-23,20
			13,87351	18,468761	0,75
4	0,31	0,38	8,184167	9,869604	4,12
			12,24444	12,648041	-11,93
			15,22259	18,468761	4,70
5	0,32	0,36	8,972086	9,869604	1,36
			12,648041	12,648041	-6,61
			18,468761	18,468761	4,11
6	0,333	0,333	9,869604	9,869604	0,00
			12,648041	12,648041	0,00
			18,468761	18,468761	0,00
7	0,35	0,3	10,69364	9,869604	1,72
			12,90426	12,648041	7,46
			22,53078	18,468761	-10,65
8	0,37	0,26	11,36154	9,869604	6,57
			13,20077	12,648041	15,29
			29,53708	18,468761	-29,80
9	0,39	0,22	11,85581	9,869604	12,25
			13,49846	12,648041	22,04
			36,99853	18,468761	-46,34

Анализируя график (рис. 2), можно отметить границы диапазона нерегулярности по длинам пролетов, в пределах которого допустимо определять частоты колебаний нерегулярной балки по уравнениям для регулярной. Для рассмотренного случая эти границы по длине пролета определены для первых двух частот (которые обычно учитываются при рас-

четах) как -10 и $+8$ %. Погрешность по частоте при этом не будет превышать 10 %.

В табл. 2 приведены аналогичные данные расчета регулярной балки по длине пролетов, но которая имеет нерегулярность по жесткости крайних пролетов и центрального (жесткости крайних пролетов одинаковы, т. е. $EI_1 = EI_3$).

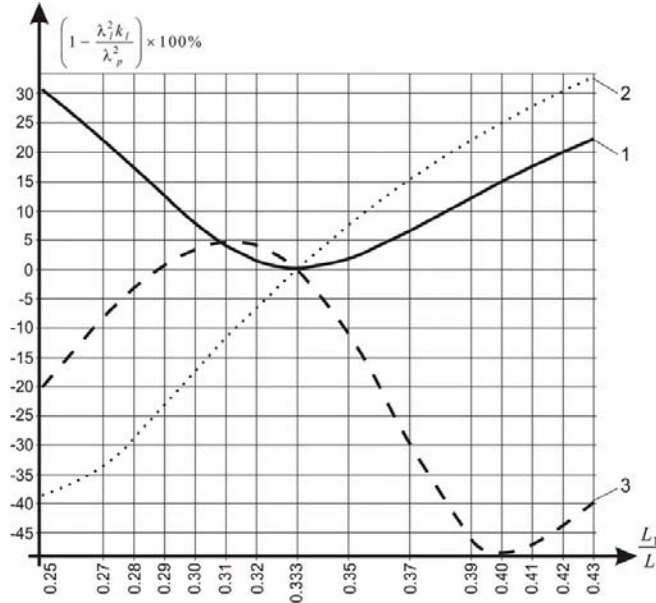


Рис. 2. График изменения частоты собственных колебаний в зависимости от соотношения пролетов:
1 – первая форма колебаний; 2 – вторая форма колебаний; 3 – третья форма колебаний

Таблица 2

№ типа	$\frac{EI_1}{EI_2} \& \frac{\mu_2}{\mu_1}$	$\lambda_{нр.б.,EI}^2$	$\lambda_{нр.б.,\mu}^2$	$\lambda_{р.б.}^2$	$\left(1 - \frac{\lambda_{нр.б.,EI}^2}{\lambda_{р.б.}^2}\right) 100, \%$	$\left(1 - \frac{\lambda_{нр.б.,\mu}^2}{\lambda_{р.б.}^2}\right) 100, \%$
1	0,25	12,5354	11,02285	9,8696	-27,01%	-11,69
		14,3541	12,7200	12,6480	-13,49%	-0,57
		25,3404	30,7185	18,4687	-37,21%	-66,33
2	0,50	11,1379	10,6675	9,8696	-12,85	-8,08
		13,6097	12,6967	12,6480	-7,60	-0,38
		21,4957	23,6970	18,4687	-16,39	-28,31
3	0,75	10,3657	10,2777	9,8696	-5,03	-4,13
		13,0639	12,6727	12,6480	-3,29	-0,20
		19,6847	20,3574	18,4687	-6,58	-10,23
4	1,00	9,8696	9,869604	9,8696	0,00	0,00
		12,6480	12,64804	12,6480	0,00	0,00
		18,4687	18,46876	18,4687	0,00	0,00
5	1,25	9,5155	9,4608	9,86960	3,59	4,14
		12,3209	12,6226	12,6480	2,59	0,20
		17,5404	17,2888	18,4687	5,03	6,39
6	1,50	9,2432	9,0656	9,8696	6,35	8,15
		12,0571	12,5965	12,6480	4,67	0,41
		17,7886	16,5030	18,4687	9,10	10,64
7	1,75	9,0221	8,6932	9,8696	8,59	11,92
		11,8399	12,5695	12,6480	6,39	0,62
		16,1596	15,9540	18,4687	12,50	13,62
8	2,00	8,8350	8,3477	9,8696	10,48	15,42
		11,6578	12,5418	12,6480	7,83	0,84
		15,6226	15,5550	18,4687	15,41	15,78

Анализируя график 3 и данные табл. 2, можно сделать вывод о том, что изменение жесткости и погонных масс пролетов значительно менее влияет на изменение частот, чем изменения длин пролетов. Та же погрешность по первым двум частотам (10 % в данном случае) достигается при нерегулярности по погонной массе пролетов +55...-55 %, а при нерегулярности по жесткости 55 и -30 %.

Указанный результат логичен по той причине, что в первом случае, при исследовании нерегулярности по длине, сама длина входит в формулу во второй степени, в то время как жесткость и масса стоят под знаком радикала.

Проведенное исследование дает нам основание обоснованно использовать простые решения, графики и приближенные формулы для определения собственных частот трехпролетной нерегулярной балки с минимальной погрешностью (рис. 3, 4).

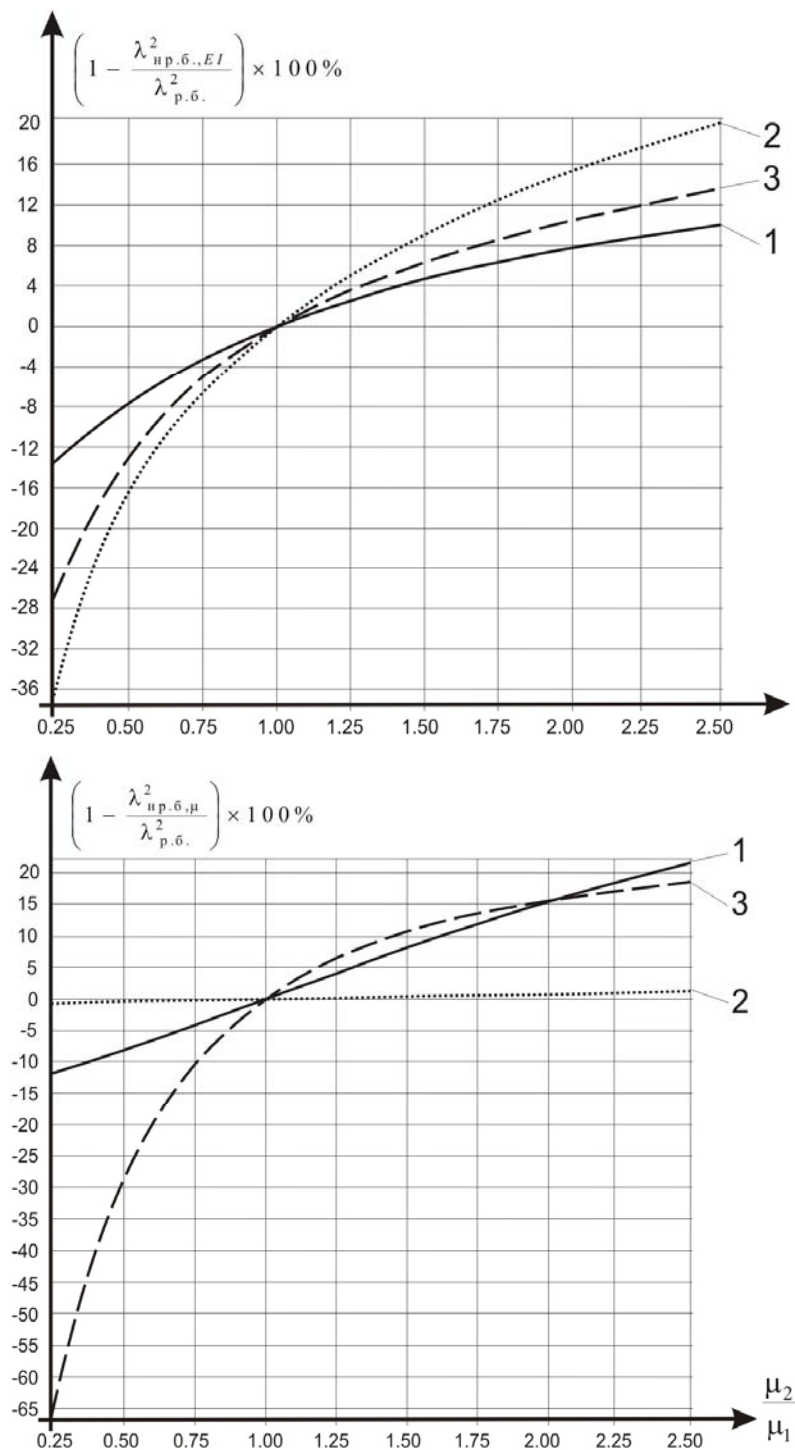


Рис. 3. График изменения частоты собственных колебаний в зависимости от соотношения жесткостей (слева) и погонных масс (справа) пролетов: 1 – первая форма колебаний; 2 – вторая форма колебаний; 3 – третья форма колебаний

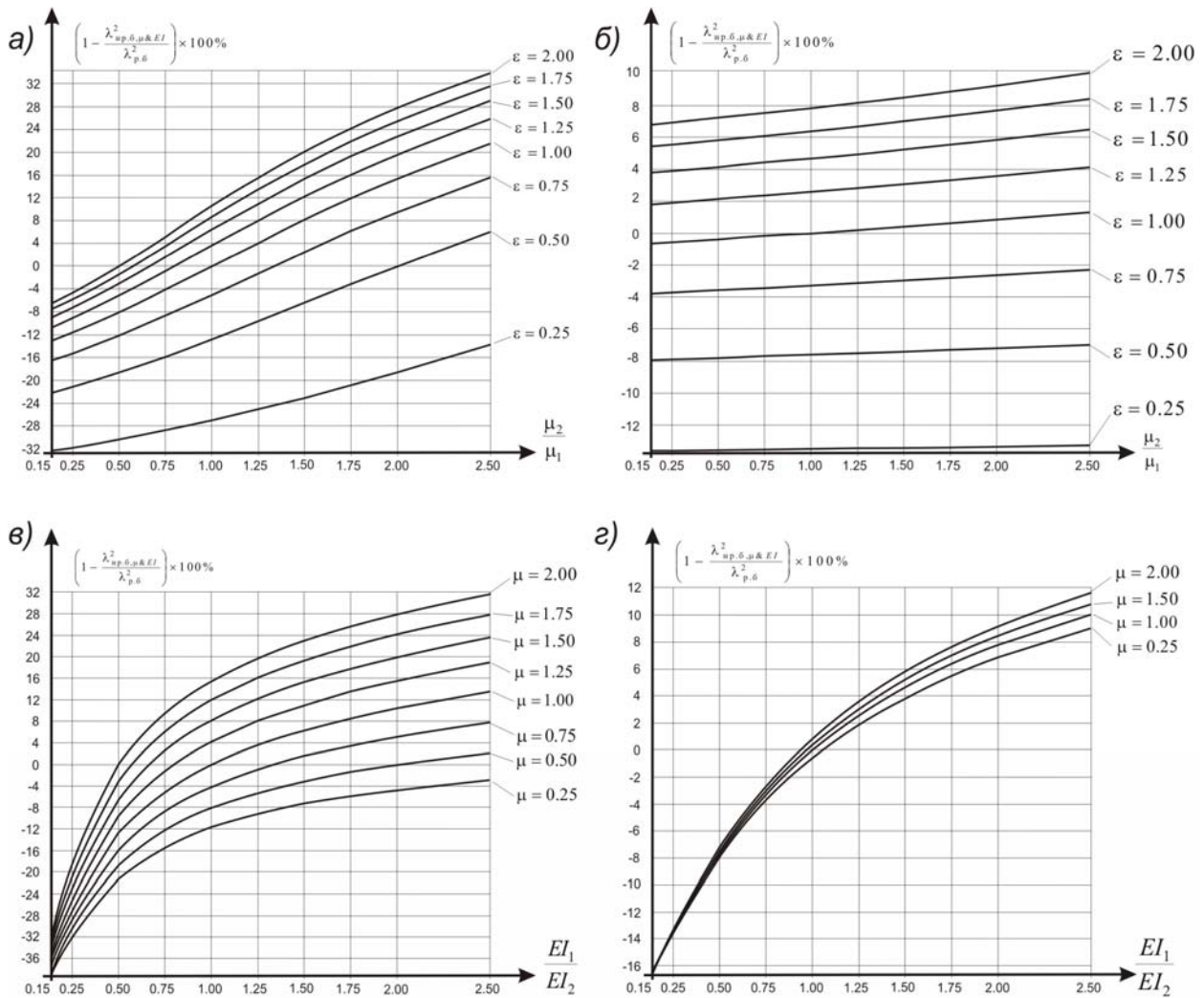


Рис. 4. График изменения частоты собственных колебаний в зависимости от соотношения жесткости и погонных масс пролетов:

- а) по первой форме от соотношения погонных масс; б) по второй форме от соотношения погонных масс; в) по первой форме от соотношения жесткости; з) по второй форме от соотношения жесткости

Соотношения длин пролетов реальных неразрезных металлических пролетных строений (ферм 110×132×110, 132×154×132 и др.) мостов находятся в пределах 0,20...0,32, что позволяет определять собственные колебания пролетных строений как для равнопролетной балки с допустимой для практических расчетов погрешностью. Апробация указанного подхода была проведена на многопролетной неразрезной конструкции, имеющей сильную нерегулярность, и по которой имеется эксперимент и выполнен расчет частот методом конечных элементов [6].

Ранее проведенные исследования [3] собственных частот многопролетных неразрезных балок (количество пролетов не ограничено) предлагают взамен сложного уравнения (2) пользоваться полученным простым решениями (6) для форм колебаний ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

$$\frac{sh\lambda_i (\cos \lambda_i - \cos \beta_i)}{\sin \lambda_i (ch\lambda_i - \cos \beta_i)} = 1, \quad \beta_i = \frac{\pi i}{n} \quad (6)$$

(для трехпролетной балки $\beta_i = \frac{\pi i}{3}$ $i = 1, 2, 3$) или графиком (рис. 5), построенным на основании решения уравнения (6), и наконец приближенными формулами, полученными на основании точного решения.

Для первых трех частот приближенные формулы [3] имеют вид

$$v_3 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{\mu l^4}} \left(1 + \frac{5}{6} \right) \quad (7)$$

$$v_2 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{\mu l^4}} \left[1 + \frac{5}{4} \left(1 - \frac{2}{3} \right) - \frac{\sin \frac{2\pi}{3}}{6,6} \right]$$

$$v_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{\mu l^4}} \left[1 + \frac{5}{4} \left(1 - \frac{3}{3} \right) - \frac{\sin \pi}{6,6} \right].$$

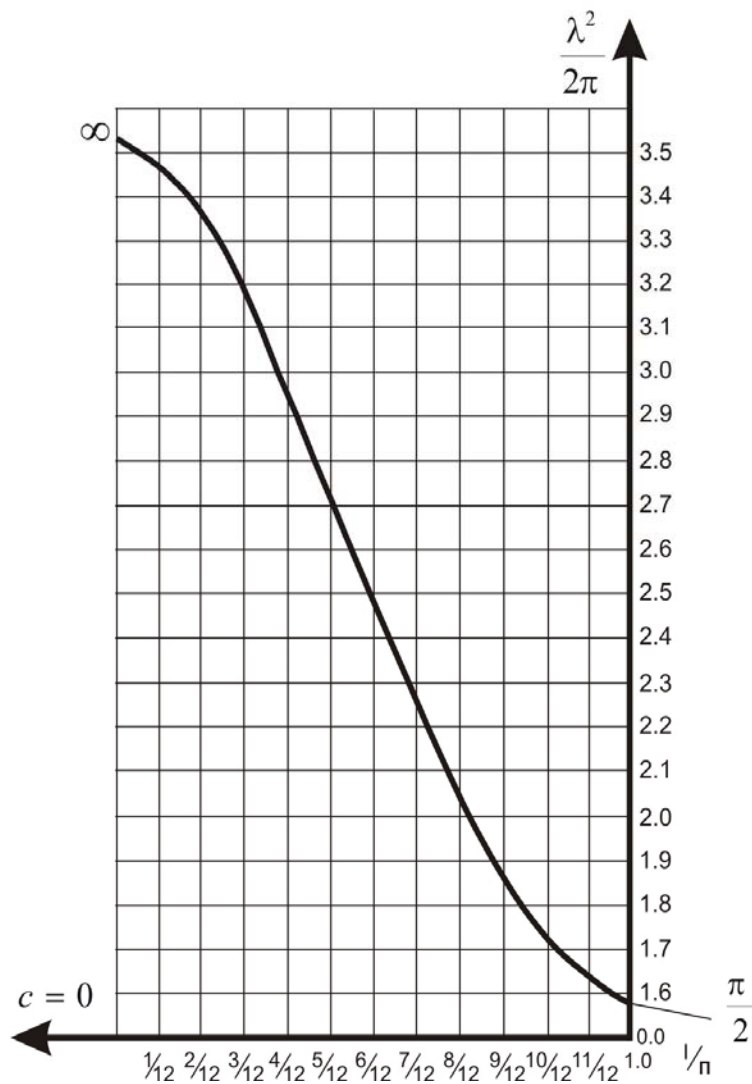


Рис. 5. График для определения частот собственных колебаний регулярной многопролетной балки на жестких опорах

Для определения частот многопролетной регулярной балки отрезок 0–1 разбивается на количество частей равное количеству пролетов балки n (в данном случае разбивка выполнена для двенадцатипролетной балки). Восстанавливая перпендикуляры до пересечения с кривой, получаем

n значений частотного параметра $\frac{\lambda_i^2}{2\pi}$.

Для определения точности предлагаемых формул и сравнения с приближенными методами вычисления частот, рассмотрим трех-

пролетную регулярную балку длиной 15 м. Поперечное сечение балки – 80 мм, момент инерции сечения $I = 201,062 \text{ см}^4$, модуль упругости для стали $20\,600 \text{ кН/см}^2$, погонная масса $0,3946 \text{ кН/м}$.

Результаты вычислений частот колебаний по трем формам приведены в табл. 4. В зависимости от способа определения частотного параметра: по формуле (2) и (6) – точный метод, выступает в роли эталонного, по графику – номограмме и по приближенным формулам (7).

Таблица 4

Варианты расчета Формы	По формуле (2)		По формуле (6)		График-номограмма		По формуле (7)	
	Частота, Гц	Погрешность, %	Частота, Гц	Погрешность, %	Частота, Гц	Погрешность, %	Частота, Гц	Погрешность, %
1	40,44632	0,00	40,44632	0,00	40,444863	+0,02	40,44632	0,00
2	51,83263	0,00	51,83263	0,00	52,269818	-0,83	51,99204	+0,31
3	75,68641	0,00	75,68641	0,00	75,442205	+0,32	74,15164	+0,32

Все рассмотренные методы обеспечивают достаточную точность вычислений. Следует отметить полное совпадение значений частот при вычислении по формулам (2) и (6). Формула (6) позволяет определить частоты колебаний балки не только для случая трехпролетной балки. В то же время при нерегулярности трехпролетной балки по длине пролетов, массе, жесткости больше указанных выше пределов целесообразней производить расчеты по формуле (2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуржий К. В. Исследование влияния незначительных нерегулярностей на изменение собственных частот неразрезных балок на жестких опорах / К. В. Гуржий, К. И. Солдатов // Вопросы статистической и динамической работы мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ, – Д., 1993, С. 63–74.
2. Гуржий К. В. Особенности динамики систем близких к регулярным применительно к двухпролетным неразрезным балкам с промежуточной упругой опорой // Вопросы динамики мос-

тов и теории колебаний: Межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ, – Д., 1994. – С. 70–83.

3. Солдатов К. И. Частные случаи задачи о собственных колебаниях регулярных упруго опертых балок, // Исследования статистики, динамики и грузоподъемности мостов: Межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ, – Д., 1971. – Вып. 127. – С. 72–79.
4. Ананьев И. В. Справочник по расчету собственных колебаний упругих систем. – М., 1946. – 224 с.
5. Эйхе Г. Н. Анализ структуры уравнения частот и форм колебаний прямолинейных цепных стержневых систем и свободные колебания радиально-вантовых мостов: Дисс. канд. техн. наук. – 183 с.
6. Солдатов К. И. Дослідження динаміки нерегулярних по довжинах прольотів мостових конструкцій / К. И. Солдатов, Г. С. Железняк, К. В. Гуржий. – Д., 2004. – С. 221–226.
7. Солдатов К. И. О жесткости опор реальных мостовых конструкций / К. И. Солдатов, Г. С. Железняк, К. В. Гуржий. – Д., 2004. С. 154–160.

Поступила в редколлегию 25.03.2005.

В. А. ИЩЕНКО, М. В. ШАПТАЛА (ДИИТ)

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Розроблена методика розрахунку тривимірного температурного поля методом скінченних елементів для визначення часу вулканізації еластомерних виробів, які мають складну поверхню нагріву. На прикладі великогабаритної шини показано, що з урахуванням тривимірного розподілу температур у порівнянні із методикою плоского перетину, яка зараз використовується в промисловості, час вулканізації можна зменшити на 6...8 %. Це дає суттєву економію теплової енергії в умовах масового виробництва.

Разработана методика расчета трехмерного температурного поля методом конечных элементов для определения времени вулканизации эластомерных изделий с геометрически сложными поверхностями нагрева. На примере крупногабаритной шины показано, что учет трехмерности распределения температур по сравнению с методикой плоского сечения, которая в настоящее время применяется в промышленности, позволяет на 6...8 % сократить время вулканизации, что приводит к существенной экономии тепловой энергии в условиях массового производства.

A procedure has been developed of calculating a 3-D temperature field with application of FEM for determination of vulcanization time of elastomer products with geometrically complex heating surfaces. On the example of heavy-duty tire it has been shown that the account of the 3-D nature of temperature distribution allows to reduce vulcanization time by 6–8 % in comparison with the plane section procedure, which is currently used in industry, which results in significant savings of thermal energy in conditions of commercial production.

Технологией изготовления эластомерных изделий предусмотрена вулканизация, в процессе которой сырая заготовка за счет выдержки при высокой температуре и давлении в пресс-формах приобретает нужную геометрию, а эластомерный материал необходимые свойства. Тепловой режим вулканизации индивидуален для каждого изделия. Неправильно выбранный тепловой режим либо приведет к перерасходу дорогостоящей тепловой энергии, либо не обеспечит изделию необходимое качество. Поэтому выбор рационального режима вулканизации резиновых и резинотехнических изделий, а особенно многослойных изделий сложной геометрической формы, например, пневматических шин, является актуальной задачей.

Для разработки рационального режима вулканизации эластомерного изделия необходимо знание его температурных полей с целью определения времени достижения необходимой степени вулканизации в так называемой холодной точке конструкции, т. е. в такой точке, температура в которой минимальна. Температурное поле шины определяется теплофизическими характеристиками материалов, которые являются функциями температуры, сложной геометрии поверхностей нагрева, внутренними источниками тепла, обусловленными тепловыделениями при химических реакциях вулканизации и переменными по времени температурами на наружной и внутренней поверхностях шины.

Вне зависимости от типа вулканизационно-оборудования покрышки нагреваются в ме-

таллических прессформах, обогреваемых паром; внутренний нагрев и прессование осуществляется путем закладки внутрь покрышек резиновых варочных камер или диафрагм. Вид и параметры теплоносителей со стороны формы и диафрагмы неодинаковы (рис. 1).

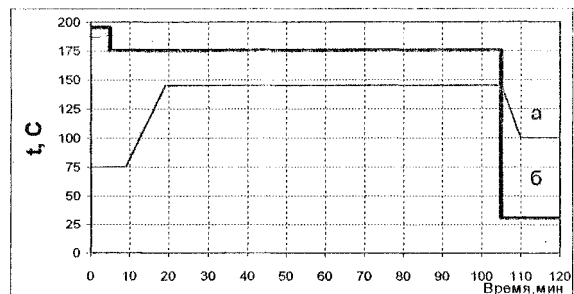


Рис. 1. График изменения граничных условий

Тепловая задача такого рода не может быть решена аналитическими методами. Последние целесообразно использовать только для предварительных ориентировочных оценок. Так, вместо сложного составного тела в первом приближении может рассматриваться однородная неограниченная пластина, для которой имеется решение – распределение по толщине и изменение во времени температуры [1].

В настоящее время для построения режимов вулканизации пневматических шин используется либо метод приведенной пластины [2], при котором рассчитывается одномерное температурное поле, либо метод плоского сечения [3], форма которого учитывает особенности протектора шины, для которого рассчитывается

двумерное температурное поле. В первом случае необходимо задать такую толщину пластины, которая бы учитывала насыщенность рисунка протектора и ряд других факторов. Во втором случае в шине выбирается наиболее труднопрогретаемое сечение, выбор которого основан на опыте и интуиции исследователя.

При проведении подобного рода расчетов пренебрегают кривизной профиля покрышки, непараллельностью слоев, разными начальными температурами формы, покрышки и камеры, зависимостью теплофизических характеристик от температуры, с заменой трехмерных (в рисунке протектора) тепловых потоков, выделение теплоты реакции вулканизации.

С целью учета всех особенностей конструкции шины, теплофизических характеристик материалов и внутренних источников тепла разработана методика расчета трехмерного температурного поля с применением метода конечных элементов.

Уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах для расчета температурных полей в трехмерном виде с внутренними источниками тепла, обусловленными тепловыделениями при протекании химической реакции вулканизации:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_p \rho},$$

где коэффициент температуропроводности

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho};$$

λ, c_p, ρ – теплопроводность, теплоемкость и плотность соответственно; q_v – внутренние источники тепла; оператор Лапласа (для цилиндрической системы координат)

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

В начальный момент времени температура изделия во всех слоях одинакова и соответствует заданной

$$T_0 = T_{\text{зад}}.$$

В расчете принималось равенство температур

поверхности пресс-формы и диафрагмы соответствующим температурам теплоносителей. Температура на внутренней и наружной поверхностях изделия является функцией времени т. е. заданы граничные условия 1-го рода (см. рис. 1).

Геометрическая модель крупногабаритной шины с конечно-элементной сеткой представлена на рис. 2 с отображением всех особенностей рисунка протектора и конструкции в целом, а также с указанием типов материалов. Ввиду симметричности приведен один шаг шины.

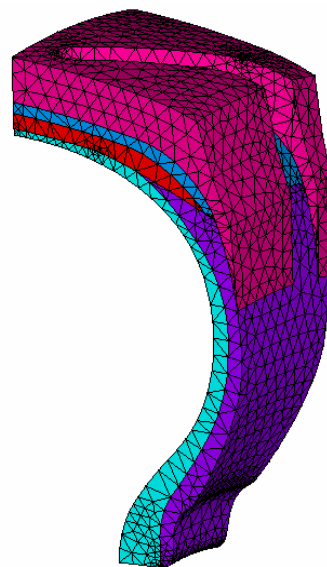


Рис. 2. Расчетная модель

Теплофизические характеристики материалов являются функциями температуры.

