



ISSN 2307-4221

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТА
ELECTRIFICATION OF TRANSPORT

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 10 / 2015

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ



85 років

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ЗАЛІЗНИЦЬ

10 / 2015

Індекс 68641

ДНІПРОПЕТРОВСЬК

ISSN 2307-4221 (print)
ISSN 2312-6574 (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 10 / 2015

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Передплатний індекс 68641

URL: <http://etr.diit.edu.ua/>

ДНІПРОПЕТРОВСЬК

№ 10, 2015

Видання Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України № 793 від 04.07.2014 р.
включений до Переліку наукових фахових видань України

Затверджений до друку Вченою радою університету
протокол № 10 від 30.11.2015 р.

Голова редакційної ради університету д.т.н., професор О. М. Пшінько

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР**

Сиченко В. Г. д.т.н., с.н.с., ДНУЗТ, Україна

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

Кузнецов В. Г. д.т.н., професор, ДНУЗТ, Україна

**ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ
ВІД УКРАЇНИ**

Андрієнко П. Д. (Запорізький національний технічний університет);
Гетьман Г. К. (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна); Денисюк С. П. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»); Танкевич Є. М. (Інститут електродинаміки Національної академії наук України); Лежнюк П. Д. (Вінницький національний технічний університет); Костін М. О. (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна); Панасенко М. В. (Державний науково-дослідний центр Укрзалізниці); Саєнко Ю. Л. (Приазовський державний технічний університет); Сокол Є. І. (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); Максимчук В. Ф. (Головне управління електрифікації та електропостачання Укрзалізниці)

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ

Бадьор М. П. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бочков К. А. (Білоруський державний університет транспорту, Білорусь); Жарков Ю. І. (Ростовський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Омарбеков А. К. (Науково-дослідний центр Казахстантеміржолі, Казахстан); Сідоров О. О. (Омський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Васяк І. (Лодзинська політехніка, Інститут електроенергетики, Республіка Польща); Стележецькі Р. (Гданьський морський університет, Республіка Польща); Палечек Й. (Остравський технічний університет, Чеська республіка).

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Босий Д. О. к.т.н., доцент, ДНУЗТ, Україна

Видання виходить 2 рази на рік з червня 2011 р.

Бадёр М.П., Лобынцев В.В.

Математическое моделирование и освоение в тяговом электроснабжении ограничителей тока на основе высокотемпературной сверхпроводимости.....10

Бадьор М.П., Лобинцев В.В.**Bader M. P., Lobyntsev V. V.**

Математичне моделювання і освоєння в тяговому електропостачанні обмежувачів струму на основі високотемпературної надпровідності 10

Mathematical modeling and implementation in traction power supply current limiter based on high superconductivity10

Курган М. Б., Байдак С.Ю., Лужицкий О.Ф., Хмелевська Н. П.

Ефективність електрифікації ділянки Куми-Новомосковськ Придніпровської залізниці ...21

Курган М. Б., Байдак С.Ю., Лужицкий О.Ф., Хмелевская Н. П.**Kurhan M. B., Baidak S.YU., Lužickiy O.F., Khmelevska N. P.**

Эффективность электрификации участка Кумы-Новомосковск Приднепровской железной дороги 21

Efficiency of electrification the Kuma-Novomoskovsk direction of Pridneprovskaya railway21

Сиченко В. Г., Босий Д. О., Божко В. В., Косарев Є. М., Борисовська Ю. А., Щербак Я. П., Борщ Б. О.

Порівняльний аналіз систем електропостачання для швидкісних магістралей29

Сыченко В. Г., Босий Д. А., Божко В. В., Косарев Е. Н., Борисовская Ю. А., Щербак Я. П., Борщ Б. О.**Sychenko V. G., Bosiy D. O., Bozhko V. V., Kosarev YE. M., Borysovs'ka YU. A., Shcherbak YA. P., Borshch B. O.**

Сравнительный анализ систем электроснабжения для скоростных магистралей.. 29

Comparative analysis of electricity for high-speed railways29

електрорухоми́й склад / electric rolling stock

Афанасов А. М., Арпуль С. В., Мясников А. С.

Анализ режимов пуска автономного электропоезда при питании тягового электропривода от ионистора.....38

Афанасов А. М., Арпуль С. В., М'ясников А. С.**Afanasov A. M., Arpul S. V., Myasnikov A. S.**

Аналіз режимів пуску автономного електропоїзда при живленні тягового електропривода від іоністора..... 38

The analysis regimes at the start of autonomous electric power from the electric traction ionistor.....38

Афанасов А. М., Друбецкий А. Е., Мясников А. С.

Покрытие потерь холостого хода в системе взаимного нагружения тяговых двигателей с одним источником электрической мощности.....44

Афанасов А. М., Друбецкий А. Ю., М'ясников А. С.**Afanasov A. M., Drubetskiy A. E., Myasnikov A. S.**

Покриття втрат холостого ходу в системі взаємної навантаження тягових двигунів з одним джерелом електричної потужності 44

Covering losses in the system of mutual loading of traction motors with a single source of electrical power.44

Гетьман Г. К., Васильев В. Е.

О возможности снижения расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов за счет частичного отключения части тяговых двигателей49

Гетьман Г. К., Васильев В. Е.**Getman G. K., Vasilev V. E.**

Про можливість зниження витрати електроенергії на тягу кар'єрних поїздів за рахунок часткового відключення частини тягових двигунів..... 49

About possibility of decline of expense of electric power on traction of quarry trains for account of partial disconnecting of part of hauling engines.....49

Забарило Д. О., Мамасуєв Д. М.	
Принципи побудови електричних схем перетворювачів власних потреб електропоїздів з асинхронним тяговим приводом	59
Забарило Д. А., Мамасуєв Д. Н.	Zabarilo D. A., Mamasujev D. N.
Принципы построения электрических схем преобразователей собственных нужд электропоездов с асинхронным тяговым приводом. 59	Construction principles of electric circuit of auxiliary converter of train with asynchronous traction drive.....59
Синчук О. Н., Семочкін А. Б., Федотов В. А., Жеребкін Б. В.	
Автоматическое управление двухдвигательным тяговым электромеханическим комплексом рудничного электровоза.....	65
Сінчук О. Н., Сьомочкін А. Б., Федотов В. А., Жеребкін Б. В.	Sinchuk O. N., Syomochkin A. B., Fedotov V. A., Zherebkin B. V.
Автоматичне керування дводвигунним тяговим електромеханічним комплексом рудничних електровозів	Automatic control of electromechanical double-engine traction complex of mine electric locomotives
65	65

енергозбереження / energy saving

Красовский П. Ю.	
Расчет технологических потерь электроэнергии в силовых трансформаторах с учетом срока эксплуатации	74
Красовський П. Ю.	Krasovski P. YU.
Розрахунок технологічних втрат електричної енергії в силових трансформаторах з урахуванням терміну експлуатації	74

автоматизація і діагностика / automation and diagnose

Бледный Ю. А., Войтиков Д. В., Иванов В. В.	
Экспериментальный подход при оценке класса достоверности протоколов передачи данных для телемеханических функций	81
Бледний Ю. А., Войтиков Д. В., Иванов В. В.	Bledny Yu. A., Voytikov D. V., Ivanov V. V.
Експериментальний підхід при оцінці класу достовірності протоколу передачі даних для телемеханічних функцій.....	81

Матусевич О. О.	
Методологія підвищення якості системи технічного обслуговування і ремонту електрообладнання тягових підстанцій	91
Матусевич А. А.	Matusevych O. O.
Методология повышения качества системы технического обслуживания и ремонта электрооборудования тяговых подстанций	91

електромагнітна сумісність / electromagnetic compatibility

Азюковський О. О.	
Зміна електротехнічних параметрів підземного металевого трубопроводу під впливом високочастотної складової напруги станцій катодного захисту	98
Азюковский А. А.	Aziukovskyi O. O.
Изменение электротехнических параметров подземного стального трубопровода под воздействием высокочастотной составляющей напряжения станций катодной защиты.....	98

Костін М. О., Муха А. М., Нікітенко А. В.	
Якість електроенергії, рекуперованої електровозами ВЛ11М6 і ВЛ11М.....	108
Костин Н. А., Муха А. Н., Никитенко А. В. Kostin M. O., Mukha A. M., Nikitenko A. V.	
Качество электрической энергии, рекуперированной электровозами ВЛ11М6 и ВЛ11М.....	108
Овсейчук В. А., Жежеленко И. В.	
Экономически обоснованное нормирование надежности и качества электроснабжения потребителей в России	117
Овсейчук В. О., Жежеленко І. В. Ovseychuk V. O., Zhezhelenko I. V.	
Економічно обґрунтоване нормування надійності та якості електропостачання споживачів у Росії.....	117
Саенко Ю. Л., Калюжный Д. Н.	
Принцип наложения в математической модели распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения	124
Саенко Ю. Л., Калюжный Д. М. Sayenko Y. L., Kalyuzhniy D. N.	
Принцип накладення в математичній моделі розподілу фактичних внесків лінійних джерел спотворень у спотворення напруг у точці загального приєднання.....	124

УДК 621.331.3

М.П. БАДЁР, В.В. ЛОБЫНЦЕВ (МИИТ)

Кафедра Энергоснабжение электрических железных дорог, Московский государственный университет путей сообщения, ул. Образцова 9, стр. 9, Москва, Российская Федерация, 127994, тел.: (495) 684-22-87, эл. почта: badjor@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ТОКА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

Введение

В настоящее время становятся наиболее актуальными научные исследования по разработке, испытаниям моделей и промышленных образцов разнообразного электротехнического оборудования на базе высокотемпературных (азотного уровня температур 77К) сверхпроводниковых материалов, включающего кабельные линии электропередачи, трансформаторы, электродвигатели, реакторы, накопители энергии.

Использование и освоение сверхпроводниковых технологий и нового высокотемпературного сверхпроводникового электротехнического оборудования в локомотивной и стационарной энергетике позволит на принципиально новом уровне решить вопросы повышения надежности и эффективности тягового электроснабжения, снижения капитальных и эксплуатационных затрат, экономии электроэнергии [1-3].

Цель работы

Использование сверхпроводниковых электротехнических устройств, лишенных активных (резистивных) потерь энергии, в транспортной энергетике позволит создать наиболее эффективные энергосберегающие системы тягового электроснабжения (СТЭ) переменного и постоянного тока.

Применение сверхпроводниковых ограничителей токов короткого замыкания в тяговых сетях постоянного тока

В тяговых сетях постоянного тока возможны несколько вариантов установки сверхпроводниковых ограничителей токов (СОТ) в силовую цепь ТП: на каждый фидер контактной сети; в цепь плюс шины каждого преобразовательного агрегата в отдельности; в цепь плюс шины дополнительно объединяющей оба преобразовательных агрегата.

Имитационное моделирование токоограничивающего действия СОТ проводилось приме-

нительно к ТП на участке с интенсивным пригородным движением и имеющей фидер питания депо. СОТ устанавливался в стандартные размеры ячеек фидеров тяговой сети при компоновке СОТ+1×ВАБ-49. Для полноты картины токоограничивающего действия рассмотрены: случай компоновки СОТ+2×ВАБ-49 и типовые решения – 1×ВАБ-49 и 2×ВАБ-49.

В компьютерной программе, основу которой составила общая математическая модель работы ВТСП токоограничителя резистивного типа было принято, что при равных уставках – I_y , СОТ всегда будет вступать в работу первым, так как его собственное – $t_{СОТ\text{ соб}}$ составляет порядка 1 и менее мс даже при наличии системы принудительного перевода в нормальное состояние (СППНС), а у выключателя – $t_{В\text{ соб}}$ в среднем 5-6мс. Расчётное время в случае глухого к.з. при отказе фидерного выключателя выбрано в 150мс. Это время равнозначно времени отключения быстродействующего выключателя на стороне переменного тока преобразовательного агрегата, как в случае использования системы УРОВ (устройства резервирования отключения выключателей), так и без неё.

На схемах замещения представлены подвергавшиеся моделированию случаи глухого к.з. вблизи шин ТП: при нормальном отключении выключателем одинарным и сдвоенным (1×ВАБ-49, 2×ВАБ-49), (рисунок 1); при нормальном отключении выключателем одинарным и сдвоенным совместно с СОТ (1×ВАБ-49+СОТ, 2×ВАБ-49+СОТ), (рисунок 2); при отказе фидерного выключателя и отсутствии СОТ (рисунок 3); при отказе фидерного выключателя и наличии СОТ (рисунок 4).

На схемах замещения по рисункам 1 - 4 приняты следующие обозначения элементов:

U_{xx} – напряжение холостого хода на шинах источника питания (ТП);

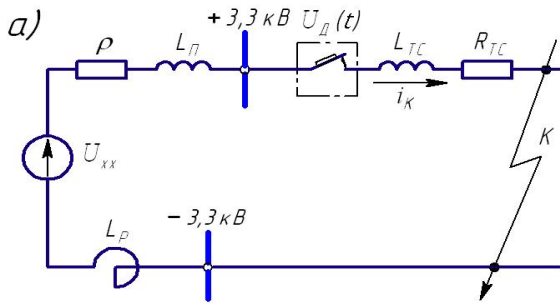


Рис. 1. Схема замещения для случая глухого к.з. при нормальном отключении выключателем одинарным и двояным (1×ВАБ-49, 2×ВАБ-49)

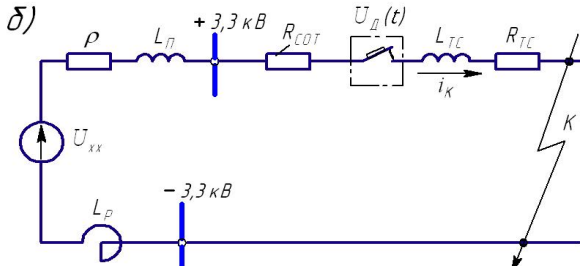


Рис. 2. Схема замещения для случая глухого к.з. при нормальном отключении выключателем одинарным и двояным совместно с СОТ (1×ВАБ-49+СОТ, 2×ВАБ-49+СОТ)

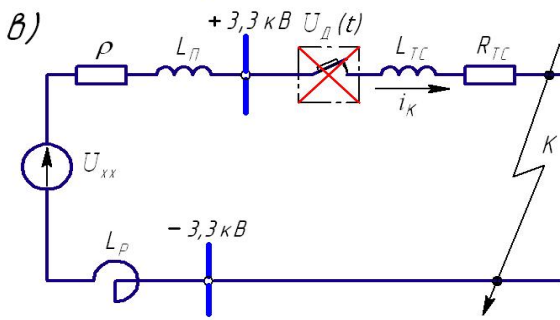


Рис. 3. Схема замещения для случая глухого к.з. при отказе фидерного выключателя и отсутствии СОТ

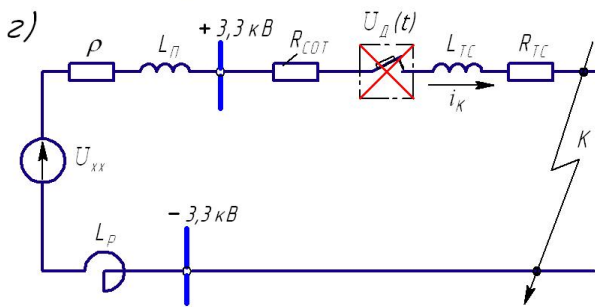


Рис. 4. Схема замещения для случая глухого к.з. при отказе фидерного выключателя и наличии СОТ

ρ , L_p – эквивалентное сопротивление и индуктивность ТП, определяемые параметрами первичной питающей системы, мощностью и числом понижающих и преобразовательных трансформаторов;

R_{TC} , L_{TC} – удельное сопротивление и индуктивность тяговой сети (суммарные значения последовательно соединенных и индуктивно связанных контактной и рельсовой сетей);

L_p – индуктивность реактора фильтра устройства ТП;

$U_d(t)$ – напряжение на дуге выключателя в функции времени;

R_{COT} – первоначально вводимое в цепь протекания тока сопротивление;

K – место короткого замыкания.

Все элементы схем считаются линейными, в том числе и напряжение $U_d(t)$ на дуге выключателя с деионной решеткой, за исключением R_{COT} , для которого будет приведена только первоначально вводимая им в цепь протекания тока величина сопротивления. Параметры схемы замещения для ТП “Ожерелье” представлены в таблице П1.

Первоначально проведем сравнение показателей работы фидерных выключателей 1×ВАБ-49 и 2×ВАБ-49. Это сравнение покажет не только достигаемый эффект от использования второго выключателя, но и ляжет в основу анализа совместной работы: СОТ+1×ВАБ-49, СОТ+2×ВАБ-49. Графические изображения временных зависимостей, полученных по результатам имитационного моделирования для ТП представлены на рисунке 5, где приняты обозначения: 1 – отключаемый ток к.з., 2 – напряжение на дуге выключателя, 3 – перенапряжение на индуктивности цепи, 4 – падение напряжения на активном сопротивлении СОТ, вводимом в цепь; а – (—) 1×ВАБ-49, (- - - -) 2×ВАБ-49; б – (—) 1×ВАБ-49+СОТ, (- - - -) 2×ВАБ-49; в – (—) 2×ВАБ-49+СОТ, (- - - -) 2×ВАБ-49; г – (—) 1×ВАБ-49+СОТ, (- - - -) 2×ВАБ-49+СОТ.

Анализ временных зависимостей проводился по характерным точкам (рисунки 6, 7), где приняты обозначения:

t_0 – время возникновения к.з.;

t_1 – время достижения током к.з. значения уставки и начала работы СОТ;

$t_1 - t_2$ – собственное время выключателя или СОТ;

t_2 – время начала расхождения контактов (появления на них дуги);

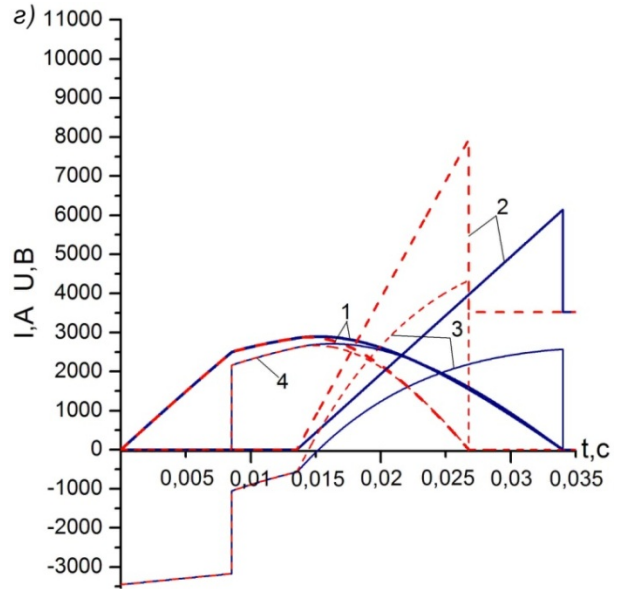
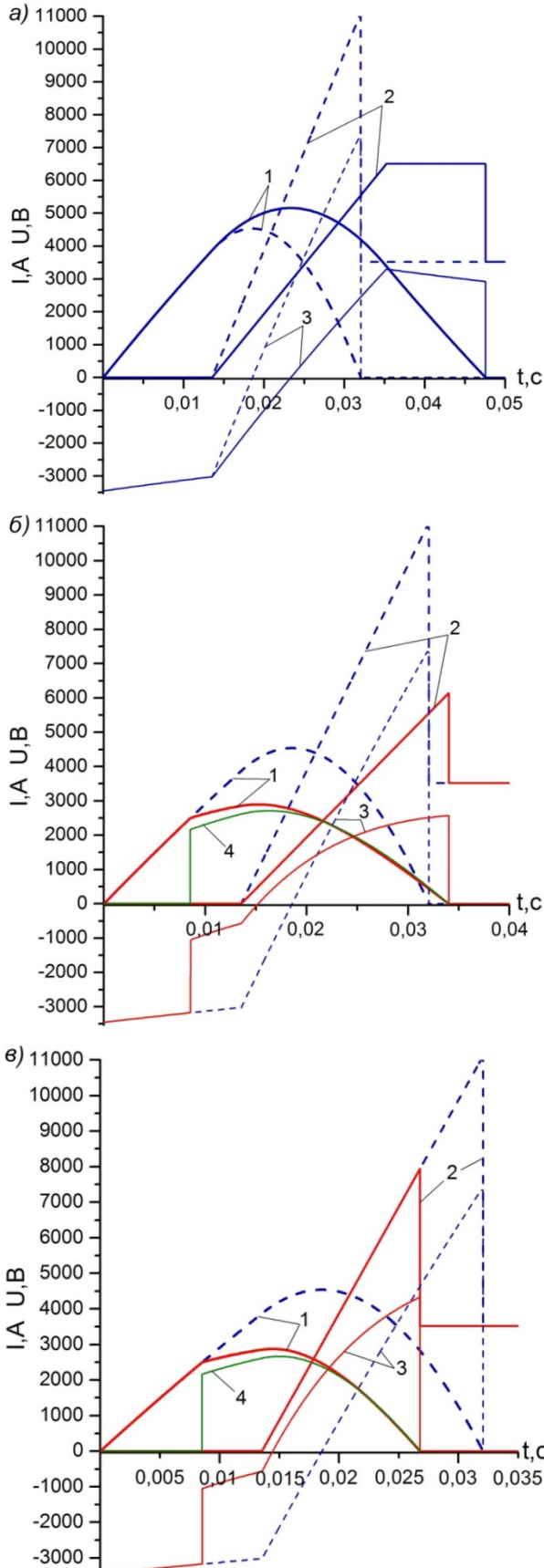


Рис. 5. Временные зависимости процессов отключения близких токов к.з. (для СОР использовалась СППНС, приводимая в действие по сигналу от ЦЗАФ-3,3)

$t_2 - t_3$ – время подъёма напряжения на дуге в камере выключателя;

$I_{к.з.о. \max}$ – максимальное значение ограниченного тока к.з.;

$U_{Лц. \max}$ – максимальное значение перенапряжения на индуктивности отключаемой цепи;

$A_{\text{кам}}$ – энергия, выделяемая в камере быстродействующего выключателя;

$A \cdot \text{сек}$ – амперсекунды отключаемого тока к.з.

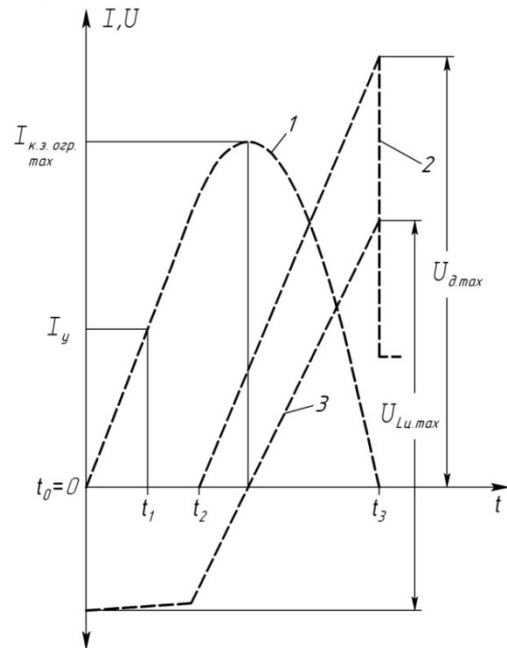


Рис. 6. Характерные точки и значения физических величин при отключении тока к.з. автоматическим быстродействующим выключателем

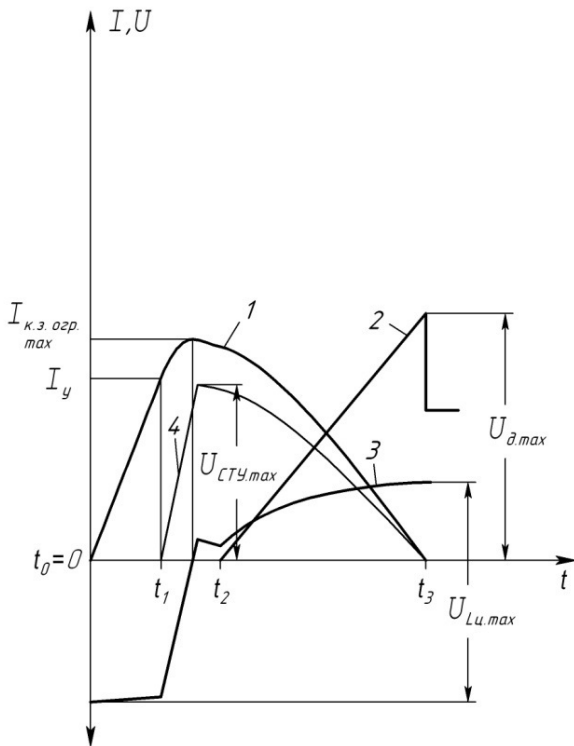


Рис. 7. Характерные точки и значения физических величин при отключении тока к.з. автоматическим быстродействующим выключателем совместно с СОР; числовые обозначения соответствуют рисунку 2

Результаты имитационного моделирования показали, что одинарный выключатель при совместной работе с СОР успешно справляется с отключением близких к.з. за 20,48 вместо 18,52мс при использовании типового решения 2×ВАБ-49. Время отключения увеличивается почти на 2мс, вместе с тем величина ограниченного тока к.з. снижается с 4536 до 2894А (рисунок 5, б), уменьшается уровень перенапряжений на индуктивности цепи к.з. с 11 до 6кВ, амперсекунды отключаемого тока к.з. с 78 до 52, а также энергия выделяемая в камере быстродействующего выключателя со 139 до 86кДж.

Наилучшие результаты по времени отключения тока к.з. – 13,24мс достигаются совместной работой СОР и сдвоенного выключателя (рисунок 5, в), но при этом более глубокого токоограничивающего действия при прочих равных условиях не наблюдается (рисунок 5, г). В связи с чем, использование такой схемы включения СОР технически и, тем более, экономически нецелесообразно.

Для полной характеристики токоограничивающего действия СОР необходимо рассмотреть наиболее тяжелый случай – отказ фидерного выключателя (рисунок 5).

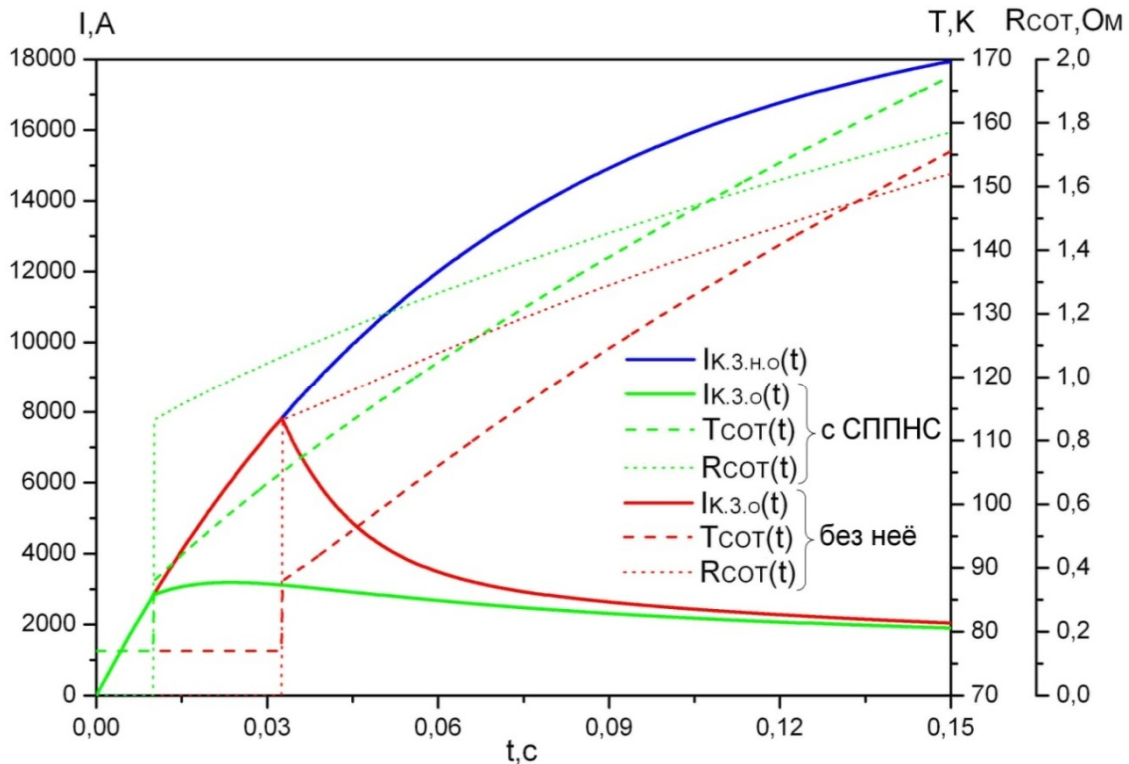


Рис. 8. Изменение тока к.з. при отказе фидерного выключателя

В случае отказа фидерного выключателя (рисунок 5) СОР позволяет ограничивать ток к.з. на безопасном уровне в течение всего времени с момента возникновения к.з. до его от-

ключения выключателем на стороне переменного тока преобразовательного агрегата – $I_{kz.o}$. В противном случае при отсутствии СОР ток к.з. может достичь установившегося значения

$I_{кз.но}$ со всеми вытекающими отсюда последствиями (выход из строя всей ТП). Из рисунка 7 видно, что использование СППНС весьма полезно для снижения тепловыделений внутри криостата СОТ во время его токоограничивающего действия. Однако и без этой системы СОТ гарантированно сработает при больших значениях тока. Также следует отметить, что не происходит разогрева токоограничивающих элементов до максимально допустимой температуры – 210К за расчётное время в 150мс. Связано это с частичным тепловыделением на внутреннем сопротивлении остальных элементов схемы замещения.

Применение сверхпроводниковых ограничителей токов короткого замыкания в тяговых сетях переменного тока

Установка на тяговых подстанциях переменного тока сверхпроводниковых ограничителей токов короткого замыкания, позволит существенно снизить термическое и динамическое действие токов короткого замыкания на силовое оборудование и токоведущие части. Сверхпроводниковый ограничитель токов короткого замыкания является сверхбыстродействующим устройством (собственное время составляет менее 1 мс), которое обладает способностью ограничивать не только установившееся значение тока к.з., но и полностью срезать амплитуду сверхпереходного тока к.з., на что принципиально не способен ни один из самых совершенных быстродействующих выключателей.

Рассмотрим порядок взаимодействия СОТ с устройствами автоматики и защиты при его установке на вводах в распределительное устройство 27,5кВ.

Время работы современной защиты фидеров контактной сети переменного тока ЦЗАФ-27,5 составляет минимум 20мс, в то время как СОТ способен среагировать на к.з. и начать токоограничивающее действие в течение 1, в крайнем случае, 2мс. Следовательно, падение напряжения на токоограничивающем элементе СОТ можно использовать в качестве управляющего сигнала на принудительное отключение выключателей, которые будут отключать уже ограниченный ток к.з.

Это неоценимое качество СОТ с уверенностью можно использовать на фидерах контактной сети, не опасаясь за селективность, но устройства данного типа пока ещё дороги и оборудовать ими все фидера не представляется возможным. Остаётся вариант использования

СОТ на вводах в распределительное устройство тягового напряжения (РУ-27,5кВ) по одному на каждую фазу. Однако в этом случае СОТ будут ограничивать не только токи коротких замыканий возникающих на шинах РУ-27,5кВ, линиях ДПР (два провода рельс), в ячейках ТСН (трансформаторов собственных нужд), но и всех близких к.з. на фидерах контактной сети.

В настоящее время при коротком замыкании на фидере контактной сети электровозы, наиболее близко расположенные к месту к.з. и получающие питание от неповреждённых фидеров той же фазы, ввиду просадки напряжения на их токоприёмниках сбрасывают ток. Это связано с тем, что вентили установленных на электровозах преобразовательных агрегатов запираются от воздействия противоэдс тяговых двигателей. Следовательно, токоограничивающее действие СОТ при его размещении на вводах в РУ-27,5кВ не будет оказывать негативного влияния на существующие режимы работы электроподвижного состава. Более того, этот вариант установки СОТ открывает новые возможности в организации работы быстродействующих выключателей вводов РУ-27,5кВ и фидеров контактной сети, направленной на повышение надёжности отключения токов к.з. (рисунок 9).

В случае возникновения к.з. на фидере контактной сети СОТ, начиная токоограничивающее действие, подаёт сигнал на принудительное отключение выключателя ввода и всех выключателей, расположенных в первой ступени защиты. Выбор нужного выключателя осуществляется через схему совпадений сигналов, подаваемых СОТ и устройством защиты ЗУ (рисунок 9). Сигнал от ЗУ поступает при регистрации им протекающего по повреждённому фидеру тока величиной $0,6-0,7I_k$ СОТ. Для предотвращения дублирующих отключений во второй ступени защиты выключатель ввода работает со сравнительно небольшой выдержкой времени, примерно в полтора раза большей полного времени отключения вакуумного выключателя на фидере контактной сети.

В случае возникновения к.з. между фазами a и b на шинах распределительного устройства, в линии ДПР или на стороне высокого напряжения в ячейке ТСН токоограничивающее действие СОТ может наблюдаться в обеих фазах, приводя к недопустимо высоким перенапряжениям на индуктивности защищаемой цепи. Для предотвращения коммутационных перенапряжений целесообразно использовать СОТ с разными значениями критического тока – I_k , опре-

деляющими их токи уставки. Имея меньшую уставку, СОТ в одной из фаз ввода всегда будет вступать в работу (выполнять токоограничивающее действие) первым, предотвращая тем самым срабатывание токоограничителя во второй фазе. В остальном работа схемы ничем не от-

личается, за исключением случаев возникновения к.з. между шинами *a* и *b* распределительного устройства, при которых отключение выключателя ввода начнётся не сразу, а по истечении выдержки времени – через 60мс.

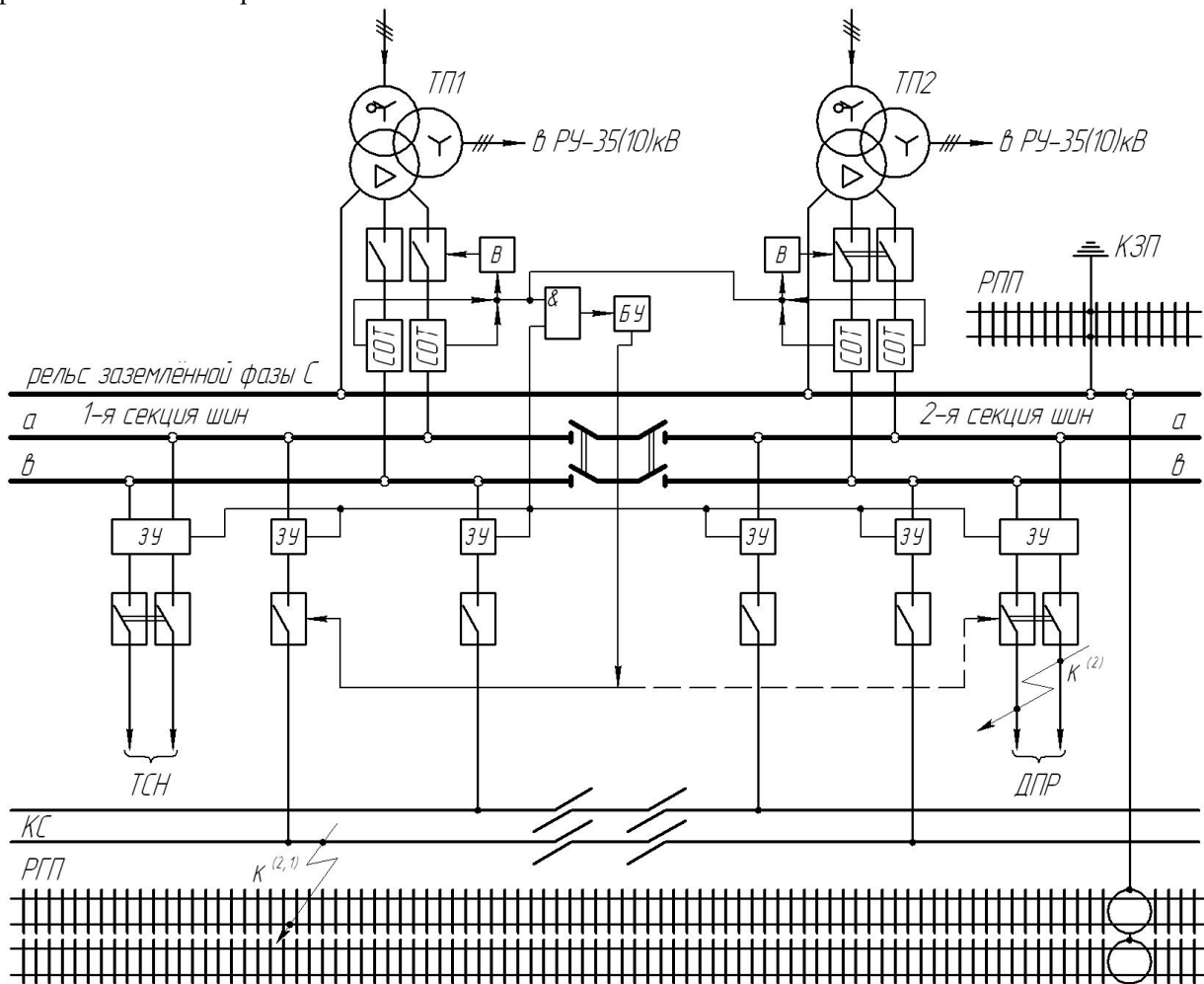


Рис. 9. Схема организации работы коммутационной аппаратуры при установке комплекта из четырёх однофазных СОТ на вводах в РУ-27,5кВ (справедлива также в случае установки комплекта из двух однофазных СОТ)

Проанализируем максимально возможное время токоограничивающего действия СОТ – $t_{\max \text{ т.д.}}$ в случае возникновения к.з. в контактной сети и отказе фидерного выключателя, исходя из времени работы ЗУ, выдержки времени второй ступени защиты и полного времени отключения вакуумного выключателя ввода РУ-27,5кВ. Время действия современных микропроцессорных защит составляет не менее 20мс, а полное время отключения вакуумного выключателя 40мс, поэтому с учётом выдержки времени второй ступени защиты – $t_{\max \text{ т.д.}} = 20 + 1,5 \cdot 40 + 40 = 120\text{мс}$. Полученная величина на 30мс меньше расчётного времени токоограничивающего действия СОТ, которое наверняка будет компенсировано при его установке для

совместной работы с другими типами быстродействующих коммутационных аппаратов.

Рассмотрим имитационное моделирование токоограничивающего действия СОТ в тяговой сети переменного тока при его установке на вводах РУ-27,5кВ и отказе фидерного выключателя.

Имитационное моделирование токоограничивающего действия СОТ проводилось применительно к тяговой подстанции с обмоткой первичного напряжения 220кВ. При моделировании за основу взят наиболее тяжелый случай – отказ фидерного выключателя, определяющий допустимое время токоограничивающего действия СОТ, величина которого принята равной 150мс. Также принято, что восстановление токоограничивающим элементом СОТ сверх-

проводящих свойств укладывается в характерные времена работы механизма АПВ.

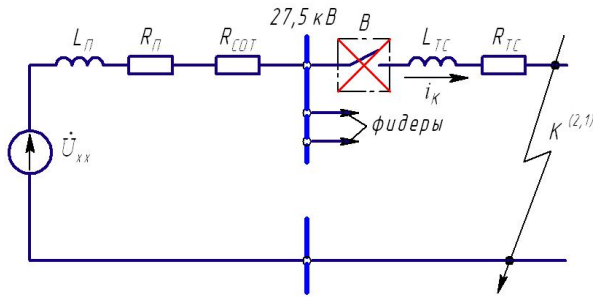


Рис. 10. Схема замещения случая близкого глухого к.з. при отказе фидерного выключателя и наличии СОТ на вводах в РУ-27,5кВ

На схеме замещения (рисунок 10) приняты следующие обозначения элементов:

\dot{U}_{xx} – напряжение холостого хода на шинах тяговой подстанции (действующее значение);

$L_{п}, R_{п}$ – эквивалентное сопротивление и индуктивность ТП, определяемые параметрами первичной питающей системы, мощностью и числом понижающих трансформаторов;

$R_{тс}, L_{тс}$ – удельное сопротивление и индуктивность тяговой сети (суммарные значения

последовательно соединенных и индуктивно связанных контактной и рельсовой сетей);

$R_{сот}$ – первоначально вводимое в цепь активное сопротивление СОТ;

Все элементы схемы замещения считаются линейными, кроме $R_{сот}$, для которого будет приведена только первоначально вводимая им в цепь протекания тока величина активного сопротивления. Параметры схемы замещения для ТП представлены в таблице ПЗ.

Для случая, представленного схемой замещения, имитационное моделирование проводилось при разных значениях начальной фазы короткого замыкания: 0, 30, 60 и 90 электрических градусов с использованием компьютерной программы, модернизированной применительно к тяговым сетям переменного тока. Основу этой компьютерной программы, как и на постоянном токе, составила общая математическая модель работы ВТСП токоограничителя резистивного типа. Полученные временные зависимости, соответственно, представлены на рисунках 11-14.