Величина внутренних источников тепла определяется тепловым эффектом реакции вулканизации, который зависит от химического состава резин.

Сравнительные расчеты температурных полей различных вариантов выполнены с использованием конечно-элементного пакета MSC Marc. Первый вариант расчета соответствовал методу приведенной пластины, толщина которой выбиралась в соответствии с [1]. Во втором варианте рассчитывалось плоское сечение [2], которое соответствовало угловой зоне, где толщина покрышки максимальна. Третий вариант соответствовал реальной конструкции (см. рис. 2). Основные результаты расчета представлены в таблице.

Таблица

Сравнительная таблица времени вулканизации

Параметри	Одномерная задача	Двумерная задача	Трехмерная задача	
			Без вн. источников	С вн. источниками
Время достижения 90 % величины модуля сдвига, в %, относительно одномерной задачи	100	91,4	88	85,2
Экономия тепла по сравнению с одномерным расчетом, %		8,6	12	14,8

Таким образом, для крупногабаритной шины с относительно простым рисунком протектора учет трехмерности конструкции и внутренних источников тепла позволяет на 6,2 % сократить время вулканизации, однако, это преимущество не следует распространять на другие типы шин, ввиду существенного влияния вида рисунка протектора, граничных условий и других исходных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.

2. Аранович Ф. Д. Расчет продолжительности вулканизации покрышек сельскохозяйственных и крупногабаритных автомобильных шин методом приведенной пластины, / Ф. Д. Аранович, В. А. Ищенко, Л. Б. Никитина, М. И. Свердел // Каучук и резина. 1976 – № 6. – С. 28–32.
3. Свердел М. И. Программное обеспечение проектирование режимов и некоторые аспекты повышения эффективности процесса вулканизации покрышек пневматических шин /М. И. Свердел, А. В. Зимин, Е. А. Дзюра и др. // Вопросы химии и химических технологий. 2002. – № 4.

Поступила в редколлегию 15.03.2005.

ВЛИЯНИЕ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ

Розглянуто питання впливу агресивних середовищ на корозійну стійкість та довговічність колекторів із залізобетонних труб. Як основний спосіб захисту від внутрішньої корозії запропоновано виконувати обов'язковий аналіз заповнювачів на дію агресивних кислот і лугів.

Рассмотрены вопросы влияния агрессивных сред на коррозионную стойкость и долговечность коллекторов из железобетонных труб. В качестве основного способа защиты от внутренней коррозии предлагается выполнять обязательный анализ заполнителей на действие агрессивных кислот и щелочей.

The article considers the issues of aggressive media influence upon corrosion-resistance and service lifespan of the collectors made up from reinforced concrete pipes. As the basic method of protection from internal corrosion it is suggested making obligatory tests of fillers on the effect of aggressive acids and alkalis.

В настоящее время в нашей стране сооружены тысячи километров напорных самотечных коллекторов из железобетонных труб. Коллекторы сточных вод являются ответственными сооружениями, от надежности работы которых зависит бесперебойная работа промышленных предприятий и объектов жилищного и коммунального хозяйства. Они входят в комплекс промышленного и гражданского строительства, без которого не может существовать ни один населенный пункт и ни одно промышленное предприятие. Кроме того отвод отходов с помощью коллекторов устраняет попадание их в окружающую среду и является важным мероприятием по ее защите. Анализ причин аварий показывает, что примерно в 75 % случаев повреждения обусловлены коррозионными процессами, происходящими в железобетонных трубах.

Аварии, вызванные коррозией трубопроводов, наиболее значительные не только по частоте их проявления, но и по масштабам производимых разрушений.

Причиной возникновения аварий является либо недооценка агрессивности грунтов, либо возникновение коррозии в результате хозяйственной деятельности. В большинстве случаев разрушение происходит изнутри труб при отводе вод хозяйственной деятельности предприятий, в технологических процессах которых содержатся органические вещества. Например, сточные воды предприятий пищевой промышленности имеют составы, которые считаются слабоагрессивными по кислотности и водородному показателю для бетона нормальной проницаемости.

Как известно, наиболее часто разрушение бетона происходит в верхней сводовой части трубы, которая подвергается действию насыщенной

влажностью среды. Из газов, выделяющихся из сточных вод, наибольшей агрессивностью обладает сероводород, который образуется в результате жизнедеятельности микроорганизмов, находящихся в коллекторе [1]. Биомасса микроорганизмов, не только продуцирует сероводород, но и является источником поступления сульфидов и полисульфидов, причем они окисляются до элементарной серы с последующим биоокислением и с образованием серной кислоты – главного разрушителя бетона. В разрушении бетона участвует не только сероводород, а и кислоты, выделяемые микроорганизмами. Для предприятий легкой и пищевой промышленности более опасными коррозионными агентами являются бактерии азотного цикла.

Способы придания длительной стойкости бетонным и железобетонным трубам должны учитывать возможность биологической коррозии, обусловленной, в частности, развитием тионовых бактерий, способных окислять сероводород. Для увеличения надежности и долговечности труб необходимо применять кислотоустойчивые бетоны или биоцидные бетоны со специальными добавками.

В производственных сточных водах отраслей легкой промышленности содержатся разнообразные органические вещества. Прямое определение концентрации этих веществ нередко оказывается сложным. Наиболее распространенным методом является определение количества кислорода, которое требуется для биохимического или химического окисления содержащихся в стоках органических веществ. По величине биологической потребности в кислороде (БПК) или по химической потребности (ХПК) судят о количестве органических веществ, участвующих в окислительных процессах.

Известно, что большинство органических веществ может служить пищей для различных микроорганизмов. В результате их жизнедеятельности органическое вещество минерализуется с образованием CO_2 и C ; H_2O и H ; NO_3 и N ; SO_4^{2-} и S ; PO_4 и P , влияющих на скорости коррозионных процессов[2].

Распад органических веществ под воздействием микроорганизмов протекает в две фазы. В первой фазе проходит окисление углерода и водорода до углекислоты и воды, во второй – окисление азота до нитритов и затем до нитратов.

Молекула вещества, в том числе и органического, как известно, является нейтральной, однако, положительные и отрицательные заряды в ней могут быть размещены пространственно неравномерно. Если центры тяжести положительных и отрицательных зарядов пространственно не совпадают, то вокруг молекулы возникает электрическое поле. При совпадении центров тяжести зарядов электросилое поле не образуется и атомы молекулы в этом случае находятся в неполярной связи.

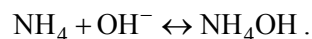
Вместе с тем, величина электросилового поля полярных молекул характеризуется динамическим моментом, представляющим собой произведение элементарного электрического заряда на расстояние между положительным и отрицательным зарядами. Примером неполярной (ионной) связи являются различные соли, примером полярной связи – вода.

Большинство растворенных в воде веществ находятся в виде ионов, связанных между собой силами электростатического взаимодействия. Каждый из них находится под воздействием воды. Причем это воздействие тем больше, чем больше концентрация ионов в растворе и чем больше их заряд.

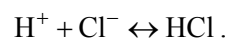
Весьма распространенными загрязнителями сточных вод являются различные соли (например, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$; Na_2S ; KCN) [1]. Все соли диссоциируют практически полностью. Однако один или оба компонента, образующие соль, являются слабыми электролитами. Электрическая диссоциация сопровождается процессами гидролиза. Гидролиз протекает не только с водными растворами солей, но и с растворами различных неорганических и органических веществ. Причем он характеризуется тем, что сложная молекула распадается с одновременным присоединением к образующимся остаткам элемента воды (H^+ или OH^-). Например, при гидролизе хлористого аммония, диссоциирующего по уравнению



Наряду с ионами NH_4^+ и Cl^- , в растворе находятся также ионы H^+ и OH^- , образующиеся вследствие диссоциации воды. При взаимодействии гидроксильных ионов с ионами NH_4^+ образуются молекулы слабо диссоциируемого основания по уравнению:



При этом концентрация OH^- в растворе понижается и образуется избыток ионов H^+ . При их взаимодействии с ионами Cl^- в растворе образуется соляная кислота.

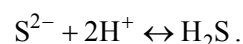


В результате нейтральный в начале раствор становится кислым.

Аналогичный процесс происходит при растворении соли, образованной сильным основанием и слабой кислотой, например, сульфата натрия. Эта соль диссоциирует по уравнению



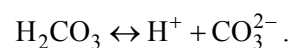
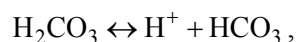
Ионы S^{2-} , взаимодействуя с ионами водорода, образуют слабо диссоциируемую молекулу H_2S :



Из раствора удаляются ионы водорода, вследствие чего образуется избыток ионов гидроксида, и ранее нейтральный раствор становится щелочным.

В результате гидролиза в растворе образуются свободные кислоты или основания, которые, взаимодействуя с цементным камнем и заполнителями, разрушают бетонные и железобетонные конструкции коллектора.

Как известно, угольная кислота может находиться в воде в виде газа CO_2 и недиссоциированных молекул H_2CO_3 или $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, и может быть полусвязанной в виде бикарбонатных ионов HCO_3^- и связанной в виде карбонатных ионов CO_3^{2-} . При этом она может диссоциировать в две ступени:

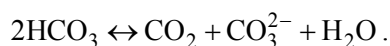


В водных растворах углекислых соединений устанавливается следующее равновесие:



То количество свободной кислоты CO_2 , которое поддерживает концентрацию HCO_3^- в растворе, является равновесной углекислотой. Эта кислота не может растворять карбонаты CO_3^{2-} , содержащиеся в воде в виде взвеси или осадка, а при отсутствии их – карбонаты, содержащиеся в строительном материале канализационных сооружений.

Если из воды удалить углекислоту, то равновесие сдвигается влево, при этом часть ионов HCO_3^- распадается с выделением из них некоторого количества свободной кислоты CO_2 и растворимых карбонатов CO_3^{2-} по уравнению



С увеличением концентрации свободной углекислоты равновесие сдвигается вправо, при этом некоторое количество нерастворимых карбонатов CO_3^{2-} , прореагировав с CO_2 , образуют растворимые бикарбонаты HCO_3^- . Избыток свободной углекислоты над равновесной концентрацией делает ее агрессивной: она может растворять карбонаты и способна разрушать железобетонные коллекторы и канализационные сооружения.

В последние годы наиболее четко рассматриваются вопросы внутренней коррозии бетона. Во многих конструкциях через несколько лет после изготовления и эксплуатации появляются трещины и студнеобразные белые высолы [1]. Химический анализ показывает присутствие в них большого количества диоксида кремния и щелочных металлов натрия и калия.

Такие коррозионные процессы происходят внутри бетона с обязательным присутствием влаги. Процесс разрушения происходит в результате взаимодействия цементного камня и заполнителей. Наиболее распространена коррозия при взаимодействии кремнезема и некоторых горных пород, являющихся заполнителями в бетонах, со щелочами. К минералам, обладающим реакцион-

ной способностью к щелочам, относятся опал, халцедон, микрокристаллический кварц.

Из магматических пород известны гранодиориты с вкраплением кварца, выветрелые полевые шпаты, реолиты, дациты, андезиты, силикатные или базальтовые стекла, а также тридилит, кристобалит, обсидиан, вулканические туфы, ретаниты, гнем, слюды и другие кварцсодержащие минералы с деформированной решеткой микрокварца.

К потенциальным реагирующим заполнителям из осадочных пород относятся известняки, доломиты и другие, содержащие халцедон.

В качестве основного способа защиты от внутренней коррозии предлагается исключить применение цемента с повышенным содержанием щелочей более 0,6 % в расчете на Na_2O или 3 кг/м³ бетона.

Исследование механизма коррозионного процесса показало, что это явление можно лишь схематически представить как образование на поверхности потенциально реагентоспособного заполнителя при взаимодействии щелочи с аморфным кремнеземом геля гидросиликата натрия, переходящего в гель гидросиликата кальция и способного увеличиваться в объеме во влажных условиях. При этом развивается внутреннее давление и возникает растягивающее напряжение, приводящие к нарушению монолитности бетона – его растрескиванию. Интенсивность внутренней коррозии зависит от вида кремнезема и его способности вступать в реакцию со щелочью.

Для выявления потенциальной опасности коррозионного процесса и возможности использования данного заполнителя должны проводиться систематические исследования по определению свойств заполнителей из различных горных пород, что позволит исключить непредвиденные повреждения железобетонных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кульский Л. А. Химия и технологии воды. – К.: Наук. дум., 1991.
2. Яковлев С. В. Канализация / С. В. Яковлев, Я. Н. Карелин, А. И. Жуков и др. – М.: Стройиздат. 1975. – 632 с.

Поступила в редколлегию 22.03.2005.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОВРЕМЕННЫХ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРОВ В НИЗКОПРОЧНЫХ БЕТОНАХ

Розглянуті проблеми використання суперпластифікаторів у бетонах міцністю до 20 МПа, вирішення яких забезпечує значний економічний ефект.

Изложены проблемы использования суперпластификаторов в бетонах прочностью менее 20 МПа, решение которых обеспечивает значительный экономический эффект.

The article deals with the issue of using super-plasticizers in concrete grades with strength less than 20 MPa, which provides substantial economic effect.

Современные нормы и рекомендации не разрешают применять суперпластификаторы в бетонах прочностью менее 20 МПа [1; 2]. Это связано с тем, что практически при любых количествах вводимого суперпластификатора, даже последнего поколения, не удается существенно улучшить удобоукладываемость таких бетонных смесей, устранить водоотделение.

В результате бетонные смеси с расходами цемента менее 250 кг на кубометр бетона практически невозможно транспортировать бетононасосами, их сложно уплотнять, особенно в монолитных конструкциях. Зная эти особенности бетонных смесей, конструкторы практически не используют их в тех конструкциях, где прочности 5...15 МПа вполне достаточно для обеспечения необходимой прочности и долговечности.

Это приводит к значительным необоснованным перерасходам цемента, бетонные смеси с расходом цемента менее 250 кг на кубометр практически не используются в строительстве. А применение так называемых тощих бетонных

смесей весьма ограничено из-за невозможности их транспортировки современными бетононасосами и надежного виброуплотнения.

Установленные нами закономерности по необходимости обеспечения рационального зернового состава компонентов бетонной смеси для повышения эффективности использования цемента в бетонах [3; 4] позволили также выявить и важную закономерность по применению суперпластификаторов для бетонов с расходами цемента менее 250 кг на кубометр.

В качестве примера в табл. 1 представлены результаты испытаний контрольных образцов бетона в 28-суточном возрасте нормального твердения с различными расходами цемента. В качестве наполнителя использованы хвосты обогащения железных руд, 90 % зерен которых соизмеримы с размером зерен цемента. Применялся также шлакопортландцемент криворожского завода активностью 40 МПа, гранитный щебень максимальной крупностью 20 мм и днепропетровский песок с модулем крупности 1,45.

Таблица 1

Составы и результаты испытания контрольных образцов

№ состава	Расход материалов на м ³ , кг					Уд-укл. ОК, см	Плотность, кг/м ³		Прочн. R _б , МПа	10R _б /Ц
	Ц	Н	Щ	П	В		свежеотформов.	затв.		
1	125	375	1200	570	170	5	2447	2375	19,8	1,58
2	250	250	1200	570	170	8	2497	2419	37,2	1,49
3	125	125	1200	820	160	1	2375	2325	12,9	1,03
4	125	—	1200	900	170	1	2387	2319	9,8	0,78
5	250	—	1200	820	170	2	2435	2379	29,8	1,19
6	120	360	1200	520	200	8	2339	2275	15,3	1,27
7	100	380	1200	520	200	7	2352	2271	13,8	1,38
8	75	400	1200	520	200	7	2347	2257	9,3	1,24

Для улучшения удобоукладываемости использован суперпластификатор «FLVICEM» итальянской фирмы «COLMEF», рекомендуемый расход которого составляет 0,5...1,5 % от массы цемента. Применяемые составы и результаты испытаний контрольных образцов представлены в табл. 1.

Анализ результатов этого эксперимента, а также визуальные наблюдения позволяют определить следующие закономерности. Эффективность используемого в этом эксперименте суперпластификатора «FLVICEM», расход которого составлял 1,5 % от массы цемента, значительно выше применяемых нами в других экспериментах суперпластификаторов СЗ и ПФС. Однако в составах без наполнителя, даже при использовании такого эффективного суперпластификатора, получить хорошую удобоукладываемость смеси не удалось. Наблюдалось значительное водоотделение в этих составах (№ 4, 5, см. табл. 1), но удобоукладываемость оставалась в пределах 1–2 см.

Аналогичная закономерность наблюдалась и по составу № 3, расход наполнителя в котором 125 кг. Хорошо уплотнить образцы из этих составов не удавалось.

Эти составы с низким расходом цемента и суперпластификатором «FLVICEM» имели значительно лучшую удобоукладываемость и связность, чем с СЗ и ПФС. Прочность бетона, полученного из этих составов, существенно выше, чем из составов с таким же расходом цемента и примерно такой же удобоукладываемости, но без суперпластификатора, а также и с суперпластификатором ПФС и значительно более жестких смесей (см. состав № 1, табл. 2). Но коэффициент эффективности использования цемента в этих составах оставался значительно ниже, чем в составах с таким же расходом цемента и рациональным зерновым составом компонентов, который обеспечивался введением необходимого количества наполнителя (см. состав № 1, табл. 1).

Таблица 2

Составы и результаты испытания контрольных образцов бетона с варьированием наполнителя из хвостов обогащения железных руд, добавка ПФС

№ состава	Расход материалов на м ³ , кг						Удобо-уклад.	Плотность, кг/м ³		Прочн. R _г МПа	10R _г /Ц
	Ц	Н	Щ	П	В	ПФС, %		свежеотформ.	затвердевш.		
1	125	–	1250	875	150	0,5	100с	2238	2177	5,92	0,47
2	250	–	1250	750	130	0,5	85с	2325	2310	25,8	1,03
3	375	–	1250	625	115	0,5	88с	2350	2328	47,1	1,26
4	500	–	1250	500	130	0,5	110с	2407	2385	61,5	1,23
5	125	125	1250	750	130	0,5	60с	2325	2288	18,8	1,5
6	125	375	1250	500	120	0,5	70с	2377	2359	20,5	1,64
7	250	125	1250	625	115	0,5	70с	2353	2345	41,0	1,64
8	250	250	1250	500	120	0,5	92с	2372	2365	43,2	1,73
9	375	125	1250	500	130	0,5	85с	2387	2369	53,5	1,43

Особый интерес представляют результаты испытаний образцов составов № 6–8 (см. табл. 1). Даже при значительном расходе воды в бетонных смесях с суперпластификатором «FLVICEM» не наблюдалось водоотделение, эти смеси отличались хорошей удобоукладываемостью, отформованные из них образцы имели гладкую хорошую поверхность. Получить такого качества бетонную смесь при таких низких расходах цемента без введения рационального количества наполнителя невозможно, в том числе и при использовании эффективных суперпластификаторов. Реализация рациональных зерновых составов компонентов бетонных смесей в сочетании с современным эффективным суперпластификатором дает возможность при пониженных расходах цемента получить

высокого качества бетонную смесь и затвердевший из нее низкопрочный бетон с высоким коэффициентом эффективности использования цемента.

Чтобы убедиться в правильности и достоверности полученных результатов исследований, нами проведены дополнительные эксперименты с применением метода математического планирования эксперимента. Применены те же материалы, но в качестве суперпластификатора использовали ПФС. Расход цемента оставался постоянным равным 125 кг на кубометр. Применен трехуровневый трехфакторный эксперимент, принятые значения переменных представлены в табл. 3. При изменении расхода наполнителя из хвостов обогащения железных руд соответственно изменяли расход песка.

Таблица 3

**Кодовые и натуральные значения переменных
планированного эксперимента**

Код	Натуральные значения, расход на кубометр бетона		
	наполнитель X_1 , кг	ПФС X_2 , % от Ц	вода X_3 , л
-1	50	0,5	125
0	300	1,0	140
+1	550	1,5	155

На рис. 1 изображены номограммы плотности, скорости ультразвука и прочности бетона от расхода наполнителя и пластификатора при постоянном содержании воды: *a* – 125, *б* – 140 л/м³ бетона. Анализом представленных на рис. 1 номограмм определены следующие закономерности. Как при расходе воды 125, так и 140 литров на кубометр наибольшие плотность, скорость ультразвука и прочность бетона определены при расходе наполнителя 300...400 кг/м³ и расходе пластификатора 0,7...1,2 % от массы цемента. Но эти характеристики несколько лучше при расходе воды 140 л/м³ бетона.

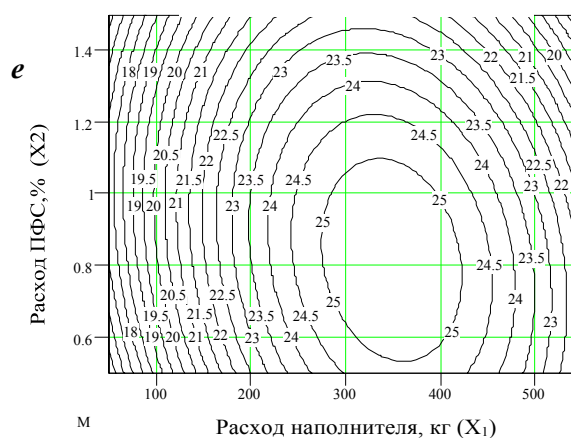
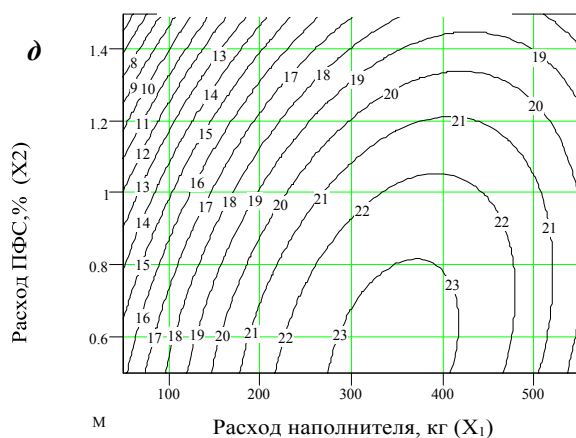
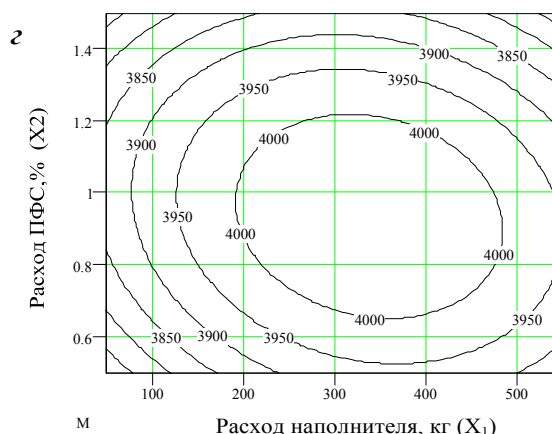
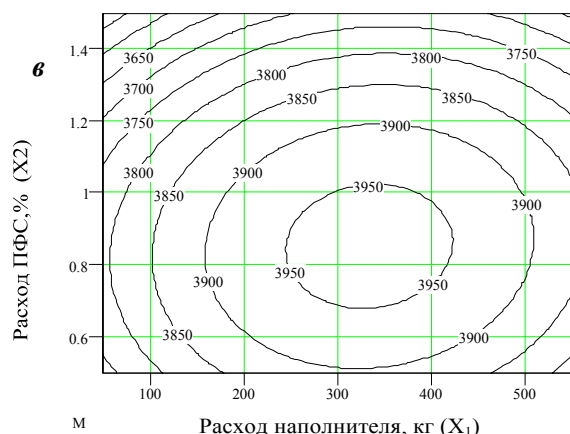
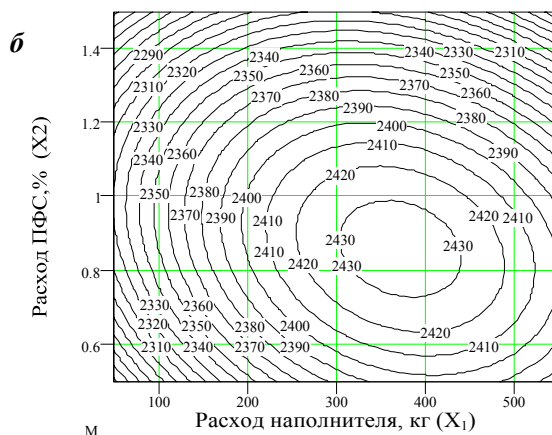
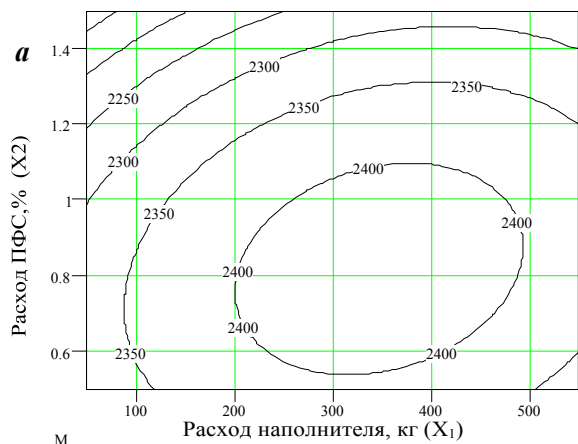


Рис. 1. Зависимости плотности (*a*, *б*), скорости ультразвука (*в*, *г*), прочности (*д*, *е*) от расхода хвостов обогащения железных руд и пластификатора ПФС при постоянном расходе воды: *a*, *в*, *д* – 125 л; *б*, *г*, *е* – 140 л/м³

Интенсивность уменьшения плотности, скорости ультразвука, прочности по мере уменьшения расхода наполнителя 200...50 кг/м³ и увеличения расхода пластификатора 1,2...1,5 % от массы цемента примерно одинакова. Так, наибольшая прочность составляет 25 МПа, а по мере уменьшения расхода наполнителя в исследуемом диапазоне она снижается до 18 МПа при постоянном расходе пластификатора. А при уменьшении содержания последнего до 0,5 % или увеличении до 1,5 % прочность бетона снижается еще больше и составляет 16 МПа. По мере увеличения содержания наполнителя до предельного (550 кг) прочность бетона также снижается, но менее существенно, чем при его уменьшении до 50 кг/м³ бетона. От расхода пластификатора в исследуемых пределах прочность зависит значительно менее существенно, чем от содержания наполнителя.

Закономерность изменения прочности при постоянном содержании воды 125 л на кубометр примерно такая же, как детально рассмотренная выше при содержании воды 140 л. Но прочность бетона во всем диапазоне изменения расхода наполнителя и пластификатора существенно ниже. Наименьшая прочность определена при содержании воды 125 л, наполнителя 50 кг/м³ бетона, а пластификатора 1,5 % от массы цемента.

Визуальными наблюдениями установлено, что бетонная смесь имеет наилучшие технологические характеристики при расходе наполнителя 300...400 кг/м³ и расходе пластификатора 0,7...1,2 % от массы цемента. Ни один из этих компонентов в отдельности не может обеспечить такие же хорошие удобоукладываемость и нерасслаиваемость бетонной смеси, отсутствие водоотделения, хорошее и быстрое запол-

нение формы. Образцы из такой смеси имеют хорошую гладкую поверхность.