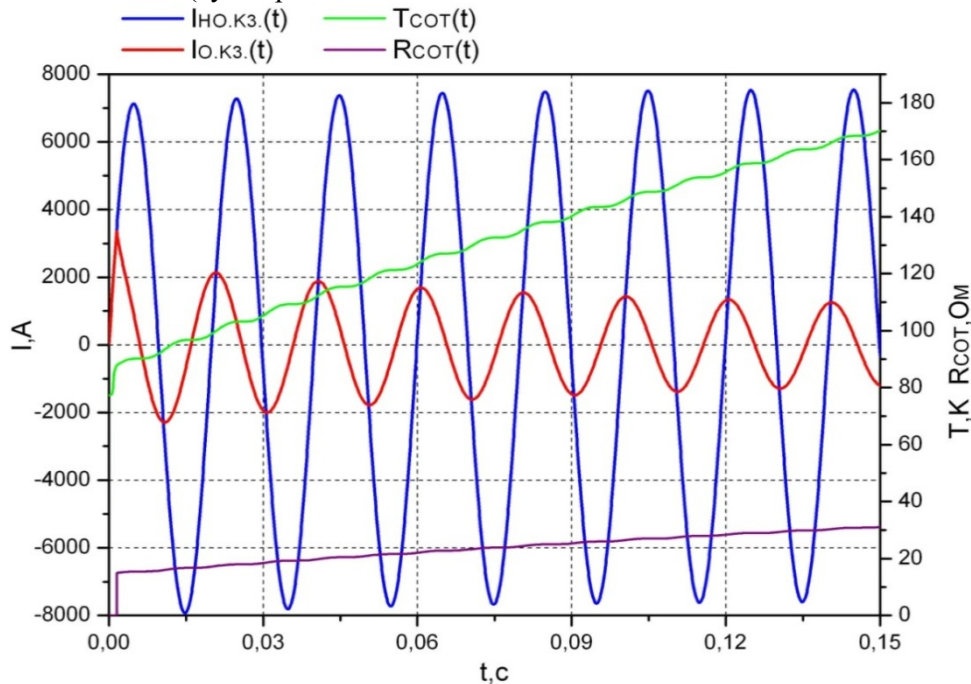


Рис. 11. Токоограничивающее действие СОТ на вводах РУ-27,5кВ ТП при отказе фидерного выключателя и начальной фазе к.з. $\psi_k = 0$ эл.град

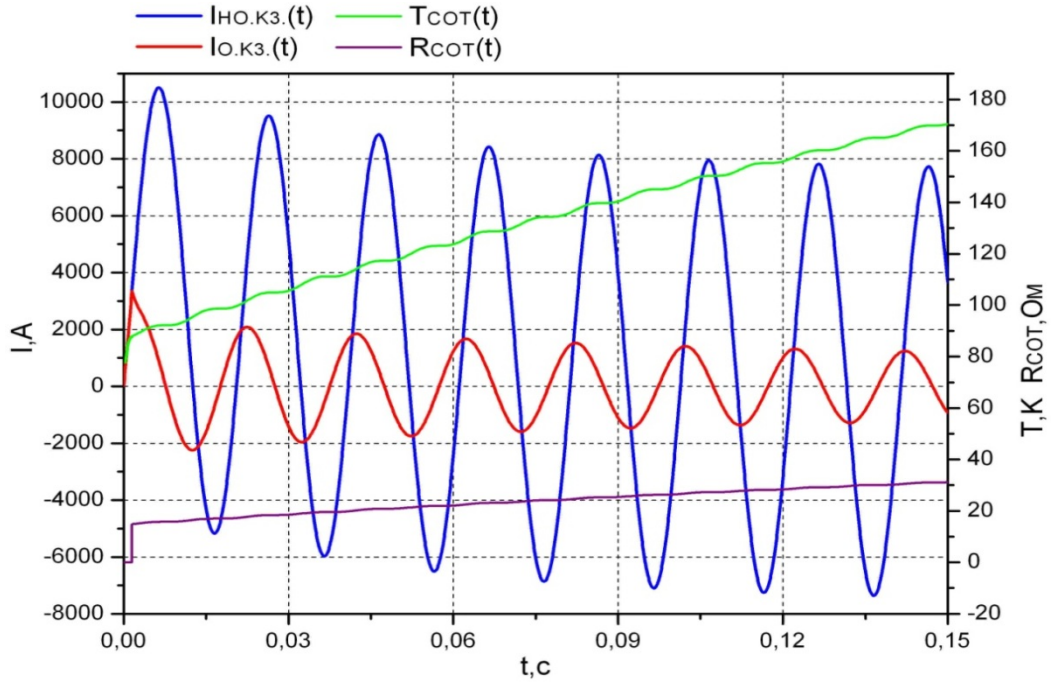


Рис. 12. Токоограничивающее действие СОТ на вводах РУ-27,5кВ ТП при отказе фидерного выключателя и начальной фазе к.з. $\psi_k = 30$ эл.град

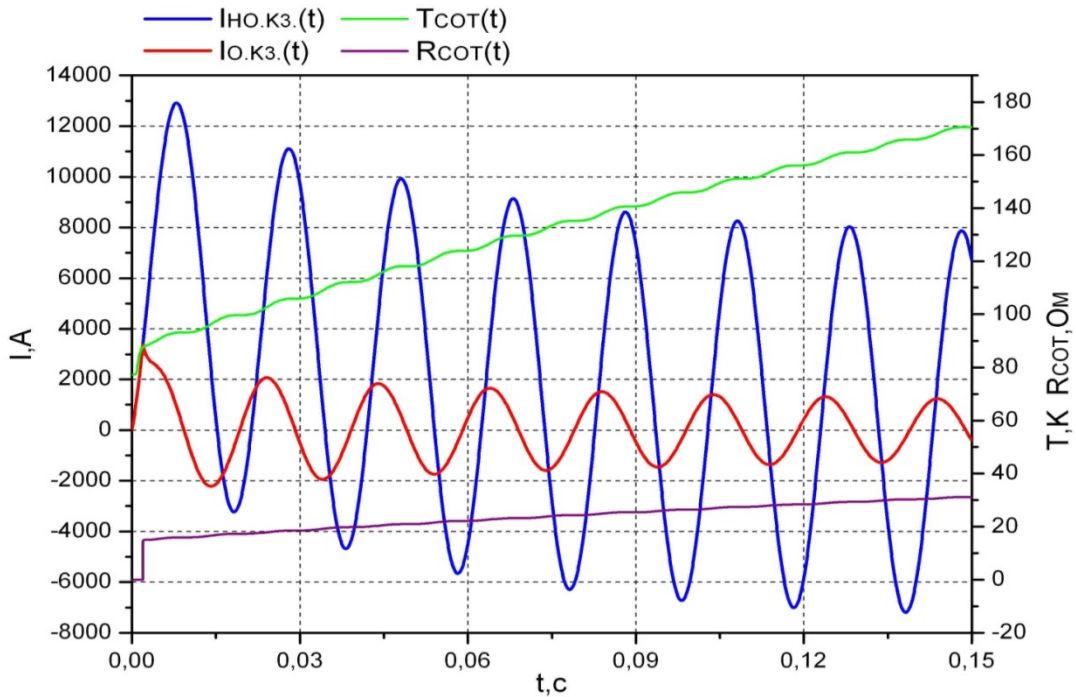


Рис. 13. Токоограничивающее действие СОТ на вводах РУ-27,5кВ ТП при отказе фидерного выключателя и начальной фазе к.з. $\psi_k = 60$ эл.град

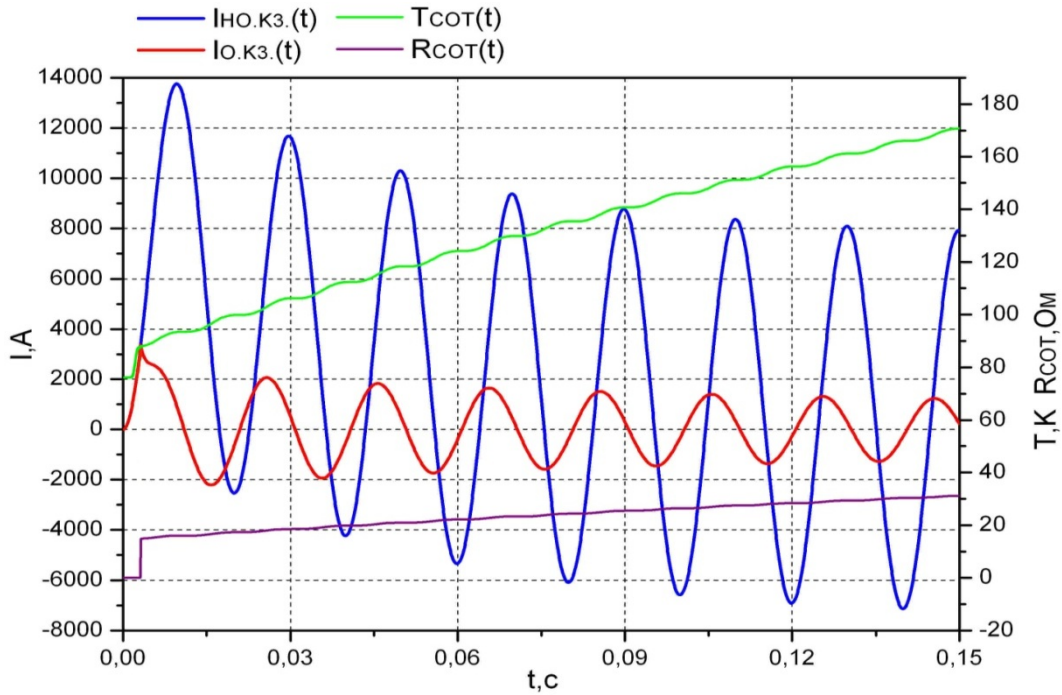


Рис. 14. Токоограничивающее действие СОТ на вводах РУ-27,5кВ ТП при отказе фидерного выключателя и начальной фазе к.з. $\psi_k = 90$ эл.град

Из представленных на рисунках 11-14 временных зависимостей видно, что СОТ действительно является безинерционным токоограничивающим устройством, единственно способным полностью срезать амплитуду ударного тока к.з. Отмечено, что изменение начальной фазы короткого замыкания при прочих равных условиях практически не влияет на конечную температуру нагрева токоограничивающего элемента СОТ, в отличие от частичного рассеяния энергии на остальных элементах схемы замещения.

Выводы

1. Проведённый анализ показывает, что с установкой СОТ действительно происходит снижение термического и динамического воздействия токов к.з. (согласно квадрату снижения его амплитудного значения) на коммутационные аппараты, токоведущие части и силовое оборудование ТП постоянного тока.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бадер, М.П. Концепция обновления и перспективы технического развития систем тягового электроснабжения / М.П. Бадер, В.Г. Сыченко // *Технічна електродинаміка*, Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність, Ч. 2., 2009. – С. 88-93.
2. Бадер, М.П. Освоение в тяговом электроснабжении электрооборудования на основе высокотемпературной сверхпроводимости и его электромагнитная совместимость / М.П. Бадер // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2013, № 5, с. 43-47.

2. Результаты проведённых теоретических исследований возможного использования СОТ на фидере постоянного тока наглядно иллюстрируют, что его установка вместо одного из быстродействующих выключателей постоянного тока полезна, но не так необходима, как на переменном токе.

3. Проведённое расчётно-теоретическое исследование токоограничивающего действия СОТ при его установке на вводах в РУ-27,5 кВ наглядно показало колоссальный технический эффект, недостижимый для других типов токоограничивающих устройств и тем более для вакуумной коммутационной аппаратуры.

4. Целесообразность использования СОТ в силовых цепях действующих ТП системы тягового электроснабжения переменного тока должна быть освещена с экономической точки зрения, которая, несомненно, имеет место быть, если не сейчас, то в обозримом будущем.

REFERENCES

1. Bader M.P., Sychenko V.G. Kontsepsiya obnoveniya i perspektivy tekhnicheskogo razvitiya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya [The concept of renovation and technological development prospects traction power supply systems]. *Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics*, 2009, pp. 88-93.
2. Bader M.P. Osvoenie v tyagovom elektrosnabzhenii elektrooborudovaniya na osnove vysokotemperaturnoy sverkhprovodimosti i ego elektromagnitnaya sovmestimost' [Mastering in electrical traction power supply on the basis of high-temperature superconductiv-

3. Бадер, М.П. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения и элементов инфраструктуры на участках с высокоскоростным движением / М.П. Бадер, Ю.М. Иньков // Электротехника. 2014 г., № 8, с. 12-18.

ity and its electromagnetic compatibility]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta - Electronics and electrical transport*, 2013, no.5, pp. 43-47.

3. Bader M.P., In'kov Yu.M. Elektromagnitnaya sovместimost' sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya i elementov infrastruktury na uchastkakh s vysokoskorostnym dvizheniem [Electromagnetic compatibility of systems and traction power supply of infrastructure in areas with high traffic]. *Elektrotehnika - Electrical Engineering*, 2014, no. 8, pp. 12-18.

Поступила в печать 01.12.2012.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Сокол Е. И.*

Использование и освоение сверхпроводниковых технологий и нового высокотемпературного сверхпроводникового электротехнического оборудования в локомотивной и стационарной энергетике позволит принципиально новым образом решить вопросы повышения надежности и эффективности тягового электроснабжения, экономии электроэнергии.

Установка на тяговых подстанциях (ТП) сверхпроводниковых ограничителей токов (СОТ) позволит существенно снизить термическое и динамическое действие токов короткого замыкания на силовое оборудование и токоведущие части.

Имитационное моделирование токоограничивающего действия СОТ проводилось применительно к ТП на участке с интенсивным пригородным движением. Проведенные исследования показали, что сверхпроводниковый ограничитель токов короткого замыкания является сверхбыстродействующим безинерционным устройством, которое обладает способностью ограничивать не только установившееся значение тока к.з., но и полностью срезать амплитуду сверхпереходного тока к.з., на что не способен ни один из самых совершенных быстродействующих выключателей. Отмечено, что изменение начальной фазы короткого замыкания при прочих равных условиях практически не влияет на конечную температуру нагрева токоограничивающего элемента СОТ.

Проведенные расчетно-теоретические исследования токоограничивающего действия СОТ при его установке на вводах в РУ-27,5 кВ наглядно показали колоссальный технический эффект, недостижимый для других типов токоограничивающих устройств и тем более для вакуумной коммутационной аппаратуры.

Ключевые слова: сверхпроводимость; ограничение тока; электрическая тяга; коммутационная аппаратура.

УДК 621.331.3

М. П. БАДЬОР, В. В. ЛОБИНЦЕВ (МІІТ)

Кафедра Енергопостачання електричних залізниць, Московський державний університет шляхів сполучення, вул. Образцова 9, буд. 9, Москва, Російська Федерація, 127994, тел.: (495) 684-22-87, ел. пошта: badjor@mail.ru

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ОСВОЄННЯ В ТЯГОВОМУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННІ ОБМЕЖУВАЧІВ СТРУМУ НА ОСНОВІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПРОВІДНОСТІ

Використання та освоєння надпровідникових технологій і нового високотемпературного надпровідникового електротехнічного обладнання в локомотивній і стаціонарній енергетиці дозволить на принципово новому рівні вирішити питання підвищення надійності та ефективності тягового електропостачання, економії електроенергії.

Установка на тягових підстанціях (ТП) надпровідникових обмежувачів струмів (НОС) дозволить істотно знизити термічну і динамічну дію струмів короткого замикання на силові устаткування та струмоведучі частини.

Імітаційне моделювання струмообмежувальної дії НОС проводилося стосовно до ТП на ділянці з інтенсивним приміським рухом. Проведені дослідження показали, що надпровідниковий обмежувач струмів короткого замикання є надшвидкодіючим безінерційним пристроєм, який має здатність обмежувати не тільки сталі значення струму к.з., але і повністю зрізати амплітуду надперехідного струму к.з., на що не здатен жоден з найдосконаліших швидкодіючих вимикачів. Відзначено, що зміна початкової фази короткого замикання за інших рівних умов практично не впливає на кінцеву температуру нагрівання струмообмежувального елемента НОС.

Проведені розрахунково-теоретичні дослідження струмообмежувальної дії НОС при його установці на вводах в РП-27,5 кВ наочно показали колосальний технічний ефект, недосяжний для інших типів струмообмежувачів пристроїв і тим більше для вакуумної комутаційної апаратури.

Ключові слова: надпровідність; обмеження струму; електрична тяга; комутаційне обладнання.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Сокол С. І.*

© Бадёр М.П., Лобынцев В.В., 2015

UDC 621.331.3

M. P. BADER, V. V. LOBYNTSEV (MIIT)

Department of Energy supply of electric railways, Moscow State University of Transport Communications,
9 Obraztsova Street, build. 9, Moscow, Russia Federation, 127994, тел.: (495) 684-22-87,
e-mail: badjor@mail.ru

MATHEMATICAL MODELING AND IMPLEMENTATION IN TRACTION POWER SUPPLY CURRENT LIMITER BASED ON HIGH SUPERCONDUCTIVITY

The use and development of superconductor technologies and new high-temperature superconducting electrical equipment in the locomotive and stationary power will enable a fundamentally new level to solve the issues of improving the reliability and efficiency of the traction power supply, energy saving.

Installation of traction substations (TS) of superconducting current limiters (SCL) will significantly reduce the thermal and dynamic effects of short circuit currents in the power equipment and live parts.

Simulation modeling of current-limiting action SCL was conducted with respect to the TS at the site with heavy commuter traffic. Studies have shown that the superconducting limiting short-circuit currents, superfast without inertia is a device that has the ability to restrict not only the steady short-circuit current value, but also completely cut off amplitude subtransient short-circuit current, what can not, none of the most advanced high-speed switches. It is noted that the change in the initial phase of a short circuit, ceteris paribus virtually no effect on the final temperature of the heating element current-limiting cells.

Made settlement and theoretical studies of current-limiting action SCL when mounted on the bushings to 27.5 kV clearly shown enormous technical effect, inaccessible to other types of current-limiting devices and especially for vacuum switchgear.

Keywords: superconductivity; current limitation; electric traction; commutation equipment.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Sokol Ye. I.*

УДК 625.113:656.222.1

М. Б. КУРГАН, С.Ю. БАЙДАК, О.Ф. ЛУЖИЦЬКИЙ, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА (ДНУЗТ)

Каф. «Проектування і будівництво доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kunibor@mail.ru

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ ДІЛЯНКИ КУМИ-НОВОМОСКОВСЬК ПРИДНІПРОВСЬКОЇ ЗАЛІЗНИЦІ

Вступ

Організація швидкісного руху пасажирських поїздів на залізницях України можлива після проведення модернізації та реконструкції інфраструктури залізниць, яка передбачає електрифікацію ділянок, що працюють на тепловозній тязі. Крім того, впровадження швидкісних денних міжрегіональних поїздів дасть можливість мінімізувати витрати на пасажирські перевезення. Створення системи швидкісного руху пасажирських поїздів в Україні дозволить істотно підвищити конкурентоздатність залізничного транспорту у сфері пасажирських перевезень, скоротити час перебування пасажирів у дорозі, підвищити мобільність населення

та додатково стимулювати соціальний розвиток регіонів [1].

Відповідно до Програми [2] передбачається для впровадження прискореного руху пасажирських поїздів на напрямку Київ-Дніпропетровськ електрифікація ділянки Куми-Дніпропетровськ. Пропозиції Придніпровської залізниці враховують також модернізацію інфраструктури існуючої ділянки Куми-Дніпропетровськ [3].

На напрямку швидкісного руху Полтава – Дніпропетровськ з метою ліквідації кутового заїзду на станцію Красноград передбачається будівництво обходу вузла Красноград [3] (рис. 1).

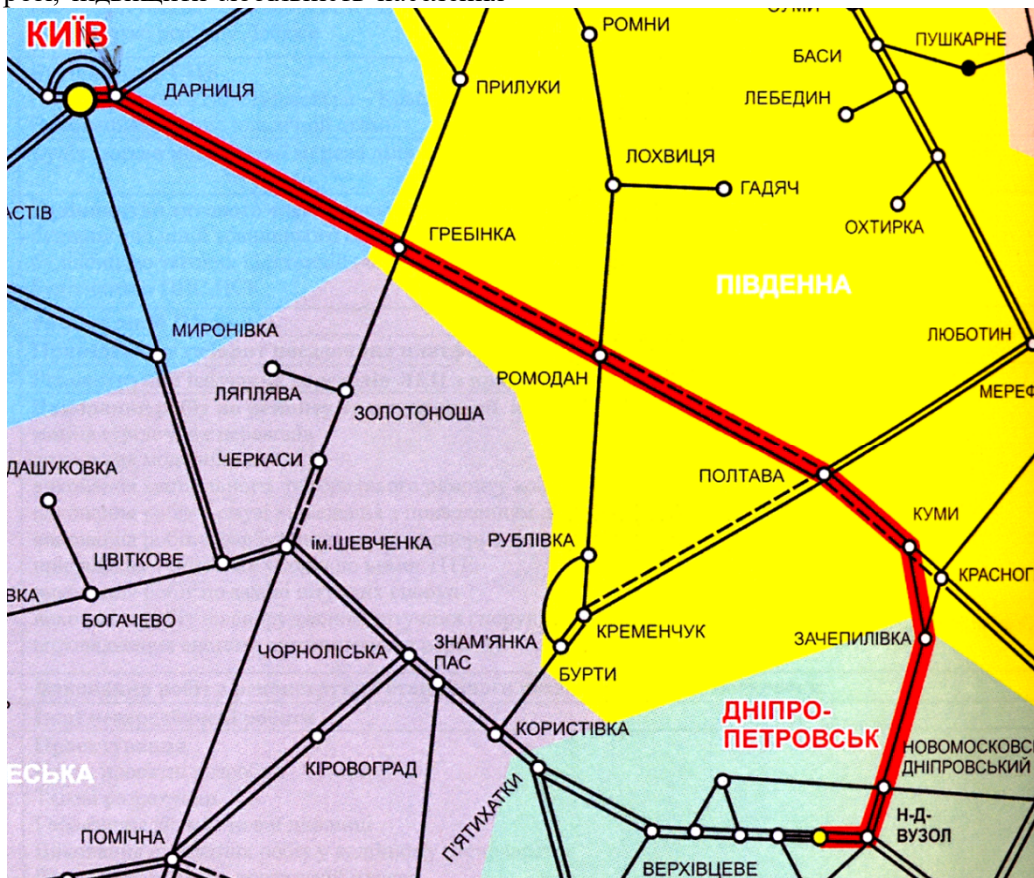


Рис. 1. Напрямок швидкісного руху пасажирських поїздів

Характеристика ділянки Куми-Новомосковськ-Дніпропетровськ

За технічним оснащенням ділянка Куми-Новомосковськ – одноколійна, на тепловозній тязі з вантажонапруженістю 1,7 млн. ткм/км

брутто на рік. Друга ділянка Новомосковськ-Дніпропетровськ – двоколійна, на електричній тязі, вантажонапруженість 12/36 млн. ткм/км брутто відповідно по непарній і парній коліях.

За обрисом поздовжній профіль представляє собою одноманітний спуск від ст. Куми до ст. Зачепилівка, потім поступовий підйом до ст. Губиниха і далі спуск до ст. Новомосковськ. Від Новомосковська до Дніпропетровська виділяється ділянка з підйомом від Самарівки до Нижньодніпровськ-Вузла з послідуочим спуском. Керівний ухил у непарному напрямку складає 7 ‰, у парному – 8 ‰, незважаючи на те, що на окремих ділянках зустрічаються і більш круті, але короткі за довжиною ухили.

Проведений аналіз всього напрямку Куми-Новомосковськ-Дніпропетровськ показав, що за крутизною ухилів більш складною є ділянка Куми-Новомосковськ, що при електрифікації ділянки й потужному рухомому складі позначається не так сильно, як вплив плану лінії. За параметрами плану більш складною є ділянка Новомосковськ-Дніпропетровськ, що є більш

впливовим фактором при впровадженні прискореного руху.

На напрямках, що готуються для впровадження прискореного й швидкісного руху поїздів особливо гостро стоїть питання підвищення швидкості за рахунок усунення обмежень швидкості при проведенні ремонтних робіт. Так, на напрямку Куми-Дніпропетровськ існуючі швидкості на рівні 40 км/год обмежуються на станціях Бузівка, Перещепине, Кільчень, Губиниха, Новомосковськ [4], що приводить до втрат за рахунок збільшення:

- роботи гальмівних сил на ділянці гальмування;
- механічної роботи сили тяги локомотива та витрат електроенергії на ділянці розгону;
- часу руху поїзда при наявності бар'єрного місця.

Приклад кривої швидкості при наявності обмеження швидкості руху по ст. Бузівка й Перещепине наведено на рис. 2.

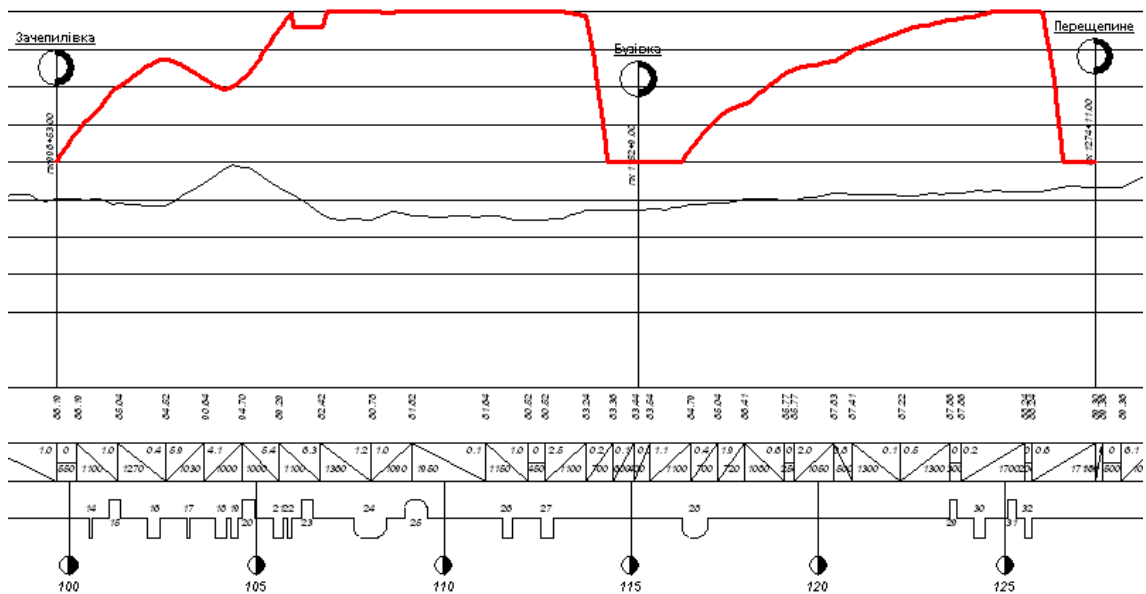


Рис. 2. Крива швидкості руху при наявності обмеження по станціях

У якості рухомого складу розглядався між-регіональний електропоїзд Hyundai Rotem [5].

Методика дослідження

Для прийняття відповідних рішень щодо доцільності зняття тих чи інших обмежень швидкості були виконані тягові розрахунки для існуючого й перспективного технічного стану ділянки Куми-Новомосковськ-Дніпропетровськ.

При існуючому технічному стані в розрахунок вводились допустимі швидкості руху за

наказом начальника Придніпровської залізниці [4]. Для перспективного технічного стану ділянки в розрахунок вводились допустимі швидкості руху за пропозиціями Придніпровської залізниці [3] щодо підвищення швидкості руху на станціях Бузівка, Перещепине, Кільчень, Губиниха, Новомосковськ до 120 км/год у пасажирському русі (крім ст. Новомосковськ) і до 80 км/год у вантажному за рахунок проведення капітального ремонту колії. А також пропозиції щодо підвищення швидкості за рахунок ремонтів 17-ти переїздів, двох мостів (км

97+563, км 122+223), заміни ґрунту тіла насипу на хворому земляному полотні (км 144+500).

Заплановані роботи з модернізації напрямку підтверджують те правило, що перехід на електричну тягу повинен супроводжуватись проведенням низки інших заходів, тобто проблема повинна вирішуватись комплексно.

Основні показники міжрегіонального електропоїзда подвійного живлення для пасажирських перевезень на залізницях України були прийняті відповідно до технічного завдання [5], тягова характеристика якого представлена на рис. 3.

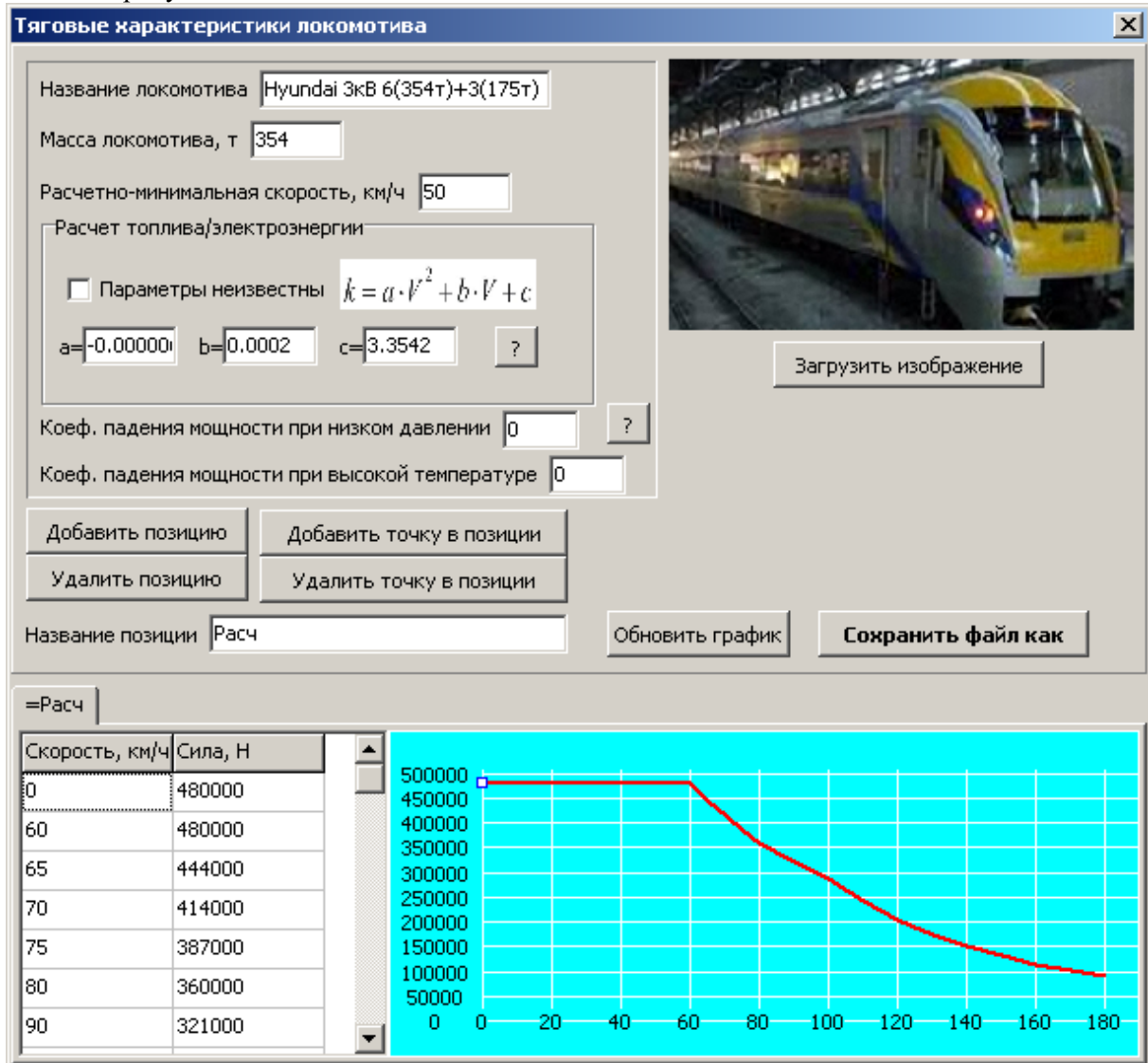


Рис. 3. Тягова характеристика Hyundai Rotem

Виходячи з аналізу основних характеристик моторвагонного рухомого складу Hyundai Rotem, можна зробити висновки, що вони відносяться до категорії поїздів з розподіленою тягою, мають хороші характеристики за динамікою руху, дозволяють забезпечити комфортні доставки пасажирів.

Для виконання варіантних тягових розрахунків в даній роботі використовувалась програма MoveRW, яка включає три модулі.

За допомогою першого модулю встановлювались допустимі швидкості руху в кривих за методикою, викладеною у Правилах (ЦП-0236) [6]. Модуль дозволяє поєднувати файли обмежень

швидкості в кривих, на роздільних пунктах, за станом верхньої будови колії, земляного полотна та ін і за допустиму в експлуатації приймати найменшу.

Другий модуль використовується для виконання тягових розрахунків при різних типах локомотивів, масах рухомого складу і рівнях допустимих швидкостей.

Третій модуль дозволяє виводити на екран чи папір поздовжній профіль, план лінії, криву швидкості руху поїзда з встановленими обмеженнями в кривих для подальшого аналізу.

Тягові розрахунки були виконані для поїзда Hyundai Rotem (табл. 1) для максимальної швид-

кості до 160 км/год за умови повного викорис-
тання розрахункової сили тяги з метою найбільш

повної реалізації максимально допустимої швид-
кості руху.

Таблиця 1

Основні характеристики рухомого складу Hyundai Rotem

Рід стру- му	Склад поїзду	Потужність, кВт	Максим. швидкість, км/год	Маса брутто, т	Довжина по осям автозчеп- лення, м	Наванта- ження на вісь, кН/вісь
змінний, 25кВ, пос- тійний 3кВ	МС1 – Т – МВ – М – Т – М – М – Т – МС2	5280	160	530	200,16	180

Обмеження швидкості руху за планом колії враховуються автоматично програмою MoveRW при заданих параметрах кривих (існуючих чи проектних). Використання програми дозволило розглянути чотири варіанти: існуючий технічний стан ділянки залізниці, проектний технічний стан інфраструктури залізниці без зміни плану лінії,

проектний технічний стан інфраструктури заліз-
ниці з корегуванням параметрів кривих, проект-
ний технічний стан інфраструктури залізниці з
корегуванням плану лінії і реконструкцією стан-
цій.

Для прикладу, представлено чотири варіанти,
характеристики яких наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристика розрахункових варіантів

Номер варіанта	Характеристика варіанта	Встановлені швидкості, км/год		
		по станціях	на перегонах	в кривих
1	Існуючий технічний стан інфра- структури залізниці	40-80 відпо- відно наказу	80-100 відпо- відно наказу	за існуючими параметрами $R_{існ}, l_{існ}, h_{існ}$
2	Проектний технічний стан інфра- структури залізниці без зміни пла- ну лінії	80	100 -140	за існуючими параметрами $R_{існ}, l_{існ}, h_{існ}$
3	Проектний технічний стан інфра- структури залізниці з корегуван- ням параметрів кривих	80	100 -140	за проектними параметрами $R_{пр}, l_{пр}, h_{пр}$
4	Проектний технічний стан інфра- структури залізниці з корегуван- ням плану лінії і реконструкцією станцій	120	140-160	за проектними параметрами $R_{пр}, l_{пр}, h_{пр}$

В табл. 2 наведені характеристики кривих
 $R_{існ}, l_{існ}, h_{існ}$ – відповідно радіус, довжина пе-
рехідної кривої й підвищення зовнішньої рей-
ки.

Аналіз результатів розрахунків

Результати розрахунків представлено в
табл. 3.

Таблиця 3

Тягово-енергетичні показники по варіантам

Варіанти	Напряг	L, км	Vmax, км/год	Vcp, км/год	A, кВт- год	Rm, т-км	Rt, т-км	t, хв.
1	непарн	127,971	100	77	919,2	276,38	207,04	100,2
	парний	131,029	100	77	1112,9	334,84	160,51	101,8
2	непарн	127,971	140	97	1444,3	436,43	336,01	79,2
	парний	131,029	140	98	1702,4	514,64	307,08	80,0
3	непарн	127,971	140	105	1030,4	311,89	194,78	73,0
	парний	131,029	140	107	1260,7	381,71	157,21	73,8
4	непарн	127,971	160	119	1786,7	543,05	401,78	64,6
	парний	131,029	140	117	1823,1	553,1	316,98	67,3

За результатами розрахунків побудовані графіки часу руху (рис. 4) і витрат електроенергії

(рис. 5) для розглянутих варіантів для непарного й парного напрямків.

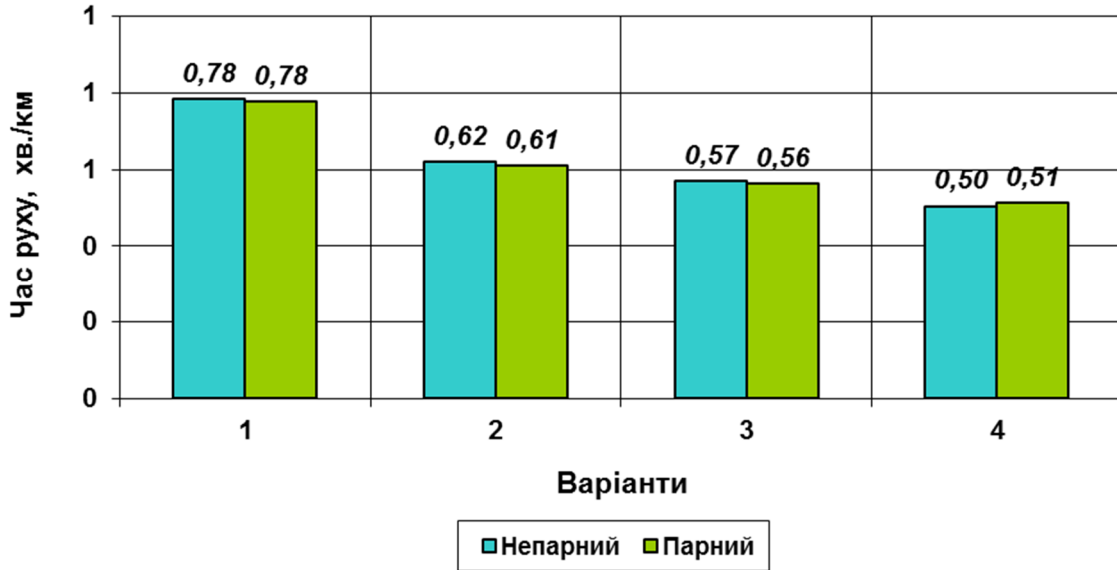


Рис. 4. Час руху пасажирського поїзда віднесений до 1 км

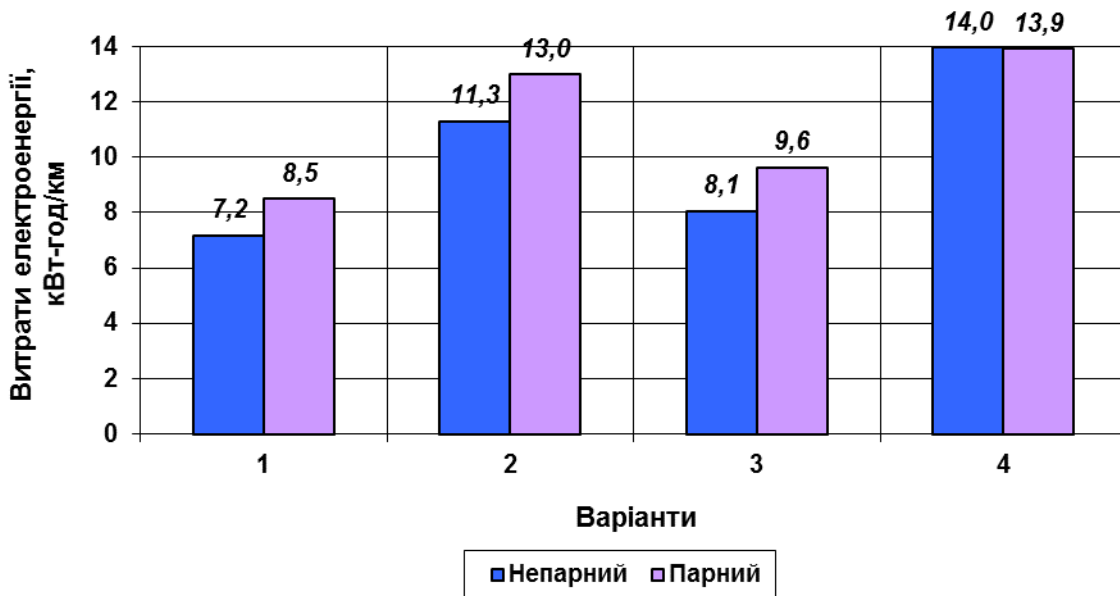


Рис. 5. Питомі витрати електроенергії за напрямками руху

Проведений аналіз отриманих результатів тягових розрахунків показав, що підвищення швидкості руху на станціях до 120 км/год і перегонах до 160 км/год не є доцільним на розглянутій ділянці, бо час руху скорочується відносно варіанта 3 несуттєво – всього на 7 хв., а витрати електроенергії збільшуються в 1,2-1,6

рази відносно існуючого технічного стану і в 5-7 разів відносно варіанта 3 (рис. 6, 7).

Витрати електроенергії склали у першому варіанті близько 8 кВт-год/км, у другому – близько 13 кВт-год/км, у третьому – 10 кВт-год/км і в четвертому – 14 кВт-год/км (рис. 7).

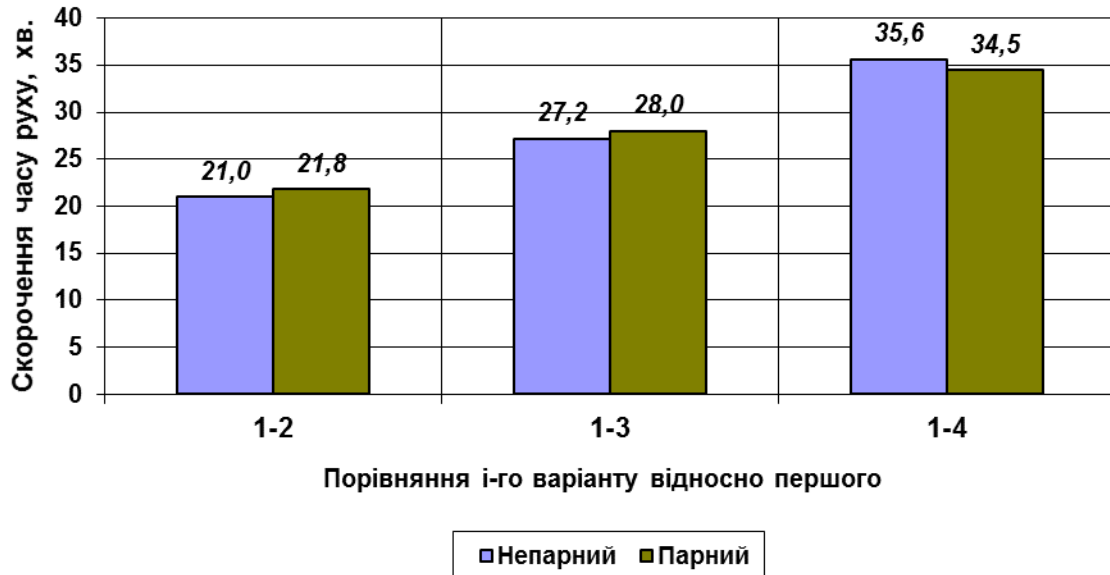


Рис. 6. Скорочення часу руху відносно існуючого технічного стану

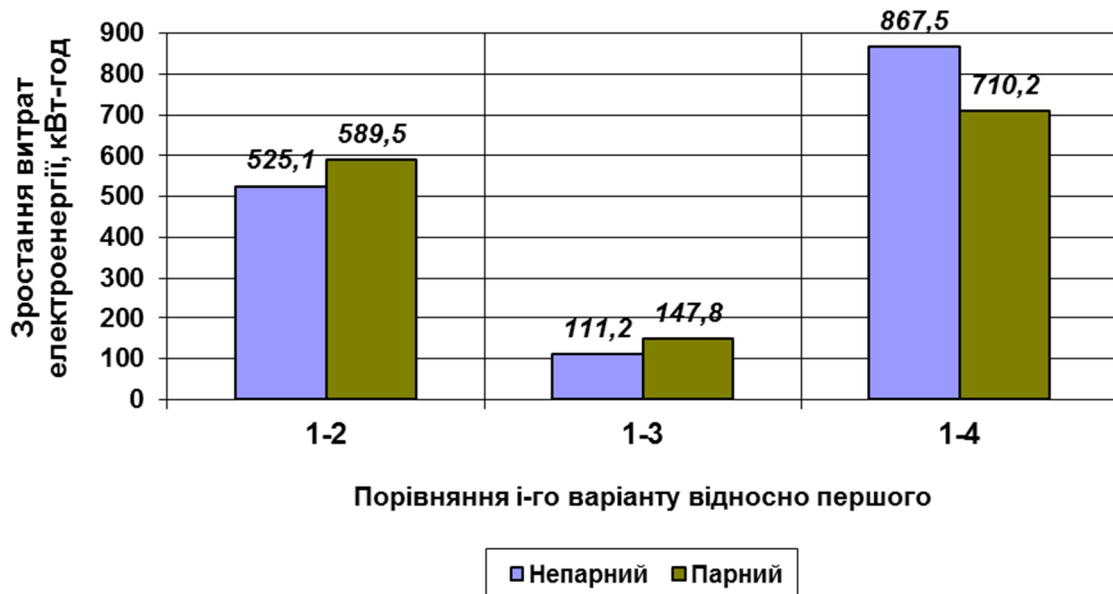


Рис. 7. Зростання витрат електроенергії відносно існуючого технічного стану

Було встановлено, що при наявності бар'єрних місць з різним рівнем обмеження швидкості й довжини перевагу слід віддавати при інших рівних умовах усуненню ділянок з низьким рівнем обмеження 25, 40, потім 60 км/год і т.д. При наявності ділянок обмеження швидкості різної довжини при інших рівних умовах слід віддавати перевагу тим, які мають більшу довжину ділянок. При наявності ділянок обмеження швидкості, що розташовані на різних ухилах поздовжнього профілю при інших рівних умовах слід віддавати перевагу тим, які розташовані на ухилах $\pm 3\%$, тобто поїзд проходить ділянку в тяговому режимі. Якщо ділянка знаходиться на крутих підйомах, то ефект знижується, так як поїзд може не вийти

на максимальну допустиму швидкість, на крутих спусках поїзд рухається в режимі регульованого гальмування і ефект також знижується [7,8].

Аналіз результатів тягових розрахунків показав, що збільшення максимальної швидкості руху по станціям до 80 км/год і на перегонах до 120-140 км/год (варіант 3) дає можливість скоротити час руху моторвагонного рухомого складу Hyundai Rotem від ст. Куми до ст. Дніпропетровськ на 27-28 хв. відносно існуючого технічного стану. При цьому усуваються різкі зміни в рівнях швидкості по станціям і перегонах і спостерігається відносно невелике збільшення витрат електроенергії. Цей варіант і пропонується при складанні графіка руху поїздів [9].

Висновки

1. На основі проведеного дослідження встановлено, що на сучасному етапі вирішення задачі впровадження прискореного руху потребує системного підходу, тобто заміни тепловозної тяги на електричну, комплексного вирішення питань з підвищення швидкості руху на станціях Бузівка, Перещепине, Кільчень, Губиниха, Новомосковськ з 40 до 80 км/год, удосконалення плану залізниці шляхом корегування параметрів кривих, виконання ремонтних робіт на перегонах.

2. Як показав проведений аналіз, бар'єрні місця викликають необхідність зниження шви-

дкості відносно максимального її рівня, що приводить до втрат часу руху, збільшення витрати електроенергії, величина яких залежить від рівня встановленого обмеження швидкості, довжини ділянки та її розташування, типу і маси рухомого складу.

3. Результати тягово-енергетичних показників для нового двосистемного електропоїзду Hyundai Rotem підтверджують можливість після електрифікації ділянки Куми-Новомосковськ організацію прискореного руху поїздів на напрямку Київ-Полтава-Дніпропетровськ з тривалістю поїздки до 5 год.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Концепція державної цільової програми впровадження на залізницях швидкісного руху пасажирських поїздів на 2005-2015 роки. – К., 2004. – 43 с.
2. Перспективи електрифікації залізниць України на 2011-2016 рр. Затв. наказом Генерального директора Укрзалізниці № 274-Ц від 10.06.2011.
3. Пропозиції ДП „Придніпровська залізниця” по організації швидкісного руху Київ-Дніпропетровськ. Дільниця Дніпропетровськ-Новомосковськ-Куми. – Д., 2011. – 35 с.
4. Наказ про встановлення найбільших швидкостей руху поїздів на Придніпровській залізниці від 29.12.2009 р. №765/Н. – 92 с.
5. Міжрегіональний електропоїзд подвійного живлення для пасажирських перевезень на залізницях України / Технічне завдання А147-ТРА-10001, – К., 2010.
6. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії / М.Б. Курган, А. М. Орловський, О. М. Патласов, В. В. Циганенко, Д. М. Курган: ЦП-0236: Затв. наказом Укрзалізниці від 14.12.2010 №778-Ц. – К., 2011. – 56 с.
7. Курган М. Б. Вплив обмеження швидкості на енергетичні показники руху поїздів / М. Б. Курган, О. С. Маркова // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 16. – С. 29–36.
8. Корженевич І.П. Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів / І.П. Корженевич, М.Б. Курган, Ю.С. Бараш, Д.М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – Вип. 20. – С. 233-239.
9. Курган М.Б. Передумови впровадження прискореного руху поїздів на напрямку Куми-Дніпропетровськ / М.Б. Курган, С.Ю. Байдак, Н.П. Хмелевська // Українськ. залізниця, Міжнародний техніко-економічний журнал. – 2014, № 10. – С. 56-64.

Надійшла до друку 01.12.2012.