Выводы

1. Эффективно использовать современные суперпластификаторы в низкопрочных бетонах с расходами цемента менее 200 кг на кубометр можно только при обеспечении рационального зернового состава компонентов бетонной смеси, в частности, введением в составы около 300 кг вторичных мелкозернистых продуктов промышленности.

2. Требуются дальнейшие исследования по обеспечению надежного перемешивания смесей с низкими расходами цемента, а также изучению долговечности таких бетонов и защите в них арматуры от коррозии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. – М.: Наука, 1998. – 768 с.
2. Никифоров А. П. Добавки для бетона. Состояние и перспективы // Будівельні конструкції. Сучасні проблеми бетону та його технологій. – К.: НДБК. – 2002. – С. 186–190.
3. Нетеса Н. И. Проблемы экономии цемента в бетонах введением рационального количества микронаполнителей // Строительство, материаловедение, машиностроение // Сб. науч. трудов. – Д.: ПГАСА, 2001. – Вып. 12. – С. 301–305.
4. Нетеса Н. И. Влияние зернового состава компонентов на структуру, прочность и морозостойкость бетонов // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Д.: ПДАБА. – 2002. – Вып. 16. – С. 100–107.

Поступила в редколлегию 24.03.2005.

А. П. НИКИФОРОВ, Н. А. МАТЕНЧУК (ДИИТ),
О. А. ПУШКАРЕНКО, Д. О. ГОРИДЬКО (ПГАСиА)

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С КОМПЛЕКСНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ

Викладені результати досліджень реологічних властивостей цементних композицій з комплексними модифікаторами. Запропонована методика визначення оптимальних дозувань хімічних домішок.

Изложены результаты исследований реологических свойств цементных композиций с комплексными модификаторами. Предложена методика определения оптимальных дозировок химических добавок.

The work describes the results of study of the rheological properties of cement compositions with complex modifiers, and offers a method of determining the optimal dosage of the chemical additives.

В настоящее время получение бетонов с высокими эксплуатационными свойствами связано с получением бетонов оптимальной структуры.

Оптимальная структура подразумевает равномерное распределение заполнителя по объему, наличие непрерывной прослойки в виде пространственной сетки вяжущего вещества, базовое отношение в котором В/Ц должно иметь минимально возможную величину. Необходимым требованием также является плотная упаковка составляющих бетона, компактное размещение их в микро- и макроструктуре.

Проблема оптимизации состава бетона с комплексными модификаторами осложняется необходимостью учета двух параметров [1]:

- изменения удобоукладываемости бетонной смеси;
- изменения прочности бетонов.

Бетоны относятся к конгломератным материалам, где реологические и физико-механические свойства определяются структурой дисперсного компонента, т. е. цементного теста и цементного камня.

Комплексные модификаторы вызывают изменения технологических свойств цементного теста.

Установлено, что при низкой концентрации пластификатора в водном растворе вяжущего вещества вязкость цементного теста может не изменяться. Некоторые пластификаторы лишь слабо снижают вязкость цементного теста, которую можно считать неизменной до некоторой критической величины добавки D_{\min} . В случае, если количество добавки превосходит критическое значение D_{\min} , начинается интенсивное

изменение вязкости цементного теста, пропорционально концентрации пластификатора в его жидкой фазе.

Из полученных экспериментальных данных следует, что скорость изменения вязкости зависит от вида добавки, которая определяет химический механизм ее взаимодействия с вяжущим веществом. Наибольшее снижение вязкости системы наблюдается при использовании добавки ПДКк, меньшее влияние составляют ЛСТ.

О влиянии этих добавок на цементное тесто можно судить по изменению его водопотребности для получения стандартной консистенции, которая отвечает нормальной густоте цементного теста.

Для двух видов портландцемента криворожского и балаклеяского сделано определение нормальной густоты цементного теста без добавок и с разным количеством добавок. Как видно из таблицы, водопотребность теста на криворожском цементе с нормальной густотой 24,6 % при введении разных добавок снижалась 13,3...22,9 %. На балаклеяском цементе (нормальная густота 27 %) аналогичное снижение водопотребности наблюдалось 5,5...19,25 %.

Итак, цементное тесто на криворожском цементе более склонно к пластификации, хотя влияние добавки ПДКк оказалось значительно меньше.

Если рассмотреть изменение вибровязкости пластифицированного цементного теста от влияния разных добавок, то легко обнаружить три зоны влияния пластификатора. Это изображается приблизительно S-подобной кривой, приведенной на рисунке.

Влияние химических добавок на водопотребность теста нормальной густоты

Добавки	Количество добавки, %	Нормальная густота цементного теста, % (криворожский цемент)	Снижение водопотребности теста нормальной густоты при введении добавки, %	Нормальная густота цементного теста, % (балаклеиский цемент)	Снижение водопотребности теста нормальной густоты при введении добавки, %
ЛСТ	0,10	22,6	16,2	24,5	9,20
ЛСТ	0,15	21,6	20,0	24,1	10,70
ЛСТ	0,20	21,4	20,7	23,7	12,20
ЛСТ	0,25	21,0	22,2	22,8	15,50
ЛСТ	0,30	20,8	22,9	22,2	17,70
ПДК	0,10	23,4	13,3	25,5	5,5
ПДК	0,20	23,0	14,8	24,9	7,77
ПДК	0,40	22,9	15,8	24,5	9,25
ПДК	0,60	22,4	17,0	23,7	12,22
ПДК	0,80	22,2	17,7	23,3	13,7
ПДКо	0,10	23,2	14,0	25,2	6,66
ПДКо	0,20	22,9	15,18	24,7	8,51
ПДКо	0,40	22,8	15,5	24,3	10,00
ПДКо	0,60	22,2	17,7	23,5	12,90
ПДКо	0,80	21,9	18,8	23,1	14,44
ПДКн	0,10	22,5	16,5	24,0	11,10
ПДКн	0,20	21,7	19,6	23,8	11,85
ПДКн	0,40	21,2	21,48	23,5	12,90
ПДКн	0,60	20,8	22,9	22,6	16,30
ПДКн	0,80	20,3	24,8	21,9	18,88
ПДКк	0,10	21,9	18,8	23,2	14,07
ПДКк	0,20	21,7	19,6	23,0	14,81
ПДКк	0,40	21,2	21,4	22,8	15,55
ПДКк	0,60	20,8	22,9	22,1	18,14
ПДКк	0,80	21,0	22,2	21,8	19,25

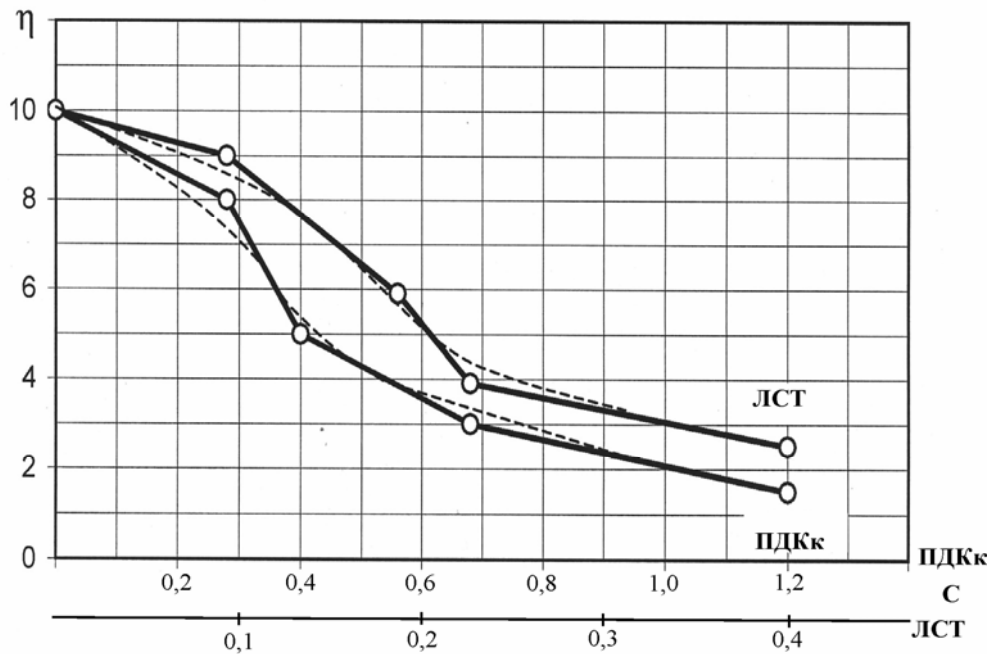


Рис. Зависимость вязкости цементного теста от количества пластификатора (ЛСТ и ПДКк)

Первая зона характерна практически отсутствием эффекта пластификации. Интервал первой зоны определяет значение D_{\min} , выше которого уже интенсивно проявляется эффект пластификации. Вторая зона пропорционального развития эффекта пластификации характерна наибольшим проявлением свойств данной добавки. Чем выше эффективность добавки, тем больше скорость снижения вязкости цементного теста от введения единицы массы данной добавки на единицу объема жидкой фазы цементного теста. Вторая зона завершается условной критической точкой D_{\min} , за которой эффект пластификации начинает падать, происходит расслоение цементного теста. Это третья зона пластификации, характерная избыточным количеством добавки [2].

При избыточном количестве добавки неизменно расслоение цементного теста в результате его флокуляции и проявление временной нестойкости. Цементное тесто в третьей зоне пластификации отличается нестабильностью, которая поясняется перенасыщением поверхности твердой фазы молекулами пластификатора и появлением части несвязных свободных молекул химической добавки в жидкой фазе системы.

Таким образом, эффективность пластификации цементного теста возможна при содержании добавки в границах $D_{\min} < D < D_{\max}$. В этом случае возможно полное использование

пластификатора без нарушения структуры цементного теста. Вторая критическая точка является технологической границей D_{\max} насыщение водного раствора в бетоне пластификатором.

Избыточное его насыщение сказывается на прочности материала, вызывая значительное ее снижение. Критические точки D_{\min} и D_{\max} часто не являются четко выраженными и их положение может определяться точкой пересечения касательных к соседним участкам кривой.

Анализ экспериментальных данных изменения вязкости пластифицированного цементного теста показал, что она может быть выражена уравнением

$$\eta_{on} = \eta_o \left[1 - \left(\frac{D}{Mn} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где η_o – вибровязкость цементного теста нормальной густоты без добавок; D – количество добавки в процентах от объема воды затворения; Mn – модуль пластификации, который характеризует пластифицирующее действия данной добавки.

Из уравнения (1) вытекает, что модуль пластификации данной добавки равен

$$Mn = \frac{D}{\sqrt{1 - \eta_{on}/\eta_o}}. \quad (2)$$

В приведенной зависимости количество добавки должно находиться в границах $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$ [3]. Из этого условия можно также установить наибольший пластифицирующий эффект цементного теста от применения данной добавки или делать сравнения пластифицирующего эффекта различных добавок.

Пластифицирующий эффект цементного теста зависит от концентрации добавки и модуля пластификации

$$\eta_{\min} = \eta_o \left[1 - \left(\frac{D_{\max}}{Mn} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

Выводы

1. Установлено влияние комплексных модификаторов на основе ПДКк и ПДКн на удобоукладываемость смеси.

2. Показаны три зоны изменения удобоукладываемости в зависимости от количества введенной пластифицирующей добавки;

3. Уменьшение водопотребности цементного теста составляет 5,5...22,9 %;

4. Предложена методика определения оптимальной концентрации химических добавок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никифоров А. П. Особенности производства бетонных работ с использованием бетононасосного транспорта / А. П. Никифоров, О. А. Пушкаренко // Инновационные технологии диагностики, ремонта и восстановления объектов строительства и транспорта. – Д. – 2004. – С. 50–52.
2. Пунагин В. Н. Основы проектирования состава бетона. – Ташкент, 1983. – 287с.
3. Ли Ф. М. Химия цемента и бетона. – М.: Госстройиздат, 1961. – 462 с.

Поступила в редколлегию 28.05.2005.

ДИНАМІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ СИСТЕМИ НАВАНТАЖЕННЯ «ВАГОН-КОЛІЯ-ЗЕМПОЛОТНО» В РОЗРАХУНКАХ ТРАНСПОРТНИХ ВІДКОСІВ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Запропоновано динамічну інтерпретацію та розширений аналіз комп'ютерної презентаційної графіки розрахунку земляного залізничного полотна.

Предложена динамическая интерпретация и расширенный анализ компьютерной презентационной графики расчета земляного железнодорожного полотна.

The work proposes dynamical interpretation and extensive analysis of display graphics for computations of railway earth permanent way.

Задачею використання наукових досліджень є впровадження останніх у виробничий процес будівництва та експлуатації земляного полотна при переході на швидкісний рух. Особливо важливим є розробка методик розрахунку земполотна, які б включали можливість навчити спеціалістів колійних частин робити аналіз розрахунків, оскільки обмежити інженерні висновки від маси існуючих наукових напрацювань, різних теоретичних та практичних рекомендацій неможливо. Тим більше, що деякі наукові праці не завжди відповідають реальним умовам, а корегувати розрахунки та виконати аналіз робіт по відновленню земляного полотна на кожній колійній частині науковці не зможуть. Це важливо при розробці нормативної документації, яка виключає рекомендації до аналізу і визначає тільки кінцевий результат – прямі вказівки, які необхідні для проектування або для відновлення та обслуговування земляного полотна.

Запропонована методологія аналізу розрахунків земляного полотна, проведених методом скінченних елементів (МСЕ), найперше, включає інтерпретацію експериментальних досліджень, важливою частиною яких є попередня оцінка існуючих напрацювань, оскільки на діючих колійних частинах проведення експериментальних досліджень під час руху неможливе. Для цього необхідно проводити дублюючі експерименти при відомих навантаженнях моделі земполотна під штампом із змінами початкових умов експерименту. Це потрібно для більш точного вираження впливу навантаження на формування тіла сповзання відкосу (рис. 1).

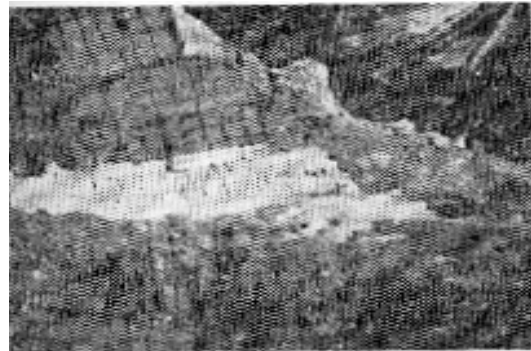


Рис. 1. Експериментальне підтвердження закономірностей накопичення деформацій руйнування за результатами ГНДЛ механіки ґрунтів ДІТТу: поетапне руйнування моделі із ослабленим шаром меотичної глини (по М. Н. Гольдштейну)

Експериментальна задача

На відміну від звично прийнятих [1], даний експеримент провадиться з нахилом штампу до 5° , чим моделюється ділянка кривої земполотна, наприклад 1021 км перегону Сватове-Попасна Донецької залізниці, де накопичення енергії навантаження призвело до створення поверхневої

тріщини та початку процесу сповзання. Звичайно, що розрахунки стійкості експлуатаційниками не провадилися, а аварійне збереження було здійснено відсіпкою та додатковим привантаженням відкосу баластним гравієм.

Розглянемо поверхню навантаження інтерпретаційної моделі (рис. 2), яка відрізняється від двоколіїної реальної поверхні. Як можна побачити в перехідній зоні (по Горбунову-Посадову) явно виражені деформації [2], в яких переважає горизонтальна складова (третій рівень від поверхні на рис. 2, по стрілці). Це достатньо змінює погляд на раніше зроблені висновки, які відзначають тільки форму та кривизну поверхні сповзання і підтверджує формування області зминання в схемі розташування елементів руйнування відкосу, а також показує, що вертикальні деформації поверхневої частини реалізуються в перехідній зоні в горизонтальні, де і проходить накопичення енергії руйнування. Тобто, опір більш міцних ґрунтів нижче перехідної зони створює умови для накопичення енергії деформування (по стрілці на рис. 2).

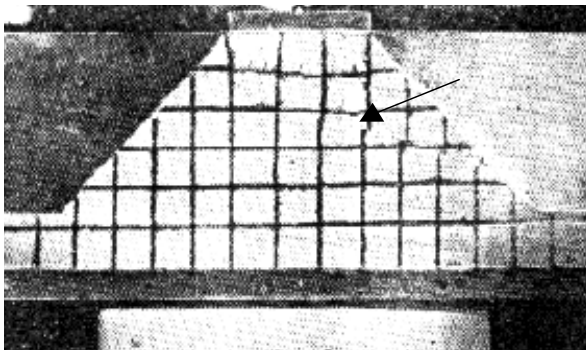


Рис. 2. Експериментальні випробування моделі ґрунтової основи під штампом із фізичними параметрами суглинку твердого, прийнятого для розрахунків МСЕ (за М. Н. Гольдштейном)

Розглядаючи у цьому аспекті закономірність формування напружень можемо відзначити, що тіло сповзання є адитивною системою, термодинамічні властивості поглинання енергії руйнування у якій різко відрізняються від явно виражених дисипативних систем, оскільки температура змін реального земляного полотна від проїзду потяга практично не змінюється або змінюється дуже незначно. Це дозволяє зробити висновок, що зміна форми тіла сповзання проходить на рівні пластичних деформацій, а в зоні накопичення останніх проходять найбільші зміни внутрішнього стану. Останнє також підтверджується існуючими експериментальними дослідженнями, проведеними під керівництвом проф. М. Н. Гольдштейна (см. рис. 1) в ГНДІ механіки ґрунтів. Се-

редній шар ґрунту зафарбовано білим кольором, що робить картину руйнування більш наглядною.

На рис. 1 у поверхневій пасивній зоні початок руйнування проходить блоками із явно вираженим випором ґрунтів у перехідній зоні. А на рис. 2 відображено зміни всього тіла руйнування та сповзання поверхневої частини, при практично відсутньому руйнуванні пасивної нижньої зони.

Це підтверджує дослідження Г. М. Шахуняца [3] про розподіл енергії навантаження у земляному полотні, за якими найбільш навантаженим приймається баластний шар, де реалізується до 50 % енергії руйнування, 70...80 % якої розповсюджуються і впливають до глибини у 3 м.

Динамічна задача

Враховуючи, що поїзне навантаження проходить у динамічному режимі, то найбільш впливовими і можливими до розгляду є маси вагона, навантаження та їх співвідношення з масою ґрунту, який вступає із ними у взаємодію. Таким чином, слід розглянути динамічну схему взаємодії елементів, основний розподіл мас та особливості методу, який передбачає пошук характеру підтвердження виявленої закономірності [4] появи сегментних зон розтягнень.

Тому для ідентифікації у динамічній постановці задачі розглянемо коливальну систему рис. 3.

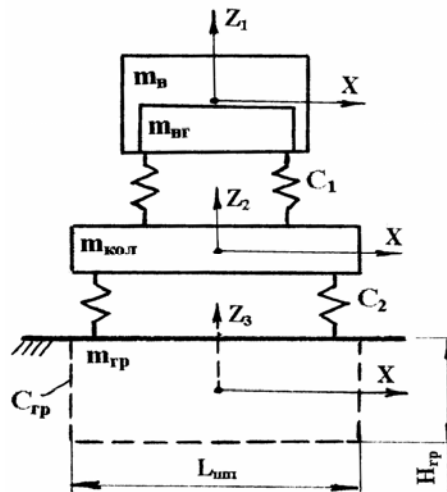


Рис. 3. Динамічна схема системи:

m_b – маса вагона або потяга; m_{br} – маса вантажу; $m_{кол}$ – маса коливальної системи колісних пар та рейкошпальної решітки; $m_{гр}$ – приєднана маса ґрунту; $L_{шп}$ – ширина приєднаної маси ґрунту, що дорівнює довжині шпали; $H_{гр}$ – висота приєднаної маси ґрунту; C_1 – жорсткість пружних зв'язків вагона; C_2 – жорсткість рейкошпальної решітки; $C_{гр}$ – умовна жорсткість ґрунту

Для визначення навантаження авторами роботи [5] запропонована модель Бусінеска-

Фламана, за якої визначення дотичних напружень провадиться із прив'язкою до радіуса можливої поверхні ковзання. Обмеженість такої наукової постановки у кінцевому результаті впливає на побудову епюр навантаження та розподіл напружень у баластному шарі, де можемо мати тільки проекції дотичних напружень, оскільки прив'язка до радіуса поверхні ковзання виключає визначення дотичної як вектора, а епюри втрачають фізичний характер відображення процесу на відміну від МСЕ. Для пояснення динамічної схеми звернемося до канонічного рівняння одномасної системи з вимушеним збудженням коливань

$$m_1 \ddot{Z} + \mu C \dot{Z} + CZ = Pr\omega^2 \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

де m_1 – вага i -ї одиниці системи; P – сила припусового збудження коливань; r – плече прикладання вимушеної сили P ; C – жорсткість пружних зв'язків із дисипативною характеристикою μ ; ω – частота вимушених коливань; φ – кут початкового розташування плеча прикладання вимушеної сили, який визначає пускову характеристику системи; Z – вертикальна вісь переміщень (см. рис. 3).

Звернення до рівняння Лагранжа зроблено, тому що «лагранжіани» найбільш зрозуміло описують стан системи: друга похідна – закон збереження енергії; перша похідна відображує момент імпульсу системи; пряме звернення показує момент сили, який розвиває система з вимушеним приводом залежно від кута зупинки приводу, що впливає на пусковий момент.

Оскільки реальна динамічна система є самобалансною і навантаження від неї через колісну пару приводимо до довжини скінченного елемента у 1 м, то самобалансність можемо прийняти за основу. При цьому можемо вважати, що швидкість поїзного руху не впливає на схему, яка стає саморезонансною без приводу вимушених коливань, тому що для швидкості, наприклад, у 140 км/год, термін проходження умовного скінченного елемента, складає лише 0,26 с. У такому випадку динамічну модель можемо описати системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{Z}_1 + C_1 Z_1 &= 0; \\ (m_1 + m_2) \ddot{Z}_2 + \mu_2 C_2 \dot{Z}_2 + C_2 Z_2 &= 0; \\ (m_1 + m_2 + m_3) \ddot{Z}_3 + \eta_{гр} C_{гр} \dot{Z}_3 + C_{гр} Z_3 &= 0, \end{aligned} \right\}; \quad (2)$$

де $\eta_{гр}$ – в'язкопластична характеристика ґрунтової маси.

У наведеній системі m_1 – сумарна маса вагона та вантажу, причому вважаємо, що маса вантажу приєднана і процес коливань безвідривний. Друга маса m_2 становить сумарну вагу колісної пари та колійної шпальної решітки із сумарною жорсткістю системи C_2 та дисипативною характеристикою μ_2 гумових підкладок під рейками, а індекси системи відповідають їх порядковому визначенню за масами.

Оскільки в реальних умовах ґрунти не мають явно виражених структурних зв'язків і зміну їх нагрівання практично не можна визначити, то у системі (2) для ґрунтів приймаємо переважаючими в'язкопластичні властивості ($\eta_{гр}$).

Особливістю динамічної системи є те, що приєднану масу ґрунтів визначити практично не можна, тоді ширину останньої $L_{шп}$ приймаємо по довжині шпали, а глибину на першому етапі розрахунків $H_{гр}$ визначаємо за дослідженнями Г. М. Шахунянца [3], в яких наведено максимальний розсів енергії навантаження на глибині у 5 м, що складає 99 % і визначає рівень взаємопідтвердження за даними науково-технічної літератури. Це підтверджує розподіл переміщень, які проведені МСЕ для земляного полотна перегону Сватове-Попасна Донецької залізниці [4].

Задача механіки ґрунтів

Повноцінним аналізом та підтвердженням надійності розрахунків МСЕ можемо вважати використання прогресивного доказу, який використовується в геологічних дослідженнях. Для цього переводимо інтерпретацію на новий рівень, проводячи пружносилову інтерпретацію презентаційної графіки МСЕ.

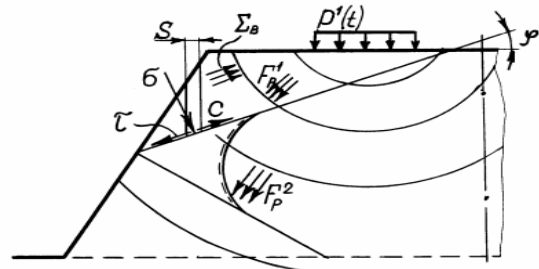


Рис. 4. Схема до аналізу силових факторів у земполотні за появи вступуючої хвилі від руху потяга або одиничного імпульсу при проходженні стику колії (позначення за текстом далі)

Вивчаючи швидкість деформацій при зсувах А. Г. Протосеня прийшов до оцінки інтенсив-

ності деформацій зсуву, і опираючись на дослідження Релея про довговічність і повзучість широкого кола матеріалів, започаткував кінетичну теорію процесів руйнування твердих тіл. Деякі відмінності запропоновано Г. М. Барте-невим [2] при використанні термоентропійного підходу, але в загальному вигляді всі теорії поведінки ґрунтів не можуть бути використані для розрахунків їх стійкості та несучої здатності – визначення міжремонтних термінів.

У цьому випадку звертаємось до теорії управління, де форма вектора управління в додатку до методу відсіків може бути виражена напруженням $\sigma(t)$ [6]. Це означає, що зміни напружень в часі не проходять безслідно, а повинно проходити накопичення енергії за рахунок зміни внутрішнього стану, тобто після кожного навантаження баланс внутрішньої енергії U_1 змінюється на величину, яка визначається з такої залежності:

$$\sigma A = U_1 - U_2. \quad (3)$$

У цьому випадку виникає питання, де найбільш активно проходить накопичення енергії руйнування і взагалі, як воно проходить і по яких законах? Така зона може характеризуватися активним переходом нормальних напружень в дотичні, розширенням внутрішньої структури окремого участку, зміною порового тиску та накопиченням вологості [4].

В активній зоні за методом Горбунова-Посадова зміна структури ґрунтів повинна змінювати поровий тиск. Тоді за умови, доведеної М. Н. Гольдштейном, на межі відсіку напруження в середині масиву будуть $(\sigma + p_w)$. Але якщо врахувати реакцію масиву, вільна енергія стиску повинна змінити стан ґрунтів у зоні дилатації на деяку величину $\Delta\sigma$ і тоді рівняння Кулона приймає вигляд

$$\tau - C = (\sigma + \Delta\sigma - p_w) \operatorname{tg}\varphi + \Sigma_B, \quad (4)$$

де p_w – поровий тиск води; Σ_B – в'язка складова зчеплення.

Така постановка наближає нас до пояснення циклічності процесів у земполотні, оскільки останнє є самоорганізуючою системою із властивостями до самовідновлення глинистих ґрунтів за відсутності критичної сезонної зміни вологості і визначає необхідність локального обстеження кожної ділянки земполотна.

Розглянемо рис. 4, де до земполотна прикладено імпульс вступуючої хвилі від поїзного

руху навантаження $P^1(t)$. Проаналізуємо виділений відсік S , для якого складено рівняння (4).

Якщо поверхня ковзання до вказаного відсіку відсутня, то зчеплення C , як і поровий тиск p_w не мають напрямку і не можуть бути вектором., тим не менш дотична τ виражена вектором поздовж лінії ковзання – протиріччя постановки задачі Кулона. В'язка складова Σ_B від динамічної дії F_p^1 миттєво змінює напрямок, що зменшує величину зчеплення C . Але оскільки зсувні напруги τ за відсутністю реальної поверхні ковзання не можуть виходити до відкосу, тоді лінію умовного клину випирання ґрунту, на який впливає динамічна згасаюча складова F_p^2 , також не можливо виводити до відкосу. Це дає можливість зробити припущення, що умовні лінії ковзання з'єднуються в середині масиву по якійсь криволінійній траєкторії.

На додаток можемо припустити, що напруження стиску в середині масиву можуть бути достатньо великі для розвитку поверхні ковзання, тоді остання буде повернена в сторону найменшого опору, тобто в сторону відкосу, створюючи додаткову лінію ковзання. При цьому на місці розвороту почнеться хаотичне руйнування масиву, яке буде виражено зміною напружень стиску на напруги розтягу, що і є, на наш погляд, тестом для визначення стану земполотна і міжремонтного терміну.

Явище формування напружень розтягу в середині земполотна проаналізовано в роботі [4] розрахунками МСЕ, має аналітичне підтвердження, але недостатньо перевірено на практиці.

Розглядаючи МСЕ з точки зору геоакустичної постановки задачі, слід відзначити, що інтерпретація фізичних процесів повинна враховувати відмінність розрахунків статичного миттєвого навантаження МСЕ від реального хвильового навантаження.

Геоакустична інтерпретація хвильового процесу коливань приєднаної маси ґрунту

Характерними признаками з точки зору геоакустики [7], що виражають вплив рухомого навантаження на ізотропний глинистий відкоступ, є хвилі розповсюдження напружень, які можуть бути трьох видів:

– вертикальна хвиля гравітаційного приєднання маси транспортного засобу;

- горизонтальна, поверхнева хвиля;
- стояча хвиля мінімального коливання частинки ґрунту.

Розглядаючи систему рівнянь (2) з геоакустичної точки зору можемо спростити її до рівняння, яке описує стійкий рух типу «ударно-вібраційна трамбівка» за умови поєднання $m_1 + m_2 = F_a$ та замість $\ddot{\xi} = m\omega^2 r / F_a$, $\tau = \omega t$, $p = P / F_a$, де точки над функціями означають диференціювання по τ . Тоді маємо безрозмірне диференціальне рівняння, яке наближує нас до пояснення суті геодинамічного впливу

$$\ddot{\xi} = p + \cos(\tau + \phi). \quad (5)$$

У цьому рівнянні p представляє відношення динамічної змінної до навантаження системи з відносною вертикальною хвилею постійного приєднання, яку можемо вважати статичною складовою на довжині одного скінченного елемента. Таким чином, на даному етапі вплив обертонів накладених коливань проміжних мас m_2 та m_3 , які відповідають масам колісної пари та рейкошпальної решітки, не враховуємо. Однак слід відзначити, що основне навантаження у МСЕ повинно враховувати коефіцієнт динамічного збільшення, який визначається зміною стану колії за результатами обстеження, тобто процес відновлення земполотна є загальною проблемою колійників та спеціалістів по земполотну.

При швидкості розповсюдження вертикальної хвилі у 1800...2500 м/с кут запізнення прикладання поїзного навантаження до скінченного елемента складатиме 1/20 частину, за якої можемо прийняти цю складову за вектор, а висунуте припущення до розрахунків навантаження допустимим.

Стосовно горизонтальної складової поверхневої хвилі, швидкість якої менше більш як на порядок від вертикальної, то із рівняння (4) можливо бачити, що вона в рівнянні не враховується, є самостійною за характером формування і на динамічну систему (2) не впливає, тому її вплив розглядається окремо від МСЕ.

Стояча хвиля характеризується відсутністю переносу енергії, тобто в ґрунтовому середовищі виникають витрати, обумовлені затуханням розповсюдження хвилі із відстанню. При циклічному навантаженні амплітуди прямої та зворотної хвиль не рівні між собою, а за нерівності характеристик міцності ґрунтів по осях, зворотна хвиля може розташовуватися під ку-

том із зміною напрямку. При цьому нормальні вертикальні напруження переходять у дотичні.

Інженерна інтерпретація презентаційної графіки методу скінчених елементів

Оскільки спеціальних методів розшифровки презентаційної графіки МСЕ не існує, то вищепроведений частковий аналіз доповнюємо інтерпретацією, за допомогою якої проєктантам та ремонтникам мають можливість визначити характерні місця реакції транспортного відкосу на навантаження.

Для цього сформулюємо послідовність, яка може бути першим варіантом загальної інтерпретації: порівняння схем полів напружень силового розрахунку; епюр розташування головних напружень від власної ваги по осях на прикладі рис. 5; визначення межі присутності вузлових переміщень та приєднаної маси ґрунту, яка реагує на навантаження.

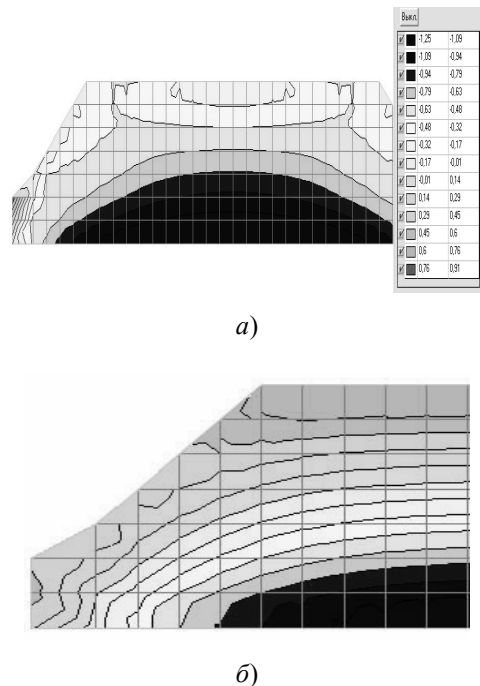


Рис. 5. Перевірочний розрахунок МСЕ від власної ваги ґрунту:

- а) – ізолінії та ізополя головних напружень по осі X (горизонтальні); б) – збільшене зображення поверхні відкосу, де ізополя головних напружень по осі Z (вертикальні)

Найбільш важливим для експлуатаційників є реакція земляного масиву на розташоване на межі поверхні відкосу навантаження [4]. Реакція земляного відкосу виявляється у розподілі останнього на похилий підпирний відкос, на вертикальній межі якого спостерігається хаотичне розташування полів напружень із виникненням зон розтяг-

нення, та основне тіло відкосу, що формується вертикальною геоакустичною складовою. Це означає, що при зміщенні шпальної решітки до краю відкосу виникають умови до найкорішого виникнення тріщини на поверхні.

Таке явище підтверджується експериментальною інтерпретацією (рис. 2), тому її висновки можливо вважати достовірними, але це можуть бути особливості МСЕ, які відмінні від реальних умов. Тому перевірку характерних особливостей МСЕ необхідно провести, порівнюючи характеристики розподілу напружень від власної ваги ґрунту, та зміщенням навантаження на декілька положень по горизонтальній поверхні, одним із яких є нормативне [4].

Розташування напружень від власної ваги для горизонтальної складової підтверджуються класичними розрахунками за М. Н. Гольдштейном, що також дозволяє вважати розрахунки достовірними. Але все це підтверджує тільки вірність розрахунків по напруженнях. МСЕ не відображує реального геоакустичного впливу, та фізичної суті процесу. Враховуючи, що на межі стоячої хвилі реакція земполотна повинна бути відображена горизонтальною лінією, то маємо тільки часткове підтвердження геоакустичного відображення в МСЕ, оскільки на денних поверхнях відкосу виходу напружень розтягу не маємо, але лінії розподілу напружень розташовані (на перший погляд) хаотично.

Відсутність виходу напружень розтягу на поверхню відкосу підтверджує стійкий стан без навантаження, але реакція хаотичного розподілу епюр вертикальних напружень на відкосі (рис. 5, б) вказує на те, що на відстані у 0,7...1 м від поверхні МСЕ (в межах одного елемента) може давати недостатньо ясну картину. Тому в розрахунках виникає необхідність до зменшення розмірів скінченного елемента. Оскільки рекомендацій щодо вибору розмірів останніх не існує, то користуючись теорією управління гірничодобувними об'єктами [8], можемо визначити оптимальний розмір скінченного елемента у 0,3...0,6 м, що необхідно при врахуванні реальних шаруватих насипів із багаторазовою відсипкою баластного шару при ремонтах.

Характерним для інженерної інтерпретації є необхідність приведення довжини скінченного елемента до контактної відстані колісної пари, що дозволяє нам співставити навантаження до приєднаної маси m_3 ґрунту земполотна, оскільки m_3 необхідна нам для завершення динамічної інтерпретації.

Оскільки «наїзд» колісної пари на скінчений елемент можливо подати у вигляді норма-

льного ергодичного випадкового процесу з приведеним усередненим терміном навантаження, то процес можемо вважати одноударним, який носить резонансний характер. Тому співставлення частоти наїзду колісних пар, тобто швидкості руху, з власною частотою коливання ґрунтів земполотна дає експлуатаційнику уяву про режими навантаження.

Важливим також для інженерної інтерпретації є визначення приєднаної маси m_3 . Розглядаючи площину поперечного перетину земполотна, на якій у МСЕ визначено присутність переміщень [4], можемо прийняти умову, що сумарна площа таких елементів може бути прийнятою за мінімальну, яка реагує на навантаження. Знаючи напруженні у кожному скінченному елементі та його переміщення, можемо визначити роботу реакції m_3 .

$$A_3 = \sum \delta A_i = \sum_0^i \sigma_i s_i \varepsilon_i, \quad (6)$$

де σ_i – напруження i -го елемента маси m_3 ; ε_i – переміщення i -го елемента; s_i – площа перетину i -го елемента, кут нахилу як та реальну її величину визначаємо із презентаційної графіки.

Але реально стан земляного полотна можливо визначити після визначення вологості ґрунтів. У сучасних розробках ГНДЛ механіки ґрунтів розробляються методики та прилади пенетрометричних випробувань, які можливо довести до нормативного впровадження та забезпечити діючі колійні частини методологією комп'ютерних розрахунків земляного залізничного полотна із частковим експериментальним підтвердженням.

Особливістю таких випробувань є забезпечення пенетрометра камерами безконтактного визначення вологості, які монтуються безпосередньо за конусом. Після занурення пенетрометра в ґрунт, із визначенням сил опору, останній остається на деякий термін в земполотні, залежно від поглинаючих властивостей характерних для наповнювача камер. Таким чином, процес обстеження земполотна можемо вважати завершеним.

Висновки

1. Використовуючи прогресивний метод обстеження земляного залізничного полотна виникає можливість визначення реальних умов експлуатаційного навантаження, залежно від кількості проходу колісних пар, та визначення міжремонтних термінів.

2. Після забезпечення пенетрометра камерами безконтактного визначення вологості ґру-

нтів, останній може виконувати три функції: пенетрометр – репер – вологомір.

3. Сумарна методика розрахунково – експериментальних досліджень доводить можливість неруйнівних методів обстеження діючих земляних відкосів без зупинки руху.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гольдштейн М. Н. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / М. Н. Гольдштейн, А. А. Царьков, И. И. Черкасов. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
2. Гольдштейн М. Н. Распределение напряжений в насыпи от действия сил собственного веса / М. Н. Гольдштейн, В. М. Тубольцев, А. Н. Шанина // Вопросы геотехники: Труды ДИИТа. – Д., 1976. – Вып. 179/25. – С. 39–49.
3. Шахунянц Г. М. Земляное полотно железных дорог. – М.: Трансжелдориздат, 1953.
4. Цепак С. В. Закономерности влияния динамической нагрузки на земляное транспортное со-

- оружение // Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України – Д., 2003. – Вип. 47. – С. 152–157.
5. Фришман М. А. Стабильность подшпального основания при железобетонных шпалах / М. А. Фришман, В. В. Говоруха // Весник Всесоюз. научно исслед. ин-та ж.-д. транспорта, – М., 1968. – № 7. – С. 27–29.
6. Виноградов В. В. Гемеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / АН УССР. Ин-т геотехн. механики. – К.: Наук. дум., 1989. – 192 с.
7. Ямщиков В. С. Введение в геоакустику: Учебное пособие. – М.: МГИ, 1968. – 284 с.
8. Полищук С. З. Геомеханические задачи рационального природопользования на открытых горных работах // Між від. зб. наук. праць / Ін-т проблем природокористування та екології НАН України. – К.: Наук. дум., 1998. – 178 с.

Надійшла до редколегії 15.06.2005.

СИСТЕМОТЕХНІЧНЕ ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ ВІДНОВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ У ВСТАНОВЛЕНІ ТЕРМІНИ

За допомогою двоїстої задачі в сітвовій інтерпретації розроблено модель, яка дозволяє виробити оптимальні організаційно-технологічні рішення з відновлення об'єктів у задані терміни.

С помощью двойственной задачи в сетевой интерпретации разработана модель, которая позволяет выработать оптимальные организационно-технологические решения по восстановлению объектов в заданные сроки.

By an ambivalent task in a network interpretation a model has been developed, which allows producing optimal organizational and technological solutions for renewal of facilities in a set timeframe.

Введення

У практичній роботі, а також у наукових дослідженнях завжди доводиться стикатися з проблемою обґрунтування термінів виконання проектів або програм у заданий (встановлений) час. У принципі, вирішити грамотно питання можна тільки на основі наукового підходу і використанні сучасного арсеналу теорії дослідження операцій і засобів обчислювальної техніки. Технології і організації виробництва завжди властиві багатоваріантність і багатокритеріальність. Оскільки будь-який проект включає впорядковану кінцеву безліч операцій, то режим виконання їх завжди характеризується як тривалістю (τ_{ij}), так і інтенсивністю виробництва, що пов'язане із залученням трудових ресурсів (n_{ij}) в одиницю часу.

Вибору рішень у вигляді конкретного варіанта дій слід зіставляти кількісну оцінку ступеня досягнення мети. Ознака, по якій порівнюються і оцінюються варіанти, називається критерієм оптимальності. Якщо процес вибору рішень описати функцією, шукані змінні якої є допустимими і описують рух до мети, то таку функцію прийнято називати цільовою, а рішення – оптимальним. Таким чином, встановити оптимальне рішення означає визначити екстремум функції, і всі розмови про менш або більш оптимальне рішення безпідставні, оскільки є екстремальне рішення, тобто оптимальне, або його немає.

Постановка задачі

Для досягнення мети роботи, що становлять $(i, j) \in A$, слід виконувати з певною швидкістю, злагодженою з кінцевою метою, заданою терміном введення. Можливих варіантів досягнен-

ня мети при великих об'ємах робіт (в складних проектах) є практично множина, непередатлива огляду. Залучення ресурсів пов'язано з додатковими витратами і збільшенням змінності виробництва. Проблема трудових ресурсів виробництва актуальна, тому можна поставити мету мінімізувати залучення ресурсів для дотримання термінів реалізації проекту. Це те ж саме, що мінімізувати виробництво робіт в дві і три зміни.

Результати дослідження

Розглянемо граф $G(U, A)$. Кожна операція характеризується тривалістю реалізації – (τ_{ij}) і інтенсивністю – (n_{ij}) $(i, j) \in A$. U – безліч вузлів (подій) графа, A – безліч дуг (робіт). Має місце залежність $x_{ij}n_{ij} = Q_{ij}$, де Q_{ij} – трудомісткість роботи (i, j) залежить від об'єму, $i = 1, 2, \dots, n-1, j = 2, 3, \dots, n$, де n – число вузлів (подій) в моделі.

По кожній роботі $(i, j) \in A$ відома нормальна інтенсивність – n_{ij}^D , якій відповідає тривалість D_{ij} ; d_{ij} – тривалість, відповідна максимальній концентрації ресурсів n_{ij}^d (тобто прискорена).

Сформулюємо математичну модель задачі. Дана сітвova модель (D_{ij}, T^D) , по $(i, j) \in A$ відоме d_{ij}, C_{ij} – «ціна» скорочення роботи на одиницю, $T_{заданий}$.

Скорочення тривалості виконання (i, j) роботи на величину $\Delta X_{ij} = D_{ij} - X_{ij}$ може бути забезпечене залученням додаткових ресурсів, тобто за рахунок збільшення інтенсивності виробництва:

$$\Delta n_{ij} = C_{ij} \Delta X_{ij}.$$

Потрібно визначити, які роботи $(i, j) \in A$ прискорити, а для яких зберегти нормальну тривалість D_{ij} . Іншими словами, потрібно знайти таке рішення (X_{ij}, T_n) , яке мінімізує функцію:

$$L(x) \sum \Delta n_{ij} = \sum C_{ij} (D_{ij} - X_{ij}) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Безліч вузлів (подій) можна визначити як $U = (1, 2, \dots, n)$, де вузол 1 позначає початок робіт (проекту), а вузол n – закінчення. Обмеження на рішення задачі такі:

$$T_i - T_j + X_{ij} \leq 0 \text{ для всіх } (i, j) \in A, \quad (2)$$

$$-T_1 + T_n \leq T_3, \quad (3)$$

$$X_{ij} \leq D_{ij} \text{ для всіх } (i, j) \in A, \quad (4)$$

$$X_{ij} \geq d_{ij} \text{ для всіх } (i, j) \in A, \quad (5)$$

де $T_i (T_j)$ – ранній термін завершення події $i(j)$.

Умова (2) відображає нерозривність мережі

$$T_j = \max (T_i + t_{ij}).$$

Умова (3) показує, що в оптимальному рішенні величина критичного шляху $T_n \in T_{кр}$ не повинна перевищувати заданого терміну реалізації проекту. Умови (4), (5) визначаються технологією виконання робіт $(i, j) \in A$.

Якщо подивитися на цільову функцію (1) і обмеження, а їх чотири в нашому випадку, то не важко помітити, що наша мета – визначити невідомі X_{ij} , задля яких і ставимо задачу, а (x) і обмеження мають лінійну залежність (X_{ij} в першому степені). Тому сформульована задача є задачею лінійного програмування. Для її розв'язання потрібно перевірити припустимість при встановленому T_3 . Використовуємо для цього наступний прийом. Вважаємо, що $X_{ij} = d_{ij}$ і певний при цьому критичний шлях позначимо як $T_{кр}^d$. Якщо $T_3 \geq T^d$, то задача має рішення, а інакше немає.

Якщо покласти $X_{ij} = D_{ij}$, то одержимо $T_{кр}^D$. Як видно необхідне дотримання умови

$$T^d \leq T_3 \leq T^D.$$

Визначення для кожного значення T_n з сегменту $[T^d \div T^D]$ мінімум функції:

$$L(x) = \sum C_{ij} (D_{ij} - X_{ij}) = (\sum C_{ij} D_{ij} - \sum C_{ij} X_{ij}) \rightarrow \min \quad (6)$$

за умов (2)–(5) є параметричною задачею лінійного програмування. Дана модель еквівалентна задачі лінійного програмування, що розглядається нижче, з максимізацією функції мети.

Враховуючи, що в (6) $\sum C_{ij} D_{ij} = \text{const}$,

замінімо цільову функцію початкової задачі на іншу функцію

$$L(x) = \sum C_{ij} X_{ij} \rightarrow \max, \quad (7)$$

яка приймала б максимальне значення і задовольняла умови:

$$\left. \begin{aligned} T_i - T_j + X_{ij} &\leq 0 \text{ для всіх } (i, j) \in A, \\ T_1 + T_n &\leq T_3, \\ X_{ij} &\leq D_{ij} \text{ для всіх } (i, j) \in A, \\ -X_{ij} &\leq -d_{ij} \text{ для всіх } (i, j) \in A. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Рішення задачі

Дана задача може бути вирішена універсальним симплекс-методом, що використовується для вирішення екстремальних задач лінійного програмування, в яких на невідомі накладені обмеження. Такі методи більш громіздкі (у порівнянні з алгоритмом, наприклад, транспортної задачі) і їх застосування доцільне тільки тоді, коли спеціальні методи виявляються недостатніми.

У нашому випадку слід використовувати інший метод рішення поставленої задачі. Він заснований на теорії двоїстості лінійного програмування і умовах доповнюючої нежорсткості.

У постановці (7), (8) задача має вигляд, аналогічний задачі мінімізації вартості проекту, тобто задача знаходження оптимального потоку, що володіє значною перевагою в обчислювальному відношенні.

Для цього досліджується задача, для якої у відповідність обмеженням (8) ставляться не-негативні змінні $f_{ij}, V, \gamma_{ij}, \delta_{ij}$, звані подвійними.

Вони перераховуються в такому ж порядку, в якому вводилися обмеження в дану модель.

Двоїсту задачу можна сформулювати таким чином.

Мінімізувати цільову функцію:

$$Z(f) = \left(TV + \sum_A D_{ij} \gamma_{ij} - \sum_A d_{ij} \delta_{ij} \right) \rightarrow \min$$

за умови, що

$$f_{ij} + \gamma_{ij} - \delta_{ij} = C_{ij} \text{ для } (i, j) \in A,$$

$$\sum f_{ij} - V = 0 \quad i=1, \quad (9)$$

$$\sum (f_{ij} - f_{ji}) = 0 \quad \text{для } i=0, \dots, n-1, \quad (10)$$

$$-\sum f_{in} + V = 0 \quad i=n,$$

$$f_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij} \geq 0 \quad (i, j) \in A.$$

Двоїсті обмеження є рівністю, оскільки змінні в основній задачі в явному вигляді не обмежені по знаку.

На основі математичної структури двоїстої задачі двоїсті змінні f_{ij} можна розглядати як потоки в сіті з обмеженою пропускнуою спроможністю. Умови (9), (10) відповідають обмеженням потоку для джерела проміжних і кінцевої подій відповідно.

Так, обмеження (10) відповідає відомим обмеженням на збереження потоку в проміжних вузлах (типа Г. Р. Кирхгофа).

Використовуючи умови доповнюючої нежорсткості для задачі лінійного програмування, можна вивести такі результати, які повинні виконуватися для оптимального рішення:

$$\left. \begin{aligned} T_i - T_j + X_{ij} < 0, \quad f_{ij} = 0, \\ T_i - T_j + X_{ij} = 0, \quad f_{ij} = 0. \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{якщо } X_{ij} = D_{ij}, \text{ то } \gamma_{ij} > 0; \\ \text{якщо } X_{ij} = d_{ij}, \text{ то } \delta_{ij} < 0; \\ \text{якщо } X_{ij} < D_{ij}, \text{ то } \gamma_{ij} = 0. \end{aligned} \right\}$$

Подвійні змінні γ_{ij}, δ_{ij} не можуть одночасно використовуватись, оскільки $D_{ij} \neq d_{ij}$.

В обмеженні $f_{ij} + \gamma_{ij} - \delta_{ij} = C_{ij}$ значення γ_{ij} і δ_{ij} визначаються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{ij} = C_{ij} - f_{ij} \quad \text{при } \delta_{ij} = 0; \\ \delta_{ij} = f_{ij} - C_{ij} \quad \text{при } \gamma_{ij} = 0. \end{aligned} \right\}$$

Тому

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{ij} = \max[0, C_{ij} - f_{ij}] \quad \text{при } \delta_{ij} = 0, \\ \delta_{ij} = \max[0, f_{ij} - C_{ij}] \quad \text{при } \gamma_{ij} = 0. \end{aligned} \right\}$$

При дослідженні всіх можливих значень $f_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}$ можна виділити три випадки:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{ij} > 0, \quad \delta_{ij} = 0, \quad 0 \leq f_{ij} \leq C_{ij}, \quad X_{ij} = D_{ij}, \\ \gamma_{ij} = 0, \quad \delta_{ij} = 0, \quad f_{ij} = C_{ij}, \quad d_{ij} \leq X_{ij} \leq D_{ij}, \\ \gamma_{ij} = 0, \quad \delta_{ij} > 0, \quad f_{ij} > C_{ij}, \quad X_{ij} = d_{ij}. \end{aligned} \right\}$$

Для кожного випадку з урахуванням умов доповнюючої нежорсткості знаходимо умови оптимальності:

$$0 < f_{ij} < C_{ij} \quad \text{і} \quad T_i - T_j + D_{ij} = 0$$

або

$$f_{ij} = 0 \quad \text{і} \quad T_i - T_j + D_{ij} < 0;$$

$$f_{ij} = C_{ij} \quad \text{і} \quad T_i - T_j + X_{ij} = 0, \quad d_{ij} \leq X_{ij} \leq D_{ij};$$

$$C_{ij} < f_{ij} < \infty \quad \text{і} \quad T_i - T_j + d_{ij} = 0.$$

Введемо такі додаткові позначення:

- резерв критичності

$$a'_{ij} = T_i - T_j + D_{ij};$$

- резерв скорочення

$$a''_{ij} = T_i - T_j + d_{ij};$$

$$\overline{X}_{ij} = T_i - T_j + X_{ij}.$$

Умови оптимальності для кожного випадку можна записати в іншому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} 0 < f_{ij} < C_{ij} \quad a'_{ij} = 0; \\ f_{ij} = C_{ij} \quad \overline{X}_{ij} = 0; \\ C_{ij} < f_{ij} < \infty \quad a''_{ij} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

За допомогою алгоритму послідовно визначаються f_{ij} і T_i (T_j), задовольняючи умовам (11) для убуваючих значень T_n , після чого шукані невідомі визначаються за формулою:

$$X_{ij} = \min(D_{ij}, T_j - T_i).$$

i, j – номери подій, $T_{i(j)}$ – ранній термін звершення $i(j)$; D_{ij}, d_{ij} – відповідно тривалість виконання операцій (i, j) при нормальній і прискореній реалізації; C_{ij} – «ціна» скорочення операцій (i, j) ; f_{ij} – потік по дузі (i, j) ; X_{ij} – невідомі режими виробництва (слід визначити).

Прийняті в задачі позначення показані на рисунку.

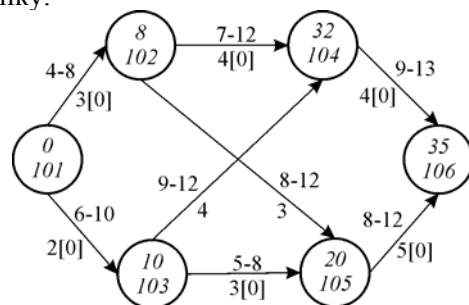


Рис. Початкова сітьова модель

Висновок

Наукова новизна розділу полягає в детальному теоретичному і практичному дослідженні двоїстої задачі в сітьовій інтерпретації і визначенні її змінних – $f_{ij}, \gamma_{ij}, \delta_{ij}$. Це вперше дозволило дати чітку економіко-математичну інтерпретацію рішення, повніше взнати і зрозуміти діалектичну єдність прямих і подвійних оцінок в задачах сітьової структури. Запропонований підхід виявляє правильність як постановки задачі, так і її методу рішення, що не практикувалося раніше. Такі дослідження відсутні як у вітчизняній, так і доступній зарубіжній літературі.