REFERENCES

1. Kontsepsiya derzhavnogo tsil'ovoyi prohramy vprovadzhennya na zaliznytsyakh shvydkisnoho rukhu pasazhyrs'kykh poyizdiv na 2005-2015 roky [Concept of the State Programme for Implementation of high-speed passenger trains for 2005-2015]. Kyiv, 2004, 43 p.
2. Perspektyvy elektryfikatsiyi zaliznyts' Ukrainy na 2011-2016 rr. [Prospects for the electrification of railways of Ukraine for 2011-2016]. Ukrzaliznitsya Publ., 2011.
3. Propozytsiyi DP „Prydniprov's'ka zaliznytsya” po orhanizatsiyi shvydkisnoho rukhu Kyiv-Dnipropetrovs'k. Dil'nytsya Dnipropetrovs'k-Novomoskovs'k-Kumy [Offers State Enterprise "Dnieper Railroad" to organize high-speed Dnipropetrovsk-Kyiv. Plot Novomoskovsk Dnipropetrovsk-Gumi]. Dnipropetrovsk, 2011. 35 p.
4. Nakaz pro vstanovlennya naybil'shykh shvydkostey rukhu poyizdiv na Prydniprov's'kiy zaliznytsi vid 29.12.2009 r. #765/N [Order on establishment of the largest train speeds on the Prydniprov'ska railway, from 29.12.2009. №765 / N]. 92 p.
5. Mizhrehional'nyy elektropoyizd podviynoho zhyvlennya dlya pasazhyrs'kykh perevezen' na zaliznytsyakh Ukrainy [Interregional electric power to double passenger traffic on the railways of Ukraine]. Kyiv, 2010.
6. Kurhan M.B., Orlovs'kyu A. M., Patlasov O. M., Tsyhanenko V. V., Kurhan D. M. Pravyla vyznachennya pidvyshchennya zovnishn'oyi reyky i vstanovlennya dopustymykh shvydkostey v kryvykh dilyankakh kolyi [Rules of superelevation and setting allowable speed in track curves sites]. Kyiv, 2011. 56 p.
7. Kurhan M. B., Markova O. S. Vplyv obmezheniya shvydkosti na enerhetychni pokaznyky rukhu poyizdiv [The impact of the speed limit on the energy performance of trains]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 16, pp. 29-36.
8. Korzhenevych I.P., Kurhan M.B., Barash Yu.S., Kurhan D.M. Vplyv pidvyshchennya shvydkosti rukhu poyizdiv na vytraty enerhoresursiv [The impact of increasing the speed of trains on energy costs]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho*

transportu imeni akademika V. Lazariana [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 20, pp. 233-239.

9. Kurhan M.B., Baydak S.Yu., Khmelevs'ka N.P. *Peredumovy vprovadzhennya pryskorenoho rukhu poyzidiv na napryamku Kumu-Dnipropetrovsk* [Prerequisites for the accelerated implementation of the train in the direction of Kuma-Dnepropetrovsk]. *Ukrayins'ki zaliznytsi - Ukrainian railways*, 2014, no. 10, pp. 56-64.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

В даній статті надано пропозиції щодо застосування системного підходу при впровадженні електричної тяги для підвищення швидкості руху поїздів. Досліджуються варіанти впровадження електричної тяги в залежності від характеристик ділянки, що включають різні рівні допустимої швидкості руху поїздів по станціях і перегонах. Для досягнення мети дослідження проаналізовано технічний стан ділянок, параметри плану й поздовжнього профілю, виконано тягові розрахунки та визначено основні тягово-енергетичні показники для різних варіантів. За результатами розрахунків встановлено умови, при яких може бути доцільно переведення одноколіїної залізниці з тепловозної тяги на електричну.

Ключові слова: електрифікація; рухомий склад, тягова характеристика; швидкість руху; станція, перегін, криві ділянки колії, витрати електроенергії.

УДК 625.113:656.222.1

Н. Б. КУРГАН, С.Ю. БАЙДАК, О.Ф. ЛУЖИЦКИЙ, Н. П. ХМЕЛЕВСКАЯ (ДНУЖТ)

Каф. «Проектирование и строительство дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 48, эл. почта kunibor@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ УЧАСТКА КУМЫ-НОВОМОСКОВСК ПРИДНЕПРОВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

В данной статье представлены предложения, использующие системный подход при введении электрической тяги для повышения скорости движения поездов. Исследуются варианты внедрения электрической тяги в зависимости от характеристик участка, включающих различные уровни допустимой скорости движения поездов по станциям и перегонам. Для достижения цели исследования проанализированы техническое состояние участков, параметры плана и продольного профиля, выполнены тяговые расчеты и определены основные тягово-энергетические показатели для разных вариантов. По результатам расчетов установлены условия, при которых может быть целесообразен перевод однопутной железной дороги с тепловозной тяги на электрическую.

Ключевые слова: электрификация; подвижной состав, тяговая характеристика; скорость движения; станция, перегон, кривые участки пути, расход электроэнергии.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 625.113:656.222.1

M. B. KURHAN, S. YU. BAIDAK, O.F. LUŽICKIY, N. P. KHMELEVSKA (DNURT)

Dep. «Engineering And Construction Of Roads», Dnipropetrovsk National University Of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, Tel./Fax +38 (056) 373 15, e-mail kunibor@mail.ru

EFFICIENCY OF ELECTRIFICATION THE KUMA-NOVOMOSKOVSK DIRECTION OF PRIDNEPROVSKAYA RAILWAY

This article presents the proposal, using a systematic approach with the introduction of electric traction to increase the speed of trains. Investigate options for the introduction of electric traction, depending on the characteristics of the area, including the various levels of permissible speed of trains at stations and spans. To achieve the objectives of the study analyzed the technical condition of the sites, the parameters of the plan and longitudinal profile, traction calculations are made and the main traction and energy indicators for the different options. The calculations are set conditions that may be expedient translation of a single-track railway with diesel traction into electric.

Keywords: electrification; rolling stock, traction characteristics; movement speed; station, stage, curves track sections, the consumption of electric energy.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

© Курган М. Б. та ін., 2015

В. Г. СИЧЕНКО, Д. О. БОСИЙ, В. В. БОЖКО, Є. М. КОСАРЕВ, Ю. А. БОРИСОВСЬКА,
Я. П. ЩЕРБАК, Б. О. БОРЩ (ДНУЗТ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: elpostz@i.ua

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ШВИДКІСНИХ МАГІСТРАЛЕЙ

Вступ

У розвитку високошвидкісного залізничного транспорту спостерігаються ціла низка тенденцій, серед яких можна виділити [1]:

- розширення мережі електрифікованих високошвидкісних магістралей;
- збільшення сумарної тягової потужності тривалого режиму руху поїздів;
- застосування безколекторних тягових двигунів і напівпровідникової силової елементної бази нового покоління, зниження питомого енергоспоживання;
- застосування струмоприймачів, закритих шумоподавляючими обтічниками.

Сучасний стан електрифікованих залізниць обумовлюється необхідністю забезпечення конкурентоспроможності з іншими видами транспорту, як при перевезенні пасажирів, так і при доставці вантажів. Разом з відомими перевагами електрифікованих залізниць необхідно також забезпечувати високий рівень комфортності і швидкості доставки. Вирішення цих завдань і зумовлює впровадження швидкісного і високошвидкісного пасажирського транспорту, а також великовагового руху потягів.

Як відомо, загальні вимоги до систем тягового електропостачання швидкісних магістралей (СТЕ) полягають у: забезпеченні надійного струмознімання і завданої якості електричної енергії при живленні швидкісного електрорухомого складу. Пристрої тягового електропостачання також не повинні обмежувати максимальні швидкості руху нижче прийнятого на ділянці рівня. Встановлення максимальних швидкостей руху швидкісних потягів по окремих конкретних ділянках і перегонах існуючих магістралей здійснюється в результаті комплексної оцінки умов допустимих швидкостей руху за станом колії і нормативам взаємодії з нею рухомого складу [2].

Досвід експлуатації існуючих систем електричної тяги показує, що швидкісний рух до 250 км/год забезпечують різноманітні системи тягового електропостачання, як постійного, так і

змінного струму без будь-яких обмежень. Розвиток і становлення кожної з цих систем обумовлювалися рівнем науково-технічного прогресу на певний період часу. При цьому необхідно відзначити, що система постійного струму з моменту своєї появи фактично не змінювалася структурно, а змінювалися, в основному, елементна база і вживане устаткування. Система змінного струму, навпаки, з самого початку свого застосування постійно піддається різного роду удосконаленням і поліпшенням. Можна констатувати, що, не зважаючи на задекларовані переваги і переважаюче нині застосування системи змінного струму, досвід її експлуатації доводить, що, в цілому, вона вже не відповідає сучасним вимогам. За усі роки експлуатації і постійної модернізації так і не були усунені основні недоліки цієї системи: небезпечний електромагнітний вплив, несиметричне завантаження фаз, значні об'єми транзиту реактивної енергії та інші [3].

Звичайно, наукові дискусії відносно того, яка система електрифікації краща, ведуться давно, але детального і комплексного порівняльного аналізу донині не виконано. Проте, при проведенні такого аналізу потрібно приймати до уваги, що передбачувані переваги впровадження системи змінного струму, а саме: зниження витрати електроенергії за рахунок зменшення втрат в контактній мережі, скорочення капітальних витрат за рахунок зменшення числа тягових підстанцій, зниження витрат міді за рахунок зменшення перерізу контактної підвіски не виправдалися, наприклад, в умовах Росії [4]. Як показують дослідження, виконані в Європі, переведення електрифікованих ділянок постійного струму при впровадженні швидкісного руху на змінний з урахуванням очікуваного співвідношення витрат і корисного ефекту не має достатніх підстав [5]. Звідси, перехід від системи постійного струму на змінний повинен бути зважено технологічним і доцільно обґрунтованим, що і показав досвід впровадження швидкісного руху на ділянці Москва-Санкт-

Петербург [6]. В той же час, як показує аналіз доступної науково-технічної літератури для живлення швидкісних магістралей зараз переважає застосування тяги змінного струму, як в Європі, так і в Азії. Такий підхід закріплений і в Пам'ятці [7], в якій наведені норми напруги для швидкостей 250 км/год і більше тільки для системи змінного струму. Для удосконалення якості передачі енергії при швидкісному русі залізниць Франції, Японії і Росії використовується також система з автотрансформаторами 2х25 кВ. Пошук шляхів комплексного усунення апіорі наявних недоліків системи електропостачання змінного струму має бути спрямований на забезпечення симетричного розподілу тягового навантаження по фазах трансформаторів підстанції і трифазної мережі, від якої вони отримують живлення, але, як показують останні дослідження [8], це завдання до цього часу не вирішене.

Сучасність науково-технічного прогресу обумовлена бурхливим розвитком силової електроніки і комп'ютерних технологій. Вдосконалення системи електричної тяги і перспективи її розвитку зумовлені безповоротним процесом оновлення усієї системи перетворення енергії, що витрачається на перевізний процес. Застосування перетворювачів постійного струму в трифазний змінний струм, тиристорних перетворювачів рівня напруги постійного струму, створення високоекономічних алгоритмів комп'ютерного управління перетворенням електроенергії, заміна колекторних двигунів постійного струму на безколекторні асинхронні трифазного струму, складають основний напрям технічного переозброєння систем електричної тяги і нині широко використовуються у ряді промислово розвинених країн. У зв'язку з цим залишається актуальним пошук рішень подальшого підвищення рівня напруги в тяговій мережі постійного струму до 12, 18, 24 кВ [3, 4, 9], тобто створення більш ефективної системи електропостачання постійного струму. Підвищення рівня напруги стає можливим за рахунок застосування і широкого впровадження перспективних видів електрорухомого складу з імпульсними тиристорними перетворювачами, що дозволяють виключити жорсткий зв'язок між напругою в тяговій мережі постійного струму і на тяговому двигуні. При цьому електрорухомий склад розробляється на основі безколекторних тягових двигунів

трифазного струму з живленням від контактної мережі постійного струму за допомогою автономних інверторів. На вході інвертора включається тиристорний перетворювач, що забезпечує узгодження з контактною мережею по рівню напруги.

Різко підвищити пропускну спроможність і ефективність електричної тяги постійного струму дозволяє рівень напруги в контактній мережі постійного струму 24 кВ: значно збільшити відстань між підстанціями, зменшити переріз дротів тягової мережі, зменшити втрати електроенергії в пристроях електропостачання, повністю усунути несиметрію живлячої напруги. Усе це і відсутність індуктивних втрат на постійному струмі може перевищити по ефективності усі системи змінного струму. Саме тому відбувається поступова еволюція підходів до електрифікації швидкісних магістралей на змінному струмі до переходу на більш досконали систему постійного струму 24 кВ [3, 10].

Мета роботи

Приймаючи до уваги вищерозглянуте необхідно оцінити напрямки підвищення якості функціонування тягового електропостачання при застосуванні системи постійного струму підвищеної напруги. Оскільки комплексний порівняльний аналіз різних систем електричної тяги представляє складне завдання, в статті виконаний аналіз енергетичних показників споживання електричної енергії в існуючих нині системах та пропонованій системі 24 кВ, що дозволить точніше і більш зважено підходити до вибору системи електричної тяги при впровадженні швидкісного та високошвидкісного руху, а також формуванні технічної політики при розвитку електрифікованих залізниць.

Методика розрахунку

Розрахунок централізованих систем тягового електропостачання постійного та змінного струму проводився за допомогою методики розрахунку миттєвих схем з використанням аналітичних функцій опору [11]. Відповідно до даної методики необхідно визначити функцію опору (1-2) для схеми живлення кожної міжпідстанційної зони, яка фізично визначає закономірність зміни опору для даної схеми.

Для вузлової схеми живлення:

$$f(x) = r_0 \times \begin{cases} x - \left(\frac{L+L_C}{2LL_C}\right)x^2, & 0 \leq x \leq L_C; \\ \frac{L\left(x - \frac{L_C}{2}\right) - \left(L - \frac{L_C}{2}\right)x^2}{L - L_C - \frac{L(L-L_C)}{L(L-L_C)}}, & L_C \leq x \leq L. \end{cases} \quad (1)$$

Для схеми живлення з повним паралельним з'єднанням проводів контактної мережі двох колій:

$$f(x) = r_0 \times \begin{cases} x - \frac{x^2}{2L} - \frac{x^2}{2L_{C1}}, & 0 \leq x \leq L_{C1}; \\ \frac{x^2 - 2L_Cx + L_CL_{C1}}{2L_C - 2L_{C1}} - \frac{L_Cx^2 - L_{C1}x^2}{2L(L_C - L_{C1})}, & L_{C1} \leq x \leq L_C; \\ \frac{x^2 - 2L_{C2}x + L_CL_{C2}}{2L_C - 2L_{C2}} - \frac{L_Cx^2 - L_{C2}x^2}{2L(L_C - L_{C2})}, & L_C \leq x \leq L_{C2}; \\ -\frac{(L-x) \cdot (LL_{C2} - 2Lx + L_{C2}x)}{2L(L - L_{C2})}, & L_{C2} \leq x \leq L. \end{cases} \quad (2)$$

де r_0 – питомий опір тягової мережі;
 L – відстань між тяговими підстанціями;
 L_{C1} – відстань до першого ППС;
 L_C – відстань до ПСК;
 L_{C2} – відстань до другого ППС.

При необхідності споживання заданої потужності в довільній точці тягової мережі струм електровоза буде збільшуватись на величину, що визначає необхідні для передачі цієї потужності втрати, відносно струму, визначеного для номінальної напруги. Таким чином, при споживанні постійної потужності в будь-якій точці тягової мережі, необхідно розрахувати струм електрорухомого складу (ЕРС) (3).

$$I(x) = \frac{U_{III} - \sqrt{U_{III}^2 - 4f(x)P}}{2f(x)} \quad (3)$$

де U_{III} – напруга на шинах тягової підстанції;

$f(x)$ - функція опору;

P – потужність ЕРС.

Для визначення напруги на струмоприймачі скористаємось формулою (4), в якій добуток

$$R_i(x) = \begin{cases} \rho + r_0 \cdot ((i-1)L - x), & 0 \leq x \leq (i-1)L; \\ \rho + r_0 \cdot (x - (i-1)L), & (i-1)L \leq x \leq (N-1)L. \end{cases} \quad (6)$$

де ρ – еквівалентний внутрішній опір тягової підстанції/автотрансформатора;

струму ЕРС та функції опору визначає втрати напруги в тяговій мережі.

$$U_e(x) = U_{III} - I(x) \cdot f(x) \quad (4)$$

За отриманими формулами функцій опору $f(x)$ можна визначити втрати потужності в контактній мережі, як добуток квадрату струму електровоза на відповідну функцію опору, тобто:

$$\Delta P = I(x)^2 \cdot f(x). \quad (5)$$

Для розрахунку автотрансформаторної системи тягового електропостачання змінного струму 2×25 кВ використовувалась методика розрахунку розподілених систем живлення. Згідно з даною методикою необхідно визначити функцію опору, враховуючи внутрішній опір тягових підстанцій та лінійних автотрансформаторів. Стосовно до прийнятої розрахункової ділянки, опір кожної ланки між тяговою підстанцією та найближчим автотрансформатором або між сусідніми автотрансформаторами, може бути виражений універсальною формулою:

N – загальна кількість тягових підстанцій та лінійних автотрансформаторів на розрахунковій ділянці.

Для випадку ряду тягових підстанцій та автотрансформаторів загальна функція опору $f(x)$ визначається як результуючий опір усіх ланок схеми заміщення для даної координати x , а саме:

$$f(x) = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i(x)}} \quad (7)$$

Для випадку стабілізації електрорухомим складом споживаної потужності використовується формула (3). Визначення напруги на струмоприймачі ЕРС та втрат потужності виконується відповідно до формул (4) та (5).

Слід зауважити, що для спрощення розрахунків, напруга на шинах тягових підстанцій приймалась однакою і рівною номінальному значенню для відповідної системи тягового

електропостачання. Розрахунки проводились за умови руху ЕРС в режимі тяги, з усталеною швидкістю без урахування розгону, вибігу та гальмування. Профіль та план колії приймався прямолінійним. При цьому до уваги приймалось, що швидкісні поїзди внаслідок великого опору руху споживають максимальний струм незалежно від профілю практично весь час руху по ділянці [12]. Для системи змінного струму 2×25 відстань між автотрансформаторами приймалась однакою. При розрахунках енергетичних показників порівнюваних систем тягового електропостачання враховувались однакові показники споживаної потужності при різних рівнях живлячої напруги сучасним швидкісним електрорухомим складом [13-15]. До розгляду приймалась реальна ділянка електрифікованої залізниці постійного струму.

Розрахункові схеми для порівняльного аналізу

1. Система тягового електропостачання постійного струму 3 кВ.



Рис. 1. Розрахункова схема постійного струму 3 кВ

Напруга на шинах тягових підстанцій: 3300 В; Тип тягової мережі: М120+2МФ-100+А185+Р65.

2. Система тягового електропостачання змінного струму 25 кВ

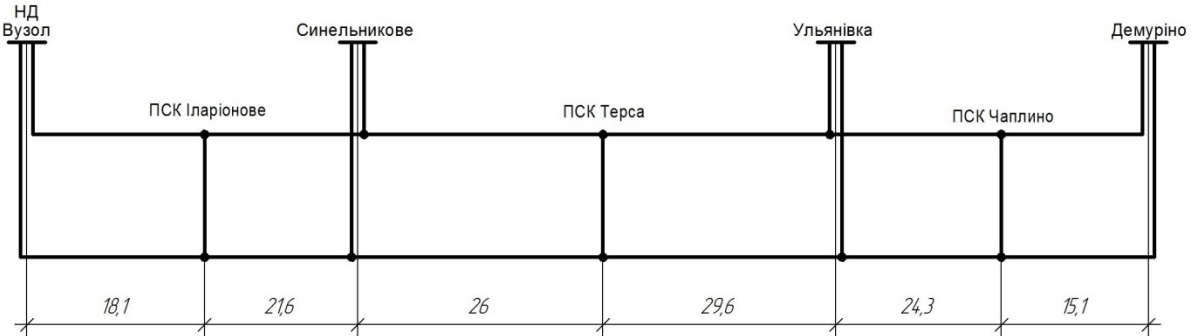


Рис. 2. Розрахункова схема змінного струму 25 кВ

Напруга на шинах тягових підстанцій: 27500 В; Тип тягової мережі: ПБСМ95+МФ-100+Р65.

3. Система тягового електропостачання змінного струму 2×25 кВ

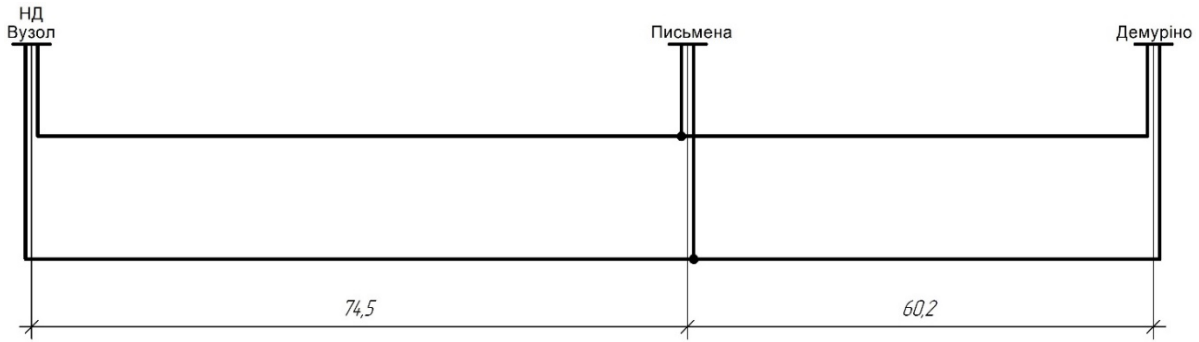


Рис. 3. Розрахункова схема змінного струму 2×25 кВ

Напряга холостого ходу тягових підстанцій: 27600 В; Тип тягової мережі: ПБСМ95+МФ-100+А185+Р65; Тип тягових трансформаторів: ОРДНЖ-16000/110-76 У1; Тип автотрансформаторів: АОМНЖ-10000/55-76 У1; Відстань між автотрансформаторами: 13,5 км.

4. Система тягового електропостачання постійного струму 24 кВ

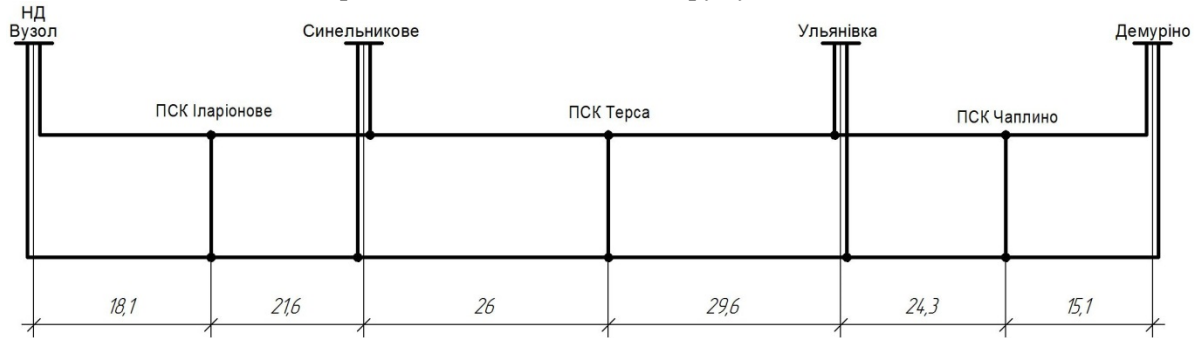
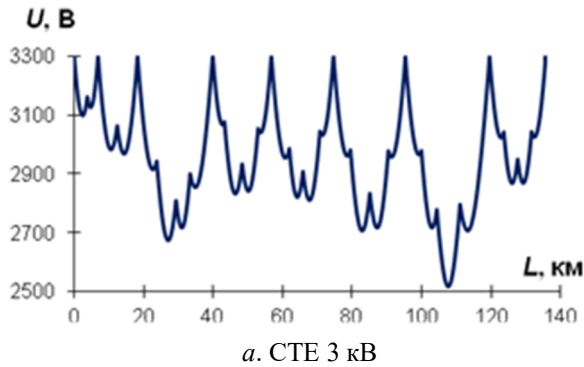


Рис. 4. Розрахункова схема постійного струму 24 кВ

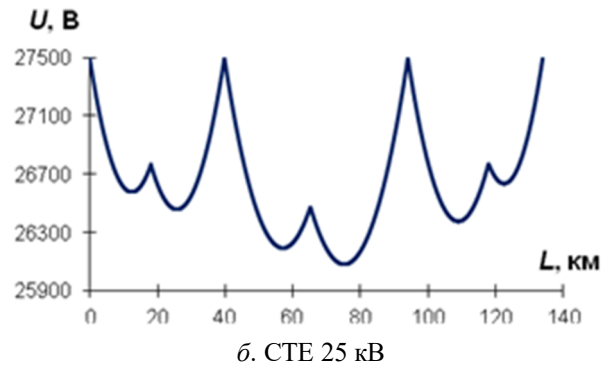
Напряга на шинах тягових підстанцій: 24000 В; Тип тягової мережі: М95+МФ-100+Р65.

Результати розрахунків

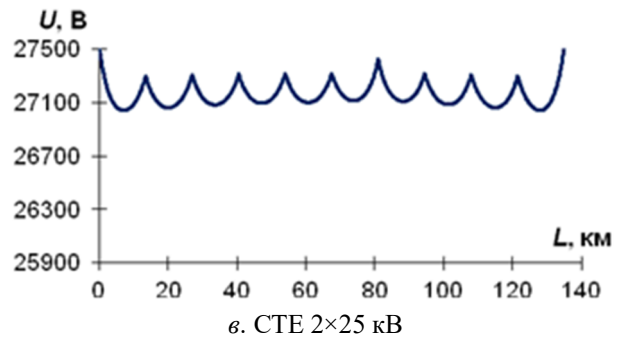
За результатами розрахунків для напрямку слідування НД Вузол – Демурино побудовані графіки напруги на струмоприймачі ЕРС (рис. 5) та миттєвих втрат потужності за час руху розрахунковою зоною (рис. 6). Результати розрахунків зведені у таблицю 1.



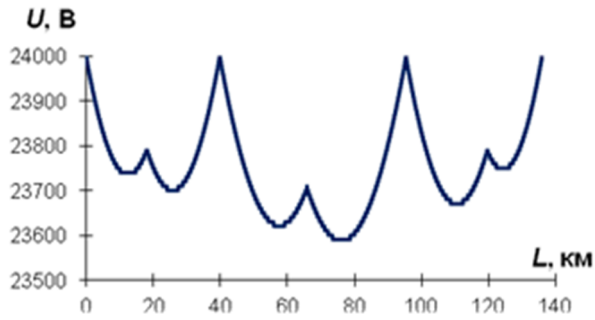
а. СТЕ 3 кВ



б. СТЕ 25 кВ

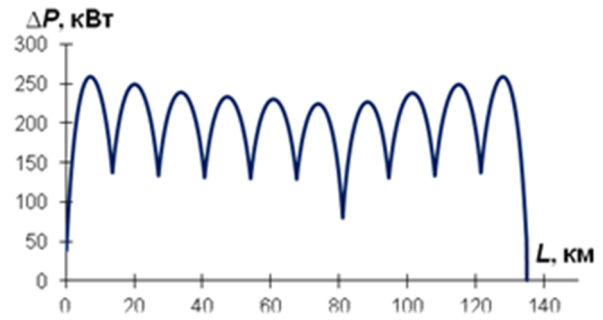


в. СТЕ 2×25 кВ

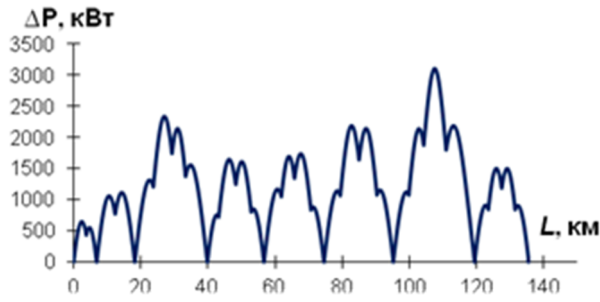


г. СТЕ 24 кВ

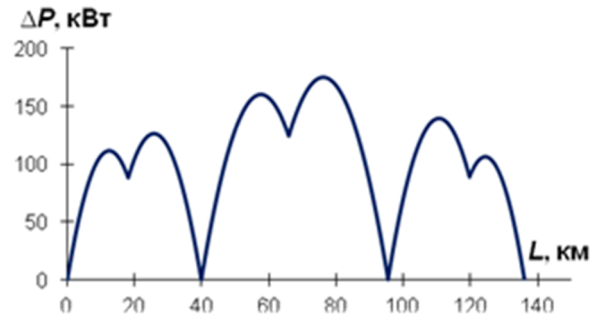
Рис. 5. Напряга на струмоприймачі ЕРС



в. СТЕ 2x25 кВ

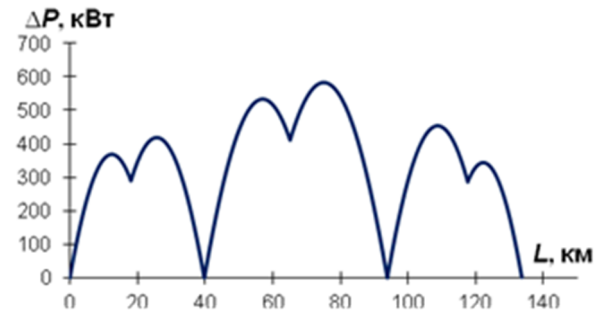


а. СТЕ 3 кВ



г. СТЕ 24 кВ

Рис. 6. Втрати потужності



б. СТЕ 25 кВ

Таблиця 1

Результати порівняльних розрахунків систем тягового електропостачання

Рід струму	Постійний струм				Змінний струм			
	3 кВ		24 кВ		25 кВ		2x25 кВ	
Параметр	U, В	ΔU, В	U, В	ΔU, В	U, В	ΔU, В	U, В	ΔU, В
M	2956,0	344,0	23752,9	247,3	26646,8	949,7	27156,7	343,3
min	2515	0	23580	0	26080	0	27040	0
max	3300	785	24000	420	27500	1420	27500	460
ΔP _{сер} , кВт	1204,3		104,3		342,7		204,6	

Висновки

При прийнятих умовах за результатами проведених розрахунків можна вказати на наступне:

- Система тягового електропостачання постійного струму 24 кВ має кращі показники по режиму напруги в тяговій мережі;

- Система тягового електропостачання постійного струму 24 кВ забезпечує найменші втрати потужності в тяговій мережі.

Сучасний етап розвитку силової електроніки та комп'ютерних технологій ставлять актуальне питання щодо технічної перебудови систем тягового електропостачання та електрорухомого складу. Для побудови високошвидкісних магістралей зі швидкістю руху 400 км/год найбільш перспективною є система електропостачання постійного струму 24 кВ розподіленого типу.

При впровадженні швидкісного та високошвидкісного руху, а також формуванні технічної політики для розвитку систем електропостачання електрифікованих залізниць необхідне

проведення комплексного техніко-економічного аналізу з урахуванням сучасних

досягнень науки та розвитку техніки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

REFERENCES

1. Блохін Є.П. Високошвидкісний наземний транспорт світу [Текст]: підручник / Є.П. Блохін, О.М. Пшінько. - Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2009.- 240 с.
2. Сиченко В.Г. Електропостачання швидкісних та високошвидкісних магістралей// Українські залізниці. № 5-6 (23-24) – 2015, - с. 32-39.
3. Перспектива разработки системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения 24 кВ для скоростной магистрали Москва-Екатеринбург / Б.А. Аржанников, А.Т. Бурков, А.Г. Галкин, В.А. Мансуров, И.О. Набойченко // Тренды.События.Рынки. 2012, №7, с. 48-50.
4. Курбасов А.С. Система электрической тяги XXI века.// Железные дороги мира. – 1999. – № 4. – С. 19–22.
5. О переходе с постоянного тока на переменный. // Железные дороги мира. - 2013, № 6, с. 68-71.
6. Котельников А.В. К вопросу о выборе системы тягового электроснабжения при организации регулярного скоротного сообщения на линии Санкт-Петербург-Москва // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе.: Сб. научн. тр. ОАО ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2010. с. 5-12.
7. ОСЖД Р-610/7 «Общие технические требования к системам тягового электроснабжения постоянного и переменного тока скоростных и высокоскоростных линий». 12 с.
8. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев, Д.В. Сербиненко. М.: ВМГ-Принт, 2015. – 349с.
9. Бадер М.П. Концепция обновления и перспективы технического развития систем тягового электроснабжения / М.П. Бадер, В.Г. Сыченко // Технічна електродинаміка, Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність, Ч. 2., 2009. – с. 88-93.
10. Хананов В.В., Бурков А.Т., Барч Д.В. Нововведения и инновационные процессы в тяговом электроснабжении.// Транспорт Российской Федерации. 2012, № 6, с. 34-39.
11. Босий, Д. О. Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності [Текст] / Д. О. Босий // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 8. – С.15-25.
12. Марский В. Е. Подготовка тягового электроснабжения для организации скоротного движения на линии Санкт-Петербург-Москва / Марский В. Е. //Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе.: Сб. научн. тр. ОАО ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2010. с. 38-45.
13. Высокоскоростной поезд Velaro для России./ А. Липп и др.// Железные дороги мира. – 2009. – №

1. Blokhin Ye.P., Pshin'ko O.M. *Vysokoshvydkisnyy nazemnyy transport svitu* [High speed Surface Transportation of the world]. Dnipropetrovsk, DNURT Publ., 2009. 240 p.
2. Sychenko V.G. *Elektropostachannya shvydkisnykh ta vysokoshvydkisnykh mahistraley* [Power supply of high-speed railways]. *Ukrayins'ki zaliznytsi - Ukrainian railways*, no. 5-6, 2015, pp. 32-39.
3. Arzhannikov B.A., Burkov A.T., Galkin A.G., Mansurov V.A., Naboychenko I.O. *Perspektiva razrabotki sistemy elektricheskoy tyagi postoyannogo toka povyshennogo napryazheniya 24 kV dlya skorostnoy magistrali Moskva-Ekaterinburg* [Prospects for the development of electric traction DC high voltage 24 kV for the highway from Moscow to Yekaterinburg]. *Trendy.Sobytiya.Rynki - Trends. Developments. Markets*, no. 7, 2012, pp. 48-50.
4. Kurbasov A.S. *Sistema elektricheskoy tyagi KhKhI veka* [Electric traction system of the XXI century]. *Zheleznye dorogi mira - Railways of the World*, 1999, no. 4, pp. 19-22.
5. О переходе с постоянного тока на переменный [On the transition from DC to AC]. *Zheleznye dorogi mira - Railways of the World*, 2013, no. 6, pp. 68-71.
6. Kotel'nikov A.V. *K voprosu o vybore sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya pri organizatsii regul'yarnogo skorotnogo soobshcheniya na linii Sankt-Peterburg-Moskva* [On the selection of tractive power at the organization of regular skorotnogo posts on the line St. Petersburg-Moscow]. *Tokos'em i tyagovoe elektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoyan-nom toke - Current collection and traction power supply during high-speed driving at a constant current*, 2010, pp. 5-12.
7. OSZhD R-610/7 *Obshchie tekhnicheskie trebovaniya k sistemam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo i peremennogo toka skorostnykh i vysokoskorostnykh liniy* [General technical requirements for traction power supply AC and DC high-speed and high-speed lines]. 12 p.
8. Kosarev A.B., Kosarev B.I., Serbinenko D.V. *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh energosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* [Electromagnetic processes in the power supply systems of railways AC]. Moscow, VMG-Print Publ., 2015. 349 p.
9. Bader M.P., Sychenko V.G. *Kontseptsiya obnoveniya i perspektivy tekhnicheskogo razvitiya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya* [The concept of renovation and technological development prospects traction power supply systems]. *Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodynamics*, 2009, pp. 88-93.
10. Khananov V.V., Burkov A.T., Barch D.V. *Novovvedeniya i innovatsionnye protsessy v tyagovom elektrosnabzhenii* [Innovation and innovation processes in traction power]. *Transport Rossiyskoy Federatsii - Transport of the Russian Federation*, 2012, no. 6, pp.

1. – С. 36–50.

14. Четырехсистемный электровоз большой мощности EuroSprinter ES64F4. // Железные дороги мира. – 2006. – № 12. – С. 30–39.

15. Развитие пассажирского подвижного состава для обычных линий. // Железные дороги мира. – 2009. – № 9. – С. 31–38.

Надійшла до друку 01.12.2012.

34-39.

11. Bosyu, D. O. Metodyka rozrakhunku myt-tyevykh skhem systemy tyahovoho elektropostachannya dlya spozhyvannya postiyanoi potuzhnosti [The method of calculation schemes instant traction system power consumption constant power]. *Elektryfikatsiya transport - Electrification of transport*, 2014, no. 8, pp. 15-25.

12. Marskiy V. E. Podgotovka tyagovogo elektrosnabzheniya dlya organizatsii skorocnogo dvizheniya na linii Sankt-Peterburg-Moskva [Preparation of traction power supply for high-speed traffic on the line St. Petersburg-Moscow]. *Tokos"em i tyagovoe elektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postoyannom toke - Current collection and traction power supply during high-speed driving at a constant current*, 2010, pp. 38-45.

13. Vysokoskorostnoy poezd Velaro dlya Rossii [High-speed train Velaro for Russia]. *Zheleznye dorogi mira - Railways of the World*, 2009, no.1, pp. 36-50.

14. Chetyrekhsistemnyy elektrovoz bol'shoy moshchnosti EuroSprinter ES64F4 [Four-sysytem high power electric locomotive EuroSprinter ES64F4]. *Zheleznye dorogi mira - Railways of the World*, 2006, no. 12, pp. 30-39.

15. Razvitie passazhirskogo podvizhnogo sostava dlya obychnykh liniy [The development of passenger rolling stock for conventional lines]. *Zheleznye dorogi mira - Railways of the World*, 2009, no. 9, pp. 31-38.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

Впровадження швидкісного, високошвидкісного пасажирського руху та великовагового вантажного руху поїздів зумовлено необхідністю забезпечення конкурентоспроможності залізничного транспорту з іншими видами. Детального і комплексного порівняльного аналізу якості функціонування існуючих систем електрифікації донині не виконано. Відомий досвід переведення електрифікованих ділянок постійного струму при впровадженні швидкісного руху на змінний з урахуванням очікуваного співвідношення витрат і корисного ефекту не має достатніх підстав.

В статті ставиться завдання аналізу енергетичних показників споживання електричної енергії в існуючих нині системах електрифікації залізниць та пропонуваній системі постійного струму 24 кВ, що дозволить точніше і більш зважено підходити до вибору системи.

Дослідження проводились на підставі методики розрахунку миттєвих схем з використанням аналітичних функцій опору, з врахуванням режиму стабілізації електрорухомим складом споживаної потужності, та до уваги приймалось, що швидкісні поїзди внаслідок великого опору руху споживають максимальний струм незалежно від профілю практично весь час руху ділянкою.

Отримані результати розрахунків вказують на те, що система тягового електропостачання постійного струму 24 кВ має найкращі показники по режиму напруги в тяговій мережі та забезпечує найменші втрати потужності в тяговій мережі за інших рівних умов.

Ключові слова: електрична тяга, постійний струм, змінний струм, швидкісні магістралі, методика розрахунку миттєвих схем, аналітичні функції опору, споживання постійної потужності.

УДК 621.311

В. Г. СЫЧЕНКО, Д. А. БОСЬИЙ, В. В. БОЖКО, Е. Н. КОСАРЕВ, Ю. А. БОРИСОВСКАЯ, Я. П. ЩЕРБАК, Б. О. БОРЦ (ДНУЖТ)

Кафедра Электроснабжение железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: elpostz@i.ua

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ СКОРОСТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

© Сиченко В. Г. та ін., 2015

Внедрение скоростного, высокоскоростного пассажирского движения и тяжеловесного грузового движения поездов обусловлено необходимостью обеспечения конкурентоспособности железнодорожного транспорта с другими видами. Детального и комплексного сравнительного анализа качества функционирования существующих систем электрификации до сих пор не выполнено. Известный опыт перевода электрифицированных участков постоянного тока при внедрении скоростного движения на переменный с учетом ожидаемого соотношения затрат и полезного эффекта не имеет достаточных оснований.

В статье ставится задача анализа энергетических показателей потребления электрической энергии для существующих сейчас систем электрификации железных дорог и предлагаемой системе постоянного тока 24 кВ, что позволит более точно и более взвешенно подходить к выбору системы.

Исследования проводились на основании методики расчета мгновенных схем с использованием аналитических функций сопротивления, с учетом режима стабилизации электроподвижным составом потребляемой мощности, и во внимание принималось то, что скоростные поезда вследствие большого сопротивления движению потребляют максимальный ток независимо от профиля практически все время движения по участку.

Полученные результаты расчетов указывают на то, что система тягового электроснабжения постоянного тока 24 кВ имеет лучшие показатели по режиму напряжения в тяговой сети и обеспечивает наименьшие потери мощности в тяговой сети при прочих равных условиях.

Ключевые слова: электрическая тяга, постоянный ток, переменный ток, скоростные магистрали, методика расчета мгновенных схем, аналитические функции сопротивления, потребление постоянной мощности.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

UDC 621.311

V. G. SYCHENKO, D. O. BOSIY, V. V. BOZHKO, YE. M. KOSAREV, YU. A. BORYSOVS'KA, YA. P. SHCHERBAK, B. O. BORSHCH (DNURT)

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: elpostz@i.ua

COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTRICITY FOR HIGHSPEED RAILWAYS

The introduction of high-speed, high-speed passenger traffic and heavy freight trains due to the need to ensure the competitiveness of rail with other modes of transport. Detailed and comprehensive comparative analysis of the quality of the functioning of existing systems, electrification has not yet been fulfilled. Known transfer experience electrified sections of DC in the implementation of high-speed traffic on the variables with the expected cost-beneficial effect has not been substantiated.

The article aim is to analyze the energy consumption rates of electricity to currently existing railway electrification systems and the proposed system, the DC 24 kV, which will allow more accurate and more balanced approach to the selection system.

Studies were conducted on the basis of the calculation method of instant schemes using analytic functions of resistance, taking into account the mode of stabilization of electric rolling power consumption, and taken into account the fact that high-speed trains because of the large resistance to movement consume a maximum current regardless of the profile of almost all travel on the site.

The results of calculations indicate that the system of traction power supply 24 kV DC has the best indicators of the voltage mode in traction network and provides the lowest power loss in traction network, ceteris paribus.

Keywords: electric traction, direct current, alternating current, high speed railway, instant schemes calculation methodic, analytic functions of resistance, consuming of constant power.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

А. М. АФАНАСОВ, С. В. АРПУЛЬ, А. С. МЯСНИКОВ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-31, эл. почта: afanasof@ukr.net

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ПУСКА АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОПОЕЗДА ПРИ ПИТАНИИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ОТ ИОНИСТОРА

Введение

Наличие неэлектрифицированных участков в сети железных дорог Украины требует использования автономного тягового и моторвагонного подвижного состава. В настоящее время данная проблема решается за счёт эксплуатации тепловозов и дизель-поездов. Отсутствие в парке автономного подвижного состава аккумуляторных электровозов и электропоездов объясняется, в основном, высокой себестоимостью и низкими энергетическими показателями современных электрохимических источников энергии [1].

Анализ истории и перспектив развития электрохимических источников показывает, что в ближайшем будущем применение таких накопителей энергии на моторвагонном подвижном составе будет экономически целесообразным и сопоставимым по энергетическим показателям с существующим вариантом питания тягового электропривода от контактной сети [2]. При этом основной проблемой питания тягового электропривода от электрохимических источников будет оставаться ограничение мощности разряда и заряда накопителя (батареи). Режимы пуска и остановочного электрического торможения требуют отбора и возврата энергии со значениями мощности, на порядок большими, чем в установившихся режимах движения электропоезда [3]. Решением данной проблемы может быть применение в качестве дополнительного накопителя энергии ионисторов [4].

Разряд и заряд ионисторов возможен с высокими значениями мощности при незначительных потерях энергии. Плотность накопленной энергии для ионисторов значительно меньше, чем для электрохимических источников, поэтому использование только ионисторов в качестве накопителя энергии будет нецелесообразным. Наиболее рациональным будет решение использования электрохимического источника, как основного накопителя энергии, и ионистора, как дополнительного накопителя, применяемого только в режимах пуска и остановочного торможения. Использование иони-

стора в качестве накопителя электроэнергии позволит применять рекуперативное торможение на дизель-поездах с электрической передачей.

Анализ характеристик пускового режима

Проведем анализ режимов пуска автономного электропоезда на площадке при питании тягового электропривода от ионистора, для этого рассмотрим режим разгона электропоезда, характер которого графически представлен на рис. 1.

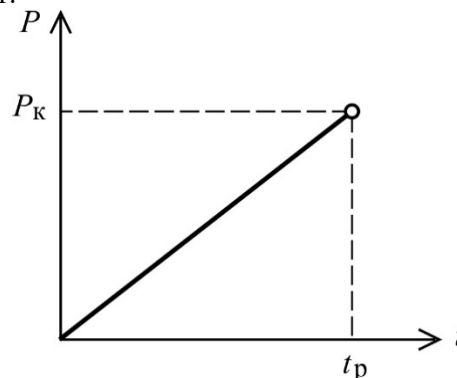


Рис. 1. Характер изменения потребляемой мощности

На рис. 1 представлен характер изменения мощности, потребляемой от ионистора тяговым электроприводом. В данном случае в течение времени разгона от нуля до значения t_p потребляемая мощность прямо пропорциональна времени. Следует отметить, что такое представление характера зависимости $P(t)$ является упрощённым. На самом деле мощность, потребляемая электроприводом при трогании с места, всегда отлична от нуля, кроме того, в реальных системах автоматического пуска электропоездов, как правило, обеспечивается стабилизация либо пускового тока, либо пускового тягового усилия (пускового ускорения), а для данных режимов зависимость $P(t)$ не прямолинейна. Но при проведении данного анализа такое упрощение характера зависимости $P(t)$ вполне допустимо. Таким образом, упрощенно зависимость $P(t)$ может быть представлена в виде

$$P = k_p t,$$

где k_p – коэффициент пропорциональности, характеризующий темп нарастания потребляемой мощности.

$$k_p = \frac{P_k}{t_p},$$

где P_k – мощность, потребляемая электроприводом в конце пуска;

t_p – время разгона электропоезда.

Учитывая то, что сила основного сопротивления движению реального электропоезда в режиме пуска составляет не более 5% от пускового значения силы тяги [3, 5], упрощенно коэффициент k_p для варианта разгона на площадке может быть представлен в виде

$$k_p = \frac{Ma^2}{\eta_{эп}},$$

где M – масса электропоезда;

a – среднее ускорение при разгоне;

$\eta_{эп}$ – среднее значение к. п. д. электропривода.