Вперше виконано практичне порівняння і оцінка рішень задачі вироблення ОТР в строк на підставі сітьового підходу і симплекс-методу. Встановлена особлива природа у відмінності результатів рішення прямої і двоїстої задач, що практично відсутній при рішенні традиційних задач ЛП (задача про розкрій матеріалу, про оптимальний раціон, в розподільних

задачах та ін.). Рішення двоїстої задачі має подвійну перевагу: швидка збіжність до оптимального рішення і отримання відразу подвійних оцінок – f_{ij} , чого немає в стандартній процедурі. У разі використання симплекс-методу змінні (оптимальні потоки по дугах) визначаються додатково, але за умови розуміння двоїстої задачі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гусаков А. А. Организационно-технологическая надежность строительства / А. А. Гусаков и др. – М.: SVP Arsys, 1994. – 427 с.
2. Миллер В. ПЕРТ – система управления: Пер. с англ. – М.: Экономика, 1965. – 140 с.
3. Павлов И. Д. Модели управления проектами: Учебное пособие / И. Д. Павлов, А. В. Радкевич. – Запорожье: ГУ «ЗИГМУ», 2004. – 320 с.
4. Филлипс Д. Методы анализа сетей / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас; Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
5. Форд Л. Р. Потоки в сетях / Л. Р. Форд, Д. Фалкерсон; Пер. с англ. – М.: Мир, 1966. – 276 с.

Надійшла до редколегію 15.06.2005.

КОЛЕБАНИЯ КONTИНУАЛЬНЫХ БАЛОК С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ОПОРАМИ

Результаты досліджень, які основані на застосуванні логічних моделей, використовуються для врахування проміжних опор нерозрізних багатопрогонних балок. Отримані матриці враховують будь-які можливі сполучення пружних закріплень як кінцевих, так і проміжних ділянок континуальних балок. При цьому виключаються додаткові рішення для частин стрижня в місцях розташування зосереджених мас, пружних опор або шарнірів.

Результаты исследований, основанных на применении логических моделей, использованы для учета промежуточных опор неразрезных многопролетных балок. Полученные матрицы учитывают любые возможные сочетания упругих закреплений как концевых, так и промежуточных участков континуальных балок. При этом исключаются дополнительные решения для частей стержня в местах расположения сосредоточенных масс, упругих опор или шарниров.

Results of investigations, based upon logical models application, are used for account of intermediate supports of continuous multispans beams. The matrices obtained take into account all possible combinations of elastic fastenings of both the end and intermediate sections of continuous beams. In this, any additional solutions for the bar parts placed in the whereabouts of localized masses, elastic supports or joints are excluded.

На сегодняшний день среди множества способов определения частот собственных колебаний неразрезных многопролетных балок можно выделить несколько основных направлений, выбрав в качестве критерия их точность, универсальность, затраты инженерного труда и машинного времени ЭВМ.

Исследования первого направления связаны с получением точного решения для колебаний стержневых систем с действительным отражением геометрических, жесткостных и массовых характеристик реальной конструкции.

Второе из них заключается в упрощении самой модели непрерывной конструкции путем замены ее системой упругих элементов с конечным числом степеней свободы и последующем точном решении.

Наконец, к третьему направлению относятся различные приближенные методы расчета систем с бесконечно большим числом степеней свободы.

Дискретные методы с одной стороны, позволяют рассматривать системы с большим числом степеней свободы, но не гарантируют точность описания деформаций каждого элемента. С другой стороны, континуальные модели более точно отображают физические свойства реальной конструкции, но чрезвычайно быстро усложняется их математическое описание при возрастании числа учитываемых элементов и связей.

Отмеченные направления особенно отчетливо проявились при расчетах однопролетных систем, где, главным образом, рассматриваются системы с сосредоточенными или же с распределенными параметрами [1]. При этом каждая из них может быть получена обычным предельным переходом.

Одновременный учет распределенных параметров с сосредоточенными массами, что во многом аналогично неразрезной балке на упругих опорах, существенно усложняет расчет и требует иных подходов к решению данной задачи. Часто такой расчет на основе классических методов строительной механики оказывается затруднительным и дорогостоящим, а иногда и вообще невыполним из-за большого числа узловых сопряжений и элементов конструкции. Если к тому же учесть, что в инженерной практике приходится иметь дело с неразрезными стержневыми системами из многократно повторяющихся регулярных включений в виде сосредоточенных масс, упругих опор или шарниров, то станет вполне понятным стремление к изысканию более простых расчетных схем и их решений.

В данной работе для оценки динамических характеристик неразрезных континуальных балок использована методика логического моделирования.

Следуя [2], уравнение частот для прямолинейной континуальной цепной системы с различными видами упругих закреплений (рис. 1) можно представить в виде:

$$V_1 \prod_{k=2}^{n-1} M_k V_n = 0, \quad (1)$$

где матрицы V_1 , M_k , V_n сформированы из элементов ассоциированных матриц каждого из n участков неразрезной балки.

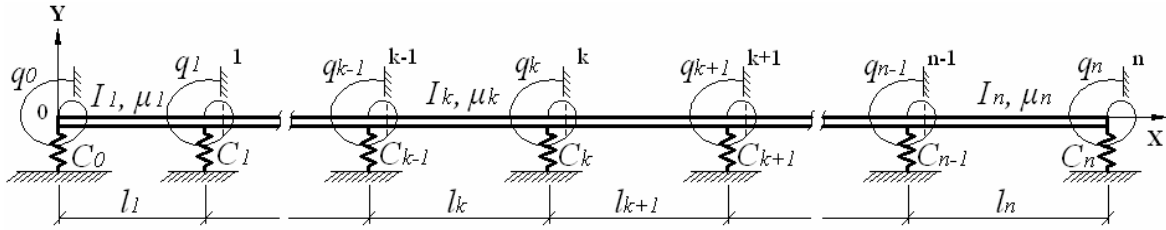


Рис. 1

Для участка балки с упругим относительно вертикальных перемещений опиранием на левом конце:

$$M_k = M + c_k M_{0101}^{(1)} + c_k M_{0011}^{(1)}, \quad (2)$$

где M – ассоциированная матрица обычного участка балки [2]; $M_{0101}^{(1)}$, $M_{0011}^{(2)}$ – матрицы, состоящие из первой и второй строк функций кодов 0101, 0011 и имеющие остальные нулевые строки.

Учитывая, что уравнение частот континуальной балки с упругими опорами можно получить путем последовательного «отсечения» упругих связей, то для участка балки с упругим относительно поворота сечения закреплением матрица M_k может быть получена из той же матрицы M прибавлением к элементам первой и пятой строк соответствующих элементов второй и шестой, умноженных на жесткость упругой связи q_k :

$$M_k = M + q_k M_{1010}^{(1)} + q_k M_{0011}^{(5)}. \quad (3)$$

Произвольный участок балки с обоими видами упругих закреплений на левом конце описывается матрицей

$$M_k = M + q_k \left(M_{1010}^{(1)} + M_{0011}^{(5)} \right) + c_k \left(M_{0101}^{(1)} + M_{0011}^{(2)} \right) + q_k c_k M_{0011}^{(1)}. \quad (4)$$

Матрицы M_k (2), (3), (4) имеют тот же порядок, что и матрица M , и дают возможность формального построения уравнений частот многопролетных балок в форме (1).

Для вектора V_n участка балки с упругими опорами на правом конце (см. рис. 1) независимо от вида граничных условий на левом конце можно записать:

$$V_n = V_{1100} + q_n V_{1010} + c_n V_{0101} + q_n c_n V_{0011}. \quad (5)$$

Использование ассоциированных матриц M_k , V_n позволяет строить уравнения частот для неразрезных континуальных балок с любыми вертикально-линейными и поворотными упругими опорами. Из этих же матриц можно получить все частные случаи возможных сочетаний граничных условий.

Предлагаемая форма упругих закреплений представляется более удобной, чем обычно используемая в методе прогонки, поскольку отпадает необходимость введения специальных матриц перехода (опор) с большим числом нулевых элементов.

В практике современного мостостроения все большее распространение получают конструкции в виде регулярных и квазирегулярных стержневых систем: неразрезные пролетные строения балочных мостов, мосты комбинированных систем, многопанельные рамы, фермы, балки проезжей части, виадуки, трубопроводы, монорельсовые дороги и другие. Кроме того, условия периодичности в неразрезных конструкциях позволяют упростить значительную часть инженерных расчетов.

Так, уравнение частот для неразрезных регулярных и квазирегулярных балок с вертикально-линейными промежуточными упругими опорами имеет вид

$$V_1 M_k^{n-2} V_n = 0. \quad (6)$$

Для удобства программирования и вычислений на ЭВМ представим матрицу M_k как сумму двух матриц

$$M_k = M + c_0 M_p,$$

где

$$M_p = M_{0101}^{(1)} + M_{0011}^{(2)}.$$

Матрицы M и M_p обладают примечательными свойствами при многократном их перемножении. Так, функции $A(n\lambda), \dots, H(n\lambda)$ при возведении матрицы M в n -ю степень преобразуются в такую же матрицу M с функциями элементов $A(n\lambda), \dots, H(n\lambda)$.

В свою очередь, матрицу M_p разделим на две матрицы M_{p1} и M_{p2} , где M_{p1} имеет тот же порядок что и матрица M и состоит из нулевых элементов и функций $A(\lambda), B(\lambda), G(\lambda)$, как и для неразрезной балки на жестких промежуточных опорах. Тогда $M_{p2}^n = 0$ и $M_{p2} M_{p1} = 0$.

Поэтому для матрицы M_p^n можно записать:

$$M_p^n = M_{p1}^{n-1} (M_{p1} + M_{p2}) = M_{p1}^{n-1} M_p, \quad (7)$$

где возведение в $(n-1)$ -ю степень матрицы M_{p1} соответствует [2] с использованием функций $f_1(\lambda)$ и $f_2(\lambda)$.

Для неразрезных балок на жестких опорах собственные значения λ могут быть получены в более простой форме аналогично [3] решением уравнений по методу деформаций с использованием конечных тригонометрических рядов:

$$F_2(\lambda) + F_1(\lambda) \cos \frac{\pi}{n} (i + \delta) = 0, \quad (8)$$

где i – номер формы колебаний порождающей системы; δ – коэффициент, зависящий от типа граничных условий ($\delta = 0$ для шарнирно опертых по концам балок; $\delta = -1$ для балок с за-

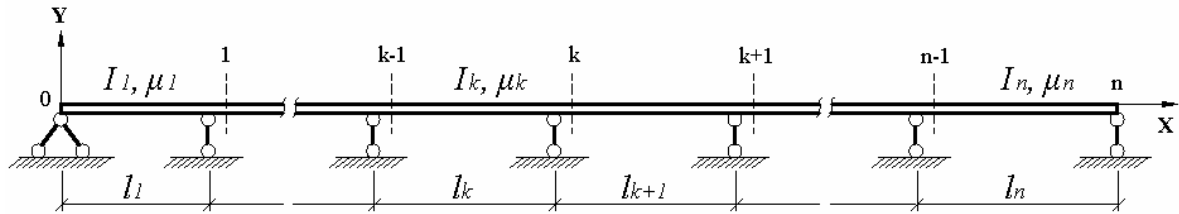


Рис. 2

Вспользуемся известной методикой проф. Е. С. Сорокина [4], который для определения первой (\bar{v}_1) и последней (\bar{v}_n) частот зоны сгущения условно разделял неразрезную систему на ряд однопролетных балок с шарнирным опиранием или защемлениями в местах расположения промежуточных опор. Таким образом, к каждой частоте \bar{v}_1 и \bar{v}_n относились группы соответствующих частот изолированных балок $v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}$ и $v_{n1}, v_{n2}, \dots, v_{nn}$, позволяющие использовать их для дальнейшей статистической обработки.

В данном случае нет необходимости выделения из основной системы совокупности изолированных однопролетных балок. Достаточно сразу воспользоваться определением соответствующих парциальных частот из безразмерных параметров λ_i регулярной балки с граничными условиями исходной системы. При этом появляется возможность аналогичного определения всего спектра частот неразрезной балки.

Предположим, что произвольной n -пролетной балке соответствует эквивалентная регулярная n -пролетная балка, имеющая частоты исходной системы $\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_n$. Тогда такой или любой другой по жесткостным и массовым характеристикам регулярной балке с количеством проле-

тением концами; $\delta = -0,5$ для балок один конец которых оперт, другой – заделан); n – количество пролетов неразрезной балки.

Полученные выше результаты для регулярных и квазирегулярных балок можно использовать для проведения простых приближенных расчетов спектра частот неразрезных балок с периодической или кратной регулярностью, а также нерегулярных многопролетных балок.

Рассмотрим неразрезную балку (рис. 2) с различными жесткостями и массами в пролетах, имеющих различные длины l_k и произвольные граничные условия. Обозначим действительные линейные частоты первой зоны сгущения такой балки через $\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_n$, а соответствующие частотные параметры неразрезной регулярной балки с таким же количеством пролетов и граничными условиями – $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$.

тов n будет всегда соответствовать один и тот же спектр частотных параметров λ_i . По каждому конкретному значению λ_i можно определить n парциальных частот v_{ik} регулярных балок с характеристиками (EI_k, μ_k, l_k) каждого k -го пролета нерегулярной балки

$$v_{ik} = \frac{\lambda_i^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI_k}{\mu_k l_k}}; \quad i, k = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

Следовательно, можно утверждать, что i -я частота многопролетной нерегулярной балки не меньше i -й частоты регулярной балки с характеристиками самого гибкого пролета исходной системы и не больше i -й частоты регулярной балки с параметрами наиболее жесткого пролета той же системы.

Поэтому весь спектр частот неразрезной балки с произвольными граничными условиями можно оценить по аналогичным [4] формулам:

$$\bar{v}_i = \sqrt[4]{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n v_{ik}^4}; \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad (10)$$

$$\frac{1}{\bar{v}_n} = \sqrt[4]{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{v_{nk}^4}}. \quad (11)$$

Таким образом, для того, чтобы получить значения частот любой зоны сгущения многопролетной нерегулярной балки, необходимо:

– определить частотные параметры λ_i соответствующей зоны сгущения неразрезной регулярной балки с таким же количеством пролетов и видом граничных условий;

– вычислить по формуле (9) значения парциальных частот регулярных балок с характеристиками каждого пролета основной системы;

– по формулам (10), (11) определить требуемые величины частот \bar{v}_i для $i = 1, 2, \dots, n$.

Точность полученных результатов будет особенно высокой для неразрезных балок с периодической или кратной регулярностью и достаточно большим количеством повторяющихся пролетов. Для нерегулярных балок область практического применения формул (10), (11) следует ограничить условиями [4], чтобы наименьшие и наибольшие величины параметров отдельных стержней неразрезной балки отличались между собой не более чем в 4 раза – для значений жесткостей, а также их масс; не более чем на 30 % – для соответствующих длин пролетов и не более чем в 2 раза – в пределах каждой группы парциальных частот регулярных балок при каком-то конкретном значении i .

Рассмотрим пример определения спектра частот 5-пролетной балки, имеющей следующие исходные данные:

$$\mu_1 = 0,52 \text{ кНм}^{-2}\text{с}^{-2}, \quad \mu_2 = 0,24 \text{ кНм}^{-2}\text{с}^{-2},$$

$$\mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = 0,37 \text{ кНм}^{-2}\text{с}^{-2};$$

$$l_1 = l_5 = 2,25 \text{ м}, \quad l_2 = l_3 = 2,42 \text{ м}, \quad l_4 = 2,7 \text{ м};$$

$$EI_1 = EI_2 = 2,9 \cdot 10^3 \text{ кНм}^2,$$

$$EI_3 = EI_5 = 4,1 \cdot 10^3 \text{ кНм}^2,$$

$$EI_4 = 6,8 \cdot 10^3 \text{ кНм}^2.$$

По уравнению (8) определяем частотные параметры регулярной балки с шарнирно опертыми концами:

$$\lambda_1 = 4,55, \quad \lambda_2 = 4,15, \quad \lambda_3 = 3,70,$$

$$\lambda_4 = 3,31, \quad \lambda_5 = 3,14.$$

Результаты вычислений по формулам (9)–(11) приведем в табл. 1, а значения \bar{v}_i по уравнению (1) и процент полученных расхождений, табл. 2.

Таблица 1

		Частота v_{ik} , Гц				
$i \backslash k$	1	2	3	4	5	
1	48,62	61,88	59,24	61,32	68,54	
2	40,45	51,47	49,28	51,01	57,01	
3	32,15	40,92	39,17	40,55	45,32	
4	25,73	32,75	31,35	32,45	36,27	
5	23,16	29,47	28,21	29,20	32,64	

Таблица 2

i	v_i (1)	v_i (10), (11)	Ошибка, %
1	59,99	60,89	1,5
2	51,29	50,66	1,2
3	40,89	40,27	1,5
4	31,29	32,23	3,0
5	26,24	27,58	5,1

Как видим, даже для неразрезной балки с произвольными характеристиками каждого из пролетов получены довольно близкие значения собственных частот колебаний первой зоны сгущения. Однако в практических задачах гораздо чаще встречаются системы балок с различными формами регулярности, что способствует повышению точности расчетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каспшик Станислав, Данг-Тинь. Собственные колебания некоторой консервативной системы с распределенными и сосредоточенными параметрами // *Zag. drgán. nielin.* 1979. 19. pp. 263–272.
2. Распопов А. С. Применение логических моделей к расчету колебаний неразрезных мостовых конструкций // 6th International Conference «Modern Building Materials, Structures and Techniques» (19–21 May 1999, Vilnius, Lithuania) // *Proceedings.* – Vol. III. – Vilnius: Technika, 1999, pp. 223–228.
3. Kolousek V. Dynamics in Engineering Structures. Prague: Czech. Acad. Sci., 1973. 580 p.
4. Сорокин Е. С. Динамический расчет несущих конструкций зданий. – М.: Госстройиздат, 1956. – 340 с.

Поступила в редколлегию 23.05.2005.

ВОПРОСЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ

Узагальнені основні критерії оцінки надійності металевих прогонових будов залізничних мостів. Запропоновано рекомендації з підвищення надійності і безпеки експлуатації мостів.

Обобщены основные критерии оценки надежности металлических пролетных строений железнодорожных мостов. Предложены рекомендации по повышению надежности и безопасности эксплуатации мостов.

The article generalizes the basic criteria of estimating reliability of metal span structures of railway bridges. Recommendations have been offered for increasing reliability and operational safety of the bridges.

В настоящее время в эксплуатации на железных дорогах Украины находится большое количество металлических пролетных строений со сроком службы более 50 лет. Недостаточное количество средств на капремонт и текущее содержание мостов влечет за собой снижение надежности и долговечности конструкций.

Целью настоящей публикации является обобщение основных критериев оценки надежности металлических пролетных строений на материалах обследования мостов, выполненных ОНИЛ искусственных сооружений.

Указанные вопросы освещены в работах В. О. Осипова, А. В. Перельмутера [2; 3].

В соответствии со стандартом [1] надежность оценивается такими характеристиками как безопасность, долговечность, ремонтпригодность.

Применительно к металлическим мостам безотказность пролетных строений определяется работоспособностью сооружения в течение заданного срока без вынужденных простоев.

Долговечность пролетных строений железнодорожных мостов определяется способностью сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания.

Система технического обслуживания предполагает регулярное обследование сооружения, определение его фактической грузоподъемности, проведение плановых и внеплановых ремонтов.

Практика обследования мостов, к сожалению, показывает, что в этом вопросе имеются большие упущения. В частности, обследования мостов проводятся с нарушением установленной ДБН В.2.3-6-2002 периодичности, ремонты сооружений проводятся, как правило, только в случае крайней необходимости, когда возникает угроза безопасности движения поездов.

Важное значение в вопросах надежности мостовых конструкций имеют такие требования как безопасность в ходе эксплуатации и эксплуатационная надежность.

Безопасность в ходе эксплуатации мостов обеспечивается требованиями по безопасному пропуску обращающейся нагрузки. Эти данные определяются по результатам расчета грузоподъемности пролетных строений.

К факторам, приводящим к нарушению уровня безопасности, относятся, прежде всего, нарушение правил проектирования, изготовления, монтажа и транспортирования пролетных строений мостов, нарушение правил эксплуатации и ремонта, а также неблагоприятные природные факторы (землетрясения, наводнения, смерчи).

Очень актуальным для мостов является требование эксплуатационной надежности, когда конструкция, оставаясь в основном прочной и устойчивой, может стать непригодной для эксплуатации по причине возникновения в ней дефектов (трещины, разрывы отдельных элементов и их деформации).

Первоосновой надежности мостовых конструкций является проектная надежность конструкций. С введением расчета конструкций по методике предельных состояний, кардинально изменился подход к детальному анализу напряженного состояния конструкций. При расчете стало рассматриваться только предельное состояние конструкции, по отношению к которому и формулируются расчетные требования к объему (например, расчет по прочности или по выносливости, или по устойчивости)

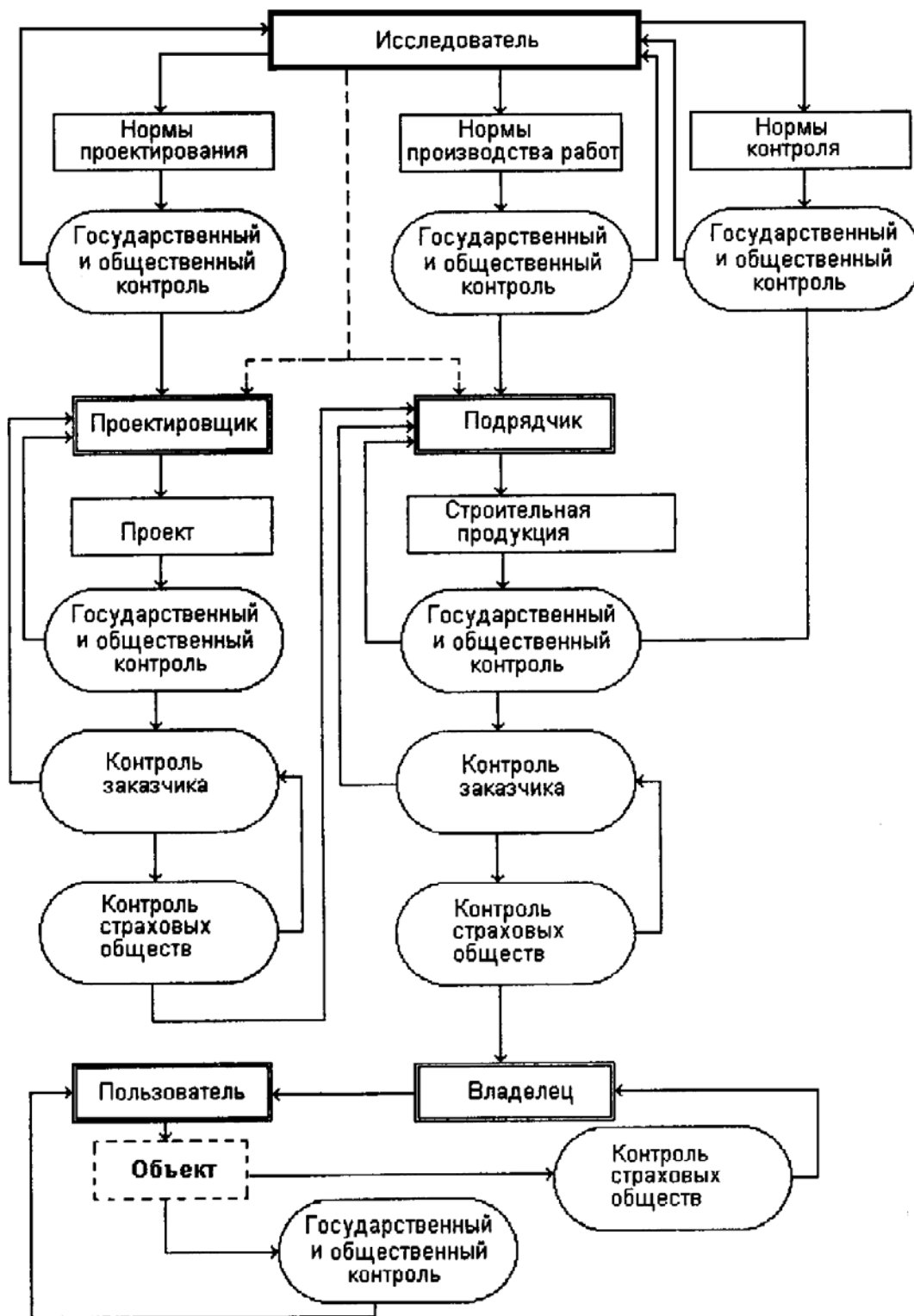
Проектная надежность мостовых конструкций предполагает, что надежность обеспечена, если расчетное значение несущей способности R_p больше, чем расчетное значение усилия в элементе Q_p , т. е. если выполнено условие $R_p > Q_p$.

Теория надежности строительных конструкций, разработанная профессорами Осиповым и Перельмутером, предполагает поддержание надежности при соблюдении следующих требований:

- контроль за изменением технического состояния на различных периодах;
- контроль за повреждаемостью элементов пролетного строения;

- оценка качества работ при монтаже;
- закономерности износа (коррозия, выработка);
- текущий контроль за состоянием пролетного строения (план, профиль);
- оптимальные сроки обследований;
- надежность систем с защитой (окраска).

Ниже приведена блок-схема системы обеспечения надежности.



По результатам обследований металлических пролетных строений можно выразить мнение, что указанная система поддержания надежности пока еще имеет недостатки: текущий контроль за состоянием пролетных строений проводится нерегулярно, износ элементов не регистрируется, окраска элементов выполняется с нарушением установленных сроков.

При оценке живучести пролетного строения следует рассматривать способность конструкции сохранять работоспособность при внезапных изменениях нагрузок, не допуская остаточных деформаций и сохраняя первоначальный вид. Такое состояние может возникнуть в результате аварийных воздействий (землетрясения, наводнения, ураганы) или в результате ошибок персонала. Такими примерами могут быть случаи удаления в процессе эксплуатации мешающих связей или пропуска болтов при монтаже, или дополнительных сварных швов.

В заключение следует отметить, что проблема обеспечения надежности и безопасности мостовых конструкций является актуальной как объектов особой социальной значимости.

Первоочередными задачами в вопросах повышения надежности пролетных строений мостов следует считать:

- разработку комплексной системы управления надежностью на всех этапах строительного процесса (изыскания, проектирование, строительство);
- создание нормативной базы для разработки взаимосвязанной системы критериев принятия решений на различных этапах производственного процесса.

Проблема надежности конструкций пока недостаточно изучена. Нам предстоит еще много потрудиться для того, чтобы обеспечить надежность и безопасность мостов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.410-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 370с.
2. Осипов В. О. Долговечность металлических пролетных строений эксплуатируемых ж. д. мостов. – М.: Транспорт, 1985. – 319 с.
3. Перельмутер А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. – К.: УкрНИИПромстальконструкция, 2000. – 216 с.

Поступила в редколлегию 23.05.2005.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ ДЛЯ РЕМОНТА И ЗАЩИТЫ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Наведено результати досліджень полімерних сумішей на основі епоксидних смол для ремонту і захисту бетонних і залізобетонних споруд. Розроблено моделі, що відображують фізико-механічні і реологічні властивості композита. Проведено аналіз отриманих результатів.

Приведены результаты исследований полимерных составов на основе эпоксидных смол для ремонта и защиты бетонных и железобетонных сооружений. Разработаны модели отражающие физико-механические и реологические свойства композита. Проведен анализ полученных результатов.

The article presents results of studies of epoxy-based polymeric composition of for repair and protection of concrete and reinforced-concrete facilities. Models have been designed, reflecting physical, mechanical and rheological properties of the composite. Analysis of the obtained results has been made.

Известно, что бетонные и железобетонные сооружения под воздействием агрессивных природных и антропогенных факторов разрушаются. Попеременное увлажнение и высыхание, замораживание и оттаивание, механические воздействия льдов, химические и биологические воздействия являются основными причинами разрушения бетона [1–3].

Одним из путей решения этой проблемы является разработка материалов и технологий, направленных как на повышение стойкости вновь создаваемых конструкций и сооружений, так и на восстановление и увеличение ресурса конструкций и сооружений, требующих ремонта.

Строительный рынок сегодня предлагает широкий выбор материалов для защиты бетона – гидроизолирующие покрытия, гидрофобные пропитки, мастики, эмульсии, пасты, полимерные и полимерцементные композиции и т. п. Однако эти материалы имеют высокую стоимость из-за производства их за пределами Украины. Поэтому сегодня особенно актуальным является вопрос создания конкурентоспособных и недорогих ремонтных материалов на базе отечественных производителей.

На первом этапе исследований следовало определиться с материалами и способами ремонта.

Как показал литературный анализ, сегодня при ремонте и защите бетонных и железобетонных сооружений наиболее широко применяют инъектирование, торкретирование и окраску поверхности конструкций полимерными и полимерцементными растворами. Следует отметить, что значительная часть полимерных ремонтных композиций зарубежного производства готовится на основе эпоксидных смол [3–6].

Композиции на основе эпоксидных смол имеют высокие физико-механические и адгези-

онные показатели, стойкие к химическим воздействиям, и не теряют свои свойства при длительном хранении. Однако в Украине из-за недостатка исследований эпоксидные смолы отечественного производства практически не используются.

Нами была поставлена задача – разработать эффективные полимерные растворы на основе эпоксидных смол для ремонта и защиты бетонных и железобетонных сооружений. Для реализации этой задачи в 2004 г. была подана заявка на выделение гранта Президента Украины, в результате чего в конце 2004 г. был подписан договор с Фондом фундаментальных исследований при Министерстве образования и науки Украины.

На первом этапе исследований необходимо было провести анализ влияния микронаполнителя на свойства полимерного композита. Для проведения исследований были выбраны следующие материалы: полимерная эпоксидная смола (ЭД-22), отвердитель – полиэтиленполиамин (ПЭПА), микронаполнитель – пыль газоочистки производства ферросилиция (ПГПФ).

С целью получения максимального количества информации при минимальном количестве лабораторных опытов, был проведен планированный эксперимент. Варьируемые факторы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варьируемые факторы, кг/м³

Уровни	Смола ЭД-22, (X ₁)	Отвердитель ПЭПА, (X ₂)	Микронаполнитель ПГПФ, (X ₃)
–1	300	20	0
0	400	60	400
+1	500	100	800

На основании проведенных экспериментов получены модели, отражающие зависимости прочности образцов на сжатие в возрасте 7, 14 и 28 сут. и времени полимеризации.

За основу поиска моделей, описывающих требуемые зависимости, брался полином следующего вида:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{33}X_3^2 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{123}X_1X_2X_3,$$

где Y – отклик модели; a_i , a_{ij} – коэффициенты при отдельных членах полинома, причем a_0 – свободный член полинома; X_i – варьируемые факторы в кодированном виде.

В табл. 2 приведены коэффициенты полинома, отражающего прочность при сжатии полимерной композиции в возрасте 28 сут., что отражает результаты построения моделей.

Таблица 2

Коэффициенты полинома	
Обозначение	Значение
a_0	2,773
a_1	-0,453
a_2	0,723
a_3	-0,734
a_{11}	0,008
a_{22}	-0,841
a_{33}	0,633
a_{12}	0,799
a_{13}	0,320
a_{23}	0,217
a_{123}	-0,382

Полученные модели позволяют рассчитать состав заданной прочности при сжатии в интервале 20...120 МПа. При этом погрешность составляет 6...10 %.

Установлено, что количество отвердителя и микронаполнителя существенно влияет на изменение физико-механических характеристик полимерной смеси.

Найден оптимальный интервал соотношений между эпоксидным вяжущим, отвердителем и микронаполнителем, что позволяет получить материал с достаточно широким спектром свойств.

Полученные модели можно рассматривать как в отдельности, предъявляя требования к одному свойству полимерной смеси, так и в комплексе. Например, искать состав полимерного композита с минимальным временем полимеризации и, в тоже время, максимальной прочностью.

Разработанные составы можно использовать как для инъектирования, так и для защиты поверхности бетонных и железобетонных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Пшинько А. Н. Подводное бетонирование и ремонт искусственных сооружений: Монография. – Д.: Пороги, 2000. – 411 с.
2. Хаютин Ю. Г. Монолитный бетон: Технология производства работ. – М.: Стройиздат, 1991. – 576 с.
3. Патуров В. В. Полимербетоны / НИИ бетона и железобетона. – М.: Стройиздат, 1987. – 286 с.
4. Treece R. A.; Jirsa J. O. Bond Strength of Epoxy-Coated Reinforcing Bars // ACI Materials Journal. – 1989. – V. 86. – No. 2. – Mar. – Apr. – P. 167–174.
5. Vipulanandan C.; and Dharmarajan N. Analysis of Fracture Parameters of Polymer Concrete // ACI Materials Journal. – 1989. – V. 86. – No. 4. – July-August. – P. 383–393.
6. O'Sell G., Jones J.J. Yield and transient effects during the plastic deformation of solid polymers // Mater.Sci. – 1981. – V.16, № 8. – P. 1956–1974.

Поступила в редколлегию 21.03.2005.

Ю. С. БАРАШ (ДІТ)

ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ЗАЛІЗНИЧНИМ ТРАНСПОРТОМ

Запропоновано п'ять організаційних моделей, за якими можна виконувати структурну реформу залізничного транспорту в різних країнах Європи.

Предложено пять организационных моделей, по которым можно выполнять структурную реформу железнодорожного транспорта в разных странах Европы.

Five organizational models have been proposed that could be used to for implementation of structural reform of railway transport in different countries of Europe.

Вступ

Проблема структурної реформи посідає значне місце в наукових журналах та газетах світу. Цьому питанню присвячено багато статей описового характеру, але наукові праці, що фундаментально досліджують реформування залізничного транспорту та його наслідки, можна зустріти в основному у представників України та Росії.

Проблема структурної реформи дуже складна і стосується тільки країн з ринковою або перехідною економікою, в яких залізничний транспорт став втрачати свої позиції, конкуруючи з іншими видами транспорту.

У країнах Східної Європи і СНД, які переходять чи тільки перешли до ринкової економіки, втрата залізничним транспортом частки на транспортному ринку ще не набула значних масштабів, проте відсутність реальної підтримки з боку держави призвела до значного старіння основних фондів залізниць. Саме проблема старіння основних фондів спонукала адміністрації цих країн шукати необхідні кошти на їх оновлення за рахунок удосконалення менеджменту на залізничному транспорті та часткової приватизації його окремих підрозділів, господарств, або видів перевезень.

Незважаючи на те, що основні положення структурної реформи були розроблені Європейським союзом ще у 1991 році, до сих пір не визначена оптимальна організаційна структура управління залізничним транспортом, доцільність його корпоратизації, організаційно-правова форма нової компанії, форма власності, етапність реформування, взаємовідношення та розподіл функцій.

Постановка задачі

Доктор Ж.-П. Естіваль – президент Європейської асоціації залізничників зробив аналіз [1, с. 68–71] і виділив три види структурних моделей реформування залізничним транспортом, які прийняти серед країн-кандидатів у члени ЄС.

Модель розділення (інституційне розділення операторів інфраструктури і підприємств, що здійснюють залізничні перевезення). Піонером такої моделі є Швеція. Кожну сферу діяльності там здійснює самостійна юридична особа з відокремленим балансом, звітністю і відповідальністю за результати діяльності. Цю модель з відповідною національною адаптацією використано в скандинавських країнах, Великій Британії, Іспанії, Португалії, Франції та Голландії.

Інтеграційна модель. Сфери діяльності (крім управління інфраструктури та надання перевізних послуг) незалежні одна від одної з точки зору управління і мають окремі рахунки та окремий баланс. Але відповідні організаційні структури не є самостійними юридичними особами. Інтегроване підприємство в цьому випадку є єдиною юридичною особою.

На сьогодні ця модель працює в Бельгії та Люксембурзі. До 1997 р. вона діяла у Франції. Для унеможливлення будь-якої дискримінації цим підприємствам необхідно розподіляти надану перевізну оплату та збори за використання залізничної лінії відповідно до директиви 2001/12/ЄС.

Холдингова модель (трансформація в холдинг) є результатом поєднання двох перших моделей. У цьому випадку юридично незалежні суб'єкти діяльності мають свободу дій, але їхні стратегії визначаються організаційною струк-

турою управління холдингу. Цей шлях пройшла Німеччина, а згодом сюди долучились Італія, Австрія та Греція.

Деякі спеціалісти вважають цю модель останньою стадією удосконалення інтеграційної моделі. Інші вбачають у ній початок нового розвитку, який в подальшому має прийти до моделі розділення.

Таким чином, країни-кандидати на членство в ЄС мають три можливості реструктуризації залізниць, аби виконати вимоги ЄС. Навряд чи можливий четвертий шлях. Хоча у будь-якому випадку не виключаються специфічні національні адаптації залізниць до організаційно – правової структури суб'єкта діяльності...».

Результати

На відміну від досліджень [1] в даній роботі запропоновано п'ять організаційних моделей, за якими можна виконувати структурну реформу залізничного транспорту в різних країнах Європи. Додатково запропоновані ще дві нові

моделі, які також використовувалися у європейських країнах у різні часи:

– **модель акціонування** (рис. 1). Ця модель передбачає тільки зміну державної власності на акціонерну. При цьому відбувається відділення функцій управління експлуатаційною діяльністю залізниць від інфраструктури та впровадження обов'язкового розподілу їх доходів та витрат. Реформування структури управління не відбувається.

– **модель виділення** (рис. 2). Юридичне виділення одного з видів перевезень в окрему структуру, яка буде працювати як незалежна компанія-оператор. Інша структура управління залізничним транспортом залишається без змін.

Модель розділення (рис. 3), інтеграційна модель (рис. 4) та холдингова модель (рис. 5) були запропоновані Ж.-П. Естівалем. Таким чином, країни-кандидати на членство в ЄС мають п'ять можливостей реструктуризації залізниць, аби виконати їх вимоги повністю або частково.

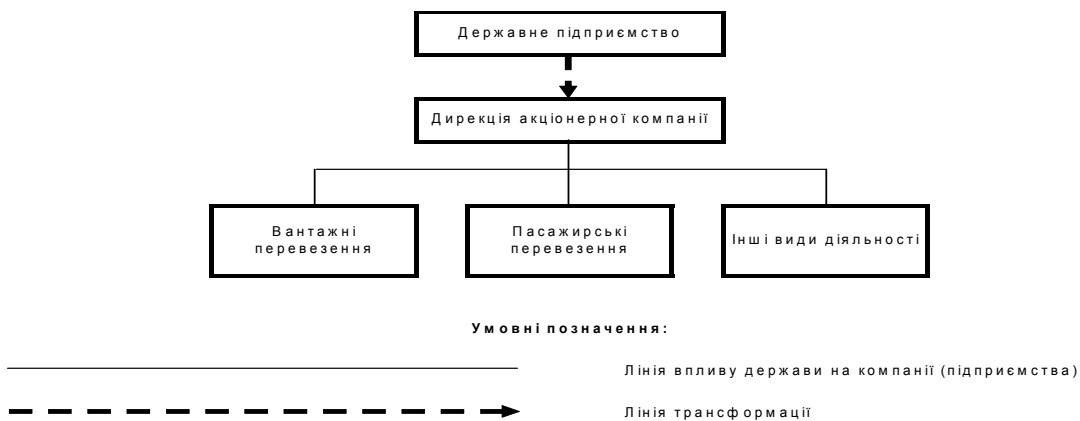


Рис. 1. Модель акціонування

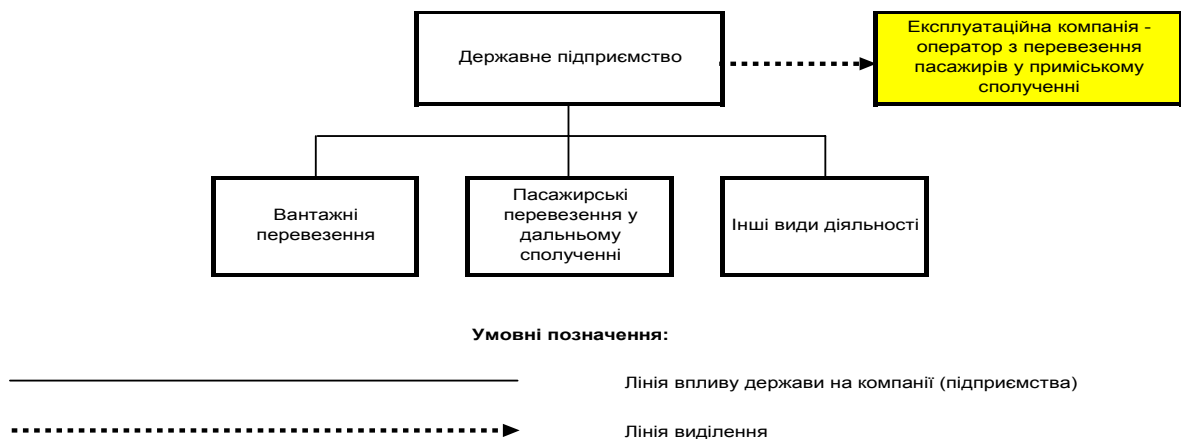


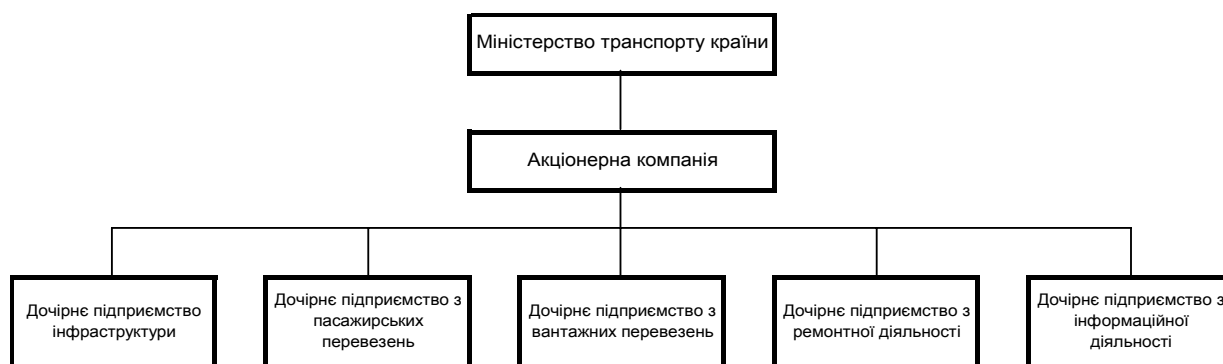
Рис. 2. Модель виділення



Умовні позначення:

Лінія впливу держави на компанії (підприємства)

Рис. 3. Модель розділення



Умовні позначення:

Лінія впливу держави на компанії (підприємства)

Рис. 4. Інтеграційна модель



Умовні позначення:

Лінія впливу держави на компанії (підприємства)

Рис. 5. Холдингова модель

Дослідження [1] показали, що кожна країна Європи вибирає організаційну модель управління залізничним транспортом самостійно, незважаючи на її розмір, довжину залізничних шляхів, політичні погляди урядів, і навіть без необхідного економічного обґрунтування. Але усі без виключення моделі управління залізничним транспортом впроваджувалися шляхом

корпоративної реструктуризації, тобто необхідною передумовою для виконання структурної реформи була корпоратизація у формі акціонерного товариства або холдингової акціонерної компанії.

На підставі сказаного можна виділити такі основні підходи для реалізації нової організаційної моделі управління залізничним транспортом:

1. Замість державної структури утворюється акціонерна компанія, 100 % акцій якої належать державі. На цьому суттєве реформування структури управління залізничним транспортом завершується, а пасажирські та вантажні перевезення залишаються без змін. Фактично відбувається тільки розподіл державних і господарських функцій, а залізниці стають єдиним суб'єктом господарювання – юридичною особою. Одночасно відбувається розподіл доходів та витрат на вантажні і пасажирські перевезення. У 1998 році федеральні залізниці Швейцарії (SBB) стали акціонерним товариством з 100-процентною державною власністю. За цей час вони стали одержувати прибуток, який усе менше залежить від субсидій держави, та збільшили капітал компанії. З точки зору техніки та експлуатаційних показників SBB є однією з найуспішніших залізниць у світі. Високий рівень технічного оснащення обумовлено державними інвестиціями у розвиток інфраструктури та рухомого складу. Керівництво SBB не вважає за необхідне розмежування інфраструктури та перевезень, рахує це недоцільним і висловлює загалом певний скептицизм стосовно приватизації.

2. Залізничний транспорт як державна структура залишається, а з його складу виділяється один з видів перевезень. На його базі утворюється акціонерна компанія або кілька регіональних компаній і досліджуються переваги та недоліки реформ. Такий варіант структурної реформи застосовується в країнах, які не зовсім впевнені в дієздатності та надійності комерційних структур управління на транспорті.

3. Замість державної структури утворюються окремі підприємства – юридичні особи за видами перевезень та діяльності, кожне з котрих має бути юридичною особою з державною формою власності. Піонером такої моделі є Швеція. Потім ці державні підприємства повинні акціонуватися і перетворитися у акціонерні товариства зі 100-процентною державною власністю. Частина державної власності в них поступово буде зменшуватися і може досягнути «0». Для підприємств інфраструктури частка державної власності не може бути менш ніж 50 % +1 акція за вимогами Директиви ЄС 91/440 і не менш 75 % за проектом Закону України «Про приватизацію майна державних акціонерних компаній». Залишити новоутворені структури у державній власності має сенс тільки на початку структурної реформи. Враховуючи те, що Укрзалізниця бракує коштів на оновлення основних фондів та рухомого складу, ці підприємства через деякий термін доцільно реструктурувати і поступово розпочати приватизацію.

4. Замість державної структури утворюється акціонерна компанія у вигляді відкритого акціонерного товариства, що об'єднує майно усіх підприємств залізничного транспорту. Ця модель до 1997 року була реалізована у Франції і на сьогодні працює у Бельгії і Люксембурзі. При цьому Державна акціонерна компанія країни ставиться правонаступником державних залізниць, що входять до її складу як філії (дочірні підприємства) без права утворення юридичної особи. Слід сказати, що існуюче Українське законодавство не допускає утворення дочірніх підприємств у складі ДАК, хоча їх статус є вище ніж філій. Для узгодження цього питання необхідно внести зміни до чинного законодавства.

5. Замість державної структури утворюється акціонерна холдингова компанія, що управляє акціями окремих акціонерних компаній, які організуються на базі окремих підприємств – юридичних осіб. Цей шлях пройшла Німеччина, а потім Італія Австрія та Греція.

6. Замість державної структури утворюється спочатку державна акціонерна компанія, яка через кілька років трансформується у холдингову компанію.

Кожен з цих підходів щодо впровадження структурної реформи має певні переваги та недоліки.

Модель акціонування може використовуватися державами, які задоволені роботою залізничного транспорту і не бажають радикальних змін в його роботі. Вимоги Директиви ЄС країна виконує у мінімальному обсязі: розділення функцій державного та господарського управління; розділення обліку доходів, витрат і прибутків від вантажних і пасажирських перевезень; ліквідація перехресного субсидування пасажирських перевезень за рахунок вантажних. При цьому зберігається стабільна робота залізничного транспорту і не відбувається реструктуризація, яка призводить до зниження рівня соціального захисту робітників. Але головна мета структурної реформи – залучення додаткових коштів для самофінансування роботи та розвитку залізничного транспорту – не досягнута.

Модель виділення використовується країнами, які хочуть реалізувати структурну реформу на транспорті, але не впевнені в отриманні позитивного результату. Ця модель використовується ними, як правило, на першому етапі структурної реформи, а після кількох років сталої роботи піонерної компанії, відбувається подальше реформування транспорту за однією з трьох нижчеописаних моделей.

Модель розділення може використовуватися країнами, які бажають провести структурну реформу в стислі строки і впевнені у плідній співпраці усіх незалежних підприємств, що будуть утворені замість державної структури. При цьому організаційно-правова форма господарювання у цих підприємств може бути різною. Але до недоліків цієї моделі слід віднести відсутність проміжної управлінської структури, яка б координувала господарські функції.

Акціонерна компанія має організаційну структуру, що потребує значно менше змін при реформуванні існуючої структури управління та забезпечує послідовний перехід між ними. Але існуючі залізниці та підприємства при цьому втрачають частину своєї самостійності, оскільки стають структурними підрозділами компанії. Одночасно підвищується роль єдиного суб'єкта господарювання, яким стає державна акціонерна компанія. Більша централізація функцій становить залізниці у рівні умови та запобігає їх нерівномірному розвитку. На сьогодні ця модель працює в Бельгії та Люксембурзі. За цим варіантом у 2003 році відбувся перший етап реформування залізничного транспорту в Росії, тому в подальшому його можна називати «російським».

Акціонерна холдингова компанія, що утворюється замість державної структури, має деякі переваги перед акціонерною компанією:

- Залізниці зберігають відносну самостійність у прийнятті певних рішень та розподілу прибутку;
- Збільшується мотивація до праці, оскільки залізниці можуть розпоряджатися часткою прибутку;
- Створюються умови для залучення приватних інвестицій на другому етапі реформування, тому що інвестори знають куди вкладати кошти та можуть розраховувати на очікувані дивіденди.

У той же час ця організаційна структура, яка впроваджена в Німеччині (подалі німецька модель), Італії, Австрії, Греції, утворюється в основному на другому або третьому етапах реформування після сталої роботи новоутворених структур. Як правило, їй передують організація державної акціонерної компанії.

Деякі інші країни на різних етапах структурної реформи одночасно використовують кілька організаційно-правових форм та моделей управління залежно від швидкості приватизації. Як правило, у цих випадках першою використовується організаційно-правова форма – акціонерна компанія, яка потім трансформується у холдингову компанію.

Україна в свою чергу теоретично обґрунтувала в різні періоди три з п'яти моделей, використовуючи при цьому в основному професійних досвід фахівців-практиків та прогнозуючи економічно-соціальні наслідки структурної реформи. Спочатку (до 2003 року) Укрзалізниця схилялась до холдингової організаційної моделі управління залізничним транспортом, але її впровадження передбачало суттєві зміни на шляху реформування. Потім була зроблена спроба виділення пасажирського господарства в окрему компанію–оператор (науково-дослідна робота [2] березень 2003 року), але після появи заборони на приватизацію окремих основних господарств залізничного транспорту, було взято курс на акціонування залізниць, як цілісного майнового комплексу. Цей варіант (інтеграційна модель) передбачав поступові зміни в структурній реформі. Після створення в жовтні 2003 року відкритого акціонерного товариства «Російські залізниці» та появи у 2004 році науково-дослідної роботи [3], Укрзалізниця схилилась до інтеграційної моделі управління залізничним транспортом.

На вибір оптимальної моделі управління залізничним транспортом та відповідної організаційно-правової форми суб'єкта господарювання впливає ряд чинників:

- збереження залізничного транспорту як єдиного виробничо-технічного комплексу та корпоратизація усіх структур разом;
- збереження державного регулювання та контролю за діяльністю залізничного транспорту;
- збереження стабільності роботи та безпечного функціонування залізничного транспорту;
- збереження соціального захисту працівників залізничного транспорту;
- збереження традицій функціонування залізничного транспорту;
- економічні аспекти структурної реформи;
- питома вага залізничного транспорту в загальних обсягах транспортних перевезень;
- ступінь розвитку ринкових умов;
- швидкість впровадження структурної реформи.

Для України дуже важливим є врахування перших п'яти чинників, що дозволить залізничному транспорту поступово та надійно інтегрувати у єдину європейську та світову транспортні системи, виключивши можливість негативних наслідків структурної реформи. Цим умовам відповідає організаційно-правова форма – акціонерна компанія.

Вибір найкращої моделі реформування залізничного транспорту, а саме, організаційно-правової форми суб'єкта господарювання у значній мірі залежить від економічних наслідків структурної реформи, можливості підвищення рентабельності його роботи в ринкових умовах, можливості залучити додаткові інвестиції для оновлення рухомого складу та інфраструктури залізниць. Радикальне впровадження структурної реформи може негативно вплинути на високі економічні показники, яких досягла Укрзалізниця в останні три роки, та призвести до збоїв у транспортному процесі. За цим чинником доцільно рекомендувати організацію акціонерної компанії

Питома вага, що займає залізничний транспорт України на ринку транспортних послуг, значно більше ніж у європейських країн. Тому темпи структурної реформи в Україні повинні бути прискорені. Такому розвитку подій відповідає акціонерна компанія, яка робить процес реформування не таким радикальним, як при утворенні холдингової компанії.

При виборі організаційно-правової форми обов'язково слід враховувати такий фактор, як традиції розвитку залізничного транспорту, національний менталітет та ступінь розвитку ринкових відносин в Україні та в галузі.

Висновки

На підставі викладеного можна зробити висновки, що для Укрзалізниці на першому та другому етапах реформування доцільно утворити державну акціонерну компанію з більшим обсягом централізації функцій. Це означає, що замість Укрзалізниці як органу управління, до сфери якої входять шість залізниць та спеціалізовані підприємства, буде утворений єдиний суб'єкт господарювання, а залізниці втратять статус юридичної особи. Необхідність організації холдингової компанії на третьому етапі структурної реформи пояснюється однією із головних цілей реформування залізничного транспорту, яка полягає у залученні додаткових інвестицій на оновлення основних фондів та рухомого складу залізниць. Це залучення коштів пов'язано з продажем акцій Державної

акціонерної компанії «Українські залізниці» (ДАК «УЗ»), або частковою приватизацією.

Передбачається, що місцеві органи влади стануть акціонерами компаній-операторів з перевезення пасажирів у приміському сполученні. Але обласні державні адміністрації будуть вкладати кошти тільки на розвиток залізничного транспорту всієї країни. Тому компанія ДАК «УЗ» мусить розробити економічні механізми реального обліку доходів, витрат і прибутку окремих структурних підрозділів залізниць на першому етапі, операторських компаній – дочірніх підприємств на другому етапі структурної реформи.

Після кількох років сталої роботи структурних підрозділів державної акціонерної компанії у якості компаній-операторів та отримання позитивних показників на третьому етапі структурної реформи (початок часткової приватизації) можна буде надати деяким компаніям – операторам статусу юридичної особи.

Вище було наведено п'ять видів моделей та відповідні їм організаційно-правові форми суб'єкту господарювання, зроблено аналіз їх позитивних та негативних рис, але визначення оптимальної моделі управління залізничним транспортом слід виконувати за економічним критерієм.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Естиваль Ж.-П. Організаційні моделі залізниці: національні критерії побудови // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 1. – С. 68–71.
2. Науково-дослідна робота «Розробка техніко – економічного обґрунтування (ТЕО) та програми реформування пасажирського господарства». Номер державної реєстрації № 0103U007781. Східний науковий центр Транспортної Академії України.
3. Науково-дослідна робота «Дослідження перспективної моделі управління залізничним транспортом в ринкових умовах з визначенням оптимальної організаційно-правової форми суб'єкту господарювання». Номер державної реєстрації № 0103U007280. Дніпропетр. нац. ун-т. заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004.

Надійшла до редколегії 23.06.2005.