Суммарная энергия, потреблённая из ионистора за время разгона

$$\Delta A_c = \int_0^{t_p} P dt = \frac{1}{2} k_p t_p^2. \quad (1)$$

Эта же энергия может быть представлена в виде

$$\Delta A_c = \Pi_0 - \Pi_k, \quad (2)$$

где Π_0 и Π_k – потенциальные энергии ионистора в начале и конце разгона соответственно.

$$\Pi_0 = \frac{CU_0^2}{2}, \quad (3)$$

$$\Pi_k = \frac{CU_k^2}{2}, \quad (4)$$

где U_0 и U_k – напряжения на ионисторе в начале и конце разгона соответственно;

C – емкость конденсатора.

Объединив формулы (1) – (4), после преобразования получим выражение для определения напряжения на конденсаторе в конце разгона в виде

$$U_k = \sqrt{U_0^2 - \frac{k_p}{C} t_p^2}. \quad (5)$$

Выражение (5) может быть преобразовано к виду

$$U_k = U_0 \sqrt{1 - \alpha t_p^2}, \quad (6)$$

где α – параметр, который для заданного значения U_0 может рассматриваться как постоянный коэффициент.

$$\alpha = \frac{k_p}{CU_0^2}.$$

Время полного разряда (максимальное время разряда) ионистора до значения $U_k = 0$ может быть определено из выражения (6) как

$$t_{pm} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}}.$$

Тогда выражение (6) может быть представлено в виде зависимости относительных параметров:

$$\frac{U_k}{U_0} = f\left(\frac{t_p}{t_{pm}}\right),$$

$$\frac{U_k}{U_0} = \sqrt{1 - \left(\frac{t_p}{t_{pm}}\right)^2}.$$

Время разряда ионистора до значения $U_k = 0,5U_0$, при котором расходуется 75% всей запасенной энергии, определяется как

$$t_{p1/2} = \frac{\sqrt{3}}{2} t_{pm} \approx 0,87 t_{pm}.$$

Результаты расчета относительных параметров, характеризующих изменение напряжения на ионисторе по мере разгона электропоезда, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета характера изменения напряжения на ионисторе по мере разгона электропоезда

t_p / t_{pm}	0	0,25	0,5	0,75	0,9	1
U_k / U_0	1	0,97	0,87	0,66	0,44	0

График зависимости $\frac{U_K}{U_0} = f\left(\frac{t_p}{t_{pm}}\right)$ пред-

ставлен на рис. 2.

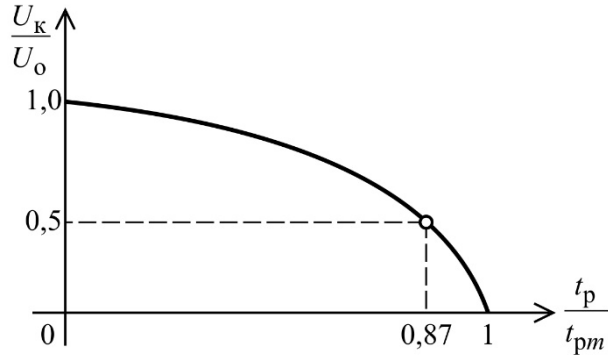


Рис. 2. Характер изменения напряжения на ионисторе

Главной особенностью режима пуска электропоезда с питанием электропривода от предварительно заряженного ионистора заключается в том, что по мере разгона требуется плавное повышение напряжения питания тяговых двигателей, а напряжение на ионисторе снижается.

Такой характер изменения напряжений на источнике и потребителе электроэнергии требует применения специального преобразователя [6]. Наиболее рациональным будет соотношение между номинальным напряжением электропривода U_H и начальным напряжением на ионисторе U_0

$$U_H = k_H U_0 = (0,5; 1) U_0.$$

Схемное решение преобразователя напряжения

Точное определение оптимального значения отношения k_H является предметом отдельного исследования. Тем не менее, очевидно, что при принятом выше подходе к выбору значения k_H требуется преобразователь, который в начале пуска будет обеспечивать преобразование мощности с понижением напряжения, а в конце пуска – с повышением. Один из вариантов схемного решения такого преобразования представлен на рис. 3.

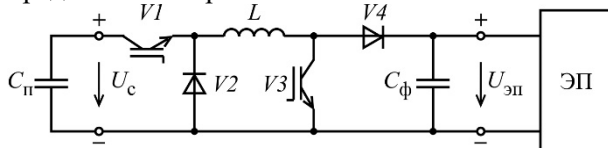


Рис. 3. Схема преобразователя напряжения

В начале пуска преобразователь работает как понижающий конвертор напряжения за счет импульсного регулирования с использо-

ванием электронного ключа $V1$ ($IGBT$ транзистор) [6]. Когда требуемое напряжение на электроприводе $U_{эп}$ становится выше напряжения на ионисторе U_c , преобразователь начинает работать как повышающий конвертор напряжения за счёт импульсного регулирования с использованием электронного ключа $V3$ ($IGBT$ транзистор) [6].

Качественно характеры изменения напряжений U_c и $U_{эп}$ представлены на рис. 4.

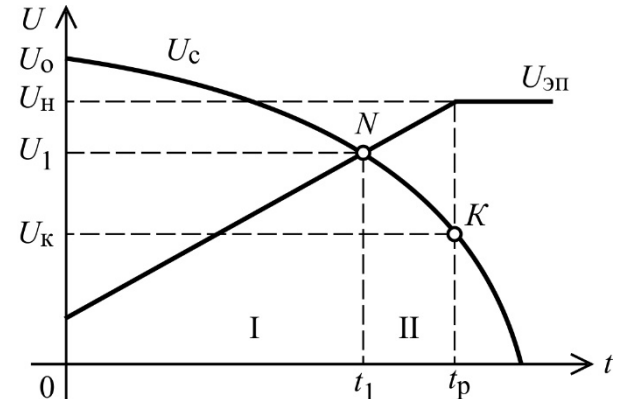


Рис. 4. Характеры изменения напряжений на ионисторе и электроприводе

Условию процесс пуска можно разделить на две зоны регулирования. В зоне I (рис. 4) преобразователь работает как понижающий конвертор напряжения. Для этой зоны коэффициент передачи напряжения k_{U1} меньше единицы.

$$k_{U1} = \frac{U_{эп}}{U_c} < 1.$$

В зоне II (рис. 4) преобразователь работает как повышающий конвертор напряжения. Для этой зоны регулирования коэффициент передачи напряжения k_{U2} больше единицы.

$$k_{U2} = \frac{U_{эп}}{U_c} > 1.$$

При $t = t_1$ характеристики $U_c(t)$ и $U_{эп}(t)$ пересекаются (точка N на рис. 4). В момент времени t_1 напряжения U_c и $U_{эп}$ равны между собой

$$U_c = U_{эп} = U_1.$$

В данный момент времени необходимо переключение работы преобразователя с режима понижения напряжения на режим повышения.

В первой зоне регулирования коэффициент передачи напряжения определяется как

$$k_{U1} = \lambda_1,$$

где λ_1 – коэффициент заполнения импульсов ключа VI [6].

Во второй зоне регулирования коэффициент передачи напряжения определяется как [6]

$$k_{U2} = \frac{1}{1 - \lambda_2},$$

где λ_2 – коэффициент заполнения импульсов ключа $U3$.

Оценка массы ионистора

Энергетический баланс для режима пуска можно представить в виде [3]

$$\Delta A_c \cdot \eta_{ЭП} = K + A_w, \quad (7)$$

где ΔA_c – энергия, потребленная из конденсатора за время пуска;

$\eta_{ЭП}$ – среднее значение к. п. д. электропривода;

K – кинетическая энергия электропоезда в конце пуска;

A_w – работа, затраченная за время пуска на преодоление сил сопротивления движению.

Нетрудно убедиться в том, что

$$\frac{A_w}{K} = \frac{w_0}{1000a},$$

где a – ускорение при пуске, м/с²;

w_0 – среднее удельное сопротивление движению за время пуска, Н/т [5].

Введем обозначение $k_w = A_w/K$ и запишем выражение (7) в виде

$$\Delta A_c \cdot \eta_{ЭП} = (1 + k_w)K. \quad (8)$$

Степень использования энергии предварительно заряженного ионистора может быть оценена коэффициентом степени разряда

$$k_A = \frac{\Delta A_c}{A_c},$$

где A_c – начальная энергия заряженного ионистора.

Тогда выражение (8) можно записать в виде

$$k_A \cdot \eta_{ЭП} \cdot \Delta A_c = (1 + k_w)K. \quad (9)$$

Проведём оценку массы ионистора, представив его полную энергию A_c в виде

$$A_c = a_c \cdot m_c, \quad (10)$$

где a_c – удельная плотность энергии конденсатора;

m_c – масса ионистора.

Кинетическая энергия электропоезда в конце пуска

$$K = \frac{M v_k^2}{2}, \quad (11)$$

где v_k – скорость электропоезда в конце пуска.

Объединив формулы (9)-(11), после преобразования получим выражение для массы ионистора, приведенной к массе электропоезда (приведенной массы ионистора), в виде

$$k_m = \frac{m_c}{M} = \frac{k_w \cdot v_k^2}{2 \cdot a_c \cdot \eta_{ЭП} \cdot k_A}. \quad (12)$$

В табл. 2 приведены результаты расчета зависимости $k_m(v_k)$, полученные по формуле (12). Значение $\eta_{ЭП}$ при расчётах принято $\eta_{ЭП} = 0,9$. Значение k_A принято $k_A = 0,75$. Значение k_w принято $k_w = 1,05$. Это значение k_w соответствует реальным условиям пуска современных электропоездов ($w_0 = 30 \div 50 \frac{Н}{Т}$;

$a = 0,7 \div 1 \text{ м/с}^2$). Значение a_c принято равным $4 \cdot 10^4 \frac{Дж}{кг}$, что соответствует реальным значениям удельной плотности энергии современных ионисторов [4]. График зависимости $k_m(v_k)$ представлен на рис. 5.

Таблица 2

Результаты расчета зависимости $k_m(v)$

$v_k, \text{ м/с}$	0	5	10	15	20	30	40
$k_m, \%$	0	0,05	0,2	0,44	0,77	1,75	3,12

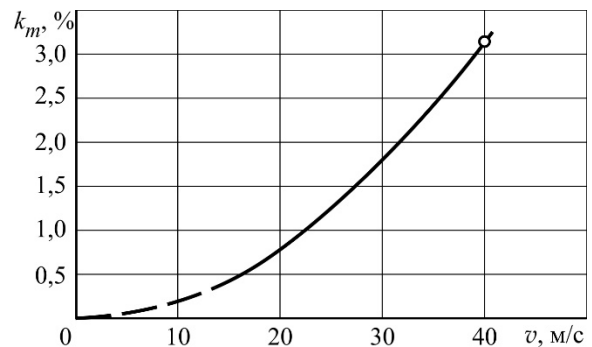


Рис. 5. График зависимости $k_m(v_k)$

Как видно из табл. 2 и рис. 5, для обеспечения пуска электропоезда до скорости 40 м/с (144 км/ч) при питании электропривода от ионистора с плотностью энергии $4 \cdot 10^4$ Дж/кг требуется повышение нагрузки на ось электропоезда не более, чем на 3,1 %. Необходимая общая масса ионисторов на один вагон электропоезда массой 80 т [2] для данных характеристик пуска составляет приблизительно 2,5 т. Для случая пуска электропоезда до скорости 30 м/с (108 км/ч) необходимая общая масса ионисторов на один вагон электропоезда массой 80 т составляет приблизительно 1,4 т.

Выводы

Применение ионисторов является эффективным решением проблемы обеспечения вы-

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скундин, А. М. Литий-ионные аккумуляторы нового поколения / А.М. Скундин // XIX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тезисы докладов, Т. 4. – Волгоград: ВГТУ, 2011. – С. 45.
2. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам [Текст] / под ред. А. И. Тищенко. Т. 1. – М.: Транспорт, 1976. – 432 с.
3. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги [Текст] / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
4. Ragone, D. Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles, SAE Technical Paper 680453, 1968, doi: 10.4271/680453.
5. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
6. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

Поступила в печать 01.12.2012.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

Рассмотрены вопросы использования на неэлектрифицированных участках железных дорог Украины автономных электропоездов. Обоснована необходимость применения на таких электропоездах, наряду с электрохимическими источниками, ионисторов. Предложено использовать ионистор в качестве дополнительного накопителя, питающего электропривод при пуске электропоезда и потребляющего энергию в режиме электрического торможения. Приведены результаты расчета зависимости напряжения на ионисторе от времени разгона электропоезда, рассмотрены вопросы выбора рационального соотношения номинальных напряжений на ионисторе и электроприводе. Предложена принципиальная электрическая схема преобразователя, обеспечивающего частотное регулирование напряжения с коэффициентами передачи как меньше, так и больше единицы. Проведен анализ режимов пуска автономного электропоезда при питании тягового электропривода от ионистора, выполнен оценочный расчет его массы. Результаты расчета показывают, что применение ионисторов для питания тягового электропривода автономного электропоезда в режиме пуска увеличивает нагрузку на ось подвижного состава в допустимых пределах.

Ключевые слова: автономный электропоезд, электропривод, ионистор, плотность энергии, импульсное регулирование напряжения.

REFERENCES

1. Skundin A. M. *Lityi-ionnye akkumulyatory novogo pokoleniya* [Lithium ion batteries of new generation]. *Tezisy dokladov*. Volgograd. Publishing house of VSTU, 2011, p. 45.
2. Tishchenko A. I. *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozam i dizel-poezdam* [Handbook of electric rolling stock, locomotives and diesel trains]. Moscow, Transport Publ., 1976. Vol. 1. 432 p.
3. Rozenfeld V. Ye., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow, Transport Publ., 1983. 328 p.
4. Ragone, D. Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles, SAE Technical Paper 680453, 1968, doi: 10.4271/680453.
5. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Rules of traction calculations for train work]. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p.
6. Burkov A. T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli* [Electronic technics and converters]. Moscow, Transport Publ., 1999. 464 p.

УДК 621.333.024:621.316.73

А. М. АФАНАСОВ, С. В. АРПУЛЬ, А. С. М'ЯСНИКОВ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-31, ел. пошта: afanasof@ukr.net

АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ПУСКУ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ПРИ ЖИВЛЕННІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВІД ІОНІСТОРА

Розглянуті питання використання на неелектрифікованих ділянках залізниць України автономних електропоїздів. Обґрунтовано необхідність застосування на таких електропоїздах, разом з електрохімічними джерелами, іоністорів. Запропоновано використовувати іоністор у якості допоміжного накопичувача, який живить електропривод при пуску електропоїзда та споживає енергію в режимі електричного гальмування. Приведено результати розрахунку залежності напруги на іоністорі від часу розгону електропоїзда, розглянуті питання вибору раціонального співвідношення номінальних напруг на іоністорі та електроприводі. Запропонована принципова електрична схема перетворювача, який забезпечує частотне регулювання напруги з коефіцієнтами передачі як менше, так і більше одиниці. Наведений аналіз режимів пуску автономного електропоїзда при живленні тягового електропривода від іоністора, виконаний оцінювальний розрахунок його маси. Результати розрахунку показують, що застосування іоністорів для живлення тягового електропривода автономного електропоїзда в режимі пуску збільшує навантаження на вісь рухомого складу в припустимих межах.

Ключові слова: автономний електропоїзд, електропривод, іоністор, щільність енергії, імпульсне регулювання напруги.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.333.024:621.316.73

A. M. AFANASOV, S. V. ARPUL, A. S. MYASNIKOV (DNURT)

Department of electrorolling stock of railways. Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryana, str. Lazaryana, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-31, e-mail: afanasof@ukr.net

THE ANALYSIS REGIMES AT THE START OF AUTONOMOUS ELECTRIC POWER FROM THE ELECTRIC TRACTION IONISTOR

The questions used on non-electrified areas of railways of Ukraine of autonomous electric trains. The necessity for the use of electric trains, together with electrochemical sources, ionistors. Ionistor proposed to use as an additional storage device, electric power supply during start-up of electric trains and power consumption of electric braking. The results of the calculation of voltage on the ionistor of the acceleration time of electric trains, the issues of selecting a rational correlation rated voltage for ionistor and the electromotive. A basic circuit diagram of an inverter which provides a frequency voltage regulation with transfer coefficients either smaller or greater than unity. An analysis of regimes start autonomous electric power train in the traction electromotive of the ionistor, made a rough calculation of its mass. The calculation results show that the use of ionistor s to power the traction electric drive train in autonomous electric start mode increases the load on the axle of the rolling stock in an acceptable range.

Keywords: Autonomous electric train, electromotive, ionistor, energy density, pulse voltage regulation.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

А. М. АФАНАСОВ, А. Е. ДРУБЕЦКИЙ, А. С. МЯСНИКОВ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-31, эл. почта: afanasof@ukr.net

ПОКРЫТИЕ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА В СИСТЕМЕ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

Введение

Требования соответствующих стандартов и правил ремонта тягового и мотор-вагонного подвижного состава магистрального и промышленного транспорта предусматривают проведение приёмо-сдаточных испытаний каждой вновь изготовленной или вышедшей из ремонта тяговой электромашин [1-3]. Эти испытания представляют собой важную и неотъемлемую часть технологического процесса изготовления или ремонта электромашин, материальные затраты на которую входят в себестоимость конечной продукции. Испытания на нагрев, проверка частоты вращения и реверсирования, а также проверка коммутации требуют обязательного нагружения тяговых электромашин.

Высокую энергетическую эффективность при относительно невысокой суммарной мощности источников питания обеспечивают системы взаимного нагружения, в которых происходит энергообмен между испытываемыми электромашин [4]. Источники внешнего питания в таких системах нагружения требуются только для покрытия потерь мощности в испытываемых электромашин.

Покрытие отдельных видов потерь мощности в системах взаимного нагружения может осуществляться как прямыми, так и косвенными методами, при использовании косвенных способов покрытие потерь обеспечивается за счёт небалансной электромагнитной мощности испытываемых электромашин, которая может создаваться за счёт разности либо электродвижущих сил электромашин, либо разности их электромагнитных моментов [5].

Цель

Целью данной работы является анализ режимов регулирования небалансного электромагнитного момента взаимно нагруженных тяговых электродвигателей постоянного и пульсирующего тока, испытываемых с использованием схемы взаимной нагрузки с одним источником электрической мощности.

Методика

Одна из схем, позволяющая реализовать электрический способ покрытия потерь холостого хода, представлен на рис. 1. На данной схеме обмотки якорей и обмотки возбуждения испытываемых тяговых электромашин (M – двигатель, G – генератор) соединены последовательно и подключены к источнику напряжения «ИН». Валы испытываемых электромашин соединены муфтой (на рисунке не показана). Обмотка возбуждения генератора шунтирована регулятором ослабления поля РОП.

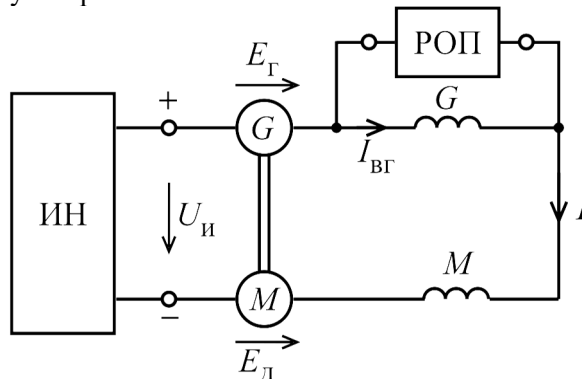


Рис. 1. Схема взаимного нагружения

Характеристики управляющих параметров, обеспечивающие режим взаимного нагружения электромашин по данному варианту, имеют вид [5]:

$$U_u > 0; \Phi_\delta > \Phi_2; \Delta\Phi > 0,$$

где U_u – напряжение источника питания;
 Φ_δ, Φ_2 – магнитные потоки двигателя и генератора соответственно;

$\Delta\Phi = \Phi_\delta - \Phi_2$ – разность магнитных потоков.

Протекание тока нагрузки I вызывает падение напряжения на суммарном активном сопротивлении цепи $\sum \Delta U$.

Система уравнений баланса напряжений и механических моментов для данной схемы взаимной нагрузки имеет вид:

$$\begin{cases} \sum \Delta U = U_u - C\Delta\Phi\omega; \\ \sum \Delta M = C\Delta\Phi I. \end{cases}$$

Кривые, характеризующие баланс напряжений в цепи якорей испытуемых электромашин при изменении тока нагрузки, качественно показаны на рис. 2.

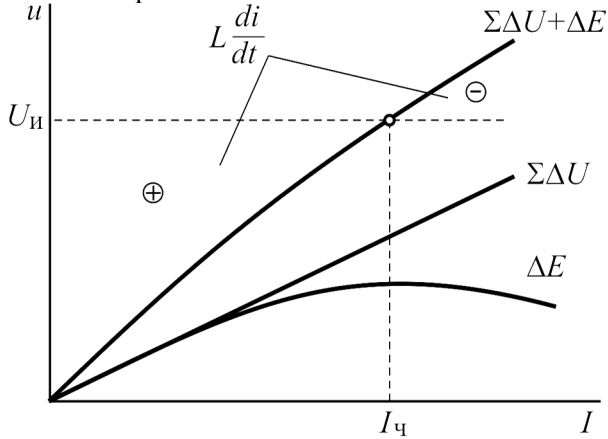


Рис. 2. Кривые, характеризующие баланс напряжений

При электрическом способе компенсации потерь холостого хода [5] регулирование небалансной электромагнитной мощности $\Delta P_{эм}$ сводится к регулированию небалансного электромагнитного момента $\Delta M_{эм}$, который определяет угловую скорость ω_∂ и напряжения на испытуемых электромашинах. Небалансный электромагнитный момент и угловая скорость связаны между собой уравнением [5]

$$\Delta M_{эм} = \sum \Delta M + J_э \frac{d\omega}{dt},$$

где $\sum \Delta M$, $J_э$ – потери момента холостого хода в стенде и эквивалентный момент инерции, приведенные к валу испытуемого двигателя.

Структурная схема регулирования угловой скорости ω_∂ представлена на рис. 3.

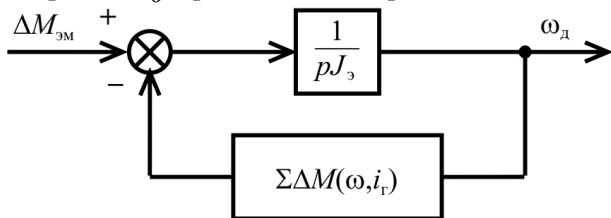


Рис. 3. Структурная схема регулирования угловой скорости

Момент сопротивления ΔM для каждой из электромашин является функцией угловой скорости ω и магнитного потока Φ [4]. Магнитный поток Φ в каждой из электромашин опре-

деляется током возбуждения, зависящим от тока нагрузки I .

$$\Delta M = f(\omega_\partial, i).$$

В стационарном режиме

$$\omega_\partial = f^*(\Delta M_{эм}),$$

где f^* – функция, обратная f .

Уравнение баланса моментов для установившегося режима вращения якорей испытуемых электромашин можно представить в виде [5]

$$\sum \Delta M = C\Delta\Phi I,$$

где $\sum \Delta M$ – общие потери момента в испытуемых электромашинах;

$\Delta\Phi = \Phi_\partial - \Phi_г$ – разность магнитных потоков;

C – конструктивная постоянная электромашин;

I – ток нагрузки (якорей) электромашин.

$$\sum \Delta M = \Delta M_\partial + \Delta M_г,$$

где ΔM_∂ , $\Delta M_г$ – потери момента двигателя и генератора соответственно.

В данной схеме возможна установка одинакового для испытуемых электромашин номинального значения токов якорей $I = I_n$. Установление значения тока возбуждения, равным номинальному, при проведении приемосдаточных испытаний является условием, обязательным для той электромашин, которая работает двигателем, и для которой, согласно требованиям к испытаниям, определяется значение частоты вращения якоря [1]. Тогда соотношение токов возбуждения испытуемых двигателя $I_{в\partial}$ и генератора $I_{вг}$ для данной схемы будет иметь вид:

$$\begin{cases} I_{в\partial} = I_n; \\ I_{вг} < I_n. \end{cases}$$

Ток возбуждения двигателя устанавливается равным его номинальному значению, а ток возбуждения генератора – меньшим номинального. При этом обмотка возбуждения электромашин, работающей генератором, недогружена по току на величину

$$\Delta I_{вг} = I_n - I_{вг}.$$

Графически характер соотношения токов возбуждения испытуемых электромашин показан на рис. 4.

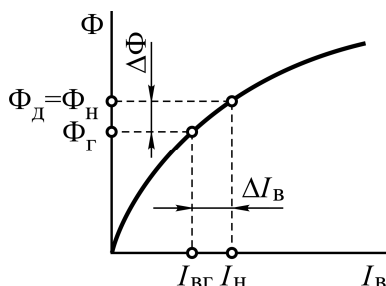


Рис. 4. Характер соотношения токов возбуждения испытуемых электромашин

Разность магнитных потоков $\Delta\Phi$, обеспечивающая покрытие потерь моментов электромашин, определяется разностью токов возбуждения ΔI_{ϵ} и местом положения точки, соответствующей номинальному режиму, на кривой намагничивания $\Phi = f(I_{\epsilon})$.

Для номинального режима значение $\Delta\Phi$ может быть определено в виде

$$\Delta\Phi_n = \frac{\Delta M_{\partial} + \Delta M_{\epsilon}}{C I_n} \quad (1)$$

Строго говоря, магнитные потери мощности и момента в генераторе при испытаниях по данной схеме должны быть меньше, чем в двигателе в связи с меньшим значением магнитного потока. Однако предварительные расчеты показывают, что в тяговых электрических двигателях (с коэффициентом полезного действия более 0,9) это различие не будет превышать 10 %. При этом суммарные потери, связанные с вращением роторов электромашин (механические и магнитные) будут отличаться не более чем на 5%. В связи с изложенным выше формулу (1) можно записать в упрощенном виде

$$\Delta\Phi_n = \frac{2\Delta M_n}{C I_n} \quad (2)$$

где ΔM_n – механические и магнитные потери момента одной электромашин в номинальном режиме.

Поделив левую и правую часть уравнения (2) на номинальное значение магнитного потока Φ_n , после преобразований получим

$$\frac{\Delta\Phi_n}{\Phi_n} = \frac{2\Delta M_n}{M_{\epsilon mn}} \quad (3)$$

где $M_{\epsilon mn}$ – номинальное значение электромагнитного момента электромашин.

Это же выражение может быть записано в виде соотношения мощностей

$$\frac{\Delta\Phi_n}{\Phi_n} = \frac{2\Delta P_{xxn}}{P_{\epsilon mn}} \quad (4)$$

где ΔP_{xxn} – потери холостого хода в одной электромашине при номинальном режиме;

$P_{\epsilon mn}$ – номинальная электромагнитная мощность одной электромашин.

Введем следующие обозначения:

$$K_{\Delta\Phi} = \frac{\Delta\Phi_n}{\Phi_n} \text{ – относительная разность магнитных потоков;}$$

$\Delta p_{xx} = \frac{\Delta P_{xxn}}{P_{\epsilon mn}}$ – относительные потери холостого хода;

$K_{\Delta I} = \frac{\Delta I_{\epsilon}}{I_n}$ – относительная разность токов возбуждения.

Согласно (4) связь между данными параметрами имеет вид

$$K_{\Delta\Phi} = 2\Delta p_{xx} \quad (4)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета зависимости $K_{\Delta\Phi} = f(K_{\Delta I})$, полученные с использованием универсальной магнитной характеристики [6] для трёх значений коэффициента магнитного насыщения в номинальном режиме k_n (1,67; 1,91; 2,15).

Таблица 1

Зависимости $K_{\Delta\Phi} = f(K_{\Delta I})$

$k_n = 1,67$	$K_{\Delta I}$	0,111	0,222	0,333	0,444	0,556	–	–
	$K_{\Delta\Phi}$	0,039	0,082	0,132	0,208	0,308	–	–
$k_n = 1,91$	$K_{\Delta I}$	0,091	0,182	0,273	0,364	0,455	0,545	–
	$K_{\Delta\Phi}$	0,031	0,064	0,100	0,140	0,187	0,258	–
$k_n = 2,15$	$K_{\Delta I}$	0,077	0,154	0,231	0,308	0,385	0,462	0,538
	$K_{\Delta\Phi}$	0,022	0,046	0,075	0,107	0,142	0,180	0,225

В табл. 2 приведены результаты расчёта зависимости относительной разности токов возбуждения $K_{\Delta I}$ от приведенных потерь Δp_{xx}

одной электромашины, полученные по формуле (5) и данным таблицы 1.

Таблица 2

Зависимости $K_{\Delta I} = f(\Delta p_{xx})$

$k_n=1,67$	Δp_{xx}	<u>0,019</u>	<u>0,041</u> 0,011	<u>0,066</u> 0,036	<u>0,104</u> 0,074	<u>0,154</u> 0,124	–	–
	$K_{\Delta I}$	0,111	0,222	0,333	0,444	0,556	–	–
$k_n=1,91$	Δp_{xx}	<u>0,016</u>	<u>0,032</u> 0,002	<u>0,050</u> 0,020	<u>0,070</u> 0,040	<u>0,094</u> 0,064	<u>0,129</u> 0,099	–
	$K_{\Delta I}$	0,091	0,182	0,273	0,364	0,455	0,545	–
$k_n=2,15$	Δp_{xx}	<u>0,011</u>	<u>0,023</u>	<u>0,038</u> 0,008	<u>0,054</u> 0,024	<u>0,071</u> 0,041	<u>0,090</u> 0,060	<u>0,113</u> 0,082
	$K_{\Delta I}$	0,077	0,154	0,231	0,308	0,385	0,462	0,538

Значения Δp_{xx} , приведенные в числителе, относятся к случаю совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин, а приведенные в знаменателе – к случаю максимального их расхождения (6%).

Выводы

Значение коэффициента $K_{\Delta \Phi}$, необходимое для создания условий компенсации механических и магнитных потерь, будет определяться значением $K_{\Delta I}$ и коэффициентом магнитного насыщения испытуемых электромашин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. [Текст] / Государственный стандарт СССР. – М. : Издательство стандартов, 1981. – 50 с.
- Правила ремонту электричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063 [Текст]. – К. : Видавничий дім «САМ», 2003. – 286 с.
- Правила ремонту электричних машин тепловозів. ЦТ-0064 [Текст]. – К. : Видавничий дім «САМ», 2003. – 122 с.
- Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины и трансформаторы [Текст] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов, Е. В. Горчаков. – М. : Транспорт, 1979. – 303 с.
- Афанасов, А. М. Принципы синтеза схем взаимной нагрузки тяговых электромашин постоянного тока / А. М. Афанасов // Гірнична електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2010. – Вип. 85. – С. 183-189.
- Находкин, М. Д. Универсальная магнитная характеристика тяговых электродвигателей постоянного тока [Текст] / М. Д. Находкин, В. С. Хвостов // Вестник электропромышленности. – 1958. – № 1. – С. 44-48.

С увеличением коэффициента магнитного насыщения k_n значение $K_{\Delta I}$, соответствующее заданному Δp_{xx} , растет. Расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин требует существенного запаса диапазона регулирования разницы их токов возбуждения. Для решения данной проблемы в системе взаимного нагружения должна быть предусмотрена возможность удобного взаимного переключения режимов нагружения испытуемых электромашин: «двигатель» – «генератор».

REFERENCES

- GOST 2582-81. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye* [Rotating electrical machines traction] / *Gosudarstvennyy standart SSSR* – State Standard of the USSR. Moscow, Publisher standards, 1981. 50 p.
- Pravila remontu elektrichnikh mashin elektrovoziv i elektrovozdiv. TsT-0063* [Rules repair electric cars and electric trains. TsT-0063]. Kiev, Publishing house «SAM», 2003. 286 p.
- Pravila remontu elektrichnikh mashin i teplovoziv. TsT-0064* [Rules repair of electric machines for diesel locomotive. TsT-0064]. Kiev, Publishing house «SAM», 2003. 122 p.
- Zakharchenko D. D., Rotanov N. A., Horchakov E. V. *Tyagovye elektricheskiye mashiny i transformatory* [Traction electric machines and transformers]. Moscow, Transport Publ., 1979. 303 p.
- Afanasov A. M. *Printsipy sintenza skhem vzaimnoy nagruzki tyagovykh elektromashin postoyannogo toka* [Principles of synthesis schemes of mutual load of electric traction a direct current]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka* [Mining Electrical Engineering and Automation], 2010, issue 85, pp. 183-189.
- Nakhodkin M. D., Hvostov V. C. *Universalnaya magnitnaya kharakteristika tyagovykh elektrodvigatelye*

Поступила в печать 01.12.2012.

postoyannogo toka [Universal magnetic characteristics of direct current traction electric motors]. *Vestnik elektropromyshlennosti* [Bulletin of the electrical industry], 1958, issue 1, pp. 44-48.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

Приведены результаты анализа электрического способа покрытия потерь холостого хода в системах взаимного нагружения тяговых двигателей с одним источником мощности. Рассмотрен вариант косвенного метода покрытия потерь холостого хода путем обеспечения разности магнитных потоков испытуемых электромашин. Получены зависимости относительной разности токов возбуждения взаимно нагруженных электромашин от приведенных потерь холостого хода одной электромашин для различных значений коэффициента магнитного насыщения.

Ключевые слова: тяговый электрический двигатель, испытание, взаимная нагрузка, потери холостого хода, электромагнитный момент.

УДК 629.423.31- 48.24

А. М. АФАНАСОВ, А. Ю. ДРУБЕЦЬКИЙ, А. С. М'ЯСНИКОВ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухоми́й склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-31, ел. пошта: afanasof@ukr.net

ПОКРИТТЯ ВТРАТ ХОЛОСТОГО ХОДУ В СИСТЕМІ ВЗАЄМНОЇ НАВАНТАЖЕННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ З ОДНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Наведено результати аналізу електричного способу покриття втрат холостого ходу в системах взаємного навантаження тягових двигунів з одним джерелом потужності. Розглянуто варіант непрямого методу покриття втрат неробочого ходу шляхом забезпечення різниці магнітних потоків випробовуваних електромашин. Одержані залежності відносної різниці струмів збудження взаємно навантажених електромашин від наведених втрат холостого ходу однієї електромашини для різних значень коефіцієнта магнітного насичення.

Ключові слова: тяговий електричний двигун, випробування, взаємне навантаження, втрати холостого ходу, електромагнітний момент.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 629.423.31- 48.24

A. M. AFANASOV, A. E. DRUBETSKIY, A. S. MYASNIKOV (DNURT)

Department of electrorolling stock of railways. Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryana, str. Lazaryana, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-31, e-mail: afanasof@ukr.net

COVERING LOSSES IN THE SYSTEM OF MUTUAL LOADING OF TRACTION MOTORS WITH A SINGLE SOURCE OF ELECTRICAL POWER.

The results of the analysis of the electrical coating process load losses in the systems of mutual loading of traction motors with a single power source. A variant of the indirect method of covering load losses by providing a difference in the subjects of electric magnetic fluxes. The dependence of the relative difference between the excitation currents mutually loaded from those of electric load losses one electric machine for different values of the coefficient of magnetic saturation.

Keywords: traction electric motors, testing, mutual load, no-load losses, electric magnetic moment.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

Г. К. ГЕТЬМАН, В. Е. ВАСИЛЬЕВ (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, г. Днепропетровск, Украина, 49010, тел. (056)373-15-31, эл.почта: getman-gk@i.ua, wasiljew@ukr.net,
ORCID: orcid.org/0000-0002-3471-6096, orcid.org/0000-0001-7551-2332

О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ КАРЬЕРНЫХ ПОЕЗДОВ ЗА СЧЕТ ЧАСТИЧНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ЧАСТИ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Введение

Издержки на возмещение затрат энергоносителей на транспортировку горной массы составляют ощутимую долю эксплуатационных расходов предприятий по открытой добыче полезных ископаемых. В связи с этим внедрение электрической тяги на горнодобывающих предприятиях всегда сопровождалось поиском резервов экономии электроэнергии на тягу поездов и разработкой технико-организационных мероприятий по их реализации.

Особую актуальность вопросы повышения энергетической эффективности железнодорожных перевозок приобрели в последние десятилетия в связи с удорожанием топливно-энергетических ресурсов как в нашей стране, так и за рубежом [1, 2].

Обзор литературы

Проблема снижения энергоемкости железнодорожных перевозок возникла одновременно с внедрением электрической тяги и большинство её аспектов характеризуется достаточно глубокой степенью разработанности. Вместе с тем ряд задач этой проблемы остаются актуальными.

В связи с этим необходимость снижения энергоемкости перевозок и на сегодня определяет приоритетные направления совершенствования систем электрической тяги как в нашей стране [1], так и за рубежом [2].

Анализ энергетики движения поезда показывает [3, 4], что при фиксированных основных параметрах перевозочного процесса (масса поезда, техническая или участковая скорость движения) повышения энергоэффективности перевозок, оцениваемую по величине расхода электроэнергии на токоприемнике, можно достичь за счет:

- снижения потерь энергии в силовых и вспомогательных электрических цепях электроподвижного состава;

- увеличения части потенциальной и кинетической энергии поезда, расходуемых в процессе движения на преодоление сил сопротивления движению (снижение потерь энергии в тормозах);

- минимизации работы сил сопротивления движению поезда путем снижения абсолютной величины основного сопротивления движению поезда и оптимизации режимов его движения.

Перечисленные выше задачи на стадии разработки и создания электроподвижного состава решаются за счет повышения энергоэффективности используемого на нем тягового электрооборудования [5], а при организации перевозок - за счет оптимизации режимов вождения поездов [2].

О возможности экономии электроэнергии за счет отключения части тяговых двигателей (или части тяговых единиц в случае кратной тяги) на легких элементах профиля или при вождении неполновесных поездов известно из классических трудов по электрической тяге [6, 7] и применительно к магистральным железным дорогам возможность реализации этой идеи широко обсуждалась в технической литературе [8, 9]. Вместе с тем для условий эксплуатации карьерного транспорта этот вопрос, насколько известно авторам, детально не исследовался. Не рассматривался также вопрос о влиянии уровня напряжения в контактной сети на расход электроэнергии на тягу карьерных поездов.

Постановка задачи

Настоящая статья посвящена вопросам снижения энергоемкости перевозок горной массы на электрифицированных ж.д. путях предприятий по открытой добыче полезных ископаемых. Применительно к тяговым агрегатам постоянного тока рассмотрена возможность снижения

затрат электроэнергии на тягу (на токоприемнике) за счет частичного отключения тяговых двигателей, а также взаимосвязь удельного расхода электроэнергии и уровня напряжения в контактной сети.

Расчеты выполнены применительно к условиям эксплуатации карьерного транспорта постоянного тока на предприятиях по открытой добыче полезных ископаемых.

Основной материал

Как показано в [8], возможность экономии электроэнергии на тягу за счет отключения части тяговых двигателей можно получить путем сопоставления удельных расходов электроэнергии для сравниваемых вариантов тяги. Поскольку на энергоёмкость транспортировки влияет большое количество факторов (тип подвижного состава, составность поезда, характеристики профиля и плана пути маршрутов, уровень напряжения в контактной сети и многие другие), задачу целесообразно решать применительно к условиям работы карьерного электротранспорта на конкретном предприятии. При этом в качестве исходных данных следует принять:

- характеристики тягового подвижного состава;
- характеристики прицепной части поезда (тип и количество вагонов, степень использования их грузоподъемности);
- уровень используемого напряжения в контактной сети и род тока.

Ниже в качестве примера будут приведены результаты расчетов для тяговых агрегатов типа ПЭ2^М.

Удельный расход электроэнергии можно установить, определив последовательно для каждого варианта:

- энергетические характеристики электроподвижного состава;
- установившуюся скорость движения поезда на рассматриваемом участке;
- удельный расход электроэнергии на тягу.

Энергетическими характеристиками принято называть зависимости отнесенного к единице транспортной работы расхода электроэнергии от скорости движения для используемых позиций регулирования мощности тяговых двигателей.

Если в качестве измерителя транспортной работы принят 1 поездо-километр, то удельный расход электроэнергии a_s и энергетические характеристики $a_{sm}(v)$ не содержат в качестве аргумента массу поезда. Если же расход энер-

гии отнести к 1 т·км, то каждому значению массы поезда будет соответствовать своя энергетическая характеристика $a_{sm}(v)$.

Энергетические характеристики можно построить по токовым характеристикам электроподвижного состава, поскольку удельные расходы электроэнергии a_s (Вт·ч/поездо·км) и a_{sm} (Вт·ч/т·км) определены как:

$$a_s = \frac{U_{кc} I_{\Sigma} 10^{-3}}{v}; \quad a_{sm} = \frac{U_{кc} I_{\Sigma}}{vm}, \quad (1)$$

где I_{Σ} – потребляемый из контактной сети ток, А;

$U_{кc}$ – напряжение контактной сети, В;

v – скорость движения поезда, км/ч;

m – масса поезда, т.

На рис. 1 для примера утолщенными линиями показаны энергетические характеристики $a_{sm}(v)$ тягового агрегата ПЭ2^М при питании от контактной сети 1500 В и 3000 В и числе используемых тяговых двигателей, равном 4, 8 и 12 (n – число включенных тяговых двигателей, i – величина уклона, ‰, масса поезда 730 т).

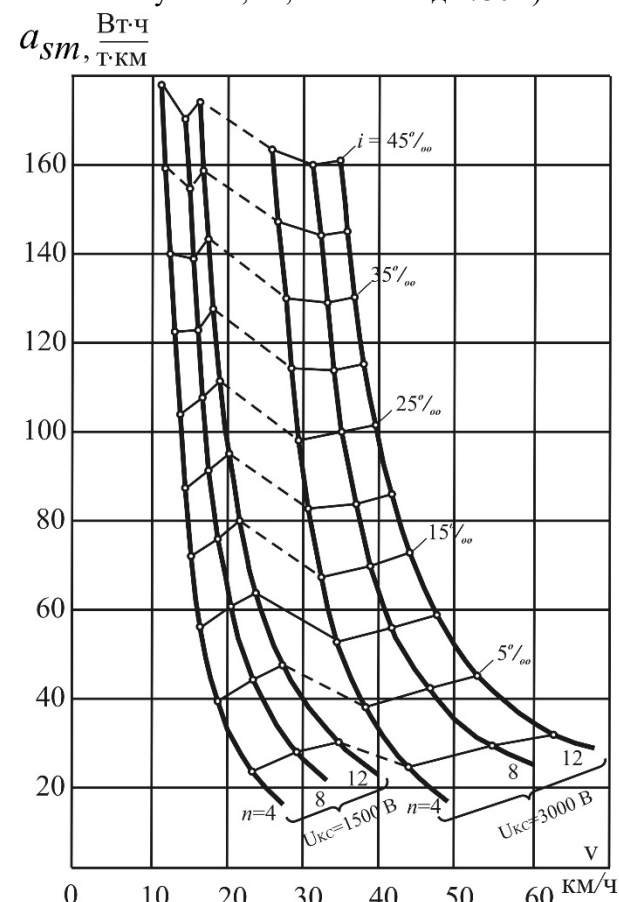


Рис. 1. Энергетические характеристики тягового агрегата ПЭ2^М

Энергетические характеристики позволяют определить удельный расход электроэнергии на тягу по известной скорости движения (см. рис. 1). Последняя есть решением уравнения

$$F_k(v) - W_k(v) = 0, \quad (2)$$

где F_k – сила тяги, Н;

W_k – полное сопротивление движению поезда, Н;

v – скорость движения, км/ч.

Установившуюся скорость движения можно определить графическим, совместив графики тяговой характеристики $F_k(v)$ и кривые $W_k(v)$, как показано на рис. 2.

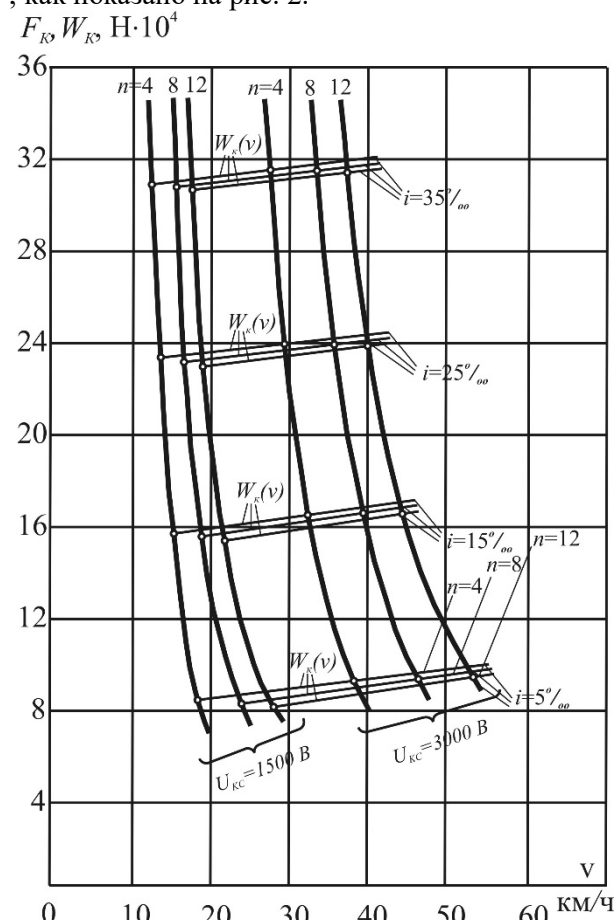


Рис. 2. Графический способ определения установившейся скорости движения

Графический способ прост и нагляден, однако весьма трудоемок и, главное, не гарантирует высокой точности результатов.

Вместе с тем экономия электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей обычно не превышает нескольких процентов, поэтому при решении таких задач важно, чтобы расчетный метод не вносил дополнительных погрешностей в расчеты.

При использовании средств вычислительной техники погрешность расчетных результатов

зависит от погрешности определения силы сопротивления движению W_k и силы тяги F_k .

Для определения W_k практически нет другой возможности, как построить расчет на использовании рекомендованных Правилами тяговых расчетов [10] аналитических зависимостей для расчета основного сопротивления движению.