А. А. КОВТУН (Белорусский государственный университет транспорта)

БИЗНЕС-ПЛАНИРОВАНИЕ И ФИНАНСОВЫЙ SWOT-АНАЛИЗ КАК СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВУЗА

У сучасній, швидко змінній економічній ситуації практично неможливо добитися позитивних результатів, не плануючи своїх дій і не прогнозуючи наслідків на ринку освітніх і інших послуг. Порівняння теоретичних і практико-орієнтованих підходів до організації і управління конкурентоспроможністю на ринку освітніх послуг дозволяє як спосіб підвищення ефективності економічної діяльності вузу запропонувати бізнес-планування фінансово-економічної діяльності на основі методу фінансового SWOT-аналізу і порівняння економічних показників.

В современной, быстро меняющейся экономической ситуации практически невозможно добиться положительных результатов, не планируя своих действий и не прогнозируя последствий на рынке образовательных и иных услуг. Сравнение теоретических и практико-ориентированных подходов к организации и управлению конкурентоспособностью на рынке образовательных услуг позволяет в качестве способа повышения эффективности экономической деятельности вуза предложить бизнес-планирование финансово-экономической деятельности на основе метода финансового SWOT-анализа и сравнения экономических показателей.

In the present-day, quickly changing economical situation it is practically impossible to achieve positive results without planning one's actions and forecasting their consequences on the market of educational and other services. A comparison of theoretical and practical approaches to organization and management of competitiveness on the market of educational services allows to propose business-planning of financial and economic activities on the basis of the method of financial SWOT-analysis and comparison of economic parameters as a way of increasing efficiency of economic activities of a university or college.

Государственный вуз – сложная социально-экономическая система. Целевая его функция многогранна: образование, наука, культура, просвещение, воспитание. Источники содержания многоканальны: бюджеты всех уровней, средства организаций, частные средства граждан. Когда-то единый коллектив вуза расслоился на администрацию, академическое сообщество, студентов и аспирантов, хозяйственно-обслуживающий персонал. Сложны по составу ресурсы – как материальные, так и трудовые; последние сегодня обладают реальным человеческим капиталом и интеллектуальной собственностью.

Государственный вуз представляет собой единое юридическое лицо с одним балансом и консолидированным бюджетом, неделимой собственностью, трудовым коллективом. Это – образовательное учреждение, руководимое ректором на принципах единоначалия и коллегиальности, имеющее общую целевую функцию и общую инфраструктуру, централизованные фонды материально-технического и социального развития, общую территорию, закрепленную за вузом. Вуз по своим обязательствам несет ответственность перед обществом, государством и личностью.

Глубокие социально-экономические и общественно-политические перемены, которые происходят сейчас не только в Беларуси, но и России и Украине, воздействуют и на систему образования. Она не существует сама по себе, а является органической частью общества, которая призвана удовлетворить потребности личности, общества и государства. В существенно меняющихся условиях образование, как важный государственный институт, не может не реагировать на это.

Переход от принципов административно-командной экономики к принципам экономики рыночной поставил вузы совершенно в иные условия. Новые проблемы, появляющиеся в деятельности вузов при трансформации экономической системы, требуют знания методов хозяйствования, рыночных механизмов функционирования вузов и новых механизмов их инвестирования. В первую очередь это касается теоретической базы, определяющей переход к выбору моделей финансирования образования, направленных на расширение возможностей экономического роста.

Эти проблемы относительно мало исследованы в отечественной экономической литературе, но они чрезвычайно актуальны, требуют

изучения и углубленных исследований, особенно в контексте начатых процессов реформирования высшей школы. Большинство руководителей вузов сталкиваются с огромными трудностями при проведении преобразований, а во многих случаях не в состоянии переориентировать свою оперативную деятельность в направлениях, которые могут дать стабильный эффект в будущем. Результатом являются ошибки, которые могут привести к ухудшению экономического состояния вуза.

Необходимость исследования современных подходов к формированию конкурентных стратегий образовательных учреждений и совершенствованию организации финансово-экономической деятельности в вузах, выявление и систематизация основных проблем указанных механизмов, а также разработка мероприятий, направленных на повышение конкурентоспособности вузов на рынках образовательных услуг и труда, обусловили актуальность проблем анализа их финансово-экономической деятельности [1].

Выявление специфических особенностей образовательных услуг, таких, как несохраняемость, неосвязаемость, единство производства и потребления, отдаленность выгоды, позволяет оценить степень влияния и условия формирования конкурентных факторов на рынке образовательных услуг: уровень жизни населения, структуру занятости, темпы развития производственного и непроизводственного секторов.

Эффективная и конкурентоспособная стратегия экономической деятельности вуза должна строиться на сочетании методов научно обоснованного прогнозирования, гибкого планирования и адаптированных к особенностям сферы образования механизмов анализа, базироваться на основании следующих принципов: инноваций, диверсификации, синергетической эффективности и управления качеством.

Разработка стратегии и тактики экономического развития вуза невозможна без анализа финансовых результатов его деятельности, сравнения экономических показателей, характеризующих его финансовое состояние, исследования динамики изменения этих показателей в ту или иную сторону.

В современной и быстро меняющейся экономической ситуации практически невозможно добиться положительных результатов, не планируя свои действия и не прогнозируя последствия на рынке образовательных и иных услуг. Бизнес-план необходим даже в том случае, если привлечение капитала извне организация не планирует, что весьма актуально для учреждений образова-

ния. Поэтому в этом случае речь пойдет о бизнес-плане финансово-экономической деятельности вуза.

Для осуществления своих программ нередко приходится привлекать финансовые средства извне, для чего с помощью бизнес-плана необходимо убедить потенциальных инвесторов в финансовой устойчивости, рентабельности, перспективности вуза. Любому хозяйствующему субъекту, которому для его деятельности необходимы внешние источники финансирования, важно уметь на основе тщательного анализа рыночных и своих возможностей выбирать перспективные и реально осуществимые задачи, привлекательные для потенциального инвестора. Бизнес-план может быть использован и для внесения изменений в руководство вузом.

Объективно говоря, составление бизнес-плана не только мобилизует руководителей на более тщательное изучение своей деятельности, в том числе в процессе воплощения планов, но и делает управление более эффективным. В условиях переходной экономики «подводных камней», действительно, возникает огромное количество и, так или иначе, приходит понимание, что подобное планирование оказывает стабилизирующее влияние на деятельность учреждения образования.

Хорошо разработанный бизнес-план поможет вузу развиваться, завоевывать новые позиции на рынке, где он функционирует, составлять перспективные планы своего развития, концепции оказания новых услуг и выбирать рациональные способы их реализации. То есть в нем описываются основные аспекты будущего вуза, с достаточной полнотой анализируются проблемы, с которыми он столкнется (или не исключено, что столкнется) и самыми современными методами определяются способы решения этих проблем. Таким образом, основная цель бизнес-плана учреждения образования – достижение разумного и выполнимого компромисса между тем, чего оно хочет и чего может достичь.

Бизнес-план не является постоянным документом, он систематически обновляется, в него вносятся изменения, связанные как с переменами, происходящими внутри вуза, так и изменениями на рынке, где действует учреждение образования, и в экономике в целом.

Бизнес-план финансово-экономической деятельности учреждений образования увязывает внутриорганизационный и макроэкономический анализ. В связи с тем, что бизнес-план представляет собой результат исследований и организационной работы, имеющей целью изучение конкретного направления деятельности

вуза на определенном рынке в сложившихся организационно-экономических условиях, он опирается на:

– конкретный проект оказания определенного вида услуг (особенности удовлетворения потребностей и т. д.);

– всесторонний анализ производственно-хозяйственной и коммерческой деятельности, целью которого является выделение его слабых и сильных сторон, специфики и отличий от других вузов;

– изучение конкретных финансовых, технико-экономических и организационных механизмов, используемых в экономике для реализации конкретных задач.

Для разработки стратегии развития учреждения образования создается развернутый бизнес-план. При его подготовке необходимо решить какая цель (или цели) преследуется. Необходимо сформулировать эту цель в письменном виде. Цели бизнес-плана могут быть различными, например, получение кредита или привлечение инвестиций, определение направлений и ориентиров для самого вуза в мире бизнеса и т. д.

Особенностью бизнес-плана как стратегического документа является его сбалансированность по постановке задач с учетом реальных финансовых возможностей учреждения. Чтобы бизнес-план был принят, он должен быть обеспечен необходимыми финансовыми ресурсами. Это в значительной мере определяет характер проектов (концепций), которые изучаются при разработке бизнес-плана. Включение самого проекта в бизнес-план становится возможным лишь в том случае, если определены источники его финансирования.

Таким образом, бизнес-план используется независимо от профиля, масштабов, собственности и прочих условий функционирования учреждения. В любом случае решаются как внутренние, связанные с управлением, так и внешние вопросы, обусловленные установлением контактов и взаимоотношений с другими организациями и предприятиями [3].

Структура бизнес-плана учреждения образования выглядит следующим образом:

I. Титульный лист.

1. Название и адрес образовательного учреждения.

2. Суть предлагаемого проекта: его цели и потенциальная эффективность.

II. Услуги.

1. Описание предлагаемых услуг и их предназначение.

2. Потенциальные потребители услуг.

3. Основные конкуренты.

4. Структура услуг конкурентов (основные качественные характеристики).

5. Ценовая политика конкурентов.

6. Выгоды, получаемые потребителями услуг вуза.

7. Реалистическая оценка преимуществ услуг вуза на рынке.

8. Оценка спроса на услуги.

9. Возможная цена предлагаемой вузом услуги.

III. План маркетинга

1. Предлагаемая система реализации услуг.

2. Определение «рыночной ниши», реклама.

3. Структура цены.

4. Возможные дополнительные льготы потребителям услуг.

IV. Производственная программа

1. Место осуществления услуги.

2. Оценка месторасположения вуза: близость к потребителям услуг, транспортная (пешеходная) доступность и т. д.

3. Анализ целесообразности кооперации с другим образовательным учреждением (организацией).

4. Методы и стандарты контроля качества услуг.

5. Возможности использования инновационных технологий и их описание.

6. Предполагаемые издержки при оказании услуг и их возможная динамика.

V. Организационный план

1. Организационная схема управления.

2. Перечень имеющихся специалистов (их квалификация, функциональные обязанности, опыт работы, права и полномочия, достоинства и недостатки).

3. Форма привлечения специалистов к участию в оказании образовательных услуг (постоянная работа в школе, совместительство и пр.).

4. Предполагаемый уровень и формы оплаты труда, включая дополнительные материальные и социальные льготы.

5. Кадровая политика (принципы найма: трудовые договора, гражданско-правовые договора, испытательный срок и пр.).

VI. Оценка риска.

Перечень возможных рисков:

а) отношение местных властей (возможность введения ими дополнительных ограничений, осложняющих организацию платных образовательных услуг);

б) наличие альтернативных услуг у конкурентов;

в) неустойчивость спроса на услуги;

г) платежеспособность потребителей;

д) трудности с набором квалифицированных преподавателей и др.

VII. Финансовый план

1. Источники финансирования вуза.

2. Распределение денежных доходов, прибыли, создание финансовых ресурсов, обеспечение роста прибыли, повышение рентабельности, выполнение финансовых обязательств перед бюджетом, банками, поставщиками, других обязательств.

3. Условия привлечения финансовых средств.

4. Налоговые последствия предоставления образовательных услуг (перечень видов налогов, ставки налогов, сроки их уплаты, имеющиеся льготы).

5. Финансовый план обобщает все предыдущие разделы в стоимостном выражении и содержит проектные данные о финансовых потоках, размерах инвестиций, объемах продаж, сведения об источниках финансирования и назначении используемых средств, сроке окупаемости инвестиций, издержках производства и обращения, о процентном соотношении доходов и расходов, использовании собственных и заемных средств.

Сравнение теоретических и практико-ориентированных подходов к организации и управлению конкурентоспособностью на рынке образовательных услуг позволяет в качестве способа повышения эффективности экономической деятельности вуза предложить бизнес-планирование финансово-экономической деятельности на основе метода финансового SWOT-анализа и сравнения экономических показателей.

Методика комплексного финансового SWOT-анализа деятельности вуза и сравнения экономических показателей отличается возможностью определять основные направления оценки деятельности вуза и его конкурентоспособности; положение на рынке образовательных услуг; привлекательность и стабильность отрасли, в которой функционирует вуз. С помощью методики можно прогнозировать уровень экономической безопасности вуза и планировать мероприятия по противостоянию влиянию экономических угроз (внутренних и внешних) при формировании стратегии развития вуза. SWOT – это акроним слов Strengths (силы), Weaknesses (слабости), Opportunities (благоприятные возможности) и Threats (угрозы). Методология SWOT-анализа предполагает, во-первых, выявление внутренних сильных и слабых сторон вуза, а также внешних возможностей и угроз и, во-вторых, установление связей между ними.

При формировании стратегической перспективы образовательного учреждения особенно значимы сильные стороны, так как они

являются основами стратегии и на них должно строиться достижение конкурентных преимуществ. В то же время хорошая стратегия требует вмешательства в слабые стороны. Это важно для формирования стратегии, так как уникальные возможности дают образовательному учреждению шанс использовать рыночные благоприятные обстоятельства; создают конкурентные преимущества на рынке; потенциально могут быть краеугольными камнями стратегии. Таким образом, использование методики позволит вузам накапливать свои конкурентные сильные стороны и защищать свои конкурентные слабости.

Методика финансового SWOT-анализа деятельности учреждения образования включает несколько этапов исследования [2]:

Первый этап: выбор объекта, цели исследования и постановка задачи.

Цель – анализ хозяйственного и финансового состояния вуза, оценка экономических показателей деятельности, динамика их изменения.

Постановка задачи – выявление резервов для снижения издержек и повышения эффективности внебюджетной деятельности вуза.

Второй этап: выбор основных показателей работы вуза.

Третий этап: определение источников информации, каковыми являются данные финансового учета, аналитического учета и статистического учета.

Четвертый этап: непосредственный финансовый SWOT-анализ деятельности вуза. Анализ деятельности вуза включает оценку финансовой силы вуза, конкурентоспособности вуза и его положения на рынке, привлекательности отрасли, стабильности отрасли, в которой функционирует вуз.

Оценка финансовой силы вуза включает:

- анализ динамики финансирования деятельности вуза из республиканского бюджета;
- оценка источников поступлений средств;
- анализ платежеспособности и финансовой устойчивости вуза;
- анализ имущественного состояния исследуемого объекта;
- анализ показателей прибыли, доходов вуза от осуществления внебюджетной деятельности;
- анализ ежегодных расходов на содержание вуза;
- анализ рентабельности капитала вуза.

Для анализа конкурентоспособности вуза и его положения на рынке исследуется:

- состояние и емкость рынка;
- структура услуг вуза;
- способность к осуществлению маркетинга;

- возможность воздействия на уровень цен и затрат;
- связи с потребителями услуг вуза;
- рентабельность оказываемых услуг.

При анализе привлекательности отрасли дается характеристика конкурентов, структура их услуг и ценовая политика, исследуется зависимость развития отрасли от конъюнктуры, анализируется общественная привлекательность оказываемых услуг, их востребованность, а также реалистическая оценка преимуществ оказываемых услуг на рынке и стабильность прибыли.

Анализ стабильности отрасли, в которой функционирует вуз, включает оценку степени инновационности, качества, привлекательности оказываемых услуг; оценку степени развития информационных услуг в отрасли; оценку уровня конкуренции; оценку возможных рисков; оценку стабильности рентабельности.

Пятый этап: определение наиболее сильных и слабых сторон внебюджетной деятельности вуза и ее видов на основе полученных результатов.

Шестой этап: Формирование стратегии вуза, которая включает два подхода:

- направленный изнутри вуза вовне – SWOT;
- направленный извне вуза вовнутрь – TOWS.

По результатам анализа после проведения группировки внешних и внутренних факторов по двум их характеристикам, например, по позитивности и негативности, получают следующие совокупности:

- внутренние факторы, которые позитивным образом свидетельствуют о сильных сторонах данного вуза;

- внутренние факторы, которые негативным образом связаны со слабыми сторонами вуза;
- внешние факторы, которые позитивным образом представляют шансы и возможности вуза;
- внешние факторы, которые негативным образом свидетельствуют о возможных угрозах для вуза.

Проводить данный анализ удобно и эффективно в виде бизнес-плана, который будет служить основой для принятия управленческих решений на уровне руководства вуза. С учетом результатов анализа осуществляется планирование показателей финансовых результатов и экономических показателей, что также отражается в бизнес-плане финансово-экономической деятельности вуза.

Таким образом, полученный при соединении инструментов и методов бизнес-планирования и SWOT-анализа механизм представляется весьма эффективным для анализа финансово-экономической деятельности и сравнения экономических показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзякова О. Н. Рынок образовательных услуг и его анализ / О. Н. Арзякова, Е. В. Морозов // Советник бухгалтера в сфере образования и науки. – 2001. – № 3. – С. 44–47.
2. Бычкова Г. М. Инновационный механизм повышения эффективности высшего образования в Беларуси. – Минск: Право и экономика, 2004. – 219 с.
3. Хрипач В. Я. Экономика предприятия / В. Я. Хрипач, Г. З. Суша, Г. К. Оноприенко; Под ред. В. Я. Хрипача. – Мн.: Экономпресс. 2000. – 464 с.

Поступила в редколлегию 07.07.2005.

ДЕЯКІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ЗАЛІЗНИЦЬ КИТАЮ

Запропоновано аналіз основних напрямків розвитку і реформування системи управління залізницями Китаю.

Предложен анализ основных направлений развития и реформирования системы управления железными дорогами Китая.

The article presents analysis of basic directions of development and reformation of railways control system in China.

Вступ

Глобалізація економіки різко підвищує значення транспорту як необхідної умови для розвитку виробничих і культурних зв'язків будь-якої держави. Китай показує приклад активної регіональної економічної політики, докладає зусиль не тільки для відбудови транспортної мережі периферійних регіонів, але й створює умови для реалізації транспортного транзитного коридору «Європа-Азія» переважно по території своєї держави.

Постановка задачі

Аналіз темпів розвитку і реформування системи управління залізницями Китаю.

Результати

Економіка Китаю переживає унікальний для світової економіки підйом, який триває вже практично 20 років і, вірогідно, збережеться впродовж наступних 10 років. Темпи зростання виробництва в 2–3 рази перевищують середньосвітові показники. Такий швидкий темп зростання економіки супроводжується відповідним ростом інфраструктури, і, в першу чергу – енергетики і транспорту.

Китай динамічно розвиває всі види транспорту, в тому числі і залізничного. Темпи зростання мережі залізниць є самими високими в світі і нагадують темпи епохи будівництва залізниць в Європі та США у другій половині XIX ст. Якщо такі темпи будуть збережені в найближчому десятиріччі, мережа залізниць Китаю за своєю протяжністю випередить російську і посяде друге місце після США. Протяжність мережі залізниць деяких країн світу станом на 1999 рік наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Країна	Протяжність мережі, тис. км	Країна	Протяжність мережі, тис. км
США	225,7	Мексика	31,0
Росія	149,0	Бразилія	30,5
Китай	67,5	Японія	23,7
Індія	62,9	Польща	23,4
Німеччина	40,8	Україна	22,3
Канада	36,1	ПАР	21,4
Австралія	33,8	Італія	19,4
Аргентина	33,7	Великобританія	16,9
Франція	31,9	Казахстан	14,4

Слід зауважити, що в період з 1987 по 2002 рр. протяжність мережі державних залізниць Китаю збільшилась на 333 км. Крім державних (70 тис. км) Китай має також провінційні (18 тис. км), промислові (20 тис. км) та лісові (11 тис. км) залізниці. Динаміка протяжності мережі державних залізниць Китаю наведена в табл. 2.

Таблиця 2

Рік	Протяжність мережі, км	Рік	Протяжність мережі, км
1911	9 565	1980	49 900
1931	14 802	1985	52 100
1935	15 725	1987	52 600
1945	25 446	1990	53 378
1949	21 810	1994	53 991
1950	21 740	1995	62 615
1953	22 676	1997	66 000
1957	29 862	1998	66 400
1958	31 193	1999	67 400
1969	39 311	2000	67 500
1971	40 121	2002	70 000
1975	46 000	2005 (план)	75 000

Були побудовані та введені в експлуатацію біля 20 тис. км нових залізниць. Серед них можна виділити магістраль «Північ»–«Південь» (Изинь-Изю) від Пекіна до Тзанчжоу, вугільно-експортні магістралі із вугільного басейну провінцій Шаньсі-Шеньсі в морські порти, нові лінії із внутрішнього Китаю для відбудови периферійних районів.

Будівництво залізниць в Китаї було розпочато наприкінці ХІХ – на початку ХХ ст. У 1881 р. була побудована залізниця для виводу вугілля в Тянь-Шань, що мала стандартну європейську колію (1 435 мм). У 1895 р. територія Китаю була поділена на сфери економічного впливу могутніх держав: Німеччині відійшов півострів Шаньдун, Великобританії і Франції – центральні та східні регіони, Росії – північно-східні (Манчжурія), США – південно-східні, Франції – південно-західні. Кожна з цих країн прагнула до економічної колонізації цих регіонів за рахунок побудови власних експортно-імпорتنих залізниць від морських портів у глибини території.

Багато іноземних компаній отримали від китайського уряду концесії на будівництво таких залізниць. Росія стала будувати Китайсько-Східну залізницю (КВЖД) з російською колією (1 524 мм). Франція – лінію з Індокитаю в провінцію Юньнань з метровою колією (1 000 мм), а інші компанії (британські, американські, німецькі і бельгійські) – із стандартною Європейською колією (1 435 мм). Таким чином, к 1925 р. на території Китаю існувала різноколійна мережа – в центральній та східній його частині переважала стандартна колія, на північному сході – широка, а крайньому південному заході, а також в провінції Шаньсі (залізниця Ченгтай) – метрова колія.

У теперішній ЧАР усі магістральні і регіональні залізниці Китаю мають стандартну європейську колію 1 435 мм, і тільки ряд вугільних (головним чином в провінціях Шаньсі і Хенань) та лісовозних залізниць (переважно в Манчжурії і на півдні) місцевого значення побудовані в 50–60-ті рр. ХХ ст., – вузьку колію з 1 000 або 762 мм.

Тривалий час практично всі залізниці Китаю були одноколійними. Великого розмаху набуло будівництво других колій в 1987–2001 рр. Зараз практично третина всіх державних залізниць має дві колії загальною довжиною 21 тис. км.

Стосовно електрифікації, слід зазначити, що до середини 70-х років було електрифіковано дві лінії протяжністю 30 км, у теперішній час електрифіковані 20 з всіх державних залізниць.

Про надзвичайно швидкі темпи розвитку залізничного транспорту також свідчать факти будівництва мостів, залізничних тунелів, будівництво швидкісних магістралей для вантажних і пасажирських поїздів паралельно існуючим лініям.

Протяжність мережі державних залізниць збільшилась з 52 тис. км у 1985 р. до 70 тис. км у 2002 р.

Але для Китаю цього мало. Протяжність залізниць повинна складати не менш як 125 тис. км, охоплюючи південь та південно-східні регіони держави. Необхідно також підвищити і частку двоколієвих та електрифікованих ліній.

Водночас, нова політика залізниць Китаю передбачає разом із заходами технічного переозброєння, і реформуванню структури управління залізничним транспортом.

Для вирішення численних проблем, пов'язаних з функціонуванням існуючої мережі, Міністерство залізниць Китаю сформулювало кілька варіантів їх реформування. Як базова прийнята модель відділення функцій управління інфраструктури залізниць від експлуатаційної діяльності (рисунок). Цей принцип означає, що інфраструктура національної мережі залізниць, природна монополія, залишається під контролем уряду, а перевезення пасажирів і вантажів будуть виконуватись компаніями операторів.

Запропоновано утворити компанію інфраструктури національних залізниць та кілька вантажних і пасажирських компаній, діяльність яких зорієнтована на роботу на ринку транспортних послуг. Національна компанія інфраструктури, що заснована Державною радою, є суб'єктом макрорегулювання і буде займатись реалізацією транспортної політики держави при відповідному фінансуванні з її боку. Доходи компанії інфраструктури формуються за рахунок коштів, які сплачують компанії оператори, за використання пропускнуої спроможності мережі. Отримані доходи компанія мусить направляти у фонди фінансування будівництва нових об'єктів та на поточне утримання інфраструктури залізниць.

Уряд з свого боку повинен розробити правила надання субсидій за збитковий перевезення. Розмір плати за використання інфраструктури погоджується на рівні уряду.

Компанії-оператори, одержуючи доходи від пасажирських та вантажних перевезень, повинні сплачувати послуги інфраструктури та інших організацій, які забезпечують транспортні процеси.

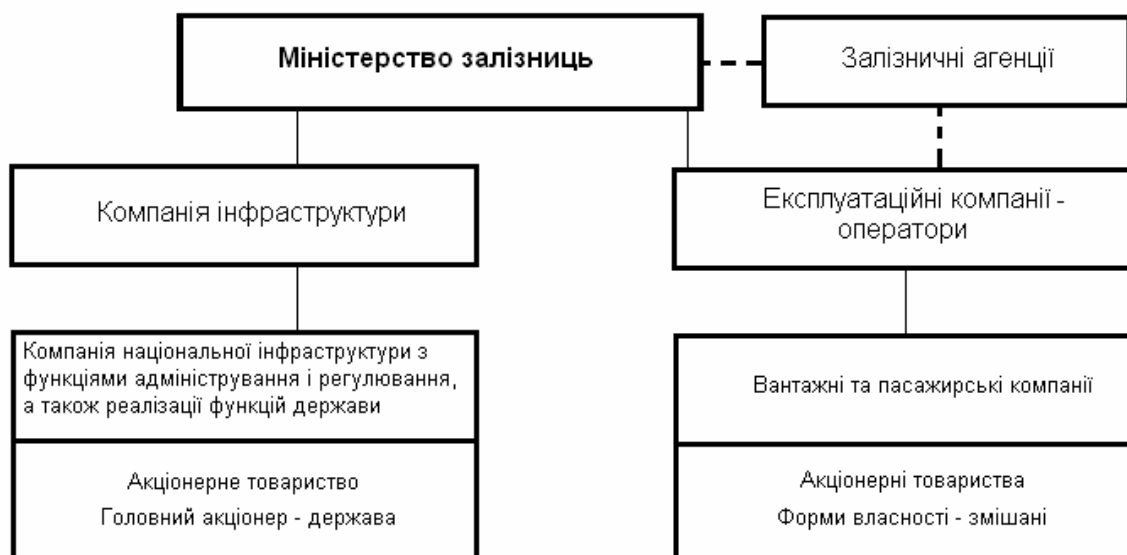


Рис.

У цієї моделі реформування компанії національної інфраструктури надано право розпоряджатися та управляти державним майном, яке передано у статутний фонд акціонерного товариства, і виконувати функції адміністрування та регулювання діяльності залізниць, а також функції держави з підтримки розвитку залізничного транспорту. Інакше можна сказати, що у Китаї бажають зробити спочатку розподіл функцій, вивести експлуатаційні компанії-оператори з під влади держави, а інфраструктуру всіх залізниць об'єднати у одну національну компанію із 100 % державним капіталом разом з керівною державною структурою та делегувати їй частину управлінських функцій.

Поступово владні структури, що знаходяться на рівні уряду, почнуть перетворюватися у залізничні агенції (див. пунктиром на рисунку). Основною функцією цих агенцій буде макрорегулювання та адміністрування діяльності залізничної промисловості, формування планів та політики його розвитку, розробка стандартів, моніторинг питань безпеки руху поїздів, розробка правил виходу на ринок транспортних послуг та роботи на ньому.

Китай бажає виконати реформування структури управління залізничним транспортом поетапно:

- спочатку виділити з діючої структури управління нетранспортні підприємства, соціальну сферу, установи освіти, медичні заклади, науково-дослідні інститути та ін.;

- потім виділити усі транспортні підприємства та підрозділи, які займають експлуатацією і плановими видами ремонту рухомого складу та організувати нові компанії-оператори. Утворити національну компанію інфраструктури, яка об'єднає інфраструктуру усіх залізниць разом з державною управлінською структурою в акціонерне товариство та наділити її відповідними повноваженнями держави;

- після декількох років функціонування такої структури управління міністерство залізничного транспорту трансформується у залізничні агенції, які більш пристосовані до ринкових умов.

Слід зазначити, що процесу реформування структури управління передусе робота з реконструкції мережі, моніторингу технічного стану рухомого складу та інші.

Висновки

Інтенсивний розвиток мережі залізниць за останні 15 років не тільки поширив мережу, але й поряд з цим удосконалив структуру мережі залізниць.

Прийнятий Міністерством залізниць Китаю план поетапного реформування структури управління залізничним транспортом також сприяє виходу залізничної галузі на рівень, що відповідає економічній ситуації в державі і на залізницях.

Надійшла до редколегії 07.07.2005.

АНАЛІЗ БЕЗЗБИТКОВОСТІ ВИРОБНИЦТВА ПІДПРИЄМСТВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Аналіз беззбитковості побудований на підставі розподілу витрат на змінні та постійні. Найбільш сприятливим для цього є метод маржинального доходу. Пропонується використовувати маржинальний підхід обліку витрат для оперативного управління, ціноутворення, моделювання ситуацій зі спецзамовленнями.

Анализ безубыточности построен на основе распределения расходов на переменные и постоянные. Наиболее приемлемым для этого является метод маржинального дохода. Предлагается использовать маржинальный подход учета затрат для оперативного управления, ценообразования, моделирования ситуаций со спецзаказами.

The break-even analysis is built on the basis of splitting the costs into variables and permanent. For this purpose the method of marginal income is seen the most acceptable. It is suggested to use marginal approach of costs account for operative management, pricing and simulation of situations with special orders.

Робота в умовах ринкової економіки потребує від організацій всіх форм власності і галузей народного господарства, в т. ч. і від залізниць, невинного підвищення ефективності діяльності і конкурентоспроможності продукції та послуг. Сучасний період розвитку економіки України характеризується глибокими змінами у всіх сферах, що суттєво впливає на систему управління. Так розвиток процесів приватизації, відокремлення підприємств різних форм власності, застосування механізмів вільного ціноутворення визначили потребу в наданні своєчасної інформації, з одного боку, менеджерам підприємства для виробітки управлінських рішень і для оцінки результатів таких рішень, з іншого боку, інвесторам, акціонерам або комерційним банкам, що вже проінвестували або збираються інвестувати свій капітал у діяльність підприємства.

Важлива роль в вирішенні завдання підвищення ефективності належить економічному аналізу господарської діяльності, за допомогою якого виробляється стратегія і тактика розвитку підприємства, обґрунтовуються плани і управлінські рішення, виявляються резерви підвищення ефективності. Економічному аналізу надавалось велике значення і в період централізованої планової економіки, але в сучасних умовах важливість його значно зростає і потребує пошуку нових форм і методів аналізу різноманітних показників діяльності.

Одне з провідних місць належить аналізу фінансових результатів, бо в них відображуються всі сторони роботи підприємства. Для менеджера це і цільова функція, і кінцевий результат діяльності організації. І тут практичний інтерес становить використання для цих цілей методик, що ви-

користовуються в країнах з розвинутою ринковою економікою, та їх адаптація до умов українських залізниць. До них належить методика маржинального аналізу, що базується на обліку і розподілі витрат на змінні і постійні.

Економічна діяльність підприємства залежить не тільки і не стільки від наявних речовинних і особистих факторів виробництва, як від ступеня використання факторів виробництва в умовах ринку. Володіючи визначеним техніко-економічним потенціалом, який можна змоделювати за допомогою кількісних і якісних показників, підприємство використовує його для одержання прибутку. Тому першочерговим завданням керівників підприємства є розробка таких управлінських рішень, що сприяли б отриманню підприємством максимального прибутку.

Зміст діяльності підприємства залізничного транспорту полягає в пошуку обґрунтованих господарських рішень, при яких досягається максимум результатів або мінімум витрат. Правильно буде так – максимум результатів за умови, що витрати не перевищують певної величини. Або мінімум витрат за умови, що результати не менше заданої величини.

При вирішенні цілого ряду практичних задач як критерій оптимальності прийнятий мінімум витрат на виробництво. Як правило, мова йде про валові (загальні) витрати, що становить сукупність постійних і перемінних. Оцінка витрат у процесі ціноутворення є одним з найважливіших етапів управління, що сприяє прийняттю оптимальних рішень. Управлінський облік дозволяє безупинно аналізувати поведінку витрат і періодично визначати розмір можливого прибутку.

Управлінські моделі, засновані на співвідношенні витрат, обсягу виробництва, прибутку, трактуються іноді як аналіз критичної точки або точки беззбитковості. Аналіз беззбитковості побудований на основі розподілу витрат на змінні та постійні, а також розрахунку точки беззбитковості, яка визначає критичний обсяг реалізації. Точка беззбитковості – це обсяг діяльності, при якому доходи підприємства дорівнюють його витратам, відповідно прибуток дорівнює нулю. Для її обчислення можна використовувати три методи: рівняння, маржинального доходу, графічного зображення.

На питомий маржинальний дохід і на точку перелому впливає змінення змінних витрат. Що стосується постійних витрат, то вони не статичні від року до року. Постійні витрати є константою тільки стосовно даного рівня діяльності у даний період часу. Тому що підприємства рідко досягають 100 %-го використання потужностей, то і планувати витрати треба з урахуванням нормальної (фактичної) потужності. В іншому разі з'являться так звані непередбачені втрати в розрахунку на одиницю виробленої продукції, виконаних робіт, послуг.

Аналіз співвідношення «витрати–обсяг–прибуток» – це системне дослідження взаємозв'язку витрат, обсягу реалізації та прибутку підприємства з метою визначення: обсягу реалізації, який забезпечує відшкодування витрат та отримання бажаного прибутку; величини прибутку при певному обсязі реалізації; впливу змін витрат, обсягу та ціни реалізації на прибуток підприємства; оптимальної структури витрат.

При маржинальному підході загальна сума постійних витрат показується відособлено, до моменту визначення суми чистого прибутку. Це «висвітлення» загальної суми постійних витрат допомагає зосередити увагу на поводженні постійних витрат і контролювати відповідність виконання довгострокових і короткострокових планів. Слід зазначити, що розходження в поведінці постійних і змінних витрат є підставою прийняття багатьох рішень.

Відзначимо, що маржинальний дохід – це різниця між виторгом і всіма змінними витратами, включаючи виробничі й адміністративні. На відміну від нього показник «валова маржа» (валовий прибуток) обчислюється як різниця між виторгом і виробничою собівартістю реалізованої продукції (включаючи постійні непрямі виробничі витрати). Таким чином, величина маржинального доходу і валової маржі завжди різні. Маржинальний дохід може бути поданий як підсумкова сума прибутку або як сума при-

бутку, що припадає на одиницю цінностей, або як рівень процентного відношення до виторгу.

Маржинальний дохід лежить в основі управлінських рішень, пов'язаних зі скороченням виробництва (продукції). У межах короткострокового періоду, якщо продукт приносить доходу більше, ніж змінні витрати на нього, він сприяє зростанню прибутку. Ця інформація може бути оцінена миттєво, якщо використовується маржинальний підхід.

Маржинальний дохід може бути використаний при виборі альтернативних методів, що можуть виникнути при визначенні розміру зниження ціни, проведенні спеціальних рекламних компаній, використанні систем, що стимулюють обсяг реалізації. Зазвичай високий рівень маржинального доходу служить стимулом до підвищення потенційного чистого доходу від реалізації. Зниження рівня свідчить про необхідність збільшення обсягу продажів, щоб покрити додаткові витрати по стимулюванню реалізації.

Коли очікуваний питомий прибуток розрахований, його загальний розмір може бути швидко визначений підрахунком числа одиниць, які необхідно продати. Для цього ділять суму постійних витрат і очікуваного прибутку на питомий маржинальний дохід.

Рішення приймаються для того, щоб визначити, використання яких матеріалів або машин забезпечить найбільш високий прибуток. Маржинальний підхід надає дані для виявлення продукції, що дає найбільший дохід.

Аналіз взаємозв'язку «витрати–обсяг–прибуток» може бути здійснений за допомогою графіків: беззбитковості, взаємозв'язку «прибуток–обсяг», маржинального доходу.

На графіку беззбитковості по осі абсцис відображають обсяг діяльності або відсоток використання виробничої потужності. По осі ординат відображають витрати та дохід від реалізації. Точка перетину лінії загальних витрат та лінії доходу від реалізації і є точкою беззбитковості.

Графік взаємозв'язку «прибуток–обсяг» показує залежність прибутку від обсягу реалізації в натуральних або грошових одиницях.

На графіку маржинального доходу, на відміну від графіку беззбитковості, спочатку проводиться лінія змінних витрат, до якої потім додаються постійні витрати. Це дає можливість показати величину маржинального доходу, зона якого знаходиться між лініями доходу від реалізації та змінних витрат.

Побудуємо графік маржинального доходу на прикладі підсобно-допоміжних підприємств залізниці (рис.).

Графік дозволяє швидко провести порівняння впливу на прибуток альтернативних варіантів цін, перемінних витрат при зміні обсягу продажів.

Зважаючи на те, що підприємства підсобно-допоміжної діяльності залізниць випускають продукцію різного асортименту, то варто роз-

глянути реалізаційний кошук підприємства. Якщо поміняти структуру реалізаційного кошика, то можна досягти розмірів заданого ви- торгу. Однак вплив на прибуток цих зрушень буде залежати від того, убік високо- або низь- корентабельної продукції відбулася зміна пер- вісної структури.

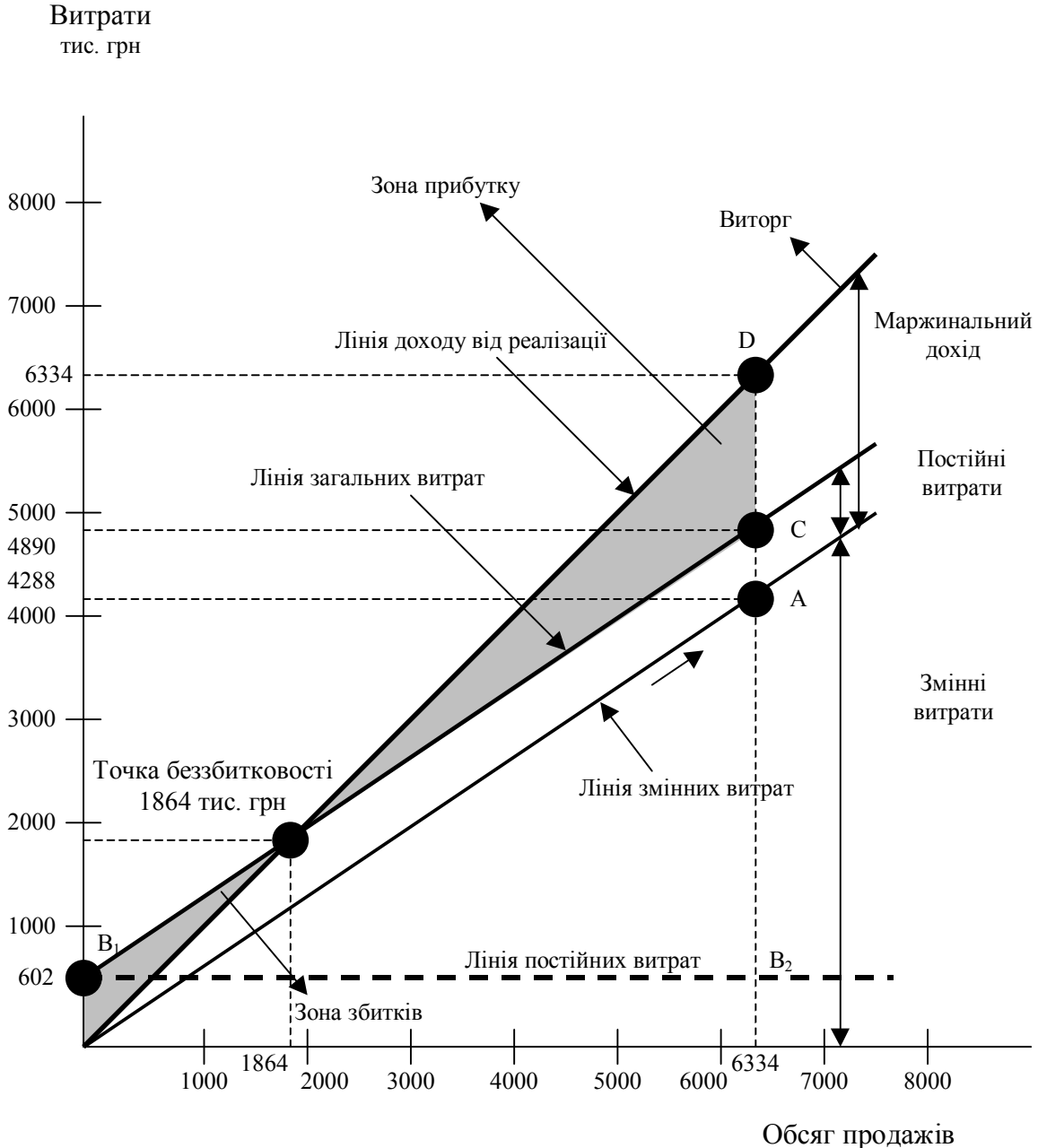


Рис. Графік маржинального доходу

Аналіз цих зрушень часто вносить ясність у причини відхилення фактичного прибутку від запланованого.

Маржинальний підхід доцільно застосовувати і в ціноутворенні. По-перше, тому що маржинальний підхід надає детальнішу інформацію, відділяючи змінні і постійні витрати. По-друге, з ним легко зіставляти поведінку прибу-

тку, витрат і обсягу, отже, встановлювати розумну ціну при різних обсягах виробництва. Такий підхід до формування ціни дозволяє моделювати її в різноманітних ситуаціях. При маржинальному підході розрахунок починається зі змінних витрат. Може бути застосований коефіцієнт відношення прибутку до змінних витрат у цілому і по окремій продукції. По-третє,

маржинальний підхід зручно використовувати для моделювання ситуацій зі спецзамовленнями. За цим методом сама система постійно постачає необхідну інформацію.

Відзначимо також, що роль обліку в ухваленні «спеціальних» рішень залежить від кваліфікації експерта-аналітика. Менеджерам повинна надаватись релевантна інформація, що є орієнтиром під час прийняття рішення. Виділення релевантної інформації і використання маржинального підходу для аналізу витрат стає основою прийняття багатьох рішень. Якщо менеджер будує довгострокову модель, то всі минулі витрати його не цікавлять, бо вони нерелевантні.

Таким чином, ринкові відношення потребують нового підходу до прийняття управлінських рішень. Залізничний транспорт як одна з найбільш значимих і впливових галузей економіки країни повинен орієнтуватися на сучасні, широко застосовувані за кордоном, методи обліку, збору і аналізу інформації. Маржинальний

підхід дозволяє дослідити і кількісно виміряти не тільки безпосередні, а й опосередковані зв'язки і залежності. Це дуже важливо для залізниць, де особливо велика вага умовно-постійних витрат. Застосування маржинального підходу є важливою передумовою прийняття обґрунтованих і своєчасних управлінських рішень, підвищення оперативності і поліпшення якості управління, підвищення рентабельності залізничного транспорту.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бутинець Ф. Ф. Бухгалтерський управлінський облік: Навчальний посібник / Ф. Ф. Бутинець, Л. В. Чижевська, Н. В. Герасимчук. – Житомир: ЖІТІ, 2000. – 228 с.
2. Голов С. Ф. Фінансовий та управлінський облік / С. Ф. Голов, В. І. Єфіменко. – К.: ТОВ «Автовнтерсервіс», 1996. – 544 с.

Надійшла до редколегії 24.06.2005.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Наведено спосіб розрахунку собівартості перевезень вантажів контейнерними поїздами.

Представлен способ расчета себестоимости перевозок грузов контейнерными поездами.

The article presents a method of calculating the costs of rail freight container services.

В настоящее время перед железными дорогами Украины стоит важная задача – обеспечение конкурентоспособности с другими видами транспорта. Особенно остро это касается контейнерных перевозок.

Для привлечения большего количества клиентуры необходима гибкая оптимизация железнодорожных контейнерных перевозок, начиная от планирования и заканчивая получением прибыли.

Эффективность и качество плана перевозок в значительной мере зависят от выбранного критерия оптимальности.

Критерий или показатель оптимальности представляет собой предельную меру экономического эффекта принимаемого решения при сравнительной оценке возможных вариантов (альтернатив) решений и выборе наилучшего (оптимального).

При текущем же планировании перевозок, когда размещение, размеры и условия производства и потребления продукции заранее обусловлены и при разных вариантах взаимного прикрепления остаются неизменными, оптимизации подлежат только транспортные затраты;

$$F = \sum_i \sum_j E_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

где E_{ij} – затраты на перевозку единицы продукции из пункта производства i в пункт потребления j , грн/т; x_{ij} – объем перевозки продукции, доставляемый из пункта i в пункт j , т.

Величина E_{ij} может иметь различную «начинку». Так, в практике текущего планирования грузопотоков она выражается сейчас чаще всего минимумом затрат транспортной работы в тонно-километрах, в основе которых фактически лежат кратчайшие расстояния перевозок грузов. Тогда эта функция примет вид

$$F = \sum_i \sum_j l_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

где l_{ij} – кратчайшее расстояние перевозки груза между пунктами i и j , км.

Однако кратчайшее расстояние перевозки не всегда является наиболее выгодным по затратам или по наивыгоднейшим вариантам перемещения груза.

Поэтому для улучшения планирования грузопотоков используются стоимостные (себестоимость перевозки, приведенные затраты, тарифы) и натуральные (время доставки, расход топлива и электроэнергии) показатели оптимальности. Целевая функция плана перевозок в этих случаях может иметь вид

$$F = \sum_i \sum_j C_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

или

$$F = \sum_i \sum_j t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

где C_{ij} – себестоимость перевозки груза между пунктами i и j , грн/т·км; t_{ij} – время доставки груза по участку, ч.

Расчет и анализ себестоимости железнодорожных перевозок производят следующими методами:

- метод расчета расходов по отдельным статьям номенклатуры (метод непосредственного расчета);
- метод единичных расходных ставок;
- метод укрупненных расходных ставок;
- метод коэффициентов изменения среднedorожной себестоимости перевозок;
- метод удельных весов расходов;
- метод коэффициентов влияния.

Метод единичных расходных ставок наиболее часто используют в расчетах.

Расходные ставки – это зависящие расходы, приходящиеся на единицу калькуляционного (расчетного) измерителя. Их рассчитывают по среднedorожным данным. Схема расчета себестоимости грузовых перевозок, перечень калькуляционных измерителей и формулы их расчета приведены в табл. 1.

**Калькуляционная таблица определения себестоимости грузовых перевозок
методом единичных расходных ставок**

Измеритель	Расходная ставка, грн	Формула расчета величины измерителя	Зависящие расходы, грн
Вагоно-километры	e_{nS}	$nS = \frac{NQ_{\text{бр}}L}{q_{\text{н}}}$	$e_{nS} nS$
Вагоно-часы	e_{nH}	$nH = \frac{nS}{v_{\text{уч}}} \left(1 + \frac{t_{\text{тр}} v_{\text{уч}}}{L} \right)$	$e_{nH} nH$
Локомотиво-километры	e_{MS}	$MS = \frac{nSq_{\text{бр}}}{Q_{\text{бр}}} (1 + \beta_{\text{л}})$	$e_{MS} MS$
Локомотиво-часы	e_{MH}	$MH = \frac{nSq_{\text{бр}}}{Q_{\text{бр}} v_{\text{уч}}} (1 + \beta_{\text{л}}) \left(1 + \frac{t_{\text{ст}} v_{\text{уч}}}{2L} \right)$	$e_{MH} MH$
Бригадо-часы локомотивных бригад	e_{Mh}	$Mh = \frac{nSq_{\text{бр}}}{Q_{\text{бр}} v_{\text{уч}}} \left(1 + \frac{t_{\text{бр}} v_{\text{уч}}}{L} \right)$	$e_{Mh} Mh$
Тонно-километры брутто	e_{pl}	$pl = nSq_{\text{бр}} \left(1 + \frac{P}{Q_{\text{бр}}} \right)$	$e_{pl} pl$
Расход электроэнергии (топлива)	$e_{\text{э}(m)}$	$\text{э}(m) = \alpha_{\text{э}(т)} nSq_{\text{бр}} \left(1 + \frac{P}{Q_{\text{бр}}} \right)$	$e_{\text{э}(т)} \text{э}(m)$

Себестоимость перевозки грузов в движении (без учета начальных и конечных операций) контейнерным поездом на расстояние S можно вычислить по формуле:

$$\begin{aligned}
 C = & e_{nS} \frac{NQ_{\text{бр}}L}{q_{\text{н}}} + e_{nH} \frac{nS}{v_{\text{уч}}} \left(1 + \frac{t_{\text{тр}} v_{\text{уч}}}{L} \right) + \\
 & + e_{MS} \frac{nSq_{\text{бр}}}{Q_{\text{бр}}} (1 + \beta_{\text{л}}) + e_{MH} \frac{nSq_{\text{бр}}}{Q_{\text{бр}} v_{\text{уч}}} (1 + \beta_{\text{л}}) \left(1 + \frac{t_{\text{ст}} v_{\text{уч}}}{2L} \right) + \\
 & + e_{Mh} \frac{nSq_{\text{бр}}}{Q_{\text{бр}} v_{\text{уч}}} \left(1 + \frac{t_{\text{бр}} v_{\text{уч}}}{L} \right) + e_{pl} nSq_{\text{бр}} \left(1 + \frac{P}{Q_{\text{бр}}} \right) + \\
 & + e_{\text{э}(т)} \alpha_{\text{э}(т)} nSq_{\text{бр}} \left(1 + \frac{P}{Q_{\text{бр}}} \right),
 \end{aligned}$$

где N – количество поездов; $Q_{\text{бр}}$ – масса поезда брутто, т.; $q_{\text{н}}$ – нагрузка на вагон нетто, т.; L – длина участка, км; $v_{\text{уч}}$ – участковая скорость, км/ч; $t_{\text{тр}}$ – средняя продолжительность стоянки транзитных поездов на технических станциях, ч; $q_{\text{бр}}$ – нагрузка на вагон брутто, т; $\beta_{\text{л}}$ – коэффициент вспомогательного пробега поездных

локомотивов; P – масса локомотива, т; $\alpha_{\text{э}(т)}$ – норма расхода электроэнергии (топлива).

Преобразуем формулу в следующий вид:

$$\begin{aligned}
 C = & e_{nS} \frac{NQ_{\text{бр}}L}{q_{\text{н}}} + \frac{nSq_{\text{бр}}}{Q_{\text{бр}}} \left\{ e_{MS} (1 + \beta_{\text{л}}) + \right. \\
 & \left. + (Q_{\text{бр}} + P) (e_{pl} + e_{\text{э}(т)} \alpha_{\text{э}(т)}) + \right. \\
 & \left. + \left[\frac{1}{v_{\text{уч}}} e_{MH} (1 + \beta_{\text{л}}) + \frac{Q_{\text{бр}}}{q_{\text{бр}}} e_{nH} + \right. \right. \\
 & \left. \left. \left(\frac{1}{L} 2t_{\text{ст}} e_{MH} (1 + \beta_{\text{л}}) + t_{\text{бр}} e_{Mh} + \frac{Q_{\text{бр}} t_{\text{тр}}}{q_{\text{бр}}} e_{nH} \right) \right] \right\}.
 \end{aligned}$$

В тех случаях, когда условия перевозок существенно отличаются от среднedorожных, расходные ставки корректируются одним из двух способов — либо рассчитываются непосредственно для данных условий перевозок (по типам вагонов, сериям локомотивов и т. д.), либо корректируются с помощью коэффициентов среднedorожных ставок. Коэффициенты корректировки учитывают изменение расходов для конкретных условий перевозок по сравнению с их среднedorожной величиной.

Расчет себестоимости при перевозках грузов в контейнерах имеет свою специфику. Она заключается в том, что с точки зрения железнодорожного транспорта, вагоны, перевозящие как груженые, так и порожние контейнеры, рассматриваются как груженые. Общие положения методики расчета себестоимости контейнерных перевозок следующие:

– для тарифных целей рассчитывают величину зависящих расходов. Эти затраты для груженых и порожних вагонов и контейнеров включают расходы по начальным и конечным операциям, по передвижению подвижного состава, по операциям формирования на технических станциях. Кроме того, для порожних контейнеров следует учитывать расходы по пробегу порожних вагонов к пунктам отправления порожних контейнеров;

– для контейнеров, не принадлежащих УЗ, из затрат следует исключать расходы по их ремонту и амортизации;

– расчеты расходов по перевозке контейнеров производят по операциям перевозочного процесса методом единичных расходных ставок;

– при расчетах корректируют расходы в зависимости от количества контейнеров, перевозящихся на одной платформе;

– величины стоимостных нормативов и технико-эксплуатационных показателей принимают по конкретным условиям перевозок контейнерных поездов.

Используя полученную формулу, можно достаточно легко рассчитать оптимальную себестоимость перевозок (без учета начальных и конечных операций) ускоренным контейнерным поездом, в зависимости от массы поезда и дальности перевозки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луговой П. А. Основы технико-экономических расчетов на железнодорожном транспорте / П. А. Луговой, Л. Г. Цыпин, Р. А. Аукуционек. – М.: Транспорт, 1973. – 232 с.
2. Пасічник В. І. Теоретичні основи економіки експлуатаційної діяльності залізниць: Монографія. – К.: Наук. світ, 2003. – 222 с.
3. Макаренко М. В. Краткий справочник показателей эксплуатационной работы железных дорог Украины. – К.: Юникон-Пресс, 2001. – 154 с.
4. Белов И. В. Экономика железнодорожного транспорта: Учебн. для вузов ж.-д. трансп / И. В. Белов, Н. П. Терешина, В. Г. Галабурда и др.; Под ред. Н. П. Терешиной, Б. М. Лapidуса, М. Ф. Трихункова. – М.: УМК МПС России, 2001. – 600 с.

Поступила в редколлегию 23.05.2005.

Наукове видання

В І С Н И К

**Дніпропетровського
національного університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Випуск 9

Українською, російською та англійською мовами

Відп. за випуск *І. П. Корженевич*,
Комп'ютерна верстка *Я. І. Зайць*,
Коректори *Т. В. Щепоткіна*, *Т. В. Мацкевич*

Здано до набору 21.07.2005. Підписано до друку 26.09.2005. Формат 60×84 1/8.
Папір офсетний. Друк офсетний. Умов. друк. арк. 27,06.
Обл.-вид. арк. 28,03. Тираж 100 прим. Замовлення № 1895. Видавн. № 19.

Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна. ДК № 1315 від 31.03.2003
49010, Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, www.diiirvv.dp.ua, admin@diiirvv.dp.ua