В этом случае применительно к тяговому агрегату ПЭ2^М полное сопротивление движению поезда при различном числе включенных двигателей определяется следующим образом:

$$W_{k4} = m_{\text{ЭУ}}(w'_0 + w_i) + 2m_{\text{МД}}(w_x + w_i) + m_{\text{ПР}}(w''_0 + w_i), \quad \text{Н}; \quad (3)$$

$$W_{k8} = (m_{\text{ЭУ}} + m_{\text{МД}})(w'_0 + w_i) + m_{\text{МД}}(w_x + w_i) + m_{\text{ПР}}(w''_0 + w_i), \quad \text{Н}; \quad (4)$$

$$W_{k12} = (m_{\text{ЭУ}} + 2m_{\text{МД}})(w'_0 + w_i) + m_{\text{ПР}}(w''_0 + w_i), \quad \text{Н}, \quad (5)$$

где W_{k4} , W_{k8} и W_{k12} – сопротивление движению поезда при использовании соответственно 4-х, 8-ми и 12-ти тяговых двигателей;

w'_0 и w_x – основное удельное сопротивление движению тягового агрегата соответственно под током и без тока, Н/т;

w''_0 – основное удельное сопротивление движению состава, Н/т;

w_i – сопротивление движению от уклонов, Н/т;

$m_{\text{ЭУ}}$ – масса электровоза управления, т;

$m_{\text{МД}}$ – масса моторного думпкара, т;

$m_{\text{ПР}}$ – масса прицепной части поезда (состава), т.

Удельное основное сопротивление движению w'_0 , w_x , w''_0 и w_i определяется согласно рекомендациям [10].

Иначе обстоит дело с расчетом силы тяги. Если, как обычно при производстве тяговых расчетов, использовать паспортные характеристики электроподвижного состава (заданные таблично или в виде аппроксимирующих аналитических выражений), то при вариации нагрузочных режимов двигателей в широких

пределах, нельзя получить требуемую при выполнении подобных задач точность расчетов.

Сказанное объясняется, главным образом, тем, что паспортные тяговые характеристики (или их аналитические выражения) получены в предположении о независимости потерь в тяговом двигателе и зубчатой передаче от величины напряжения на коллекторе. Такое упрощение задачи, как можно судить на основании приведенных в [11] характеристик двигателя ТЛ-2К, могут привести при определении силы тяги и к.п.д. к ошибкам, достигающим нескольких процентов. При решении же вопросов, связанных с экономией электроэнергии, точность определения к.п.д. электроподвижного состава должна быть не ниже, чем 0,5% [12].

Чтобы обеспечить указанную точность, расчет характеристик тяговых двигателей должен базироваться на результатах их квалификационных испытаний и рекомендаций ГОСТ 2582-81.

С целью упрощения процедуры алгоритмизации решения задачи установившуюся скорость движения, как показал анализ, целесообразно определять не из уравнения (2), а как решение уравнения

$$F_k(I) - W_k(v(I)) = 0, \quad (6)$$

где I – ток якоря тягового двигателя, а $W_k(v(I))$ – представленное в функции тока якоря полное сопротивление движению поезда.

Полное сопротивление движению поезда, представленное в виде функции тока якоря $W_k(I)$ можно найти как

$$W_k(I) = m[w_o(v(I)) - w_i], \quad (7)$$

где w_o – основное удельное сопротивление движению поезда, Н/т;

w_i – сопротивление движению от уклонов, Н/т;

m – масса поезда, т;

При таком подходе задача сводится фактически к определению тока установившегося режима путем совмещения графиков $F_k(I)$ и $W_k(I)$ как показано на рис. 3 (n – число включенных тяговых двигателей). Упрощение процедуры решения задачи обусловлено возможностью использования в расчетах зависимости скорости движения от тока якоря.

$F_k, W_k, Н \cdot 10^4$

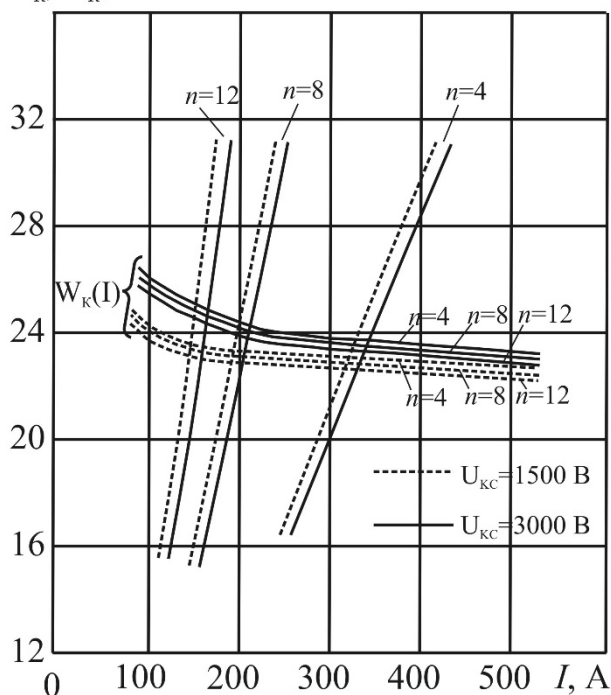


Рис. 3. Определение тока установившегося режима

При машинном счете ток установившегося режима определяется как нуль функции (6). С этой целью можно использовать любой известный способ приближенного нахождения корней уравнений и оценки степени их точности, например, метод половинного деления.

При алгоритмизации решения задачи следует иметь в виду, что:

- функция (3) в интервале $0 < I < \infty$ определена, непрерывна и имеет лишь один корень;
- область допустимых решений определена установленными наибольшими допустимыми значениями скорости движения, тока якоря тягового двигателя и расчетной силы сцепления.

При решении задачи для выбранного варианта исходных данных (напряжение в контактной сети U_{kc} , число включенных тяговых двигателей и тип подвижного состава) на каждом шаге расчета, т.е. для каждого значения тока, последовательно определяются:

- магнитный поток (в виде удельной э.д.с. $c_e \Phi$, частота вращения вала тягового двигателя и скорость движения электровоза;
- потери холостого хода и добавочные потери;
- потери в тяговом редукторе;
- расчетная сила тяги двигателя и электровоза;
- полное сопротивление движению поезда.

Для определения характеристик $v(I)$ и $F_{\text{кд}}(I)$ используются известные расчетные выражения:

$$v = 0.1885 \frac{D_{\text{к}}}{\mu} \cdot \frac{U - Ir}{c_e \Phi};$$

$$F_{\text{к}} = n \left(\frac{2\mu}{D_{\text{к}}} \cdot c_e \Phi I - \Delta F \right),$$

где v – скорость движения, км/ч;

$D_{\text{к}}$ – диаметр круга катания движущих колес, м;

μ – передаточное число тягового редуктора;

$F_{\text{кд}}$ – расчетная сила тяги движущей оси, Н;

ΔF – снижение расчетной силы тяги от потерь энергии в двигателе и тяговой передаче, Н;

I – ток цепи якоря, А;

U – напряжение на зажимах двигателя, В;

r – активное сопротивление обмотки якоря двигателя, Ом;

c_e – конструктивная постоянная;

Φ – магнитный поток, Вб;

n – число движущих осей.

Магнитная характеристика тягового двигателя $c_e \Phi(I_{\text{в}})$ представляется в табличной форме. Для определения промежуточных значений $c_e \Phi$ можно использовать интерполяционную формулу Лагранжа. Причем, поскольку природа магнитной характеристики такова, что ее график представляет собой плавную линию, для определения промежуточных значений $c_e \Phi$, как показали расчеты, достаточно в качестве интерполяционной формулы применить полином второй степени.

При определении коэффициентов интерполяционных формул в расчет принимаются узлы интерполяции, принадлежащие интервалу, содержащему табличное значение тока возбуждения и в наибольшей мере приближенные к его значению на данном шаге расчета. Если таковым оказывается первое или последнее значение тока возбуждения в исходной зависимости $c_e \Phi(I_{\text{в}})$, то для расчета используют координаты трех первых или трех последних узлов.

Снижение расчетной силы тяги двигателя ΔF , в Н, определяется как [4]

$$\Delta F = 3,6 \frac{p_{\text{хх}} + p_{\text{доб}} + p_{\text{зп}}}{v}, \quad (8)$$

где $p_{\text{хх}}$ – потери холостого хода, Вт;

$p_{\text{доб}}$ – добавочные потери, Вт;

$p_{\text{зп}}$ – потери в зубчатой передаче и моторно-осевых подшипниках, Вт;

v – скорость движения в км/ч.

При расчете к.п.д. тягового двигателя падение напряжения в контакте щеток и коллектора согласно ГОСТ 2582-81 принимается равным 2 В, а сопротивление цепи якоря – при температуре обмоток, равной 115°C.

Зависимость потерь холостого хода от тока возбуждения и частоты вращения ротора $p_{\text{хх}}(I_{\text{в}}, n)$, определяются по данным протоколов квалификационных испытаний тягового двигателя.

Нетабличные значения $p_{\text{хх}}$ вычисляются методом интерполяции функции двух переменных. Вычислительный алгоритм предусматривает интерполирование зависимости $p_{\text{хх}}(I_{\text{в}}, n)$ последовательно по обоим аргументам. В качестве интерполирующей зависимости при организации процедуры интерполяции по каждому аргументу используется полином второй степени. Узлы интерполяции на каждом шаге интерполирования выбираются так же, как и при вычислении $c_e \Phi$.

Механические потери (потери холостого хода при $I_{\text{в}} = 0$) тягового двигателя целесообразно представить аналитическим выражением в виде степенного полинома второй степени. Для тягового двигателя ДТ-9Н на основании данных, приведенных в [13], имеем выражение

$$p_{\text{мх}} = 1,63n + 4,23 \left(\frac{n}{100} \right)^2 + 0,761 \left(\frac{n}{100} \right)^3, \quad \text{Вт} \quad (9)$$

где n – частота вращения вала двигателя в об/мин.

Добавочные потери согласно ГОСТ 2582-81 определяются как

$$p_{\text{доб}} = p_{\text{доб}}^* p_{\text{мг}}, \quad (10)$$

где $p_{\text{мг}}$ – магнитные потери;

$p_{\text{доб}}^*$ – отношение добавочных потерь к магнитным.

Приведенная в ГОСТ 2585-81 зависимость $p_{\text{доб}}^*$ от выраженного в долях номинального

значения тока возбуждения I_B^* с приемлемой точностью аппроксимируется аналитическим выражением

$$P_{\text{доб}}^* = 0,224 - 0,0627I_B^* + 0,139I_B^{*2} \quad (11)$$

Магнитные потери равны разности потерь холостого хода и механических потерь, т.е.

$$P_{\text{МГ}} = P_{\text{ХХ}} - P_{\text{Мех}}. \quad (12)$$

Потери в месте контакта щеток определяются, исходя из падения напряжения на нем 2 В.

Потери в зубчатой передаче и моторно-осевых подшипниках

$$P_{\text{зп}} = p_{\text{зп}}^* P_{\text{под}}, \quad (13)$$

где $P_{\text{под}}$ – подведенная к двигателю мощность;

$p_{\text{зп}}^*$ – потери в зубчатой передаче, отнесенные к $P_{\text{под}}$.

Величина $p_{\text{зп}}^*$ определяется по приведенной в ГОСТ2585-81 зависимости $p_{\text{зп}}^*(P_{\text{под}}^*)$, где $P_{\text{под}}^*$ – отнесенная к единице номинальной мощности двигателя подведенная мощность. Указанная зависимость может быть представлена аналитическими выражениями:

$$\begin{aligned} (P_{\text{под}}^* < 0.75): p_{\text{зп}}^* &= 0,1792 - \\ &- 0,477P_{\text{под}}^* + 0,3646P_{\text{под}}^{*2}, \\ (P_{\text{под}}^* \geq 0.75): p_{\text{зп}}^* &= 0,247 - \\ &- 0,00334P_{\text{под}}^* + 0,004289P_{\text{под}}^{*2}. \end{aligned} \quad (14)$$

В результате решения уравнения (6) для каждого из выбранных значений уклона определяется установившаяся скорость движения, и ток двигателя, а формулам (2) соответствующий им удельный расход электроэнергии на тягу.

Расход электроэнергии на собственные нужды в Вт·ч/т·км определяется как

$$a_{\text{сн}} = \frac{10^3 P_{\text{сн}}}{mv}, \quad (15)$$

где $P_{\text{сн}}$ – расчетная мощность потребителей цепей собственных нужд, кВт.

Решение задачи применительно к вариантам, отличающимся количеством используемых тяговых двигателей и напряжением на токоприемнике, можно представить в виде графиков, показанных для примера на рис. 1.

Как можно видеть, эти графики дают возможность оценить изменение энергоемкости перевозок, обусловленное изменением напряжения в контактной сети с 1500 В до 3000 В и отключением части тяговых двигателей при каждом уровне напряжения в сети.

Относительная разность расхода электроэнергии в %:

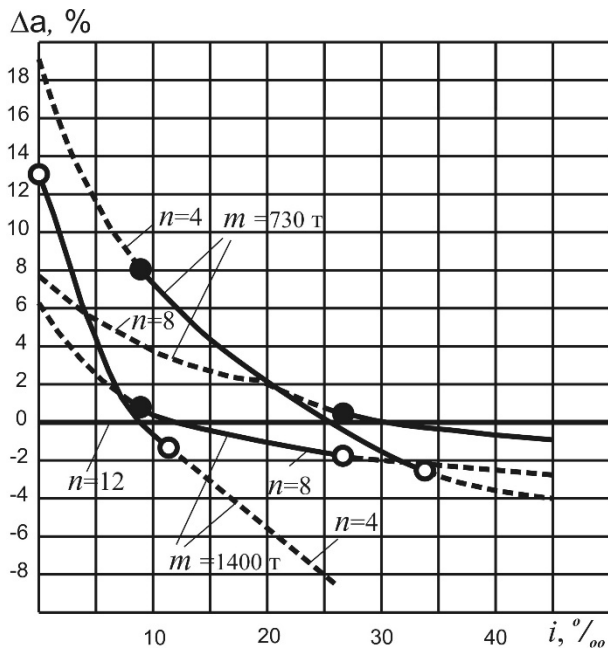
$$\Delta a = 100 \frac{a_1 - a_2}{a_1}, \quad (16)$$

где a_1 и a_2 удельный расход электроэнергии сравниваемых вариантов.

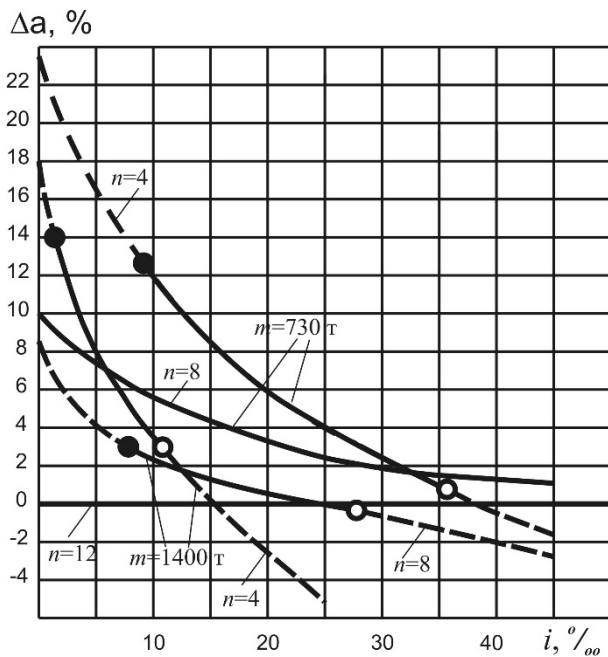
На практике обычно рассматривается вождение поездов на конкретном участке, поэтому решение предпочтительнее представить не в виде приведенных на рис. 1 графиков, а в виде зависимости относительной разности расхода энергии Δa от уклона пути i , как показано на рис. 4.

Как уже отмечалось, графики рис.4, рассчитанные рассмотренным выше способом, соответствуют случаю, когда прицепная часть поезда состоит из девяти вагонов-самосвалов типа 2ВС105. В этом случае расчетная масса поезда составляет 1400 т при tare 730 т.

Зависимости $\Delta a(i)$ определяют для поезда заданной массы снижение ($\Delta a > 0$) или увеличение ($\Delta a < 0$) расхода электроэнергии, вызванное отключением части тяговых двигателей. На рис. 4 затушёванные точки соответствуют ограничению по скорости движения 35 км/ч, а не затушёванные - ограничению по току двигателя 400 А.



а) – без учета расхода энергии на собственные нужды



б) – с учетом расхода энергии на собственные нужды

Рис. 4. Зависимость разности расхода электроэнергии на тягу от уклона пути при напряжении в контактной сети 3000 В

Подобные представленным на рис. 4 зависимости были рассчитаны для ряда значений напряжения в контактной сети (от 2200 В до 3700 В), а также для массы поездов (1400 т), соответствующих транспортировке вскрыши. Проведено также сравнение энергоемкости перевозок при работе тяговых агрегатов на участках с напряжением в контактной сети 1500 В и 3000 В (см. рис. 5).

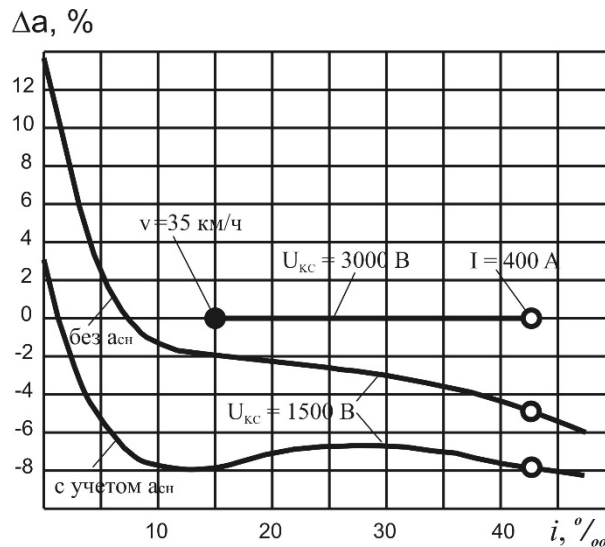


Рис. 5. Сопоставление расхода электроэнергии на тягу (на токоприемнике) при $U_{кк} = 3000$ В и $U_{кк} = 1500$ В

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы.

Выводы

1. На постоянных путях откатки карьеров с уклонами 15÷40 ‰ для тяговых агрегатов ПЭ2^М наиболее выгоден режим работы на последовательно – параллельном соединении с включением всех тяговых двигателей. Движение на последовательном соединении сопровождается ростом расхода электроэнергии на тягу на 2-4 ‰. При учете затрат на собственные нужды разница расходов энергии на этих режимах достигает 6-10%.

2. Приведенные в п. 1 выводы справедливы при изменении напряжения в контактной сети в допустимых пределах (3,7÷2,2 кВ). С понижением напряжения работа на последовательном соединении становится все более «невыгодной» (расход энергии на 10-13% больше, чем при работе на последовательно – параллельном соединении).

3. На постоянных путях откатки с уклонами до 15‰ для ведения груженных

поездов целесообразно использовать 4 или 8 двигателей. Снижение затрат энергии составляет 2÷10%.

4. При движении без груза на участках с уклонами $i \leq 30$ ‰ целесообразно использование 8 тяговых двигателей.

5. Расход электроэнергии (на токоприемнике) на транспортировку горной массы на постоянных путях откатки при повышении напряжения в контактной сети с 1500 В до 3000 В снижается на 4-8 ‰.

6. Приведенные выше выводы соответствуют установившимся режимам ($v=\text{const}$) движения поезда, поэтому в каждом конкретном случае реальное снижение затрат электроэнергии, ко-

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Курбасов А.С. Электровозы нового поколения как фактор улучшения базовых показателей работы железных дорог. / А.С. Курбасов // Железнодорожный транспорт. – 2003. – №10. – С. 55-58.
2. Ясукава С. Энергосберегающие методы управления движением высокоскоростных поездов / С Ясукава, С. Като // Железные дороги мира. -1990. №7.-С. 43-46
3. Гетьман Г.К., Васильев В.Е. Анализ расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов. / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. какад. В.Лазаряна. - 2011.Вип. 36.С.70-74.
4. Гетьман Г.К. Теорія електричної тяги [Текст]: підручник: у 2 т. / Г. К. Гетьман. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – Т. 1. – 2014. – 578 с.
5. Бочаров В. И. и др. Тяговые двигатели электровозов. Новочеркасск: Агенство Наутилус. - 1998.-672с.
6. Розенфельд В.Е. Электрическая тяга поездов. / В. Е. Розенфельд, Ю. Е. Равкин, И. А. Лакштовский. – М.: Государственное транспортное железнодорожное издательство. - 1940. – 799 с.
7. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. - М.: Транспорт. - 1983. -328 с.
8. Гетьман Г. К. О расчетном определении экономии электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей электроподвижного состава. / Г.К. Гетьман, В.Е. Васильев. //Электрификация транспорта. – 2013. - №5. С. 25-32.
9. Гетьман Г. К. Еще раз об определении экономии электроэнергии на тягу за счет частичного отключения тяговых двигателей электроподвижного состава. / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Наука та прогресс транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна : зб. наук. пр. – 2013. – Вип. 5(47). – С. 47-57.
10. Правила тяговых расчетов для поездной работы промышленных электровозов постоянного тока. – Госстрой СССР, ПромтрансНИИпроект вып. 4322. – М. – 1977. - 230 с.
11. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизельпоездам. Том 1. – М.: Транспорт. – 1976. - 431 с.
12. ГОСТ 2582-81. Машины электрические тяговые. Общие технические требования. Введ. 1981-01-01. – М.: Издательство стандартов. – 1981. – 27 с.
13. Типовые испытания тягового двигателя ДТ9Н. ВЭЛНИИ. Технический отчет ЭМ-4Т-69. Новочеркасск. – 1969. – 32 с.

Поступила в печать 01.12.2012.

торое может быть получено за счет отключения части тяговых двигателей, следует определять путем производства тяговых расчетов и проведения тягово-эксплуатационных испытаний.

REFERENCES

1. Kurbasov A.S. Elektrovozyi novogo pokoleniya kak faktor uluchsheniya bazovyih pokazateley raboty zheleznnyih dorog [Electric locomotives of the new generation as a factor in improving the basic performance of the railways]. *Zheleznodorozhnyiy transport – Railway transport* , 2003, no. 10, pp. 55-58.
2. Yasukava S., Kato S. Energoberegayuschie metodyi upravleniya dvizheniem vyisokoskorostnyih poezdov [Energy-saving methods of traffic control high-speed trains]. *Zheleznnye dorogi mira - Railways of the World*, 1990, no. 7, pp. 43-46.
3. Getman G.K., Vasilev V.E. Analiz rashoda elektroenergii na tyagu karernyih poezdov [Analysis of energy consumption for traction trains career] *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 36, pp. 70-74.
4. Getman G.K. *Teoriya elektrichnoyi tyagi* [Theory of electric traction]. Dnipropetrovsk, DNURT Publ., 2014. 578 p.
5. Bocharov V. I. *Tyagovyye dvigateli elektrovovoz* [Electric traction motors]. Novocherkassk, Aгенstvo Nautilus Publ., 1998. 672 p.
6. Rozenfeld V.E., Ravkin Yu. E., Lakshtovskiy I. A. *Elektricheskaya tyaga poezdov* [Electric traction of trains]. Moscow, Gosudarstvennoe transportnoe zheleznodorozhnoe izdatelstvo Publ., 1940. 799 p.
7. Rozenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow, Transport Publ., 1983. 328 p.
8. Getman G. K., Vasilev V. E. O raschetnom opredelenii ekonomii elektroenergii pri chastichnom otklyuchenii tyagovyih dvigateley elektropodvizhnogo sostava [Estimated determining energy savings at partial disabling the traction motors of electric rolling stock]. *Elektrifikatsiya transporta – Electrification of transport*, 2013, no. 5, pp. 25-32.
9. Getman G. K., Vasilev V. E. Esche raz ob opredelenii ekonomii elektroenergii na tyagu za schet chastichnogo otklyucheniya tyagovyih dvigateley elektropodvizhnogo sostava [Once again, the definition of energy savings in the draft due to the partial shutdown of traction motors of electric rolling stock]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2013, issue 5(47), pp. 47-57.
10. *Pravila tyagovyih raschetov dlya poezdnoy raboty promyshlennyih elektrovovoz postoyannogo toka* [Terms traction calculations for train operation of industrial DC electric]. PromtransNIIProekt vyip Publ.,

© Гетьман Г. К., Васильев В. Е., 2015

1977, 230 p.

11. *Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozam i dizelpoezdam* [Handbook of electric rolling stock, locomotives and diesel trains]. Moscow, Transport Publ., 1976, 431 p.

12. GOST 2582-81. *Mashinyi elektricheskie tyagovyye. Obschie tehniccheskie trebovaniya*. [State standart Machines the electric hauling. General technical requirements]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1981, 27 p.

13. *Tipovyye ispytaniya tyagovogo dvigatelya DT9N* [Type testing traction motor DT9N]. Novocherkassk, 1969, 32 p.

Внутренний рецензент *Сыченко В.Г.*Внешний рецензент *Синчук О.Н.*

Важнейшей задачей локомотивного хозяйства в условиях рыночных отношений является сокращение расхода электрической энергии на тягу поездов. Особую актуальность это имеет не только для грузового движения, которое является основным на железных дорогах Украины, но и для карьерного транспорта. В последние годы удалось добиться некоторого снижения удельного расхода электроэнергии и эта тенденция должна быть сохранена и усилена в последующие годы. Большое значение здесь имеет совершенствование способов определения и реализации резервов экономии электроэнергии.

В статье рассматривается методика определения расхода электроэнергии на тягу поездов в установленных режимах движения, которая может найти применение при определении эффективности ряда мероприятий по снижению энергоемкости перевозок, или задач нормирования энергозатрат. В качестве примера рассмотрены результаты решения задач о влиянии степени использования установленной мощности и уровня напряжения в контактной сети на затраты электроэнергии на тягу тяговыми агрегатами постоянного тока типа ПЭ2^М.

Ключевые слова: норма расхода, карьерный транспорт, тяговый двигатель, электроэнергия, потери, собственные нужды, скорость движения.

УДК [629.423+620.92].004.18

Г. К. ГЕТЬМАН, В. Е. ВАСИЛЬЄВ (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, м. Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. (056)373-15-31, ел.пошта: getman-gk@i.ua, wasiljew@ukr.net,
ORCID: orcid.org/0000-0002-3471-6096, orcid.org/0000-0001-7551-2332

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ КАР'ЄРНИХ ПОЇЗДІВ ЗА РАХУНОК ЧАСТКОВОГО ВІДКЛЮЧЕННЯ ЧАСТИНИ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ

Найважливішим завданням локомотивного господарства в умовах ринкових відносин є скорочення витрати електричної енергії на тягу поїздів. Особливу актуальність це має не тільки для вантажного руху, який є основним на залізницях України, але і для кар'єрного транспорту. В останні роки вдалося добитися деякого зниження питомої витрати електроенергії і ця тенденція повинна бути збережена й посилена в наступні роки. Велике значення тут має вдосконалювання системи нормування.

У статті розглядається методика визначення витрати електроенергії на тягу поїздів в ustalених режимах руху, яка може знайти застосування при визначенні ефективності ряду заходів щодо зниження енергоємності перевезень, або завдань нормування енерговитрат. Як приклад розглянутий результати розв'язку завдань про вплив ступеня використання встановленої потужності і рівня напруги в контактній мережі на витрати електроенергії на тягу тяговими агрегатами постійного струму типу ПЭ2^М.

Ключові слова: норма витрати, кар'єрний транспорт, тяговий двигун, електроенергія, втрати, власні потреби, швидкість руху.

Внутрішній рецензент *Сиченко В.Г.*Зовнішній рецензент *Синчук О.М.*

UDC [629.423 - 620.92].004.18

G. K. GETMAN, V. E. VASILEV (DNURT)

Dnepropetrovsk national university of railway transport of the name of academician V. Lazaryana, street of Lazaryana 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. (056) 373-15-31, el.mail: getman-gk@i.ua, vasiljev@ukr.net,
ORCID: orcid.org/0000-0002-3471-6096, orcid.org/0000-0001-7551-2332

ABOUT POSSIBILITY OF DECLINE OF EXPENSE OF ELECTRIC POWER ON TRACTION OF QUARRY TRAINS FOR ACCOUNT OF PARTIAL DISCONNECTING OF PART OF HAULING ENGINES

The major task of locomotive economy in the conditions of market relations is reduction of expense of electric energy on traction of trains. The special actuality it has for freight motion that is basic on the railways of Ukraine. It was the last year succeeded to obtain some decline of specific expense of electric power and this tendency must be stored and in crease in subsequent years. A large value has perfection of the system of setting of norms here.

In the real article methodology of determination of expense of electric power is examined on traction of trains in the set modes of motion, that can find application at determination of efficiency of row of measures on the decline of power-hungryness of transportations, or tasks of setting of norms of expenses of energy. The results of decision of tasks are as an example considered about influence of degree of the use of the set power and level of tension in a pin network on the expenses of electric power on traction by the hauling aggregates of direct-current of type of ПЭ2^М

Keywords: norm of expense, quarry transport, hauling engine, electric power, own needs, rate of movement.

Internal reviewer *Sichenko V.G.*

External reviewer *Sinchuk O.N.*

УДК 629.423.2:621.313.333

Д. О. ЗАБАРИЛО, Д. М. МАМАСУЄВ (ДНУЗТ)

Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010 Дніпропетровськ, Україна, тел.+38(063)446 - 77 - 38, ел. пошта lazbl@yandex.ru, ORCID 0000-0002-6206-0012, 0000-0003-0313-7574

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ З АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ

Вступ

Важливим елементом в забезпеченні стабільного функціонування всіх систем електропоїзда є перетворювач власних потреб. Він забезпечує живленням двигуни допоміжного привода, пристрої зарядки акумуляторних батарей, електричних кіл керування, освітлювальних мереж, систем мікроклімату.

Конфігурація схеми перетворювача власних потреб електропоїзда головним чином визначає параметри таких компонентів схеми як чопер, інвертор, трансформатор, випрямляч та індуктивно-ємнісні елементи фільтрів [1]. Тому правильно спроектована конфігурація схеми перетворювача власних потреб дозволяє мінімізувати його масу, габарити та вартість. В свою чергу конфігурація схеми живлення пристроїв власних потреб залежить від топології силової схеми електропоїзда та наявної елементної бази силових напівпровідникових приладів.

Мета

Визначення раціональної структури схеми перетворювача власних потреб електропоїздів подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом для залізниць України.

Методика

Для вирішення поставленої задачі були використані основні положення теорії статичних перетворювачів та трансформаторів.

Результати дослідження

Для підвищення надійності допоміжного привода використовують асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, які живляться від джерела трифазної змінної напруги 380 В, промислової частоти 50 Гц, тому обов'язковим є застосування гальванічної розв'язки високовольтних кіл з допоміжними машинами. На електропоїздах змінного струму (рис. 1) роль гальванічної розв'язки як правило виконує тяговий трансформатор, частина вторинної обмотки якого використовується для живлення пристро-

їв власних потреб. На електропоїздах постійного струму (рис. 2) та подвійного живлення (рис. 3) використовується додатковий трансформатор. В останньому випадку необхідним є також застосування інвертора для живлення обмоток трансформатора.

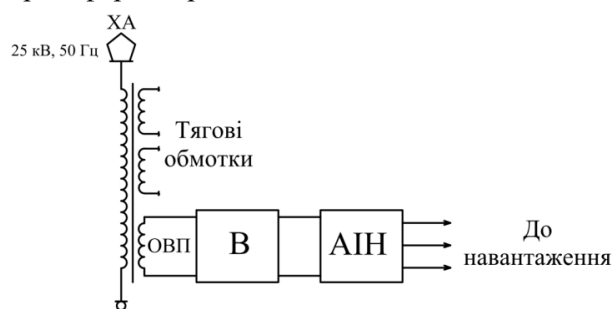


Рис. 1. Функціональна схема живлення пристроїв власних потреб електропоїзда змінного струму

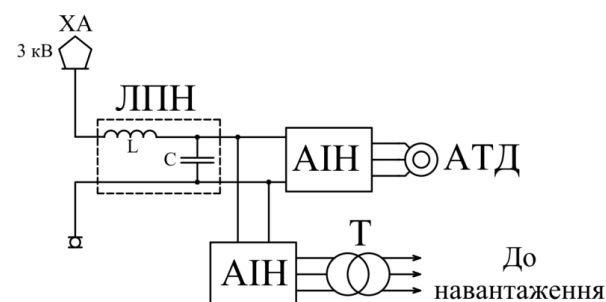


Рис. 2. Функціональна схема живлення пристроїв власних потреб електропоїзда постійного струму

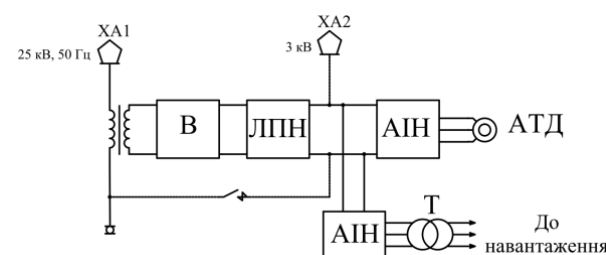


Рис. 3. Функціональна схема живлення пристроїв власних потреб електропоїзда подвійного живлення

Найбільш розповсюдженими структурами схем перетворювачів власних потреб електропоїздів подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом є:

- схема з застосуванням вхідного чопера;

- схема прямого підключення однофазного АІН;
- схема прямого підключення трифазного АІН.

Схема з застосуванням вхідного чопера

При живленні від мережі постійної напруги (рис. 4) [2] використовуються ємнісний подільник і чопер СНР, які призначені для зниження напруги мережі до рівня, необхідного для роботи автономних інверторів напруги PWM. Два інвертори з'єднані послідовно, а на їх вході встановлено ще один ємнісний подільник напруги. Таки чином напруга мережі постійного струму поділяється навпіл спочатку одним ємнісним подільником, а потім ще раз навпіл другим ємнісним подільником, що дозволяє вико-

ристовувати у чопері силові напівпровідникові прилади, розраховані на половину максимальної мережевої напруги, а в інверторах – на одну четверту максимальної напруги тягової мережі постійного струму. Така величина напруг на інверторах дозволяє використовувати силові напівпровідникові прилади 17 класу, які мають значно вищі показники частотних характеристик та відносно низьку вартість порівняно до приладів такого ж типу більш високого класу (наприклад GTO 45 класу або IGBT 65 класу), що дозволяє підвищити частоту широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), а отже, отримати майже ідеальну форму синусоїди струму навантаження інвертора.

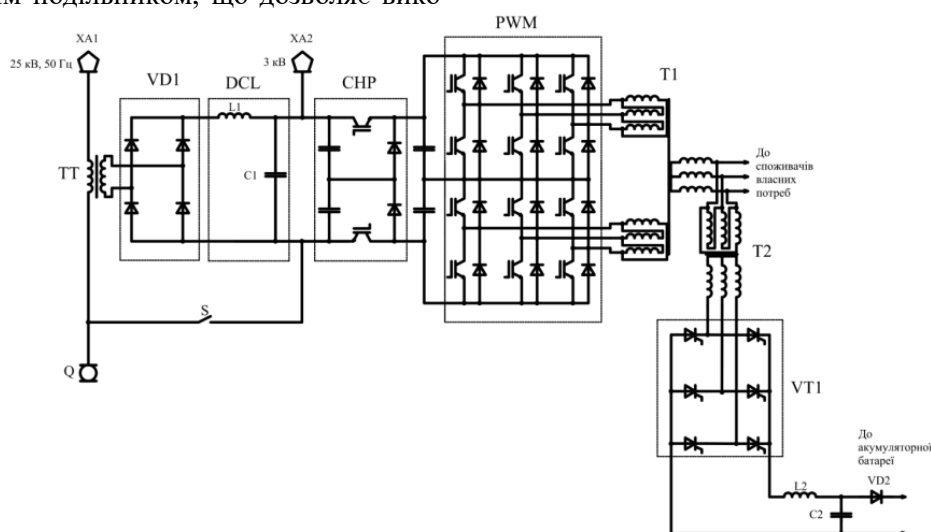


Рис. 4. Схема з застосуванням вхідного чопера

При живленні від мережі змінного струму (див. рис. 4) напруга обмотки власних потреб тягового трансформатора ТТ випрямляється некерованим мостовим випрямлячем VD1, згладжується у ланці постійної напруги DCL і подається на вхід чопера, який знижає і стабілізує напругу.

З виходу інверторів напруга подається до первинних обмоток трифазного трансформатора Т1, який виконує роль гальванічної розв'язки високовольтих кіл з допоміжними машинами. Вторинна обмотка трансформатора живить допоміжні машини трифазною напругою 380 В, частотою 50 Гц. Первинні обмотки трифазного трансформатора як правило з'єднані «трикутником», вторинні – «зіркою». Також до вторинної обмотки трансформатора Т1 підключений трансформатор Т2, на виході якого встановлений керований випрямляч VT1 і фільтр L2C2, які призначені для зарядки акумуляторної батареї.

Схема прямого підключення однофазного АІН

При живленні від мережі постійного і змінного струму напруга ланки постійної напруги DCL перетворюється за допомогою інвертора VT1 в змінну однофазну напругу, яка живить первинну обмотку трансформатора власних потреб Т1 [2]. Трансформатор виконує роль гальванічної розв'язки і знижає напругу до необхідної величини. Далі напруга вторинної обмотки випрямляється однофазним некерованим мостовим випрямлячем VD1 і подається до поїзної шини власних потреб (train bus supply). З поїзної шини отримують живлення трифазні автономні інвертори напруги, які живлять допоміжні асинхронні машини та кондиціонери. Також від поїзної шини живляться пристрої обігріву та зарядки акумуляторних батарей. Як правило напруга поїзної шини становить 570 В,

що дозволяє отримати на виході інвертора діюче значення трифазної напруги 380 В, 50 Гц.

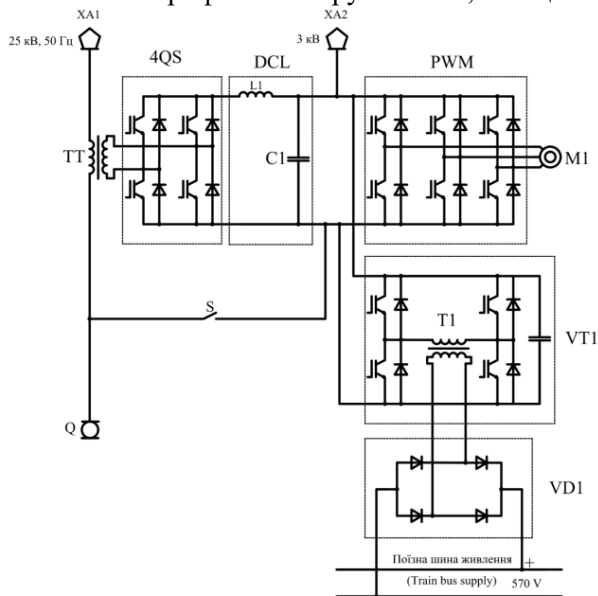


Рис. 5. Схема прямого підключення однофазного АІН

Схема прямого підключення трифазного АІН

При живленні від мережі постійного струму (рис. 6) напруга ланки постійної напруги DCL1 подається на вхід автономного трифазного інвертора напруги власних потреб PWM2, який живить трифазний трансформатор власних потреб T1 з'єднані «трикутником», а вторинні – «зіркою». На вторинних обмотках трансформатора за допомогою інвертора власних потреб підтримується стабільна трифазна напруга 380 В, 50 Гц.

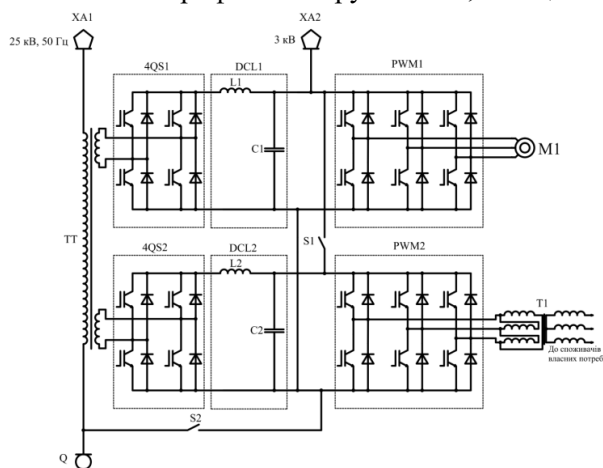


Рис. 6. Схема прямого підключення трифазного АІН

При живленні від мережі змінного струму напруга обмотки власних потреб тягового трансформатора ТТ випрямляється, стабілізується і підвищується до необхідної величини за допомогою чотириквadrантного перетворювача

4QS2 і через ланку постійної напруги DCL2 подається до автономного інвертора напруги PWM2.

Таким чином, при живленні від мережі постійного струму напруга на вході інвертора коливається в діапазоні 2000...4000 В, а при живленні від мережі змінного струму до інвертора подається стабільна напруга величиною, як правило 2800 В.

Наступний варіант схеми передбачає живлення допоміжних машин від ланки постійної напруги при роботі електропоїзда як від мережі постійного струму, так і від мережі змінного струму. При цьому автономний інвертор напруги, який живить первинні обмотки трифазного трансформатора отримує живлення через чофер (рис. 7) або безпосередньо від ланки постійної напруги (рис. 8).

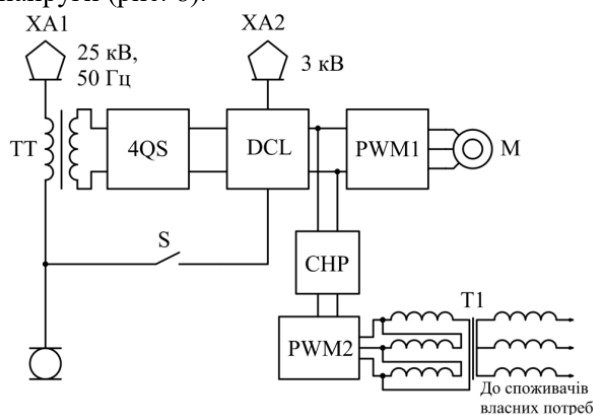


Рис. 7. Функціональна схема живлення допоміжних машин від ланки постійного струму з вхідним чофером

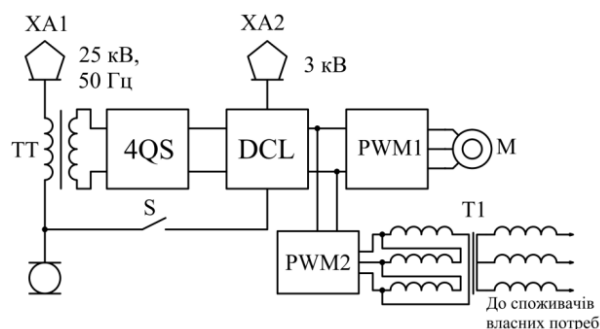


Рис. 8. Функціональна схема живлення допоміжних машин від ланки постійного струму без вхідного чофера

При такій топології схеми силові прилади автономних інверторів, які живлять асинхронні тягові двигуни розраховуються на номінальний струм двигунів, а силові прилади чотириквadrантних перетворювачів на більш високі значення струмів, як правило на 20 % більше номінального струму тягового інвертора. Це пояснюється тим, що через силові прилади вхідного чотириквadrантного перетворювача також

протікає струм навантаження допоміжних машин.

Схема з застосуванням проміжного трансформатора підвищеної частоти

Новим принципом побудови структур електричних кіл власних потреб є застосування проміжного трансформатора підвищеної частоти, обмотки якого живляться від резонансного інвертора напруги (рис. 9) [3,4]. Принцип дії наступний. Вхідна напруга знижується до необхідного рівня DC-DC конвертером. Конвертер складається з послідовного резонансного інвертора, який перетворює постійну напругу в змінну, частотою, вищою 50 Гц і живить первинну обмотку трансформатора. За допомогою трансформатора здійснюється гальванічна розв'язка кіл високої і низької напруг. Також трансформатор знижує напругу до потрібної величини для живлення автономного інвертора напруги власних потреб. Напруга вторинної обмотки трансформатора випрямляється однофазним некерованим випрямлячем.

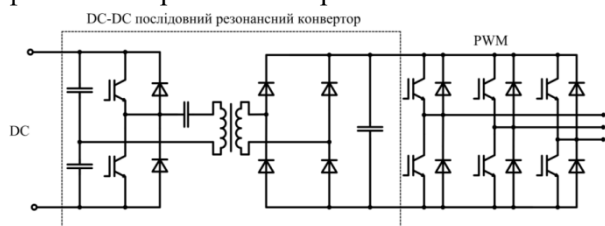


Рис. 9. Схема резонансного конвертера для живлення АІН власних потреб від мережі постійного струму

Хоча в схемі з DC-DC конвертером використовується більша кількість елементів відносно традиційної схеми, проте з точки зору вартості, збільшена кількість елементів компенсується зниженням вартості низьковольтних інверторів. Робоча частота трансформатора знаходиться в діапазоні 10 кГц, що дозволяє знизити вагу трансформатора з сотень до десятків кілограмів.

Послідовний резонансний перетворювач працює без будь-яких зворотних зв'язків. Фіксоване співвідношення вхідної до вихідної напруги визначається лише коефіцієнтом трансформації.

При використанні такого перетворювача для багатосистемних електропоїздів (рис. 10) для регулювання вхідної змінної напруги на вхід DC-DC конвертера потрібно лише встановити двоквADRантний перетворювач 2QS змінного струму.

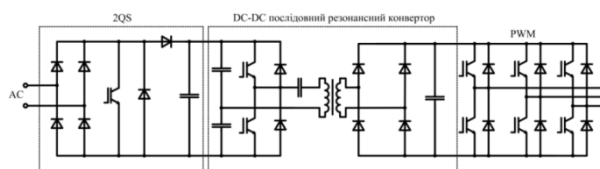


Рис. 10. Схема резонансного конвертера для живлення АІН власних потреб від мережі постійного і змінного струму

Якщо використовувати два вхідні модулі перетворювача, які з'єднані послідовно на первинній стороні і паралельно на вторинній, то можна подавати вхідну напругу вдвічі більшої величини (рис. 11).

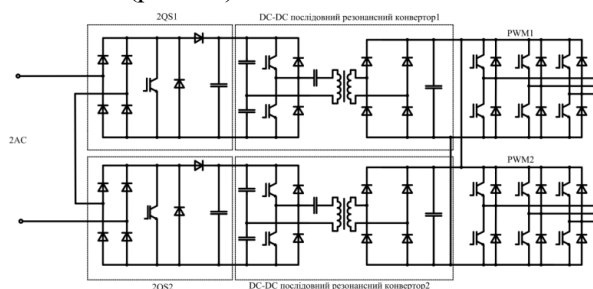


Рис. 11. Схема з'єднання двох резонансних конвертерів для живлення АІН власних потреб від мережі постійного і змінного струму

Схема подібної концепції, тобто з використанням трансформатора підвищеної частоти була запропонована для перетворювачів власних потреб електропоїзда ЕД6 [5,6]. В такій схемі (рис. 12) [7] замість резонансного інвертора використовується трирівневий однофазний інвертор.

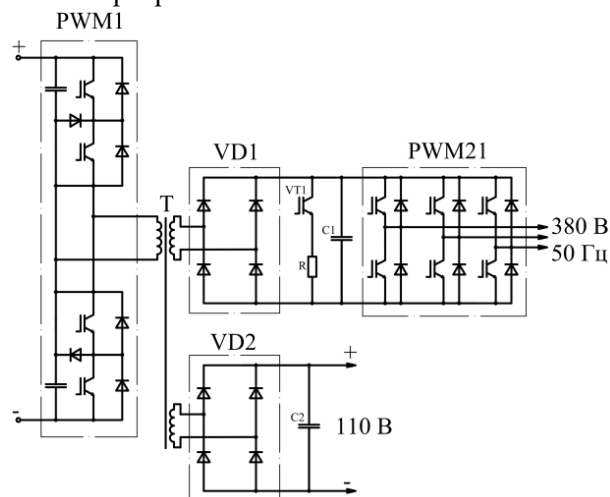


Рис. 12. Схема електричних кіл перетворювача власних потреб електропоїзда ЕД6

Перетворювач отримує живлення з контактної мережі 3 кВ і забезпечує живленням мережу постійної напруги 110 В та трифазну мережу змінної напруги 380 В, 50 Гц. В перетворювачі за допомогою трансформатора забезпечується гальванічна розв'язка мереж 3 кВ, 380 В і 110

В. Для зменшення маси і габаритів трансформатора він виконується на підвищену частоту (1000 Гц).

Напруга контактної мережі перетворюється в однофазну змінну напругу вхідним трирівневим інвертором, який включає в себе чотири транзистори із зворотними діодами, конденсатори та інші елементи. Транзистори вмикаються по два послідовно в кожному плечі вхідного інвертора. Напруга між ними розподіляється за допомогою вхідних конденсаторів, точка з'єднання яких за допомогою діодів сполучається з точками з'єднання одного з іншим транзисторів.

Змінна напруга однієї вторинної обмотки випрямляється випрямлячем VD1 і живить трифазний АІН, який в свою чергу живить трифазною напругою 380 В, 50 Гц відповідні споживачі. Напруга другої вторинної обмотки трансформатора випрямляється і живить споживачі напругою 110 В.

Така конфігурація схеми дозволяє використовувати в перетворювачі силові прилади більш

низького класу та зменшити масу і габарити трансформатора власних потреб.

Висновки

1. Серед діючих схем перетворювачів власних потреб електропоїздів з асинхронним тяговим приводом найбільш широко використовується схема з «поїзною шиною живлення». Застосування такої схеми дозволяє реалізувати живлення допоміжних машин та інших пристроїв від індивідуальних інверторів, що дає можливість регулювати потужність окремих допоміжних машин. При цьому в інверторах використовуються прилади відносно низького (9...12) класу.

2. Застосування схеми перетворювача власних потреб з використанням проміжного трансформатора підвищеної частоти дозволить знизити масо-габаритні показники перетворювача та його вартість в цілому. Тому схеми подібної концепції можна вважати найбільш перспективними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пронин М. В. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, Е. А. Крутякова. – СПб: «Электросила», 2003. – 172 с.
2. Забарило Д. О. Принципи побудови силових схем багатосистемних електровозів нового покоління / Д. О. Забарило // Локомотив-інформ. – Х., 2013. – №8 (86). – С.4-12.
3. Висин Н. Г. Повышение надежности работы систем автоматического управления электропоездов: Монография / Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, Д. А. Забарило / - Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2012. – 256 с.
4. Литовченко В. В. Особенности тягового привода электропоезда ЭД6 / В. В. Литовченко, В. А. Шаров, О. Б. Баранцев, Е. В. Корзина // Локомотив. – 2002. - №8. – С. 17-19.
5. Сиротинкин С. Б. Знакомьтесь: электропоезд ЭД6 / С. Б. Сиротинкин, М. В. Куприянов // Локомотив. – 2001. - №7. – С. 40-42.
6. Steiner M. Medium frequency topology in railway applications / M. Steiner, H. Reinold // Power Electronics and Applications. – Aalborg, 2-5 Sept, 2007. – P 1-10.
7. Hoffman H. High voltage IGBTs and medium frequency transformer in DC-DC converters for railway applications / H. Hoffman H., B. Piepenbreier // Power Electronics Drive Automation and Motion (SPEEDAM) – Pisa, 14-16 June, 2010. – P. 744-749.

Надійшла до друку 01.12.2012.

Внутрішній рецензент *Афанасов А. М.*

Визначено раціональну структуру схеми перетворювача власних потреб електропоїзда з асинхронним тяговим приводом для залізниць України. Внаслідок проведеного аналізу були визначені такі основні структури перетво-

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

рювачів власних потреб: схема з застосуванням вхідного чопера, схема прямого підключення однофазного автономного інвертора, схема прямого підключення трифазного автономного інвертора. Встановлено, що найбільш раціональною структурою є схема прямого підключення однофазного автономного інвертора напруги. В такій схемі для гальванічної розв'язки високовольтних кіл з низьковольтними колами використовується трансформатор підвищеної частоти. В якості перетворювача можна використовувати резонансний інвертор або трирівневий інвертор напруги. Застосування такої структури дозволить знизити масу і об'єм перетворювача власних потреб, а використання трирівневого інвертора дасть можливість знизити клас силових напівпровідникових приладів і відповідно, вартість перетворювача.

Ключові слова: електропоїзд, асинхронний привод, перетворювач власних потреб, трансформатор підвищеної частоти, автономний інвертор напруги, допоміжні машини, резонансний конвертор.

УДК 629.423.2:621.313.333

Д. А. ЗАБАРИЛО, Д. Н. МАМАСУЕВ (ДНУЖТ)

Каф. «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010 Днепропетровск, Украина, тел.+38(063)446 - 77 - 38, эл. почта lazbl@yandex.ru, ORCID [0000-0002-6206-0012](https://orcid.org/0000-0002-6206-0012), [0000-0003-0313-7574](https://orcid.org/0000-0003-0313-7574)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Определена рациональная структура схемы преобразователя собственных нужд электропоезда с асинхронным тяговым приводом для железных дорог Украины. В результате выполненного анализа были определены такие основные структуры: схема с применением входного чопера, схема прямого подключения однофазного автономного инвертора, схема прямого подключения трехфазного автономного инвертора. Установлено, что наиболее рациональной структурой является схема прямого подключения однофазного автономного инвертора напряжения. В такой схеме для гальванической развязки высоковольтных цепей с низковольтными цепями используется трансформатор повышенной частоты. В качестве преобразователя можно использовать резонансный инвертор либо трехуровневый инвертор напряжения. Применение такой позволит снизить массу и объем преобразователя собственных нужд, а использование трехуровневого инвертора даст возможность снизить класс силовых полупроводниковых приборов и соответственно, стоимость преобразователя.

Ключевые слова: электропоезд, асинхронный привод, преобразователь собственных нужд, трансформатор повышенной частоты, автономный инвертор напряжения, вспомогательные машины, резонансный конвертор.

Внутренний рецензент *Афанасов А. М.*

Внешний рецензент *Андриенко П. Д.*

UDC 629.423.2:621.313.333

D. A. ZABARILO, D. N. MAMASUJEV (DNURT)

Department «Electric rolling stock of railways» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaryan, Lazaryana street 2, 49010 Dnipropetrovsk, Ukraine, tel.+38(056)373 - 15 - 04, E-mail lazbl@yandex.ru, ORCID [0000-0002-6206-0012](https://orcid.org/0000-0002-6206-0012), [0000-0003-0313-7574](https://orcid.org/0000-0003-0313-7574)

CONSTRUCTION PRINCIPLES OF ELECTRIC CIRCUIT OF AUXILIARY CONVERTER OF TRAIN WITH ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE

The rational structure of the converter circuit auxiliary electric with asynchronous traction drive for the railways of Ukraine was determined. As a result of the analysis was to determine the main structure of the circuit using the input choppers, the circuit directly connecting single-phase autonomous inverter, circuit directly connecting the three-phase autonomous inverter. Found that the most rational structure is the circuit of direct connection of single-phase voltage inverter autonomous. In such a circuit for electrical isolation of high voltage circuits with low-voltage circuits using high frequency transformer. As the converter can be used resonance inverter or three-level voltage inverter. Applying this will reduce the weight and volume of auxiliary inverter, and the use of a three-level inverter will enable to reduce the class of power semiconductor devices, and accordingly, the cost of the converter.

Keywords: train, asynchronous drive, auxiliary converter, high frequency transformer, autonomous voltage inverter, auxiliary machines, resonant converter.

Internal reviewer *Afanasov A. M.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

О. Н. СИНЧУК, А. Б. СЕМОЧКИН, В. А. ФЕДОТОВ (КНУ), Б. В. ЖЕРЕБКИН (СПБГУ)

Криворожский национальный университет. 50027, г. Кривой Рог, Днепропетровская обл., ул. XXII партсъезда, д. 11, тел. (056) 409-17-30, E-mail: speet@ukr.net

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫМ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Введение

Основным видом транспорта железорудных шахт является электровозный, обеспечивающий 100% подземных грузоперевозок [1]. Для этого используются специальные электровозосоставы: электровоз – вагонетки. Специальными для шахт являются и электровозы дуосные, именуемые как рудничные, количество видов которых равно 20-ти [2].

Постановка задачи исследований

Электровозный транспорт является одним из основных потребителей электрической энергии (ЭЭ), потребляя 18 – 20% ЭЭ от всей потребляемой подземными потребителями железорудных шахт [3 – 4]. В связи с этим, вопросы эффективного использования ЭЭ напрямую касаются и внутришахтного транспорта (ВШТ) железорудных шахт. Решая эту проблему в ряде зарубежных стран ведутся, а точнее продолжают вестись, работы по созданию современных и эффективных по технологическим и энергетическим показателям рудничных электровозов и, прежде всего, их тяговых электромеханических систем (ТЭМС) [7 – 12].

Отрадно, что с этой целью в последние годы и в Украине, после более чем 20-летнего периода застоя, возобновлены аналогичные работы по созданию отечественных электроэнергоэффективных видов ТЭМС для рудничных электровозов [5 – 9]. В качестве одного из таких

перспективных направлений используются ТЭМС на базе IGBT-преобразователей и асинхронных тяговых электрических двигателей (АТД) [10].

При этом, как правило, акцент в выборе вида управления делается в сторону так называемого способа векторного управления, поскольку он обладает достаточно высоким качеством регулирования [10].

Однако, для двухдвигательного тягового комплекса, работающего параллельно на общую нагрузку, рудничный электровоз, в отличие от других видов электровозов, в силу ряда причин, главной из которых является состояние путевого хозяйства, присущи различные моменты нагрузок ТЭД, которые механически жестко связаны каждый со своей колесной парой.

Решение задачи исследований

Перераспределение нагрузок между двигателями можно осуществить, корректируя сигнал задания скорости вращения индивидуально для каждого из двух слагаемых ТЭМС рудничного электровоза [6]. Коррекцию сигнала задания можно выполнить с использованием нечеткого регулятора (FUZZY- регулятора) [6]. Вариант структуры тягового двухдвигательного регулируемого электропривода с формированием сигнала задания системы векторного управления представлена на рис. 1.

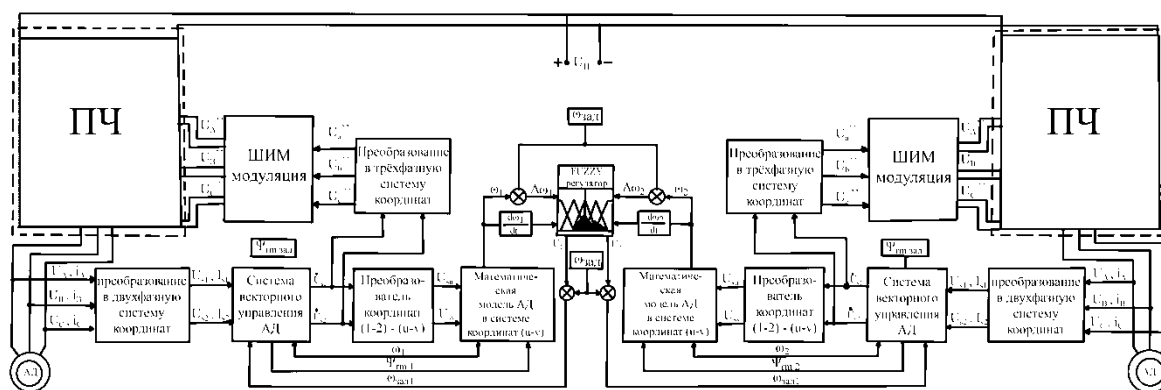


Рис. 1. Структурная схема многодвигательного асинхронного частотно-регулируемого электропривода с

формированием сигнала задания системы векторного управления, для варианта безсенсорного управления частотой вращения роторов АД

Система управления многодвигательным электроприводом состоит из двух уровней: нижнего с классической схемой векторного управления ТАД, и верхнего с регулятором нечеткой логики- регулятором сигналов задания скорости вращения роторов ТАД (индивидуально для каждого электропривода). Нижний уровень содержит блоки преобразования трехфазной системы координат (a; b; c) в двухфазную (1-2), блоки с алгоритмом векторного управления, преобразователи системы координат (1-2) в в систему координат (u; v), блоки с математической моделью для вычисления потокосцеплений роторов Ψ_m и скоростей вращения роторов ТАД ω_r и блоков обратного

преобразования двухфазной системы координат в трехфазную (a; b; c). Все эти блоки интегрированы совместно с инвертором и образуют единый полупроводниковый преобразовательный модуль с микропроцессорным управлением. Входом этого модуля является сигнал задания скорости вращения ротора ТАД, а выходом трехфазное синусоидальное напряжение, полученное широтно-импульсной модуляцией.

Процесс формирования сигналов задания скорости вращения электроприводов осуществляется в соответствии с разработанным алгоритмом нечеткого управления.

Структура данного алгоритма (рис. 2):

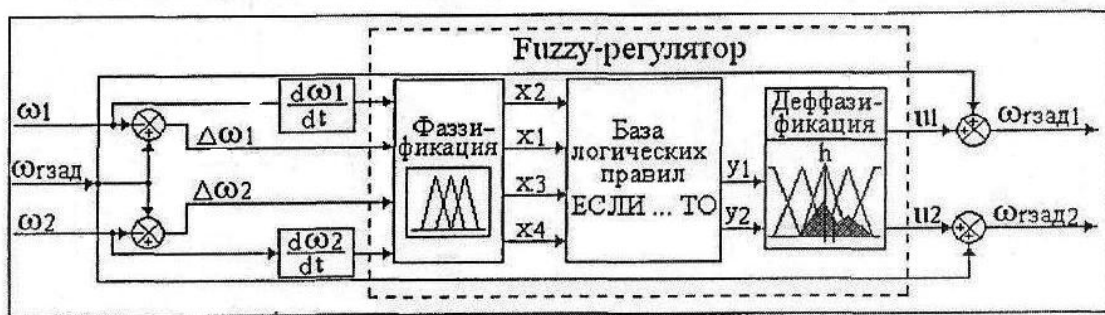


Рис. 2. Структура алгоритма системы нечеткого вывода

На вход Fuzzy-регулятора поступают сигналы рассогласования $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ фактической скорости вращения роторов ТАД $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ с заданным значением $\omega_{зад}$ и производные по скорости вращения электроприводов $\frac{d\omega_1}{dt}$ и $\frac{d\omega_2}{dt}$.

Выходом нечеткого регулятора являются корректирующие сигналы u_1 и u_2 , которые будут добавлены к опорному сигналу задания скорости вращения роторов АД.

Представленный алгоритм нечеткого вывода состоит из трех этапов в следующей последовательности:

- преобразование четких значений входных переменных в лингвистические переменные (терм-множества) - этап фаззификации;
- обработка полученной информации в категориях нечеткой логики в соответствии с разработанной на основе экспертных оценок базой логических правил вида ЕСЛИ...ТО;
- переход от категории нечетких множеств к четким значениям выходных переменных - этап дефаззификации.

На этом этапе устанавливается соответствие между конкретным (численным) значением отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей значения входной лингвистической переменной. Так для четких значений входных переменных соответствуют лингвистические входные переменные x_1 (ошибка по скорости вращения первого электропривода), x_2 (значение производной по скорости вращения первого электропривода), x_3 (ошибка по скорости вращения второго электропривода) и x_4 (значение производной по скорости вращения второго электропривода), которые заданы терм-множествами треугольного, S-образного и Z-образного вида с некоторой степенью принадлежности в диапазоне от нуля до единицы (рис.3).

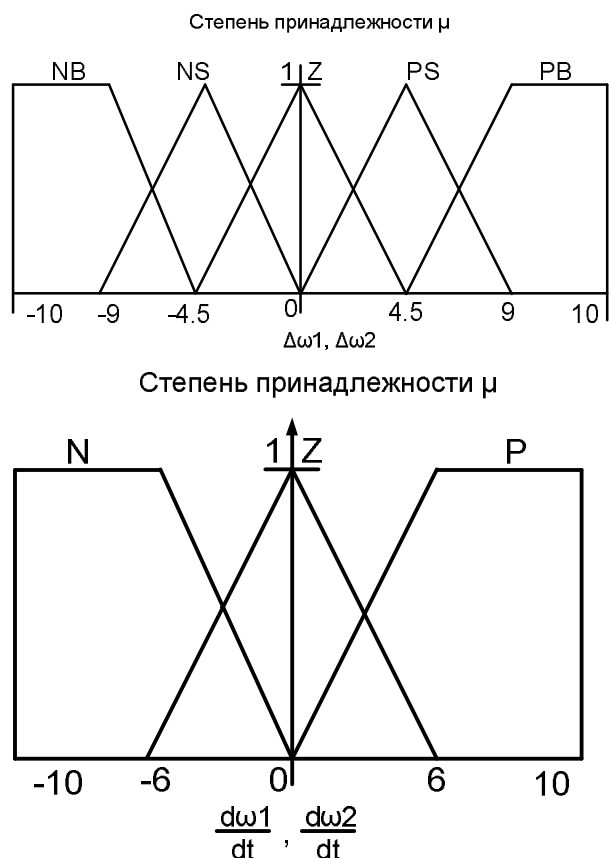


Рис. 3. Фаззификация четких значений входных переменных $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \frac{d\omega_1}{dt}$ и $\frac{d\omega_2}{dt}$

Входные лингвистические переменные x_1 и x_3 заданы пятью терм-множествами в области значений (на универсуме) $(-10; +10)$. Входные лингвистические переменные x_2 и x_4 заданы тремя терм-множествами также на универсуме $(-10; +10)$.

Диапазон универсумов соответствует максимальным положительному и отрицательному значениям входных переменных нечеткого регулятора и может быть обеспечен, при необходимости, с помощью блоков ограничения.

Количество терм-множеств, которыми заданы входные лингвистические переменные, было определено экспертным опросом на этапе формирования таблицы логических правил.

Для терм-множеств входных лингвистических переменных x_1 и x_3 были сделаны следующие обозначения:

Z - значение входного сигнала $\Delta\omega_1 (\Delta\omega_2)$ близкое к нулю;

NS - значение входного $\Delta\omega_1 (\Delta\omega_2)$ сигнала отрицательное малое;

NB - значение входного $\Delta\omega_1 (\Delta\omega_2)$ сигнала отрицательное большое;

PS - значение входного сигнала $\Delta\omega_1 (\Delta\omega_2)$ положительное малое;

PB - значение входного сигнала $\Delta\omega_1 (\Delta\omega_2)$ положительное большое.

Все терм-множества входных лингвистических переменных заданы тремя точками.

Терм-множество Z : $(-4,5; 0; 0; 1; 4,5; 0)$;

Терм-множество NS : $(-9; 0; -4,5; 1; 0; 0)$;

Терм-множество NB : $(-10; 1; -9; 1; -4,5; 0)$;

Терм-множество PS : $(0; 0; 4,5; 1; 9; 0)$;

Терм-множество PB : $(4,5; 0; 9; 1; 10; 1)$.

Для терм-множеств, которыми заданы входные лингвистические переменные x_2 и x_4 были сделаны следующие обозначения:

Z - значение входного сигнала $\frac{d\omega_1}{dt} (\frac{d\omega_2}{dt})$ близкое к нулю;

близкое к нулю;

P - значение входного сигнала $\frac{d\omega_1}{dt} (\frac{d\omega_2}{dt})$ положительное;

положительное;

N - значение входного сигнала $\frac{d\omega_1}{dt} (\frac{d\omega_2}{dt})$ отрицательное;

отрицательное;

Терм-множество Z : $(-6; 0; 0; 1; 6; 0)$;

Терм-множество P : $(0; 0; 6; 1; +\infty; 1)$;

Терм-множество N : $(-\infty; 1; -6; 1; 0; 0)$.

Все множество комбинаций терм-множеств входных лингвистических переменных образует множество подусловий, которые образуют множество условий состояния объекта регулирования. Для каждого условия состояния объекта существует свое заключение также представленное лингвистической переменной y_1 либо y_2 соответствующей четкому значению выходной переменной u_1 или u_2 . Выбор конкретного терм-множества заключения выходной лингвистической переменной определяется в соответствии с разработанной таблицей логических правил.

Таблица логических правил содержит эмпирические знания экспертов в области управления тяговыми электроприводами рудничных электровозов, представленные в формальном виде — в виде высказываний (таблица 1). Экспертами в этой области могут быть, например, проектировщики, наладчики систем управления тяговыми электроприводами, машинисты рудничных электровозов.

Таблица логических правил системы нечеткого вывода

№	ЕСЛИ (связка &)				ТО		№	ЕСЛИ (связка &)				ТО		№	ЕСЛИ (связка &)				ТО	
	x ₁	NB	x ₂	N	y ₁	PB		x ₁	NB	x ₂	P	y ₁	PS		x ₃	NB	x ₄	Z	y ₂	PB
1	x ₁	NB	x ₂	N	y ₁	PB	11	x ₁	NB	x ₂	P	y ₁	PS	21	x ₃	NB	x ₄	Z	y ₂	PB
2	x ₁	NS	x ₂	N	y ₁	PB	12	x ₁	NS	x ₂	P	y ₁	Z	22	x ₃	NS	x ₄	Z	y ₂	PS
3	x ₁	Z	x ₂	N	y ₁	PS	13	x ₁	Z	x ₂	P	y ₁	NS	23	x ₃	Z	x ₄	Z	y ₂	Z
4	x ₁	PS	x ₂	N	y ₁	Z	14	x ₁	PS	x ₂	P	y ₁	NB	24	x ₃	PS	x ₄	Z	y ₂	NS
5	x ₁	PB	x ₂	N	y ₁	NS	15	x ₁	PB	x ₂	P	y ₁	NB	25	x ₃	PB	x ₄	Z	y ₂	NB
6	x ₁	NB	x ₂	Z	y ₁	PB	16	x ₃	NB	x ₄	N	y ₂	PB	26	x ₃	NB	x ₄	P	y ₂	PS
7	x ₁	NS	x ₂	Z	y ₁	PS	17	x ₃	NS	x ₄	N	y ₂	PB	27	x ₃	NS	x ₄	P	y ₂	Z
8	x ₁	Z	x ₂	Z	y ₁	Z	18	x ₃	Z	x ₄	N	y ₂	PS	28	x ₃	Z	x ₄	P	y ₂	NS
9	x ₁	PS	x ₂	Z	y ₁	NS	19	x ₃	PS	x ₄	N	y ₂	Z	29	x ₃	PS	x ₄	P	y ₂	NB
10	x ₁	PB	x ₂	Z	y ₁	NB	20	x ₃	PB	x ₄	N	y ₂	NS	30	x ₃	PB	x ₄	P	y ₂	NB

Каждое правило данной таблицы содержит одно условие и одно заключение соответствующее этому условию. Каждое условие представлено двумя подусловиями т.е. является сложным высказыванием. Определение степени истинности сложного высказывания на основе известных значений истинности подусловий, полученных на этапе фаззификации, выполняется с использованием любого из известных выражений для логической конъюнкции.

В данном алгоритме использована формула min-конъюнкции:

$$T(x_1 \wedge x_2) = \min \{ \mu(x_1), \mu(x_2) \},$$

где $\mu(x_1)$ - степень принадлежности лингвистической переменной x_1 к некоторому множеству;

$\mu(x_2)$ - степень принадлежности лингвистической переменной x_2 к некоторому множеству;

$T(x_1 \wedge x_2)$ - степень истинности сложного высказывания (конкретного условия) базы логических правил.

Для условий состояния объекта представленного лингвистическими переменными x_3 и x_4 выполняется аналогичная процедура.

После нахождения степени истинности всех условий рассматриваемой базы логических правил, определяются значения степени истинности всех заключений базы логических правил, которые равны значениям степени истинности соответствующих им условий.

Для нахождения функции степени принадлежности каждой из выходных лингвистических переменных y_1 и y_2 производится логическое объединение всех функций степени принадлежности заключений, соответствующей лингвистической переменной. Процедура задания терм-множеств заключений и их обозначения выполнены аналогично входным лингвистическим переменным x_1 и x_3 (рис.4). В данном алгоритме для нахождения функций принадлежности выходных лингвистических переменных использовано следующее выражение max-объединения:

$$\mu(y_{1(2)}) = \max \{ \mu(1), \mu(2), \dots, \mu(30) \},$$

где $\mu(y_{1(2)})$ - функция степени принадлежности выходной лингвистической переменной y_1 или y_2 ;

$\mu(1), \mu(2), \dots, \mu(30)$ - функции степени принадлежности заключений (30 - число заключений в таблице логических правил).

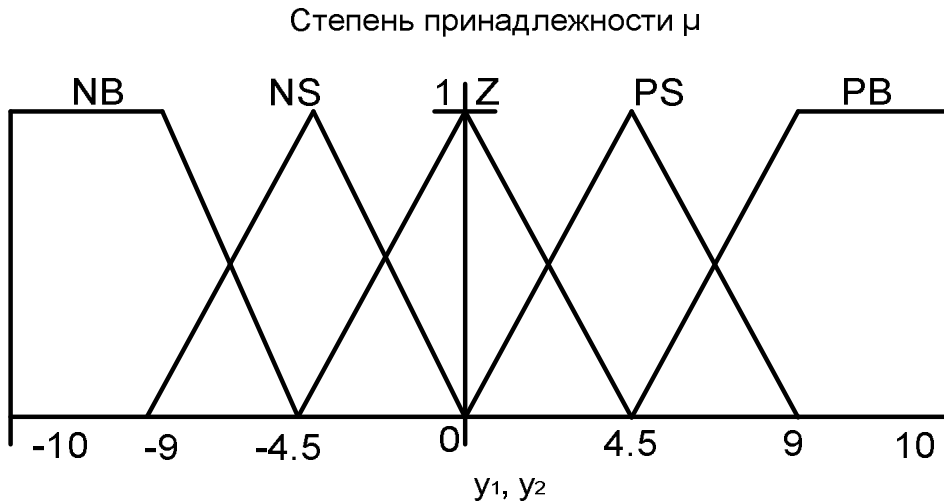


Рис. 4. Функции степени принадлежности заключений

После определения функции принадлежности каждой лингвистической переменной, выполняется процедура обратная фаззификации - дефаззификация.

В данном алгоритме переход от категории нечетких значений корректирующих сигналов выходных лингвистических переменных y_1 и y_2 к обычным (четким) значениям Fuzzy-регулятора u_1 и u_2 производится наиболее распространенным методом - методом центра тяжести плоских фигур функций степени принадлежности выходных лингвистических переменных y_1 и y_2 (рис. 5), образованных на этапе аккумуляции заключений, по формуле:

$$u_{1,2} = \frac{\int_{y_{1,2min}}^{y_{1,2max}} y_{1,2} \cdot \mu(y_{1,2}) dy_{1,2}}{\int_{y_{1,2min}}^{y_{1,2max}} \mu(y_{1,2}) dy_{1,2}}$$

где $u_{1,2}$ - результат дефаззификации - четкие значения корректирующих сигналов на выходе нечеткого регулятора;

$y_{1,2}$ - выходные лингвистические переменные, представленные некоторыми терм-множествами (заклЮчениями);

$\mu(y_{1,2})$ - степени принадлежности нечетких множеств заключений, соответствующих выходных лингвистических переменных y_1 и y_2 после этапа аккумуляции;

$y_{1,2min}$ и $y_{1,2max}$ - левая и правая точки интервала носителя нечетких множеств выходных лингвистических переменных y_1 и y_2 .

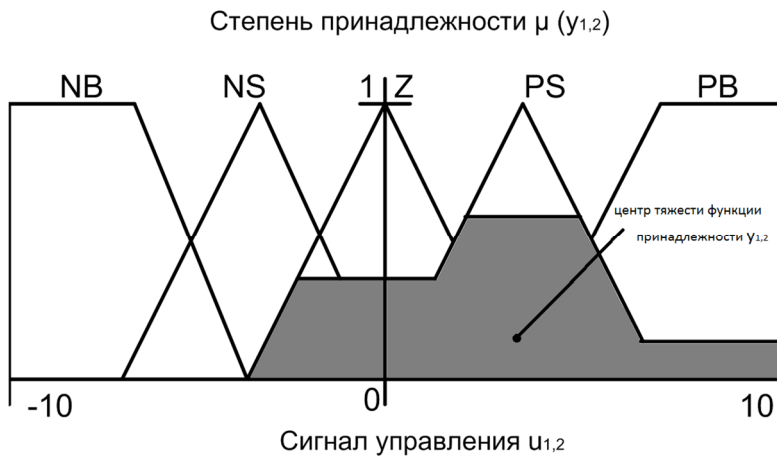


Рис. 5. Нахождение центра тяжести плоской фигуры функции степени принадлежности выходных лингвистических переменных y_1 и y_2

Полученные на выходе нечеткого регулятора четкие значения корректирующих сигналов u_1 и u_2 , добавляются к последним значениям сигналов задания скорости вращения тяговых электроприводов $\omega_{зад1}$ и $\omega_{зад2}$ и поступают на вход системы управления многодвигательным асинхронным тяговым электроприводом.

Графическое представление работы FUZZY-регулятора, изображенное на рис. 6, есть поверхность в пространстве состояний объекта регулирования.

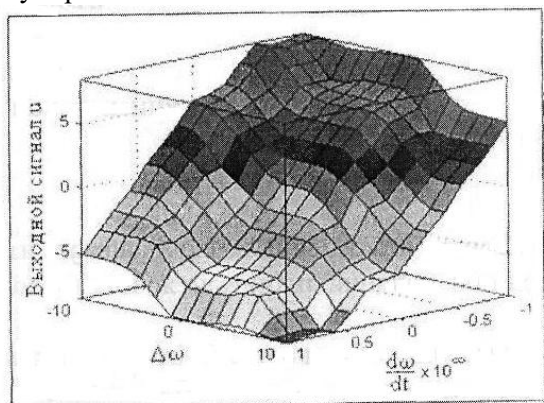


Рис. 6. Графическое представление работы FUZZY-регулятора

Для предварительной оценки результатов исследований разработанный макетный вариант автоматизированной тяговой системы рудничного электровоза прошел испытания на специально созданном для этого лабораторном стенде [6].

На рис. 7 представлены осциллограммы при исследовании влияния на многодвигательный асинхронный электропривод скачкообразного изменения сигнала задания скорости вращения роторов АД при неодинаковых нагрузках на валах АД и отличающихся электромеханических характеристиках АД двухмашинного агрегата при векторном законе управления асинхронным электроприводом и FUZZY-регулятором сигналов задания скорости вращения электроприводов на верхнем уровне.

В ходе эксперимента на выходе лабораторного источника к опорному сигналу задания скорости вращения роторов АД скачком добавлялся и убирался сигнал напряжения амплитудой 1В.

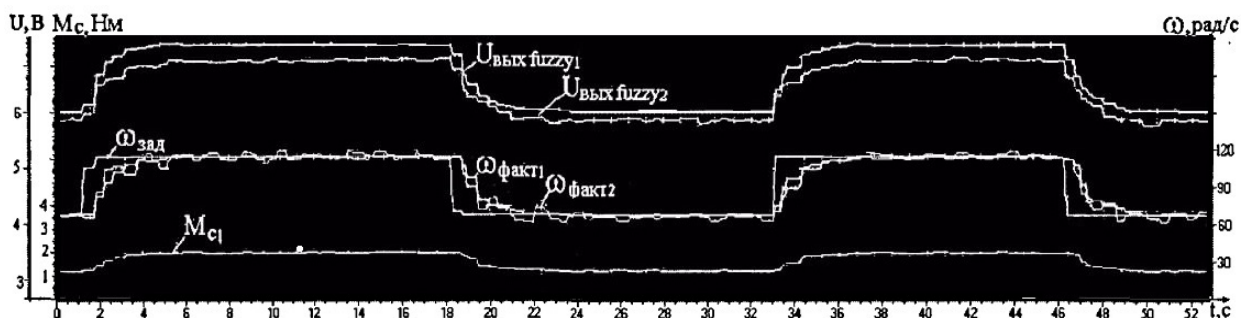


Рис. 7. Экспериментальные электромеханические характеристики двухдвигательного асинхронного электропривода с векторным алгоритмом управления и FUZZY-регулятором верхнего уровня

Выводы

Анализ результатов исследований показывает, что векторный алгоритм управления с системой формирования сигналов задания с использованием аппарата нечеткой логики дает хорошие результаты. В итоге для повышения

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сборник технико-экономических показателей горнодобывающих предприятий Украины в 2009 – 2010 гг. Анализ мировой конъюнктуры рынка ЖРС 2004 – 2011 гг. / Е.К. Бабец, Л.А. Штанько, В.А. Салганик и др. – Кривой Рог: Видавничий дім, 2011 – 329 с.
2. Шахтный подземный транспорт: справочное

технико-экономических показателей к применению на двухдвигательных тяговых электромеханических комплексах с ТАД рекомендуется «гибридная» система векторного управления с нечетким регулятором верхнего уровня.

REFERENCES

1. Babets E.K., Shtan'ko L.A., Salganik V.A. *Sbornik tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley gornodobyvayushchikh predpriyatiy Ukrainy v 2009 – 2010 gg. Analiz mirovoy kon'yunktury rynku ZhRS 2004 – 2011 gg.* [Collection of technical and economic parameters of mining enterprises in Ukraine in 2009 – 2010 years. An analysis of the global iron ore market

издание. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт / Ю.Ф. Бутт, В.Б. Грядущий, В.Л. Дебелый, А.Н. Коваль, А.Л. Фурман, В.М. Щука, В.А. Яценко // Под общ. ред. Б.А.Грядущего. – Т.1. – Донецк: «ВИК», 2009. – 481 с.

3. Синчук О.Н. Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, О.В. Ершов // Под ред. д. т. н., проф. О.Н. Синчука – К.: АДЕФ – Украина. – 278 с.

4. Дебелый В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С.30-31.

5. Шокарев Д.А. Асинхронный тяговый электротехнический комплекс двухсистемного рудничного электровоза / Скапа Е.И. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. № 4/2011(16). С.45–48.

6. Жеребкин Б.В. Синтез структуры системы векторного управления тяговых электромеханических комплексов двухосных электровозов / Б.В. Жеребкин, Д.А. Шокарев, Е.И. Скапа // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. № 4/2011(16). – С.17–21.

7. Кордаков В.Н., Коржев А.А. Методика определения рациональной величины силы тяги дополнительного линейного электропривода рудничного электровоза // Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. – Вып. 29. – СПб.: СЗТУ, 2003. – С. 120 – 125.

8. Bertil Oberg. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna. – Sweden Information of ASEA. – 1979. P. 212.

9. S.Florentsev, A. Pukhovoy, I. Uss, D. Izosimov, L. Makarov. Agricultural tractor with pure electromechanical drivetrain. SAE 2011 Commercial Vehicle Engineering Congress. September 13 – 14, 2011. Rosemont. Illinois USA. Session CV707. Paper No. 2011-0-2296.

10. Dankmeyer Hugo. Kopalniana lokomotiwa przewodowa o podwyzszonej zdolnosci przewozowej. – Pns. gorn. – 1979, 35, N 10. – с. 432 – 438. LIV.

11. S.Florentsev, D. Izosimov, S. Baida, A. Belousov, A. Sibirtsev, S. Zhuravljov. Complete traction electric equipment sets for hybrid buses. APAC16. 16th Asia Pacific Automotive Engineering Conference. October 6 – 8, 2011, Chennai. India. Paper No. M2010003.

12. Shultz L. An inverter and induction motor traction drive underground mining's Locomotives / Shultz L., Van Wyk D., Dunford W.S., Pzest R.B., Landy C.F. // Elek. Bahnen. – 2000. – 88. - №3. – p. 145-148.

Поступила в печать 01.12.2012.

conditions 2004 - 2011 years]. Krivoy Rog, Vidavnichiy dim Publ., 2011. 329 p.

2. Butt Yu.F., Gryadushchiy V.B., Debelyy V.L., Koval' A.N., Furman A.L., Shchuka V.M., Yatsenko V.A. *Shakhtnyy podzemnyy transport: spravochnoe izdanie. Shakhtnyy lokomotivnyy i rel'sovyy transport* [Mine underground transport: a reference book. Mine locomotive and rail transport]. Donetsk, «VIK» Publ., 2009. 481 p.

3. Sinchuk O.N., Chumak V.V., Erzhov O.V. *Impul'snye sistemy upravleniya i zashchity na rudnichnom elektrovoznom transporte* [Impulse control and protection system for mine locomotive transport]. Kiev, ADEF Publ. 278 p.

4. Debelyy V.L., Debelyy L.L., Mel'nikov S.A. *Osnovnye napravleniya razvitiya shakhtnogo lokomotivnogo transporta* [The main directions of development of the mine locomotive transport]. *Ugol' Ukrainy - Coal of Ukraine*, no. 6, 2006, pp. 30-31.

5. Shokarev D.A., Skapa E.I. *Asinkhronnyy tyagovyy elektrotekhnicheskyy kompleks dvukhsistemnogo rudnichnogo elektrovoza* [Asynchronous traction electrical mine complex dual-system electric locomotive]. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy - Electromechanical and saving system*, issue 4 (16), 2011, pp. 45-48.

6. Zherebkin B.V., Shokarev D.A., Skapa E.I. *Sintez struktury sistemy vektornogo upravleniya tyagovykh elektromekhanicheskikh kompleksov dvuosnykh elektrovozov* [The synthesis of the structure of the vector control traction electrical systems biaxial locomotives]. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy: shchokvartal'nyy nauково-vyrobnychyy zhurnal - Electromechanical and saving system: quarterly scientific journal production*, issue 4 (16), 2011, pp. 17-21.

7. Kordakov V.N., Korzhev A.A. *Metodika opredeleniya ratsional'noy velichiny sily tyagi dopolnitel'nogo lineynogo elektroprivoda rudnichnogo elektrovoza* [Methods of determining the value of a rational traction additional linear electric mine locomotive]. *Problemy mashinovedeniya i mashinostroeniya - Problems of Mechanical Engineering, and Mechanical Engineering*, issue 29, 2003, pp. 120-125.

8. Bertil Oberg. Computer-controller ore transformation at the LKAB mine in Kiruna. – Sweden Information of ASEA. – 1979. P. 212.

9. S.Florentsev, A. Pukhovoy, I. Uss, D. Izosimov, L. Makarov. Agricultural tractor with pure electromechanical drivetrain. SAE 2011 Commercial Vehicle Engineering Congress. September 13 – 14, 2011. Rosemont. Illinois USA. Session CV707. Paper No. 2011-0-2296.

10. Dankmeyer Hugo. Kopalniana lokomotiwa przewodowa o podwyzszonej zdolnosci przewozowej. – Pns. gorn. – 1979, 35, N 10. – с. 432 – 438. LIV.

11. S.Florentsev, D. Izosimov, S. Baida, A. Belousov, A. Sibirtsev, S. Zhuravljov. Complete traction electric equipment sets for hybrid buses. APAC16. 16th Asia Pacific Automotive Engineering Conference. October 6 – 8, 2011, Chennai. India. Paper No. M2010003.

12. Shultz L. An inverter and induction motor traction drive underground mining's Locomotives / Shultz L., Van Wyk D., Dunford W.S., Pzest R.B., Landy C.F. // Elek. Bahnen. – 2000. – 88. - №3. – p. 145-148.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Андрієнко П. Д.*

Основным видом транспорта железорудных шахт является электровозный, обеспечивающий 100% подземных грузоперевозок. Электровозный транспорт является одним из основных потребителей электрической энергии (ЭЭ), потребляя 18 – 20% ЭЭ от всей потребляемой подземными потребителями железорудных шахт. Для решения этой проблемы в Украине возобновлены работы по созданию отечественных электроэнергоэффективных видов ТЭМС на базе IGBT-преобразователей и асинхронных тяговых электрических двигателей (АТД).

При этом, предпочтение отдается векторному управлению, поскольку оно обладает достаточно высоким качеством регулирования.

Однако, для двухдвигательного тягового комплекса, работающего параллельно на общую нагрузку, в силу ряда причин присущи различные моменты нагрузок ТЭД, которые механически жестко связаны каждый со своей колесной парой. Выравнивание нагрузок между двигателями можно осуществить с помощью нечеткого регулятора (FUZZY- регулятора). Система управления многодвигательным электроприводом состоит из двух уровней: нижнего с классической схемой векторного управления ТАД, и верхнего с регулятором нечеткой логики- регулятором сигналов задания скорости вращения роторов ТАД (индивидуально для каждого электропривода).

На вход Fuzzy-регулятора поступают сигналы рассогласования $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ фактической скорости вращения роторов ТАД $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ с заданным значением $\omega_{зад}$ и производные по скорости вращения электроприводов $\frac{d\omega_1}{dt}$ и $\frac{d\omega_2}{dt}$. Полученные на выходе нечеткого регулятора четкие значения корректирующих сигналов u_1 и u_2 , добавляются к последним значениям сигналов задания скорости вращения тяговых электроприводов $\omega_{зад1}$ и $\omega_{зад2}$ и поступают на вход системы управления многодвигательным асинхронным тяговым электроприводом.

Для проверки работы автоматической системы управления многодвигательными тяговыми комплексами на ТАД были реализованы натурные испытания на лабораторном стенде. Результаты испытаний показывают, что векторный алгоритм управления с системой формирования сигналов задания с использованием аппарата нечеткой логики дает хорошие результаты. Для повышения технико-экономических показателей к применению на двухдвигательных тяговых электромеханических комплексах с ТАД рекомендуется «гибридная» система векторного управления с нечетким регулятором верхнего уровня.

Ключевые слова: автоматизация, электровоз, тяговая электромеханическая система, шахты, нечеткий регулятор, векторное управление.

УДК 629.423.1

О. Н. СІНЧУК, А. Б. СЬОМОЧКІН, В. А. ФЕДОТОВ (КНУ), Б. В. ЖЕРЕБКІН (СПБДУ)

Криворізький національний університет. 50027, м.Кривий Ріг, Дніпропетровська обл., Вул. XXII партз'їзду, б. 11, тел. (056) 409-17-30, E-mail: speet@ukr.net

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ДВОДВИГУННИМ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ РУДНИЧНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Основним видом транспорту залізорудних шахт є електровозний, що забезпечує 100% підземних вантажоперевезень. Електровозний транспорт є одним з основних споживачів електричної енергії (ЕЕ), споживаючи 18 - 20% ЕЕ від всієї споживаної підземними споживачами залізорудних шахт. Для вирішення цієї проблеми в Україні відновлені роботи по створенню вітчизняних електроенергоєфективних видів ТЕМС на базі IGBT-перетворювачів і асинхронних тягових електричних двигунів (АТД).

При цьому, перевага віддається векторному управлінню, оскільки воно має досить високу якість регулювання. Однак, для двохдвигунного тягового комплексу, який працює паралельно на загальне навантаження, в силу ряду причин притаманні різні моменти навантажень ТЭД, які механічно жорстко пов'язані кожен зі своєю колісною парою. Вирівнювання навантажень між двигунами можна здійснити за допомогою нечіткого регулятора (FUZZY- регулятора). Система управління багатодвигунним електроприводом складається з двох рівнів: нижнього з класичною схемою векторного управління ТАД, і верхнього з регулятором нечіткої логіки- регулятором сигналів задання швидкості обертання роторів ТАД (індивідуально для кожного електроприводу).

© Синчук О. Н. та ін., 2015

На вхід Fuzzy-регулятора надходять сигнали неузгодженості $\Delta\omega_1$ і $\Delta\omega_2$ фактичної швидкості обертання роторів ТАД $\Delta\omega_1$ і $\Delta\omega_2$ із заданим значенням $\omega_{зад}$ і похідні за швидкістю обертання електроприводів $\frac{d\omega_1}{dt}$ і $\frac{d\omega_2}{dt}$. Отримані на виході нечіткого регулятора чіткі значення коригувальних сигналів u_1 і u_2 , додаються до останніх значень сигналів задання швидкості обертання тягових електроприводів $\omega_{зад1}$ і $\omega_{зад2}$ і надходять на вхід системи управління багатодвигунним асинхронним тяговим електроприводом.

Для перевірки роботи автоматичної системи управління багатодвигунними тяговими комплексами на ТАД були реалізовані натурні випробування на лабораторному стенді. Результати випробувань показують, що векторний алгоритм управління з системою формування сигналів задання з використанням апарату нечіткої логіки дає хороші результати. Для підвищення техніко-економічних показників до застосування на дводвигунних тягових електромеханічних комплексах з ТАД рекомендується «гібридна» система векторно-керування з нечітким регулятором верхнього рівня

Ключові слова: автоматизація, електровоз, тягова електромеханічна система, шахти, нечіткий регулятор, векторне управління.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Андриєнко П. Д.*

UDC 629.423.1

O. N. SINCHUK, A. B. SYOMOCHKIN, V. A. FEDOTOV (KNU), B. V. ZHEREBKIN (SPNU)

Kryvyi Rih National University. 50027, Krivoy Rig, Dnipropetrovsk region. Str. XXII Party Congress, 11, tel. (056) 409-17-30, E-mail: speet@ukr.net

AUTOMATIC CONTROL OF ELECTROMECHANICAL DOUBLE-ENGINE TRACTION COMPLEX OF MINE ELECTRIC LOCOMOTIVES

Electric locomotive train is the main mode of transport in iron ore mines, which facilitates almost 100% of all underground freight. Electric locomotive transport uses up to 18 – 20% of total electric energy (EE) required for mine operations and is the main consumer of EE within the typical iron ore mine. A renewed initiative was sought to resolve the problem of excessive energy consumption involving the development of locally (Ukrainian) built energy efficient thermo-electric material (TEM) based IGBT – converters and asynchronous electric traction motors (electric induction motors).

Torque Vector Algorithm is the preferred method of current control within electric induction motors because of its greatly enhanced performance capabilities. However the twin induction motor traction system which operates in parallel on a common load experiences various torques and momentum forces due to a number of factors which are mechanically linked to specific axles. Equilibration of loads between the twin motors can be achieved with an aid of FUZZY controller/regulator. The controls for multiple - electric induction motor system consists of two stages – the lower stage which includes classic scheme Vector Algorithm control system, and the upper stage which includes FUZZY controller/regulator for input signals setting the rotor speed within motors (individually for each motor).

FUZZY-regulator receives mismatched input signals $\Delta\omega_1$ and $\Delta\omega_2$ representative of the actual rotor speed in induction motors $\Delta\omega_1$ and $\Delta\omega_2$ with a predetermined value of $\omega_{зад}$ and derivatives based on the motors' rotation speed.

The precise correction signal values u_1 and u_2 generated on the output from FUZZY-regulator are added to the last values of input signals (i.e. $\omega_{зад1}$ and $\omega_{зад2}$) which predetermined the rotation speed within induction motors and are also an input to the controls of the multiple electric induction motor traction system.

Induction motors were subject to full scale laboratory testing to verify the workings and efficiency of automatic control systems within multiple electric induction motor traction setup. Test results show that torque Vector Algorithm method of current control along with the input signal generating system using FUZZY-regulator shows good, promising results.

The use of a "hybrid" system of torque Vector Algorithm method of current control along with upper level FUZZY-regulator is advisable in order to improve physical performance and economic indicators related to the operations of twin induction motor traction systems.

Keywords: automation, electric, electromechanical traction system, mines, fuzzy controller, vector control.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

П. Ю. КРАСОВСКИЙ (НГУ)

Государственное высшее учебное заведение "Национальный горный университет", пр. Карла Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49005, Украина, тел: (056) 373-07-46, эл. почта: kraspu@gmail.com,
ORCID: orcid.org/0000-0002-2639-017X

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ С УЧЕТОМ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ

Постановка задачи

Технические потери электроэнергии при ее транспортировке в распределительных сетях являются основой норматива, определяющего экономически обоснованный технологический расход электроэнергии. В городских (распределительных) электрических сетях значительной составляющей потерь электроэнергии (до 30 %) являются потери холостого хода трансформаторов ΔP_x [1]. Снижение коэффициентов загрузки трансформаторов вследствие перераспределения электроэнергии увеличивает долю потерь холостого хода в суммарных потерях в трансформаторах. При расчетах баланса энергии потери ΔP_x в трансформаторах принимаются равными паспортному значению $\Delta P_{x,пасп}$. На практике паспортное значение $\Delta P_{x,пасп}$ не всегда соответствует реальным потерям в трансформаторе [2] и для разных трансформаторов различие может быть значительным. Неточное задание ΔP_x приводит к существенной ошибке в расчетах отпуска электроэнергии. Можно утверждать, что потери электрической энергии в силовых трансформаторах изменяются во времени и динамика этих изменений зависит как минимум от срока и условий эксплуатации, а также от видов и количества поврежденных трансформаторов и качества их ремонта [1].

По данным ОАО "Укрэлектроаппарат" (г. Хмельницкий) в Украине на сегодня находится в эксплуатации 197360 силовых трансформаторов. На основании анализа технического состояния и характеристик трансформаторов мощностью 25-2500 кВ·А напряжением до 35 кВ установлено, что 75 % из них было изготовлено в 1970-1980 годах. В эксплуатации находятся трансформаторы проработавшие 40 и более лет, в то время как нормативный срок службы силовых трансформаторов составляет 25 лет [3]. На подавляющем большинстве предприятий в связи с финансовыми трудностями трансформаторы

заменяют в зависимости от их фактического состояния, и в ближайшие годы провести замену устаревшего оборудования не представляется возможным. Это приводит к тому, что значительное количество трансформаторов эксплуатируется сверх нормативного и номинального сроков использования. Число таких трансформаторов на некоторых РЭС приближается к 80 % от числа установленных.

Цель статьи

На основании результатов [1] представить:
- разработанную математическую модель эксплуатационного изменения потерь мощности в магнитопроводе силовых трансформаторов напряжением 150 кВ.

- разработанные рекомендации по уточнению расчета потерь холостого хода в силовых трансформаторах распределительных сетей.

Изложение основного материала

При разработке математической модели эксплуатационного изменения потерь мощности в магнитопроводе силовых трансформаторов напряжением 150 кВ использовались статистические данные из 48 замеров потерь холостого хода силовых трансформаторов напряжением 150 кВ со сроком эксплуатации от 3 до 39 лет.

В регрессионной модели за выходной параметр y_i принималось превышение измеренных потерь мощности в магнитопроводе над паспортными значениями, %:

$$y_i = d\Delta P_{x,i} = \frac{\Delta P_{x,изм,i} - \Delta P_{x,пасп,i}}{\Delta P_{нач}} \cdot 100 \quad (1)$$

где $\Delta P_{x,изм,i}$ – измеренные потери мощности холостого хода i -го силового трансформатора, кВт; $\Delta P_{x,пасп,i}$ – паспортные потери мощности холостого хода i -го силового трансформатора, кВт.

На основании имеющихся статистических данных в качестве основных факторов оказывающих влияние на эксплуатационное изменение

потерь мощности в магнитопроводе, предварительно выбраны: x_1 – срок эксплуатации трансформатора ($T_{э}$), лет; x_2 – номинальная мощность (S_H), МВА; x_3 – паспортные потери мощности холостого хода ($\Delta P_{x,пасп.}$), кВт.

Из рассматриваемых факторов x_1, x_2, x_3 корреляционным анализом отобран статистически значимый фактор x_1 . При разработке однофакторной регрессионной модели изменения потерь мощности холостого хода в магнитопроводах силовых трансформаторов наиболее точной из полученных регрессионных моделей оказалась степенная модель, которая была выбрана для описания процесса изменения потерь мощности (%) в магнитопроводах силовых трансформаторов

$$d\Delta P_{x,i} = 5,55 \cdot T_{эi}^{0,49} \quad (2)$$

Однофакторную регрессионную модель используем для уточнения потерь мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся трансформаторов напряжением 150 кВ. В этом случае они принимают вид:

$$\Delta P_{x,150} = \Delta P_{x,пасп.} \cdot \left(1 + 5,55 \cdot T_{эi}^{0,49}\right) \quad (3)$$

Уточненные потери мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся трансформаторов напряжением 150 кВ в относительных единицах:

$$\Delta P_{*x,150} = \frac{\Delta P_{x,150}}{\Delta P_{x,пасп.}} = 1 + 5,55 \cdot T_{эi}^{0,49} \quad (4)$$

На рис. 1 изображен характер изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов 150 кВ в процессе эксплуатации в относительных единицах.

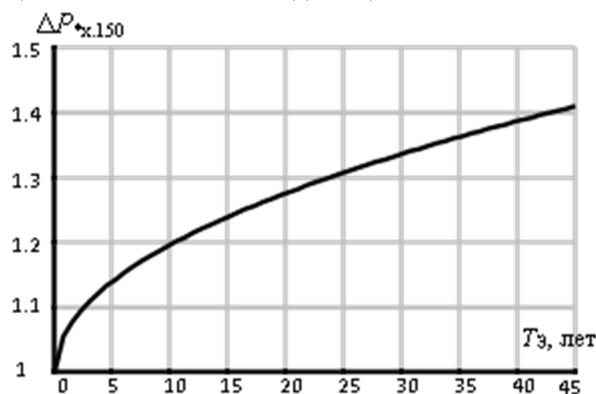


Рис. 1. Характер изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов 150 кВ в процессе эксплуатации

Для получения и оценки общей картины изменения в процессе эксплуатации потерь холостого хода в силовых трансформаторах различных классов напряжений рассмотрены и оценены математические модели изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов с первичным напряжением 10(6), 35 и 110 кВ. Из-за различия в конструктивных особенностях силовых трансформаторов различных ступеней напряжения и условиях их эксплуатации зависимости величин потерь в магнитопроводе от срока эксплуатации будут различными.

Согласно исследованиям [4-6] статистический анализ распределительных сетей 10(6) кВ показал существенное возрастание потерь холостого хода трансформаторов с течением срока службы. При этом для трансформаторов со сроком службы до 20 лет допустимо принимать, с погрешностью до 8 %, потери холостого хода равными паспортным. Для трансформаторов со сроком службы более 20 лет потери холостого хода возрастают в среднем с интенсивностью 1,75 % в год. На основании упомянутых выше исследований получим уточненные потери мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся трансформаторов напряжением 10(6) кВ

$$\Delta P_{x,10(6)} = \Delta P_{x,пасп.} \cdot \left(1 + \frac{T_{эi}^{1,0935} - 25,32}{100}\right) \quad (5)$$

Другой причиной увеличения потерь мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся трансформаторов напряжением 10(6) кВ, согласно исследованиям [7, 8] является капитальный ремонт трансформатора с расшировкой магнитопровода, необходимость проведения которого вызывается повреждением обмоток, магнитной системы или износом их изоляции [9]. На основании полученной математической модели, характеризующей изменение потерь мощности в магнитопроводах трансформаторов 10(6)/0,4 кВ мощностью до 630 кВА после проведения капитального ремонта, уточним потери мощности холостого хода

$$\Delta P_{x,рем.10(6)} = \Delta P_{x,пасп.} \cdot \left(1 + \frac{82,2 \cdot S_{TH}^{-0,19}}{100}\right) \quad (6)$$

где S_{TH} – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Из формул (5) и (6) получим уточненные потери мощности в магнитопроводе для силовых трансформаторов 10(6)/0,4 кВ мощностью до

630 кВА после проведения капитального ремонта и с учетом срока эксплуатации

$$\Delta P_{x.э.рем.} = \Delta P_{x.пасп.} \times \left(1 + \frac{T_{эi}^{1,0935} - 25,32 + 82,2 \cdot S_{ТН}^{-0,19}}{100} \right) \quad (7)$$

или в относительных единицах

$$\Delta P_{*x.э.рем.} = \frac{\Delta P_{x.э.рем.}}{\Delta P_{x.пасп.}} = 1 + \frac{T_{эi}^{1,0935} - 25,32 + 82,2 \cdot S_{ТН}^{-0,19}}{100} \quad (8)$$

На рис. 2 показаны зависимости для корректировки паспортных потерь мощности в магнитопроводе для силовых трансформаторов 10(6)/0,4 кВ мощностью до 630 кВА без проведения капитального ремонта (кривые 1, 2) и после проведения капитального ремонта (кривые 4, 5) с учетом срока эксплуатации в относительных единицах.

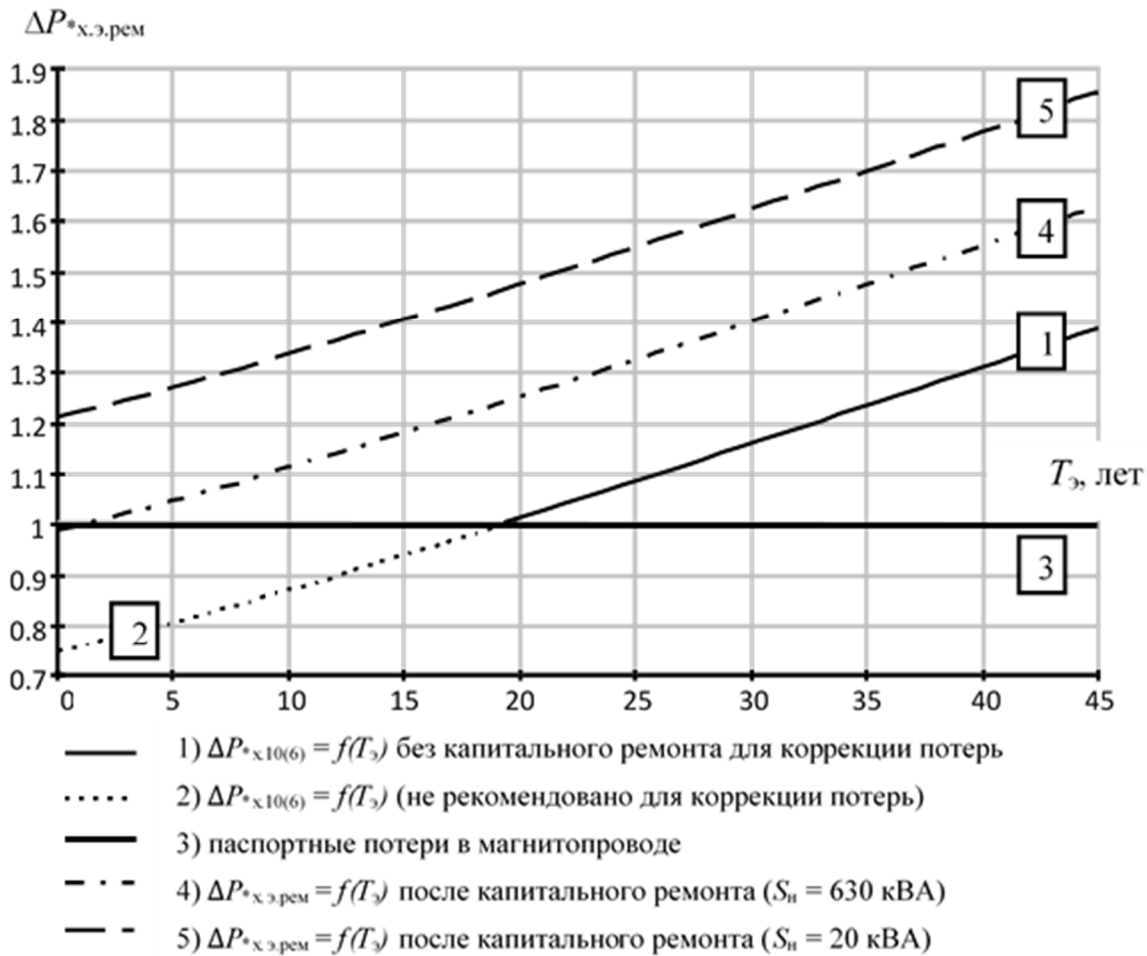


Рис. 2. Характер изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов 10(6) кВ в процессе эксплуатации

Кривые 1 и 2 являются одной зависимостью отличающиеся только интервалом срока эксплуатации согласно вышеприведенным рекомендациям, согласно которым при $T_3 \geq 20$ лет следует пользоваться формулой (5) (кривая 1), иначе в расчетах используются паспортные данные (кривая 3). Кривые 4 и 5 характеризуют зависимости для корректировки паспортных потерь с учетом проведения капитального ремонта для

крайних значений номинальной мощности исследуемых трансформаторов – 630 и 20 кВА соответственно. Другими словами после капитального ремонта точка, находящаяся на кривой 1 или 3 (в зависимости от значения T_3) смещается вертикально и, в зависимости от значения $S_{ТН}$, попадает в зону, которая ограничена кривыми 4 и 5, и в дальнейшем перемещается вдоль кривой, рассчитанной по формуле (7).

Для силовых трансформаторов напряжением 35 и 110 кВ уточненные потери мощности холостого хода получим на базе разработанных однофакторных регрессионных математических моделей изменения потерь мощности в магнитопроводах в процессе эксплуатации [10]

$$\Delta P_{x.35} = \Delta P_{x.пасп.} \cdot \left(1 + \frac{0,66 \cdot T_{эi}^{1,12}}{100} \right) \quad (9)$$

$$\Delta P_{x.110} = \Delta P_{x.пасп.} \cdot \left(1 + \frac{1,07 \cdot T_{эi}^{1,02}}{100} \right) \quad (10)$$

Скорректированные паспортные потери мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся трансформаторов напряжением 35 и 110 кВ в относительных единицах:

$$\Delta P_{*x.35} = \frac{\Delta P_{x.35}}{\Delta P_{x.пасп.}} = 1 + \frac{0,66 \cdot T_{эi}^{1,12}}{100} \quad (11)$$

$$\Delta P_{*x.110} = \frac{\Delta P_{x.110}}{\Delta P_{x.пасп.}} = \left(1 + \frac{1,07 \cdot T_{эi}^{1,02}}{100} \right) \quad (12)$$

На рис. 3 изображен характер изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов 35 и 110 кВ в процессе эксплуатации в относительных единицах.

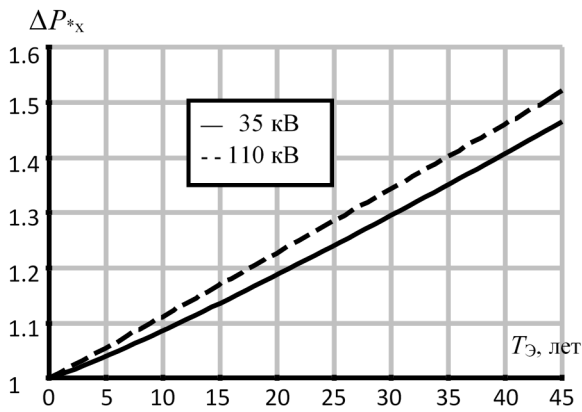


Рис. 3. Характер изменения потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов 35 и 110 кВ в процессе эксплуатации

Учитывая влияние длительности эксплуатации силовых трансформаторов и капитального ремонта с разборкой магнитопровода на потери мощности холостого хода, а также количество силовых трансформаторов, эксплуатирующихся с превышением нормативных сроков службы и наличием капитальных ремонтов, возникает необходимость корректировки действующей

методики расчета нормативных потерь, не учитывая данных факторов.

Корректировка методики расчета потерь электроэнергии в магнитопроводе силового трансформатора заключается в том, чтобы выполнять расчет не на основе паспортных потерь мощности в магнитопроводе, а с использованием их фактических значений. Таким образом, задача повышения точности расчета потерь сводится к определению фактических потерь мощности в магнитопроводе.

Фактические потери мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов можно определить из опыта холостого хода. При наличии замеров потерь мощности холостого хода не возникнет сложности в определении потерь электроэнергии в магнитопроводе силового трансформатора. Однако, такие данные имеются не по всем силовым трансформаторам, так как основным назначением замеров потерь в магнитопроводе в процессе эксплуатации является диагностика состояния силовых трансформаторов. В связи с чем, порядка половины силовых трансформаторов имеют данные о замерах потерь мощности в магнитопроводе, а по остальным такие данные отсутствуют. Вместе с тем, не все указанные замеры могут быть использованы при расчетах потерь электроэнергии, поскольку имеют различные сроки давности их проведения. Учитывая данное положение, необходимо разработать методику, которая позволит определять фактические потери мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов с различными сроками эксплуатации.

Для определения фактических потерь мощности в магнитопроводах длительно эксплуатирующихся силовых трансформаторов их предлагается делить на следующие группы:

- 1) новые трансформаторы;
- 2) трансформаторы с актуальными результатами замеров потерь мощности в магнитопроводе;
- 3) трансформаторы с неактуальными замерами потерь;
- 4) трансформаторы без замеров потерь.

К первой группе следует отнести силовые трансформаторы со сроком эксплуатации до трех лет. Это связано с тем, что разработанные математические модели эксплуатационного изменения потерь мощности в магнитопроводе ограничиваются сроками эксплуатации от трех лет. Ко второй группе относятся силовые трансформаторы, у которых измерения потерь в магнитопроводах проводились в течение текущего года. К третьей группе следует отнести силовые

трансформаторы с замерами потерь, проведенными более года назад. В четвертую группу входят трансформаторы, не охваченные замерами потерь.

С учетом приведенной классификации, фактические потери мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов, относящихся к первой группе, соответствуют паспортным потерям мощности холостого хода, в силовых трансформаторах второй группы – измеренным потерям холостого хода. Для остальных силовых трансформаторов, входящих в третью и четвертую группы, фактические потери мощности в магнитопроводах можно определить с использованием разработанных математических моделей эксплуатационного изменения потерь мощности холостого хода для силовых трансформаторов напряжением:

- 150 кВ – по формуле (3) или из графической зависимости, представленной на рис. 1;

- 110 кВ – по формуле (10) или из графической зависимости – рис. 3;

- 35 кВ – по формуле (9) или из графической зависимости – рис. 3;

- 10(6) кВ – по формуле (5) для силовых трансформаторов без капитального ремонта с разборкой магнитопровода, и по формуле (7) – после капитального ремонта, или из графической зависимости – рис. 2.

В случае, когда потери мощности в магнитопроводах трансформаторов, входящих в третью группу, по результатам расчета окажутся ниже измеренных значений, то в качестве фактических потерь мощности рекомендуется принимать результаты замеров.

При определении фактических потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов прошедших капитальный ремонт, их предлагается делить на две группы:

1) трансформаторы, имеющие данные о замерах потерь мощности в магнитопроводе после проведения ремонта;

2) трансформаторы, у которых результаты таких замеров отсутствуют.

Таким образом, фактические потери мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов первой группы соответствуют измеренным потерям. В силовых трансформаторах, относящихся ко второй группе, фактические потери

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Красовский, П. Ю. Эксплуатационная динамика параметров и технических потерь в силовых трансформаторах / Красовский П. Ю. // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук. – Техн. зб. – 2012. – Вип. 89. – С. 20-23.

мощности в магнитопроводе рекомендуется определять на основе разработанной математической модели послеремонтного изменения потерь с учетом срока эксплуатации (7) или из графической зависимости – рис. 2.

Выводы

1. Установлена степень влияния срока эксплуатации и ремонтов магнитопроводов силовых трансформаторов на увеличение потерь холостого хода и получены аналитические зависимости динамики изменения во времени значений потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов напряжением 150 кВ. Показано, что динамика изменения потерь мощности холостого хода силовых трансформаторов в течение эксплуатационного периода характеризуется приращением, значение которого зависит от срока их работы и конструктивных особенностей.

2. Динамика изменения потерь мощности холостого хода силовых трансформаторов в течение срока их эксплуатации характеризуется приращением, нарастающим в степенной функции от срока службы, коэффициенты которой зависят от конструктивных и режимных особенностей трансформатора, и может быть унифицирована для соответствующих классов значений первичного напряжения.

3. Разработаны принципы и методика расчета нормативных потерь энергии в силовых трансформаторах, которая, в отличие от действующей, учитывает динамику изменения магнитных свойств сердечников трансформаторов в зависимости от срока и условий эксплуатации, а также ремонты трансформаторов с разборкой магнитопроводов.

4. При выполнении расчетов потерь электроэнергии в магнитопроводах силовых трансформаторов энергосистемы, имеющих длительный срок эксплуатации, рекомендуется учитывать изменения потерь мощности в магнитопроводе, что позволит повысить точность расчета нормативных потерь в силовых трансформаторах и определить наиболее достоверную структуру потерь в электрических сетях, лежащую в основе мероприятий по энергосбережению.

REFERENCES

1. Krasovskiy P.Yu. Eksploatatsionnaya dinamika parametrov i tehniceskikh poter v silovyih transformatorah [An operating dynamics of parameters and technical

2. Лебедев, М. В. Техническая эксплуатация городских электрических сетей / М. В. Лебедев. – М.: Изд-во М-ва коммун. хоз-ва РСФСР, 1957. – 394 с.: ил.
3. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – Введ. 1986-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 2002. – 48 с.
4. Казаков, Ю. Б. Учет изменения потерь холостого хода трансформаторов в период срока службы при расчете потерь в распределительных сетях / Ю. Б. Казаков, А. Б. Козлов, В. В. Коротков // Электротехника. – 2006. – № 5. – С. 11-16.
5. Коротков, А. В. Методы оценки характеристик оборудования электротехнических комплексов городских распределительных сетей / А. В. Коротков, В. Я. Фролов // Электрика. – 2014. – № 1. – С. 6-10.
6. Коротков, А. В. Результаты измерений мощности потерь холостого хода трансформаторов с различным сроком службы / А. В. Коротков, В. Я. Фролов // Электрика. – 2011. – № 8. – С. 8-11.
7. Заугольников, В. Ф. Некоторые аспекты экономической работы силовых трансформаторов / В. Ф. Заугольников, А. А. Балабин, А. А. Савинков // Промышленная энергетика. – 2006. – № 4. – С. 10-14.
8. Балабин, А. А. Повышение достоверности расчета потерь электроэнергии в трансформаторах 10(6)/0,4 кВ / А. А. Балабин, Ю. Д. Волчков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 4. – С. 22-23.
9. Худяков, З. И. Ремонт трансформаторов / З. И. Худяков. – М.: Высш. шк., 1986. – 232 с.
10. Волчков, Ю. Д. Повышение достоверности расчета потерь электроэнергии в трансформаторах 35 и 110 кВ / Ю. Д. Волчков, А. А. Балабин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 12. – С. 41-43.

Поступила в печать 01.12.2012.

energy losses in power transformers]. *Girnycha elektromekhanika ta avtomatyka - Mountain electromechanics and automation*, 2012, issue 89, pp. 20-23.

2. Lebedev M.V. Tehnicheskaya ekspluatatsiya gorodskih elektricheskikh setey [Technical exploitation of municipal electric networks]. Moscow, Moscow Publ., 1957. 394 p.

3. GOST 11677-85. Transformatory silovye. Obshchie tehnicheckie usloviya. [State Standart 11677-85. Power transformers. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 48 p.

4. Kazakov Yu.B., Kozlov A.B., Korotkov V.V. Uchet izmeneniya poter holostogo hoda transformatorov v period sroka sluzhby pri raschete poter v raspredelitelnykh setyakh [Accounting of no-load loss change of power transformers during life cycle at the calculation of losses in distributive networks]. *Elektrotehnika – Electrical engineering*, 2006, no. 5, pp. 11-16.

5. Korotkov A.V., Frolov V.Ya. Metody otsenki harakteristik oborudovaniya elektrotehnicheskikh kompleksov gorodskih raspredelitelnykh setey [Estimation methods of equipment features of electrical engineering complexes of municipal distributive networks]. *Elektrika – Electric*, 2014, no. 1, pp. 6-10.

6. Korotkov A.V., Frolov V.Ya. Rezultaty izmeneniy moschnosti poter holostogo hoda transformatorov s razlichnym srokom sluzhby [Results of no-load power loss measuring of power transformers with different life cycle]. *Elektrika – Electric*, 2011, no. 8, pp. 8-11.

7. Zaugolnikov V.F., Balabin A.A., Savinkov A.A. Nekotorye aspekty ekonomicheskoy raboty silovykh transformatorov [Some aspects of power transformers economic work]. *Promyshlennaya energetika – Industrial power engineering*, 2006, no. 4, pp. 10-14.

8. Balabin A.A., Volchok Yu.D. Povyschenie dostovernosti rascheta poter elektroenergii v transformatorah 10(6)/0,4 kV [Increasing the reliability of the calculation of electric power losses in transformers 10(6)/0,4 kV]. *Mehanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo hozyaystva – Mechanization and electrification of agriculture*, 2009, no. 4, pp. 22-23.

9. Hudyakov Z.I. Remont transformatorov [Repair of transformers]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 232 p.

10. Volchok Yu.D., Balabin A.A. Povyschenie dostovernosti rascheta poter elektroenergii v transformatorah 35 and 110 kV [Increasing the reliability of the calculation of electric power losses in transformers 35 and 110 kV]. *Mehanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo hozyaystva – Mechanization and electrification of agriculture*, 2008, no. 12, pp. 41-43.

Внутренний рецензент Кузнецов В. Г.

Внешний рецензент Сасенко Ю. Л.

В статье затронута проблематика роста потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов находящихся в эксплуатации продолжительное время. Установлена степень влияния срока эксплуатации и ремонтов магнитопроводов силовых трансформаторов на увеличение потерь мощности холостого хода и получены аналитические зависимости динамики изменения во времени значений потерь мощности в магнитопроводах силовых трансформаторов напряжением 150 кВ. Показано, что динамика изменения потерь мощности холостого хода силовых трансформаторов в течение эксплуатационного периода характеризуется приращением, значение которого зависит от срока их работы и конструктивных особенностей. Разработаны

и представлены рекомендации по уточнению расчета потерь мощности холостого хода в силовых трансформаторах распределительных сетей, которые учитывают динамику изменения магнитных свойств сердечников трансформаторов в зависимости от срока и условий эксплуатации, а также ремонты трансформаторов с разборкой магнитопроводов, что позволит повысить точность расчета нормативных потерь в силовых трансформаторах и определить наиболее достоверную структуру потерь в электрических сетях, лежащую в основе мероприятий по энергосбережению.

Ключевые слова: потери холостого хода, силовой трансформатор, динамика изменения потерь, методика расчета нормативных потерь, длительный срок эксплуатации.

УДК 621.314.222.6

П. Ю. КРАСОВСЬКИЙ (НГУ)

Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет", пр. Карла Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49005, Україна, тел.: (056) 373-07-46, ел. пошта: kraspu@gmail.com,
ORCID: orcid.org/0000-0002-2639-017X.

РОЗРАХУНОК ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРАХ З УРАХУВАННЯМ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В статті порушена проблематика зростання втрат потужності в магнітопроводах силових трансформаторів, що знаходяться в експлуатації тривалий час. Встановлено ступінь впливу терміну експлуатації і ремонтів магнітопроводів силових трансформаторів на збільшення втрат потужності холостого ходу та отримано аналітичні залежності динаміки зміни в часі значень втрат потужності в магнітопроводах силових трансформаторів напругою 150 кВ. Показано, що динаміка зміни втрат потужності холостого ходу силових трансформаторів протягом експлуатаційного періоду характеризується збільшенням, значення якого залежить від терміну їх роботи і конструктивних особливостей. Розроблені та представлені рекомендації з уточнення розрахунку втрат потужності холостого ходу в силових трансформаторах розподільних мереж, які враховують динаміку зміни магнітних властивостей осердь трансформаторів у залежності від терміну та умов експлуатації, а також ремонти трансформаторів з розбиранням магнітопроводів, що дозволить підвищити точність розрахунку нормативних втрат в силових трансформаторах і визначити найбільш достовірну структуру втрат в електричних мережах, що лежить в основі заходів з енергозбереження.

Ключові слова: втрати холостого ходу, силовий трансформатор, динаміка зміни втрат, методика розрахунку нормативних втрат, тривалий термін експлуатації.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Саенко Ю. Л.*

UDC 621.314.222.6

P. YU. KRASOVSKIY (NMU)

State higher educational establishment "National mining university", Karl Marx Av., 19, Dnipropetrovsk, 49005, Ukraine, Tel.: (056) 373-07-46, E-mail: kraspu@gmail.com,
ORCID: orcid.org/0000-0002-2639-017X.

CALCULATION OF POWER LOSSES IN POWER TRANSFORMERS CONSIDERING THE OPERATION LIFE

The article deals with the problems of power loss increase in magnetic cores of power transformers that have been operated for a long time. The degree of influence of the operation life and repairs of power transformer cores on increase of the no-load losses of power is found and the analytical dependence of the changing dynamics in time of power losses value in power transformers cores of 150 kV is released. It is shown that the changing dynamics of power transformers no-load losses for the operation term is characterized by the increment, which value depends on operation term and design features. Developed and released recommendations to clarify the calculation of no-load power losses in power transformers of distribution networks, which take into account the changing dynamics of magnetic properties in transformer cores, depending on the operation term and conditions, and repairs of power transformers with disassembly of cores that will improve the accuracy of normative losses calculation in power transformers and determine the most accurate structure of losses in electric networks, that underlying energy saving measures.

Keywords: no-load loss, power transformer, changing dynamics of loss, method of normative losses calculation, long operation term.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД ПРИ ОЦЕНКЕ КЛАССА ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОТОКОЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Введение

В настоящее время АРМ участкового энергодиспетчера (АРМ ЭЦЦ) становится частью энергодиспетчерской информационно-управляющей системы железной дороги. Он играет ключевую роль в оперативном управлении системой тягового электроснабжения, обеспечении производства плановых и аварийно-восстановительных работ, а также является источником оперативной информации в реальном времени.

Современный АРМ-ЭЦЦ включает функции телемеханики на энергодиспетчерском (ДП) и контролируемых (КП) пунктах. В состав АРМ ЭЦЦ входит современная вычислительная и микропроцессорная техника, устанавливаемая на ДП и КП, и используются передовые информационные технологии.

При использовании в АРМ ЭЦЦ существующих стандартных протоколов и стандартных кодовых форматов важно оценить их соответствие требованиям достоверности для функций телеконтроля и телеуправления. Используемые кодовые форматы сообщений должны быть надежно защищены от ошибок, потерь сообщений и возникновения ложных сообщений. При условии достаточной достоверности большое значение играет минимальное время передачи

за счет применения короткоформатных и бит-ориентированных кодов.

Требования к достоверности передачи данных для телемеханических функций и обзор известных алгоритмов расчета контрольных сумм

Согласно стандарту IEC 60870 (МЭК 60870) Международной электротехнической комиссии (International Electrotechnical Commission) для систем телемеханики существуют три класса достоверности передачи данных: I_1 , I_2 , I_3 . Применение того или иного класса достоверности определяется характером (важностью) передаваемых сообщений. Для классов достоверности устанавливаются требования к вероятности ошибочного приема сообщения: для I_1 $R_{np}=2^{-1}$, для I_2 $R_{np}=2^{-8}$, для I_3 $R_{np}=10^{-12}$ [1][2].

Стандарт МЭК по системам телемеханики предусматривает определенные кодовые форматы для обеспечения заданных классов достоверности передаваемых данных [1][4]. Рекомендуются форматы FT1.1, FT1.2, FT2, FT3.

Вероятность необнаруживаемых ошибок зависит от вероятности ошибочного приема бит – p . Значение $p=10^{-4}$ соответствует удовлетворительному качеству канала передачи [1]. Расчетные данные классов достоверности для 100-битных блоков данных и скорости передачи 1200 бит/с приведены в таблице 1 [1].

Таблица 1

Расчетные данные классов достоверности

Класс достоверности	Вероятность ложных сообщений R при $p=10^{-4}$	Ожидаемое время T между ложными сообщениями	Основная область
I_1	10^{-6}	1 день	Циклические телеизмерения (ТИ)
I_2	10^{-10}	26 лет	Передача телесигнализации, ТИ важных параметров
I_3	10^{-14}	260 000 лет	Телеуправление, телеавтоматика

Форматы FT1.1 обеспечивают класс достоверности I_1 . FT1.2, FT2 обеспечивают класс достоверности I_2 , FT3 – класс достоверности I_2 во всем диапазоне изменения вероятности ошибки на бит ($p<0.5$) и класс I_3 при $p\leq 10^{-3}$. Формат

FT3 используется при передаче особо важных сообщений, например команд телеуправления (ТУ) и т.п.

Формат кодового предложения FT3 представлен на рис 1.

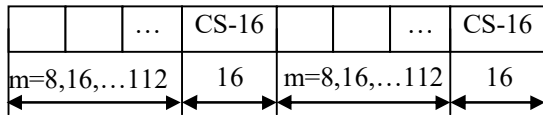


Рис. 1. Формат кодового предложения FT3

Кадр другого известного протокола MODBUS RTU представлен в таблице 2.

Таблица 2

Кадр сообщения Modbus RTU

Адрес подчиненного устройства	Номер функции	Данные	CRC
1 байт	1 байт	N < 253 байта	2 байта

Для расчета контрольной суммы в кадре Modbus RTU используется число-полином 0x8005 и реверсирование данных.

Формат FT3 должен обеспечивать кодовое расстояние d=6 при числе информационных байт до 14.

Кодовым расстоянием d для кода, содержащего m кодовых комбинаций, является минимальное расстояние между всеми парами кодовых комбинаций, т.е.:

$$d = \min \{d_{ij}\},$$

где $i \neq j, i=1,2..m; j=1,2..m$.

Таким образом, кодовое расстояние d=6 означает, что формат обеспечивает обнаружение ошибок кратности меньше 6.

Разряды блока данных называют информационными, а дополнительные называют проверочными. Проверочный блок формируется образующим полиномом P(x), который может различаться для различных стандартов. Алгоритм расчета контрольной суммы для передаваемого сообщения называется CRC (Cyclic Redundancy Code - циклический избыточный код).

Для передачи телесигнализации (ТС) и телеуправления необходимо выбрать алгоритм расчета контрольной суммы, который будет обеспечивать наибольшую достоверность при определенных заданных условиях.

Полиномы, наиболее широко применяемые в телемеханике для расчета контрольной суммы, представлены в таблице 3 [2].

Таблица 3

Полиномы расчета контрольной суммы

Образующий полином	Число-полином (hex) / Реверсивное число-полином	Протоколы, использующие полином
$x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$	0x8005 / 0xA001	Bisync, Modbus RTU, USB, ANSI X3.28
$x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$	0x1021 / 0x8408	X.25, HDLC, XMODEM, Bluetooth, SD
$x^{16} + x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^6 + x^5 + x^2 + 1$	0x3D65 / 0xA6BC	DNP, IEC 60870, M-Bus

При вычислении контрольной суммы алгоритмы могут использовать различные начальные константы (Init) и различные способы обработки пакета данных: реверсирование исходного сообщения (RefIn), реверсирование ре-

зультата (RefOut) и операция исключающего ИЛИ над результатом (XOROut).

Параметры распространенных алгоритмов представлены в таблице 4 [3].

Таблица 4

Параметры распространенных CRC алгоритмов

Название	число-полином (hex)	Константа инициализации (Init) (hex)	Реверсирование данных (RefIn)	Реверсирование результата (RefOut)	Операция исключающего ИЛИ над результатом (XorOut)(hex)
"ARC", "CRC-16" "CRC-IBM", "CRC-16/ARC" "CRC-16/LHA"	0x8005	0x0000	+	+	0x0000
CRC-16/AUG-CCITT	0x1021	0x1D0F	-	-	0x0000
CRC-16/BUYPASS CRC-16/VERIFONE	0x8005	0x0000	-	-	0x0000
CRC-16/CCITT-FALSE	0x1021	0xFFFF	-	-	0x0000
CRC-16/DDS-110	0x8005	0x800D	-	-	0x0000

CRC-16/DECT	0x0589	0x0000	-	-	0x0001
CRC-16/DNP	0x3D65	0x0000	+	+	0xFFFF
CRC-16/EN-13757 ISO/IEC 60870-5-2	0x3D65	0x0000	-	-	0xFFFF
CRC-16/GENIBUS	0x1021	0xFFFF	-	-	0xFFFF
CRC-16/MAXIM	0x8005	0x0000	+	+	0xFFFF
CRC-16/TELEDISK	0xA097	0x0000	-	-	0x0000
CRC-16/USB	0x8005	0xFFFF	+	+	0xFFFF
KERMIT CRC-16/CCITT CRC-16/CCITT-TRUE CRC-CCITT	0x1021	0x0000	+	+	0x0000
MODBUS RTU	0x8005	0xFFFF	+	+	0x0000
X-25 CRC-16/IBM-SDLC CRC-16/ISO-HDLC	0x1021	0xFFFF	+	+	0xFFFF
XMODEM ZMODEM CRC-16/ACORN	0x1021	0x0000	-	-	0x0000

Для некоторых алгоритмов характерны так называемые «слепые пятна». Дело в том, что кроме искажений битов, возможны пропуски и дублирование байтов данных. Если блок данных содержит одни нули, то, к примеру, у алгоритмов CRC-16-IBM и TELEDISK контрольная сумма также будет нулевой и, таким образом, алгоритм не будет обнаруживать усеченные сообщения или сообщения, содержащие лишние нулевые байты. Что бы этого не происходило, применяют константу Init неравную нулю.

При применении XORout CRC будет отличаться от нуля, но будет одинаковой при любой длине сообщения, состоящего из нулевых байтов. А при использовании константы Init CRC будет разной для блоков данных разной длины. Исследование устойчивости алгоритмов расчета контрольной суммы к ошибкам различной кратности

Объектом исследований являются протоколы IEC 60870 и MODBUS RTU. В качестве критерия оценки достоверности выбираем вероятность получения ошибочного сообщения при различных длинах информационного блока.

Цель исследования – оценить достоверность передаваемых данных, обеспечиваемую форматами известных протоколов, на основании экспериментально полученного количества обнаруживаемых ошибок.

Методика исследования

Первоначально определяем количество обнаруживаемых ошибок для блоков данных

длиной 48, 112 и 240 бит. Длина блока данных 112 бит – это длина информационного блока кодового формата FT3 протокола IEC 60870 для функций телемеханики. Общая длина блока данных и контрольной суммы составляет 128 бит. Блок длиной 48 бит вместе с контрольной суммой имеет длину 64 бита, что составляет половину длины кодового формата FT3 и позволяет рассчитать количество необнаруживаемых ошибок большей кратности. Кадр протокола MODBUS RTU имеет максимальную длину 256 байт (2048 бит), поэтому выбран размер кодового слова в два раза больше, чем размер кодового слова в формате FT3, но меньше, чем максимальный размер в формате MODBUS RTU.

Случайным образом выбирается блок данных указанной длины. Рассчитывается контрольная сумма для этого блока. Кодовый блок, состоящий из информационного и контрольного блоков, подвергается искажениям указанной кратности. Полученный искаженный блок состоит из искаженного блока данных и искаженной контрольной суммы.

Далее производится расчет контрольной суммы для искаженного блока, если полученная контрольная сумма совпадает с искаженной контрольной суммой, то ошибка является необнаруживаемой. Например, возьмем информационный блок В размером 16 бит (2 байта): 110F(hex).

$V=110F(\text{hex})=1000.1000.1111.0000(\text{bin})$, биты расставлены в порядке их поступления в канал связи (слева направо).

Посчитаем контрольную сумму по алгоритму MODBUS RTU:

$$S = E44D(hex) = 1011.0010.0010.0111 (bin)$$

Сделаем искажение блока данных и контрольной суммы:

$$1000.1000.1111.0000.1011.0010.0010.0111 =$$

110F4DE4 – исходный блок

$$1000.0100.1111.0000.1001.1010.0010.0111 =$$

210F59E4 – искаженный блок

Исказились 4 бита сообщения: 5, 6, 19, 21. Искаженный блок данных B' = 210F, искаженная контрольная сумма S' = E459. Подсчитаем CRC для B':

$$CRC(B') = E459$$

Таким образом, $CRC(B') = S'$, т.е. такая ошибка является необнаруживаемой. Для выбранного алгоритма и для информационного блока размером 16 бит таких необнаруживаемых

ошибок будет 24, а число возможных искажений – 35960.

Выбранный кодовый блок подвергается всем возможным искажениям определенной кратности (с учетом всех возможных искажений контрольной суммы CRC).

Многочисленные поиски необнаруживаемых ошибок для различных случайных информационных блоков одинаковой длины показывают одно и то же количество необнаруживаемых ошибок. Количество необнаруживаемых ошибок не зависит от содержимого блока данных.

Исследование производилось с помощью специально созданной программы. Программа перебирает все возможные комбинации искажений исходного блока данных. Количество комбинаций и время поиска необнаруживаемых ошибок представлены в таблице 5. Исследование проводилось на компьютере с процессором Intel® Core 2 Duo 2,2 ГГц с использованием распараллеливания процессов (задействовались два ядра процессора).

Таблица 5

Число возможных комбинаций искажений и время поиска необнаруживаемых ошибок

Кратность ошибки	Размер инф. блока, бит	Число комбинаций искажений	Время обработки (Скорость обработки)
3	48	41 664	00.015 с (2,8 млн комб./с)
4		635 376	00.172 с (3,7 млн комб./с)
5		7 624 512	01.578 с (4,8 млн комб./с)
6		74 974 368	17.484 с (4,3 млн комб./с)
3	112	341 376	0.079 с (4,3 млн комб./с)
4		10 668 000	2.797 с (3,8 млн комб./с)
5		264 566 400	01 мин 01 с (4,3 млн комб./с)
6		5 423 611 200	расчетное время 21 мин при скорости (4,3 млн комб./с)
3	240	2 763 520	0.781 с (3,538 млн комб./с)
4		174 792 640	52.282 с (3,343 млн комб./с)
5		8 809 549 056	расчетное время 44 мин
6		368 532 802 176	расчетное время 30 часов

Как видно из таблицы, проведение исследований с большими блоками и большими кратностями искажений занимает много времени. Поэтому для больших чисел можно пользоваться теоретическим количеством необнаруживаемых ошибок, которое приближенно рассчитывается по известной формуле [1]:

$$A \approx \frac{1}{2^{15}} \quad (1)$$

где:

e = 4, 6, 8, ... 256 – кратность ошибок;

n – суммарный размер блока данных и контрольного блока CRC.

Для блока данных длиной 112 бит, CRC 16 бит и кратности ошибки 4 имеем:

$$A \approx 128! / ((128 - 4)! \cdot 4!) / 32768 \approx 326 \text{ ошибок}$$

Точное количество необнаруживаемых ошибок зависит от выбранного полинома. Например, при одной и той же длине информационного блока, алгоритм, используемый в ФТЗ ПЕС 60870 выявляет все ошибки кратности 4 для кодового слова длиной 128 бит, а MODBUS RTU не обнаруживает 2320 ошибок той же кратности (см. табл. 6).

Для блока данных 240 бит, получаем следующие величины:

$$A \approx 256! / ((256 - 4)! \cdot 4!) / 32768 \approx 5334 \text{ ошибок}$$

Точное количество необнаруживаемых ошибок для МЭК 60870 – 5460, для MODBUS RTU – 14995 (см. табл. 6).

Таблица 6

Результаты исследований устойчивости алгоритмов расчета контрольной суммы к случайным ошибкам различной кратности

Алгоритм, число – полином	Размер блока данных, бит	Количество необнаруживаемых ошибок при искажении кратности ϵ					
		$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=3$	$\epsilon=4$	$\epsilon=5$	$\epsilon=6$
CRC-IBM,CRC-16/ARC 0x8005	48	0	0	0	364	0	9414
	112	0	0	0	2320	0	-----
	240	0	0	0	14995	----	-----
CRC-16/AUG-CCITT 0x1021	48	0	0	0	84	0	2430
	112	0	0	0	574	0	-----
	240	0	0	0	5344	----	-----
CRC-16/BUYPASS 0x8005	48	0	0	0	364	0	9414
	112	0	0	0	2320	0	-----
	240	0	0	0	14995	----	-----
CRC-16/DDS-110 0x8005	48	0	0	0	364	0	9414
	112	0	0	0	2320	0	-----
	240	0	0	0	14995	----	-----
CRC-16/DECT 0x0589	48	0	0	0	0	0	2308
	112	0	0	0	0	0	-----
	240	0	2	0	8255	---	-----
CRC-16/DNP 0x3D65	48	0	0	0	0	0	2051
	112	0	0	0	0	0	-----
	240	0	105	0	5460	---	-----
CRC-16/EN-13757 ISO/IEC 60870-5-2 0x3D65	48	0	0	0	0	0	2051
	112	0	0	0	0	0	170581
	120	0	0	0	0	---	-----
	128	0	0	0	0	---	-----
	136	0	1	0	0	---	-----
	144	0	9	0	36	---	-----
CRC-16/MAXIM 0x8005	48	0	0	0	364	0	9414
	112	0	0	0	2320	0	-----
	240	0	0	0	14995	---	-----
CRC-16/TELEDISK 0xA097	48	0	0	0	0	0	2251
	112	0	0	0	121	0	-----
	240	0	0	0	5081	---	-----
CRC-16/USB 0x8005	48	0	0	0	364	0	9414
	112	0	0	0	2320	0	-----
	240	0	0	0	14995	---	-----
KERMIT,CRC-16/CCITT 0x1021	48	0	0	0	84	0	2430
	112	0	0	0	574	0	-----
	240	0	0	0	5344	----	-----
MODBUS RTU 0x8005	48	0	0	0	364	0	9414
	112	0	0	0	2320	0	-----
	240	0	0	0	14995	---	-----
X-25,CRC-16/IBM-SDLC 0x1021	48	0	0	0	84	0	2430
	112	0	0	0	574	0	-----
	240	0	0	0	5344	----	-----
XMODEM,ZMODEM 0x1021	48	0	0	0	84	0	2430
	112	0	0	0	574	0	-----
	240	0	0	0	5344	----	-----

Полученные результаты исследований показывают, что не многие алгоритмы обеспечивают кодовое расстояние $d=6$ даже при малых разме-

рах блока данных. Так, алгоритм расчета контрольной суммы, используемый в протоколе Modbus RTU, не обнаруживает ошибки кратко-

сти 4. Для блока размером 112 бит, возможно появление 2320 необнаруживаемых ошибок кратности 4. В то же время алгоритм, используемый форматом FT3 в протоколе IEC 60870, обнаруживает все искажения битов кратности до 5 включительно при размере блока данных до 128 бит включительно. Кроме того, количество необнаруживаемых ошибок может отличаться у разных протоколов, в зависимости от выбранного полинома для расчета контрольной суммы.

Для формата FT3 определена граница размера блока данных (16 байт), превышение которой больше не обеспечивает кодовое расстояние $d=6$. При размере блока в 17 байт, резко (см. табл. 7) увеличивается вероятность ошибочного приема сообщения.

Исходя из полученных данных, можно определить, к какому классу достоверности будет относиться кодовый формат при использовании конкретного алгоритма расчета контрольной суммы.

Вероятность ошибочного приема сообщения R рассчитывается по известной формуле [1]:

$$R = \sum_{i=d}^n A_i p^i (1-p)$$

где:

A_i – количество ошибок кратности i ,

p – вероятность искажения бита.

При малых p ($p \leq 10^{-3}$), $(1-p) \approx 1$ и выражение (1)

может быть принято равным $\sum_{i=d}^n A_i$. При малых p

наибольший вклад в сумму(3) вносит слагаемое при $i=d$, т.е.

$$R = A_d p^d .$$

Ожидаемое время T между ложными сообщениями рассчитывается по формуле [1]:

$$T = n / (vR) ,$$

где n – размер кодового слова,

v – скорость передачи данных,

R – вероятность ошибочного приема сообщения.

Сравним вероятности ошибочного приема сообщения при $p=10^{-4}$ (удовлетворительное качество канала) и при $p=10^{-3}$ (канал с большими помехами). Используя формулы (2), (3), (4) и данные таблицы 6 получим результаты, приведенные в таблице 7.

Таблица 7

Сравнение вероятностей ошибочного приема сообщения при использовании кодовых форматов протоколов MODBUS RTU и IEC 60870 при различном качестве канала связи

Протокол, вероятность искажения бита p	Длина кодового слова, бит	Вероятность приема ложного сообщения R	Ожидаемое время T между ложными сообщениями	Класс достоверности
MODBUS 10^{-3}	64	$3.64 \cdot 10^{-10}$	4.6 года	I_2
	128	$2.3 \cdot 10^{-9}$	537 дней	I_2
	256	$1.5 \cdot 10^{-8}$	164 дня	I_2
MODBUS 10^{-4}	64	$3.64 \cdot 10^{-14}$	46 000 лет	I_3
	128	$2.3 \cdot 10^{-13}$	14 000 лет	I_3
	256	$1.5 \cdot 10^{-12}$	4 500 лет	I_2
IEC 60870 10^{-3}	64	$2.1 \cdot 10^{-15}$	805 000 лет	I_3
	128	$1.7 \cdot 10^{-13}$	19 000 лет	I_3
	144	$\approx 3.4 \cdot 10^{-13}$	11 000 лет	I_3
	152	$1 \cdot 10^{-6}$	35 часов	I_2
	160	$9 \cdot 10^{-6}$	4 часа	I_2
	256	$1.1 \cdot 10^{-4}$	32 мин	I_2
IEC 60870 10^{-4}	64	$2.1 \cdot 10^{-21}$	800 млрд. лет	I_3
	128	$1.7 \cdot 10^{-19}$	19 млрд. лет	I_3
	152	$1 \cdot 10^{-8}$	146 дней	I_2
	256	$1.1 \cdot 10^{-6}$	2 дня	I_2

Таким образом, использование алгоритма CRC-16-IBM (MODBUS RTU) для передачи данных по каналам связи с неудовлетворительным качеством ($p = 10^{-3}$) обеспечивает класс достоверности I_2 и не обеспечивает I_3 .

Алгоритм, используемый в протоколе IEC 60870, обеспечивает кодовое расстояние $d=6$ (при длине кодового слова до 128 бит), т.е. возможны необнаруживаемые ошибки кратности 6, поэтому алгоритм обеспечивает класс достоверности I_3 для

каналов связи с неудовлетворительным качеством ($p=10^{-3}$). Использование пакета большей длины значительно снижает защитные свойства алгоритма.

Исследование устойчивости алгоритмов расчета контрольной суммы к пакетным ошибкам различной длины

Анализ ошибок при передаче информации по каналам связи показывает, что часто ошибки не независимы, а группируются в пакеты (пачки) ошибок [1]. Пакетом ошибок длины b называется последовательность символов, искажения в которых произошли среди b идущих подряд символов, первый и последний из которых обязательно искажены. Любой циклический код, образованный полиномом с высшей степенью k , обнаруживает пакеты ошибок длины b в кодовом слове, если $b \leq k$.

Рассматривая пакеты ошибок, следует учитывать порядок поступления информационных битов в канал связи. Байты данных могут поступать в канал старшим битом вперед или младшим битом вперед.

Рассчитанная контрольная сумма искаженного блока данных может совпасть с искаженной при передаче контрольной суммой.

Количество возможных искажений для блока данных длиной n и пакетом ошибок длиной b ($b > 1$) можно рассчитать по формуле:

$$N = (n + 16 - b + 1) \cdot 2^{(b-2)}, \{n \geq b > 1\},$$

Проведем исследование устойчивости нескольких известных алгоритмов к пакетным ошибкам.

Методика исследования

1. Случайным образом выбирается информационный блок.
2. Вычисляется контрольная сумма.
3. Производятся все возможные пакетные искажения выбранной длины.
4. Для каждого из N искаженных блоков данных вычисляется контрольная сумма и сравнивается с искаженной контрольной суммой. Если контрольные суммы совпадают, значит, искажение является необнаруживаемым.

Результаты исследования представлены в таблице 8.

Таблица 8

Результаты исследований устойчивости алгоритмов расчета контрольной суммы к пакетным искажениям размера b

Алгоритм (число – полином)	Размер блока данных	Длина пакета ошибок b								
		$b=2$...	$b=13$	$b=14$	$b=15$	$b=16$	$b=17$	$b=18$	$b=19$
CRC-IBM,CRC-16/ARC 0x8005	48	0	0	0	0	0	0	48	47	92
	112	0	0	0	0	0	0	112	111	220
	240	0	0	0	0	0	0	240	239	476
CRC-16/AUG-CCITT 0x1021	48	0	0	0	0	0	0	48	47	92
	112	0	0	0	0	0	0	112	111	220
	240	0	0	0	0	0	0	240	239	476
CRC-16/DECT 0x0589	48	0	0	0	0	0	0	48	47	92
	112	0	0	0	0	0	0	112	111	220
	240	0	0	0	0	0	0	240	239	476
CRC-16/EN-13757 ISO/IEC 60870-5-2 0x3D65	48	0	0	0	0	0	0	48	47	92
	112	0	0	0	0	0	0	112	111	220
	240	0	0	0	0	0	0	240	239	476
CRC-16/TELEDISK 0xA097	48	0	0	0	0	0	0	48	47	92
	112	0	0	0	0	0	0	112	111	220
	240	0	0	0	0	0	0	240	239	476
MODBUS RTU 0x8005	48	0	0	0	0	0	0	48	47	92
	112	0	0	0	0	0	0	112	111	220
	240	0	0	0	0	0	0	240	239	476
XMODEM,ZMODEM 0x1021	48	0	0	0	0	0	0	48	47	92
	112	0	0	0	0	0	0	112	111	220
	240	0	0	0	0	0	0	240	239	476

Из таблицы 8 видно, что все алгоритмы обнаруживают любые пакетные ошибки с длиной пакета до 16 включительно. При этом все алгоритмы не будут обнаруживать одинаковое количество ошибок при одинаковой кратности искажений и одинаковой длине блока данных.

Проведем исследование протокола MODBUS RTU при длине пакета ошибок больше 16 и размере блока данных 48 бит. Экспериментально зафиксированы следующие количества необнаруживаемых ошибок:

- для $b=17$ – количество ошибок = 48;
- для $b=18$ – количество ошибок = 47 или $(48 - 1) \cdot 1$ или $(48 - 1) \cdot 2^0$;
- для $b=19$ – количество ошибок = 92 или $(48 - 2) \cdot 2$ или $(48 - 2) \cdot 2^1$;
- для $b=20$ – количество ошибок = 180 или $(48 - 3) \cdot 4$ или $(48 - 3) \cdot 2^2$;
- для $b=21$ – количество ошибок = 352 или $(48 - 4) \cdot 8$ или $(48 - 4) \cdot 2^3$;
- для $b=22$ – количество ошибок = 688 или $(48 - 5) \cdot 16$ или $(48 - 5) \cdot 2^4$;
- для $b=23$ – количество ошибок = 1344 или $(48 - 6) \cdot 32$ или $(48 - 6) \cdot 2^5$;
- для $b=24$ – количество ошибок = 2624 или $(48 - 7) \cdot 64$ или $(48 - 7) \cdot 2^6$;

Таким образом, можно увидеть зависимость количества необнаруживаемых ошибок от длины пакета ошибок.

$$E = (n_{\text{инф}} - s) \cdot 2^{s-1} \quad (1)$$

где:

E – количество необнаруживаемых ошибок;
 $n_{\text{инф}}$ – размер блока данных;

$$s = b - k - 1,$$

где:

b – длина пакета ошибок,
 k – максимальная степень полинома, для MODBUS RTU $k=16$.

Формула (1) справедлива для $b \geq (k+2)$.

При рассмотрении пакетных искажений нужно учитывать порядок поступления бит в канал связи. Байты могут передаваться по каналу старшим битом вперед или младшим битом вперед. Например, устройства UART персональных ЭВМ передают данные младшим битом вперед. Соответственно, если кадр сообщения будет искажен пакетом ошибок длиной n , то применяя реверсивный алгоритм, мы обнаружим все пакетные ошибки длиной до 16,

а применяя нереверсивный алгоритм, некоторые пакетные ошибки будут не обнаружены.

Таким образом, для того чтобы алгоритм обнаруживал пакетные ошибки длиной до 16 включительно, нужно учитывать, каким образом аппаратура помещает данные в канал связи и, если первыми передаются младшие биты, использовать реверсивный алгоритм, иначе – нереверсивный.

Выводы

Существует несколько алгоритмов расчета контрольной суммы для блока передаваемых данных. Рассмотрены алгоритмы расчета контрольной суммы, использующие полином с максимальной степенью 16.

Исследования показали, что:

1. Предлагаемый подход позволяет достаточно точно оценить вероятность ошибочного приема сообщения, если известны характеристики канала связи и параметры кодового слова, применяемого в протоколе передачи данных.
2. Число необнаруживаемых ошибок значительно зависит от выбранного полинома.
3. Кодовые расстояния, а значит и количество необнаруживаемых ошибок для блока данных определенной длины могут отличаться, в зависимости от выбранного полинома. Увеличение кодового расстояния существенно уменьшает вероятность ошибочного приема сообщения.
4. Размер блока данных влияет на кодовое расстояние, которое может обеспечить выбранный полином. Увеличение размера блока данных сверх определенной границы может резко снизить защитные свойства контрольной суммы.

5. Многократный поиск необнаруживаемых ошибок для блоков одинаковой длины, но с различным содержимым, выдавал одни и те же количества ошибок, что позволяет предположить – число необнаруживаемых ошибок при использовании контрольной суммы CRC не зависит от содержимого блока данных.

6. Кроме обнаружения случайных, независимых ошибок в сообщении, алгоритмы, использующие полиномы со старшей степенью 16, обладают способностью обнаруживать пакетные ошибки с длиной пакета ошибок до 16 включительно. Однако необходимо учитывать, каким образом передающая аппаратура помещает данные в канал связи. Если данные передаются младшим битом вперед, то используют

реверсивные алгоритмы, если старшим битом вперед – нереверсивные.

7. Исследование характера ошибок в канале связи, а именно, как часто происходят па-

кетные ошибки и какова средняя длина пакета ошибок, позволит оценить насколько применяемый алгоритм будет устойчив к ошибкам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Митюшкин К. Г. Телеконтроль и телеуправление в энергосистемах / К.Г. Митюшкин. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
2. Wikipedia – свободная энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Циклический_избыточный_код
3. Параметры CRC алгоритмов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://regrex.bbcmicro.net/crc-catalogue.htm>
4. ГОСТ МЭК 870-5-1-95 «Устройства и системы телемеханики. Часть 5. Протоколы передачи. Раздел 1. Форматы передаваемых кадров». М.:ИПК Издательство стандартов, 1995г.
5. Ross N. Williams Элементарное руководство по CRC алгоритмам обнаружения ошибок (пер. с англ.), 1993г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ross.net/crc/download/crc_v3.txt

Поступила в печать 01.12.2012.

Внутренний рецензент *Сиченко В. Г.*

Внешний рецензент *Сокол С. И.*

Экспериментально исследованы алгоритмы расчета контрольной суммы (CRC-16), используемые в протоколах передачи данных. Сделана оценка класса достоверности и проведено сравнение алгоритмов расчета контрольной суммы в кодовом формате протоколов IEC 60870 и протоколе MODBUS RTU. Разработана программа для проведения исследований.

Ключевые слова: АРМ участкового энергодиспетчера, телемеханическая функция, протокол передачи данных, контрольная сумма.

УДК 621.331.3

Ю. А. БЛЕДНИЙ, Д. В. ВОЙТИКОВ, В. В. ИВАНОВ (ВІНК)

Науково-виробнича фірма систем автоматизації та управління «ВІНК», м. Дніпропетровськ, ел. пошта: dima@ukrvink.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПІДХІД ПРИ ОЦІНЦІ КЛАСУ ДОСТОВІРНОСТІ ПРОТОКОЛУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ДЛЯ ТЕЛЕМЕХАНІЧНИХ ФУНКЦІЙ

Експериментально досліджені алгоритми розрахунку контрольної суми (CRC-16), використовувані в протоколах передачі даних. Зроблено оцінку класу вірогідності й проведено порівняння алгоритмів розрахунку контрольної суми в кодовому форматі протоколів IEC 60870 і протоколі MODBUS RTU. Розроблено програму для проведення досліджень.

Ключові слова: АРМ дільничного енергодиспетчера, телемеханічна функція, протокол передачі даних, контрольна сума.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Сокол С. І.*

UDC 621.331.3

YU. A. BLEDNYY, D. V. VOYTIKOV, V. V. IVANOV (DNURT)

Scientific Industrial Firm of automation and control systems "VIC", Dnepropetrovsk, e-mail: dima@ukrvink.com

EXPERIMENTAL APPROACH IN ASSESSING CLASS RELIABILITY DATA TRANSMISSION PROTOCOLS FOR TELECONTROL FUNCTIONS

Algorithms of calculation of the control sum (CRC-16), used in data transfer protocols are experimentally investigated. The estimation of a class of reliability is made and comparison a control sum calculation algorithms in a code format of protocols IEC 60870 and protocol MODBUS RTU is spent. The program for carrying out of researches is developed.

Keywords: Power dispatcher automated workplace district, telemechanical function, data transfer protocol, checksum.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Sokol Ye. I.*

УДК 621.331: 621.311.4

О. О. МАТУСЕВИЧ (ДНУЗТ)

Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056)793 19 17, ел. пошта: al_m0452@meta.ua, ORCID: 0000-0002-2174-7774

МЕТОДОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

Вступ

В умовах складності технологічних процесів і режимів роботи електрифікованих залізниць вирішення першочергових завдань неможливе без забезпечення надійної роботи системи тягового електропостачання (СТЕ), яке у свою чергу залежить від надійності функціонування силового електроустаткування тягових підстанцій (ТП). Підвищення ефективності організації процесу експлуатації електроустаткування ТП може бути досягнуте при забезпеченні оптимального технічного стану устаткування по відношенню до початкового. Тому в умовах критичності технологічних процесів експлуатації потрібне підвищення експлуатаційної надійності ТП за рахунок рівня якості системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) при мінімальних витратах на експлуатацію.

Мета

Розробка методики підвищення якості системи ТО і Р основного електрообладнання ТП СТЕ в умовах невизначеності експлуатації на основі експертної інформації.

Результати дослідження

Аналіз існуючого різноманіття підходів розробки сучасних методів вдосконалення системи ТО і Р, дозволяє зробити висновок, вирішення проблеми підвищення якості системи досягається шляхом рішення індивідуальних завдань підвищення експлуатаційної надійності силового електроустаткування ТП в наступних основних взаємозв'язаних напрямках: технічному, економічному та організаційному [1, 2]. Для вирішення задачі мінімізації наслідків відмов пристроїв ТП, система ТО і Р повинна володіти наступними властивостями: бути ефективною в умовах високої невизначеності початкової інформації стану СТЕ; простота застосування, універсальність, комплексність, практична спрямованість, можливість нарощування вхідних даних, тощо.

Однак, вирішення даної проблеми ускладнюється деякими особливостями організації та управління системою ТО і Р, основними з яких є [3]:

– необхідність обліку великої кількості показників експлуатаційної надійності обладнання при виборі їх раціонального варіанту в умовах невизначеності функціонування СТЕ;

– суттєвий взаємозв'язок і взаємозалежність показників що мають суперечливий характер;

– складність отримання вихідних даних залишкового ресурсу обладнання в умовах невизначеності стану пристроїв ТП, які необхідні для вирішення завдань аналізу і синтезу, особливо на ранніх етапах розвитку відмови;

– здебільшого якісний характер показників, які враховуються при аналізі і синтезі системи ТО і Р.

Вказані особливості дуже ускладнюють застосування традиційних математичних методів, зокрема методів математичної статистики і теорії ймовірності, а також класичних методів оптимізації для вирішення прикладних завдань аналізу і синтезу системи ТО і Р ТП внаслідок того що, математична статистика і теорія ймовірності використовують експериментальні дані, які володіють певною точністю і достовірністю.

У цьому випадку перспективним напрямом для вирішення прикладних задач, які пов'язані з оцінкою та вибором напрямів вирішення проблеми зменшення збитків системи тягового електропостачання з причини відмов пристроїв СТЕ, при експертній початковій інформації є: лінгвістичний підхід на базі теорії нечітких множин і лінгвістичної змінної [4, 5]. Теорія нечітких множин має справу з «людськими знаннями», які прийнято називати експертною інформацією. У цьому випадку ухвалення рішень в більшості базується на експертних оцінках і експертній інформації з урахуванням важливості показників підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП СТЕ. Експертна інформація - це думки фахівців-

експертів виражених в кількісній і/або якісній формі з метою підготовки інформації для ухвалення рішень [6].

Розглянемо можливі взаємозв'язані напрями моделі вдосконалення і підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП СТЕ та розробимо методику розрахунку інтегрального показника якості системи.

Основними напрямками цієї моделі є [7]:

- *технічні* (застосування сучасних автоматизованих інформаційно-діагностичних систем. Склад і характеристики технічних засобів діагностики своєчасного виявлення відмов, несправностей. Повнота та якість програмного забезпечення автоматизації процесу діагностування обладнання, якісного і оперативного проведення оцінки ризиків експлуатації силового електрообладнання ТП. Резервування, тощо);

- *економічні* (повнота та якість економічно-технічного забезпечення системи ТО і Р, своєчасне і якісне оновлення засобів діагностування, обладнання ТП та забезпечення ремонтними матеріалами і частинами. Матеріальне заохочення ремонтних бригад за якість здійснення обслуговування, тощо);

- *організаційні* (повнота виконання законодавчих, нормативних і методичних документів з питань ефективного та якісного здійснення ТО і Р. Рівень застосування новітніх методик діагностування які забезпечують ефективне, своєчасне та якісне діагностування обладнання ТП, а також оперативне виявлення елементів обладнання які вийшли з ладу та причини цих порушень. Програмне забезпечення якісного і оперативного контролю системи ТО і Р. Повнота виконання функцій ремонтними підрозділами, які забезпечують своєчасне і якісне виявлення відмов, перешкод, несправностей, а також причин цих порушень та проведення ремонтів. Ступінь кваліфікації фахівців, тощо.

1. Вибір варіанту підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП СТЕ при рівній важливості показників напрямів системи.

Припустимо є множина A з варіантів підвищення якості системи ТО і Р ТП СТЕ

$$A = [a_1, a_2, \dots, a_m] \quad (1)$$

Згідно [6] для деякого показника підвищення надійності C може бути розглянута нечітка множина

$$C = \{ \mu_c(a_1) / a_1; \mu_c(a_2) / a_2; \dots; \mu_c(a_m) / a_m \} \quad (2)$$

де $\mu_c(a_i) \in [0,1]$ - експертна оцінка підвищення якості системи ТО і Р ТП варіанту (a_i) по показнику C .

Допустимо є чотири варіанти підвищення якості системи ТО і Р ТП СТЕ: a_1, a_2, a_3, a_4 . Рівень підвищення якості системи (P_a) оцінимо по трьом напрямам показників: C_1 - *технічні*, C_2 - *економічні*, C_3 - *організаційні*.

Наприклад, при обслуговуванні силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП постійного струму (ЕЧЕ-15) [8], експертами надані наступні пропозиції (оцінки) які характеризують ступінь підвищення якості системи ТО і Р заданим вимогам з вказаних трьох напрямів альтернативних варіантів системи:

$$C_1 = \{0,7 / a_1; 0,65 / a_2; 0,9 / a_3; 0,8 / a_4\}$$

$$C_2 = \{0,6 / a_1; 0,9 / a_2; 0,6 / a_3; 0,8 / a_4\} \quad (3)$$

$$C_3 = \{0,9 / a_1; 0,8 / a_2; 0,8 / a_3; 0,8 / a_4\}$$

Згідно [9] рівень підвищення якості функціонування системи обслуговування можна прийняти

$$P_a = \prod_{j=1}^m C_j^{\omega_j} \quad (4)$$

де: C_j - значення j -го показника системи; ω_j - ваговий коефіцієнт j -го показника системи ($0 < \omega_j < 1$).

При рівній важливості показників ($\omega_j = 0,33$) рівень підвищення якості функціонування системи ТО і Р ТП для варіантів (a_1, a_2, a_3, a_4) згідно формули (4) складає: $P_{a1} = 0,725$; $P_{a2} = 0,778$; $P_{a3} = 0,758$; $P_{a4} = 0,802$. Порівняння результатів рівня підвищення якості функціонування системи ТО і Р, при рівній важливості показників, представлено на графіку (рис.1).

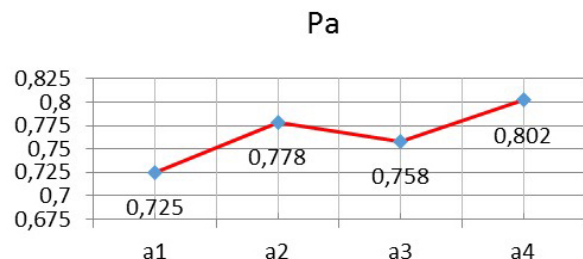


Рис. 1. Рівень підвищення якості функціонування системи ТО і Р при рівній важливості показників

З графіку слідує що найкращим варіантом підвищення якості системи ТО і Р ТП СТЕ у розглянутому випадку є варіант a_4 .

2. Вибір варіанту підвищення якості функціонування системи ТО і Р силового електрообладнання ТП СТЕ при різній важливості показників напрямів системи.

При ухваленні рішення про вибір якнайкращого варіанту підвищення якості функціонування системи виникає задача визначення важливості (ваги) напрямів системи ТО і Р з підвищення якості. Огляд основних методів визначення коефіцієнтів важливості розглядається в публікаціях [10, 11]. Для вирішення практичних завдань автори пропонують визначити вагові коефіцієнти шляхом розраху-

нку середнього геометричного із співвідношення

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}; i = \overline{1, n}} \quad (5)$$

де a_{ij} - коефіцієнти матриці парних порівнянь.

$$\omega_i \geq 0; i = \overline{1, n}; \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (6)$$

Розглянемо приклад визначення коефіцієнтів відносної важливості показників підвищення надійності на основі методу парних порівнянь (метод Сааті). Шкала для оцінки відносної важливості показників приведена в таблиці 1

Таблиця 1

Інтенсивність відносної важливості	Визначення
0,1	Рівна важливість порівнюваних вимог
0,3	Помірна (слабка) перевага одній над іншою
0,5	Сильна (істотна) перевага
0,7	Очевидна перевага
0,9	Абсолютна перевага
0,2; 0,4; 0,6; 0,8	Проміжні рішення між двома сусідніми оцінками

В результаті експертної оцінки відносної важливості показників підвищення якості функціонування системи ТО і Р ТП при обслуговуванні силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП постійного струму (ЕЧЕ-15) [8], експертами запропонована наступна матриця парних порівнянь:

$$\omega = \begin{pmatrix} 0,38 / a_{11} & 0,5 / a_{12} & 0,36 / a_{13} & 0,42 / a_{14} \\ 0,36 / a_{21} & 0,34 / a_{22} & 0,34 / a_{23} & 0,38 / a_{24} \\ 0,26 / a_{31} & 0,16 / a_{32} & 0,3 / a_{33} & 0,2 / a_{34} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Згідно співвідношення (5) та даних матриці парних порівнянь (7) визначимо відносну важливість ω_i показників напрямів підвищення якості системи обслуговування C_1, C_2, C_3 :

$$\omega_{c_1} = \sqrt[4]{\omega_{a11} \cdot \omega_{a12} \cdot \omega_{a13} \cdot \omega_{a14}} = 0,413$$

$$\omega_{c_2} = \sqrt[4]{\omega_{a21} \cdot \omega_{a22} \cdot \omega_{a23} \cdot \omega_{a24}} = 0,356$$

$$\omega_{c_3} = \sqrt[4]{\omega_{a31} \cdot \omega_{a32} \cdot \omega_{a33} \cdot \omega_{a34}} = 0,231 \omega_{c_3}$$

Порівняння результатів визначення коефіцієнтів відносної важливості показників підвищення напрямів підвищення якості системи ТО і Р ТП представимо на графіку (рис.2).

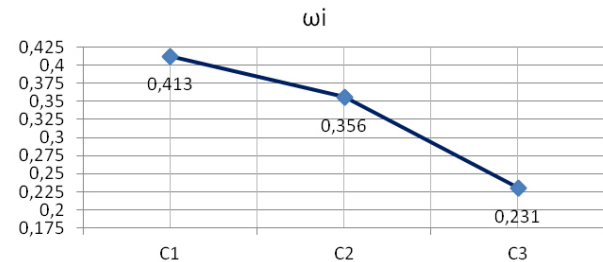


Рис. 2. Коефіцієнти відносної важливості показників підвищення якості функціонування системи ТО і Р ТП

З графіку бачимо що найважливішим показником підвищення якості системи обслуговування у розглянутому випадку, є показник C_1 .

У випадку, якщо показники підвищення надійності мають різну відносну важливість, кожному з них приписується число ω_i (чим важливіше вимога, тим більше ω_i) і загальне правило вибору приймає вигляд [9]

$$P_a = C_1^{\omega_1} \cap C_2^{\omega_2} \cap \dots \cap C_n^{\omega_n} \quad (8)$$

При обслуговуванні силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП постійного струму (ЕЧЕ-15) [9] експертами розглядалися чотири варіанти рішення задачі підвищення якості системи ТО і Р при обслуговуванні трансформатору це варіанти a_1, a_2, a_3, a_4 . Варіанти оцінювалися по тих же напрямках показни-

ків: C_1 - технічні, C_2 - економічні, C_3 - організаційні, які розглянуті вище. Визначені експертні оцінки, відносної важливості напрямів підвищення якості системи обслуговування трансформатора за напрямками, склали: $\omega_1 = 0,45$; $\omega_2 = 0,3$; $\omega_3 = 0,25$.

За результатами експертизи нечітких множин які характеризують альтернативні варіанти

$$C_1^{0,45} = \{0,7^{0,45} / a_1; 0,65^{0,45} / a_2; 0,9^{0,45} / a_3; 0,8^{0,45} / a_4\} = \{0,825 / a_1; 0,824 / a_2; 0,954 / a_3; 0,904 / a_4\}$$

$$C_2^{0,3} = \{0,6^{0,3} / a_1; 0,9^{0,3} / a_2; 0,6^{0,3} / a_3; 0,8^{0,3} / a_4\} = \{0,858 / a_1; 0,969 / a_2; 0,858 / a_3; 0,935 / a_4\}$$

$$C_3^{0,25} = \{0,9^{0,25} / a_1; 0,8^{0,25} / a_2; 0,8^{0,25} / a_3; 0,8^{0,25} / a_4\} = \{0,974 / a_1; 0,946 / a_2; 0,946 / a_3; 0,946 / a_4\}$$

Відповідно до (2) та (4) отримаємо множину P_a :

$$P_a = \{0,712 / a_1; 0,755 / a_2; 0,744 / a_3; 0,8 / a_4\}$$

Порівняння результатів альтернативних варіантів підвищення якості обслуговування силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП з врахуванням відносної важливості напрямів системи ТО і Р представлено на графіку (рис.3).

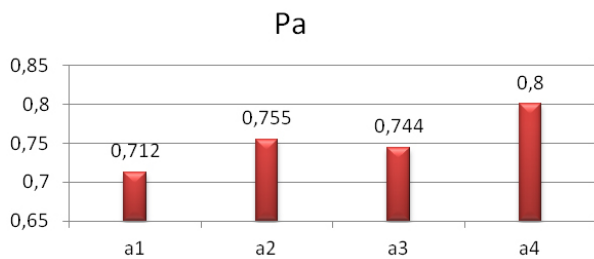


Рис. 3. Результати альтернативних варіантів підвищення якості обслуговування силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП з врахуванням відносної важливості напрямів системи ТО і Р

З графіку бачимо що максимальне значення рівня якості обслуговування силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП P_a має альтернатива a_4 - її і обираємо для реалізації, як кращий варіант підвищення якості системи обслуговування.

Висновки

Існуюче різноманіття підходів розробки сучасних методів вдосконалення системи ТО і Р,

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андриюшин, А.В. Основы концепции комплексного подхода к системе технического обслуживания и ремонта на электростанции / А.В. Андриюшин, Д.А. Баршак, Ю.Л. Гуськов, Н.И. Тимошенко. - Моск. Энерг.ин-т. - 2000. Деп в ВИНТИ, 06.04.00, № 913-В00.

підвищення якості обслуговування силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП складають, вираз (3).

Модифікуємо дані множини (3) з урахуванням відносної важливості напрямів підвищення якості системи обслуговування трансформатора:

дозволяє зробити висновок, вирішення проблеми підвищення якості системи досягається шляхом рішення індивідуальних завдань підвищення експлуатаційної надійності силового електроустаткування ТП в основних взаємозв'язаних напрямках: технічному, економічному та організаційному.

У статті запропоновано методіку подальшого розвитку системного підходу з підвищення якості функціонування системи ТО і Р силового електрообладнання тягової підстанції в умовах невизначеності на основі експертній інформації з урахуванням важливості показників. Даний метод дає змогу проводити експертну оцінку стану системи обслуговування та прогнозувати і вибирати раціональний варіант підвищення якості системи ТО і Р з урахуванням не тільки технічних, але й організаційно – правових та фінансово-економічних заходів.

Визначено відносну важливість ω_i показників напрямів підвищення якості системи обслуговування трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП постійного струму.

Запропонована методіка визначення альтернативних варіантів підвищення якості обслуговування силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП з врахуванням відносної важливості напрямів системи ТО і Р з метою обрання кращого варіанту підвищення якості системи.

REFERENCES

1. Andryushin A.B., Barshak D.A., Gus'kov Yu.L., Timoshenko N.I. *Osnovy kontseptsii kompleksnogo podkhoda k sisteme tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta na elektrostantsii* [Based on the concept of an integrated approach to the system of maintenance and repairs to power plants]. Moscow, 2000.

2. Матусевич, О. О. Удосконалення методологи системи технічного обслуговування і ремонту тягових підстанцій: монографія / О.О. Матусевич.- Дніпропетровськ: Дніпропетровський національний державний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. - 2015. - 295 с.

3. Матусевич, О. О. Методи підвищення надійності функціонування системи керування тягового електропостачання електричного транспорту на основі експертної інформації / О.О. Матусевич. // Вісник Дніпропетровського національного державного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. №26/2009 - С. 63-66.

4. Костерев Н. В. Нечеткое моделирование электрооборудования для оценки технического состояния и принятия решений о стратегии дальнейшей эксплуатации / Н. В. Костерев, Е. И. Бардик // Техническая электродинамика. Темат. вып. "Проблемы современной электротехники". - 2006. - Ч.3. - С. 39-43.

5. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные сети / В.В. Круглов. - М.: Физматлит. 2001. - 221 с.

6. Панкова, Л. А. Организация экспертизы и анализ экспертной информации / Л. А. Панкова, А.М. Петровский, Н.В. Шнейдерман. - М.: Наука, 1984. - 214 с.

7. Матусевич, О.О. Методика проведення експертизи оцінки надійності функціонування системи автоматизованого керування тягового електропостачання електричного транспорту / О.О. Матусевич. // Вісник Дніпропетровського національного державного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна №28/2009 -С. 37-39.

8. Сиченко, В.Г. Процесний інжиніринг удосконалення системи діагностування тягових підстанцій / В.Г. Сиченко, О.О. Матусевич, А.О. Кириченко. // Електрифікація транспорту. - 2014. - №8. С. 118-128.

9. Борисов, А.Н. Принятие решения на основе нечетких моделей: примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. - Рига.: Знание, 1990. - 184 с.

10. Анохин, А.М. Методы определения коэффициентов важности критериев / А.М. Анохин, В.А. Глотов, В.В. Павельев, А.М. Черкашин // Автоматика и телемеханика. - 1997, -№8 - С. 3-35.

11. Матусевич, О.О. Підвищення надійності функціонування системи керування тягового електропостачання електричного транспорту на основі експертної інформації з урахуванням важливості показників / О.О. Матусевич. // Вісник Дніпропетровського національного державного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна №27/2009 - С. 84-87.

Надійшла до друку 01.12.2012.

2. Matusевич O. O. *Udoskonalennya metodolohy systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya i remontu tyahovykh pidstantsiy* [Improving methodologies for system of maintenance and repair of traction substations]. Dnipropetrovsk, DNURT Publ, 2015. 295 p.

3. Matusевич, O. O. Metody pidvyshchennya nadiynosti funktsiyuvannya systemy keruvannya tyahovoho elektropostachannya elektrychnoho transportu na osnovi ekspertnoyi informatsiyi [Methods to improve the reliability of the control system of the traction power supply electric vehicle based on expert information]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, no. 26, pp. 63-66.

4. Kosterev N. V., Bardik E. I. Nечetkoe modelirovanie elektrooborudovaniya dlya otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya i prinyatiya resheniy o strategii dal'neyshey ekspluatatsii [Fuzzy modeling of electrical equipment for technical condition assessment and decision-making about the strategy of further exploitation]. *Tekhnichna elektrodynamika - Technical electrodyamics*, 2006, pp. 39-43.

5. Kruglov, V.V. *Nечetkaya logika i iskusstvennyye seti* [Fuzzy logic and artificial network]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 221 p.

6. Pankova L. A., Petrovskiy A.M., Shneyderman N.V. *Organizatsiya ekspertizy i analiz ekspertnoy informatsii* [Organization of examination and analysis of expert information]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 214 p.

7. Matusевич O.O. Metodyka provedennya ekspertyzy otsinky nadiynosti funktsionnuvannya systemy avtomatyzovanoho keruvannya tyahovoho elektropostachannya elektrychnoho transport [Methods of assessing the reliability of the examination of the system of automated management of the traction power supply electric transport]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, no. 28, pp. 37-39.

8. Sychenko V.G., Matusевич O.O., Kyrychenko A.O. Protseсныy inzhynirnyh udoskonalennya systemy diahnostuvannya tyahovykh pidstantsiy [Process engineering improvement of diagnostics traction substations]. *Elektryfikatsiya transport - Electrification of transport*, 2014, no. 8, pp. 118-128.

9. Borisov A.N., Krumberg O.A., Fedorov I.P. *Prinyatie resheniya na osnove nechetkikh modeley: primery ispol'zovaniya* [Making a decision based on fuzzy models usage examples]. Riga, Znanie Publ., 1990. 184 p.

10. Anokhin A.M., Glotov V.A., Pavel'ev V.V., Cherkashin A.M. Metody opredeleniya koeffitsientov vazhnosti kriteriev [Methods for determination of the coefficients of importance of criteria]. *Avtomatika i telemekhanika - Automation and Remote Control*, 1997, no. 8, pp. 3-35.

11. Matusевич O.O. Pidvyshchennya nadiynosti

funkcionuvannya systemy keruvannya tyahovoho elektropostachannya elektrychnoho transportu na osnovi ekspertnoyi informatsiyi z urakhuvanniam vazhlyvosti pokaznykiv [Improving the reliability of the control system of the traction power supply electric vehicle based on expert information, given the importance of indicators]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, no. 27, pp. 84-87.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Хворост М. В.*

Розробка методики підвищення якості системи ТО і Р основного електрообладнання ТП СТЕ в умовах невизначеності експлуатації на основі експертної інформації. Для вирішення поставленого завдання були використані основні положення теорії нечітких множин і лінгвістичної змінної. Оцінка якості системи ТО і Р ТП СТЕ здійснювалася на прикладі обслуговування силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП постійного струму. Аналіз існуючого різноманіття підходів розробки сучасних методів вдосконалення системи ТО і Р, дозволяє зробити висновок, вирішення проблеми підвищення якості системи досягається шляхом рішення індивідуальних завдань підвищення експлуатаційної надійності силового електрообладнання ТП в наступних основних взаємозв'язаних напрямках: технічному, економічному та організаційному. Для вирішення задачі підвищення якості системи ТО і Р ТП прийнятий перспективний напрям для вирішення прикладних задач, це експертна початкова інформація з використанням лінгвістичного підходу на базі теорії нечітких множин і лінгвістичної змінної. Визначено відносну важливість ω_j показників напрямів підвищення якості системи обслуговування трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП постійного струму. Запропонована методика визначення альтернативних варіантів підвищення якості обслуговування силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 ТП з врахуванням відносної важливості напрямів системи ТО і Р з метою обрання кращого варіанту підвищення якості системи. У статті отримав подальший розвиток метод системного підходу з підвищення якості функціонування системи ТО і Р силового електрообладнання тягової підстанції в умовах невизначеності на основі експертної інформації з урахуванням важливості показників. Даний метод дає змогу проводити експертну оцінку стану системи обслуговування та прогнозувати і вибрати раціональний варіант підвищення якості системи ТО і Р силового електрообладнання ТП з урахуванням не тільки технічних, але й організаційно – правових та фінансово-економічних заходів. Формування на електрифікованих залізницях України системи управління якістю ТО і Р ТП дозволить підвищити ефективність і якість системи технічного обслуговування силового електрообладнання ТП, та забезпечити попередження виникнення або зниження важкості можливих відмов обладнання.

Ключові слова: електропостачання, система тягового електропостачання, тягова підстанція, технічний стан обладнання, ТО і Р, експертна інформація, нечіткі множини, лінгвістичні змінні.

УДК 621.331: 621.311.4

А. А. МАТУСЕВИЧ (ДНУЖТ)

Каф. «Електроснабження залізничних доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056)793 19 17, ел. пошта: al_m0452@meta.ua, ORCID: 0000-0002-2174-7774

МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Разработка методики повышения качества системы ТО и Р основного электрооборудования ТП СТЭ в условиях неопределенности эксплуатации на основе экспертной информации. Для решения поставленной задачи были использованы основные положения теории нечетких множеств и лингвистической переменной. Оценка качества системы ТО и Р ТП СТЭ осуществлялась на примере обслуживания силового трансформатора ТДТН - 25000 / 150-70 У1 ТП постоянного тока. Анализ существующего многообразия подходов разработки современных методов совершенствования системы ТО и Р, позволяет сделать вывод, решение проблемы повышения качества системы достигается путем решения индивидуальных задач повышения эксплуатационной надежности силового электрооборудования ТП в следующих основных взаимосвязанных направлениях: техническом, экономическом и организационном. Для решения задачи повышения качества системы ТО и Р ТП принято перспективное направление для решения прикладных задач, это экспертная начальная информация с использованием лингвистического подхода на базе теории нечетких множеств и лингвистической переменной. Определена относительная важность показателей направлений повышения качества системы обслуживания трансформатора ТДТН-25000 / 150-70 У1 ТП постоянного то-

© Матусевич О. О., 2015

ка. Предложена методика определения альтернативных вариантов повышения качества обслуживания силового трансформатора ТДТН-25000 / 150-70 У1 ТП с учетом относительной важности направлений системы ТО и Р с целью избрания лучшего варианта повышения качества системы. В статье получил дальнейшее развитие метод системного подхода по повышению качества функционирования системы ТО и Р силового электрооборудования тяговой подстанции в условиях неопределенности на основе экспертной информации с учетом важности показателей. Данный метод позволяет проводить экспертную оценку состояния системы обслуживания и прогнозировать и выбирать оптимальный вариант повышения качества системы ТО и Р силового электрооборудования ТП с учетом не только технических, но и организационно - правовых и финансово-экономических мероприятий. Формирование на электрифицированных железных дорогах Украины системы управления качеством ТО и Р ТП позволит повысить эффективность и качество системы технического обслуживания силового электрооборудования ТП, и обеспечить предупреждение возникновения или снижение тяжести возможных отказов оборудования.

Ключевые слова: электроснабжение, система тягового электроснабжения, тяговая подстанция, техническое состояние оборудования, ТО и Р, экспертная информация, нечеткие множества, лингвистические переменные.

Внутренний рецензент *Костин Н. О.*

Внешний рецензент *Хворост Н. В.*

UDC 621.331: 621.311.4

О. О. MATUSEVYCH (DNURT)

Department of Power Supply, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, tel.: +38 (056)793 19 17, e-mail: al_m0452@meta.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-2174-7774

METHODOLOGY OF IMPROVING THE QUALITY THE SYSTEM OF MAINTENANCE AND REPAIR THE ELECTRICAL EQUIPMENT OF TRACTION SUBSTATION

Development of methods to improve the quality of M and R main electrical TS operating in conditions of uncertainty on the basis of expert information. To solve this problem have been used basic tenets of the theory of fuzzy sets and linguistic variable. Assessment of the quality of M and R TS carried out by the example of the power of service TDTN - 25000 / 150-70 U1 TA DC. Analysis of the existing diversity of approaches development of modern methods of improving the system of M and R, allows you to conclude a solution to improve the quality of the system is achieved by solving individual problems increase reliability of electric power transformer substation in the following main interrelated areas: technical, economic and organizational. To solve the problem of improving the quality of M and R TS made a promising direction for applications, the initial information is an expert using a linguistic approach based on the theory of fuzzy sets and linguistic variable. It determines the relative importance of the indicators towards improving the quality of service TDTN-25000 / 150-70 U1 TA DC. The technique of definition of alternatives to improve the quality of service of the power transformer TDTN-25000 / 150-70 U1 TA, given the relative importance of the areas of M and R to elect the best option to improve the quality of the system. The article has been further development of the method of a systematic approach to improve the quality of the system M and R power electric traction substation in the face of uncertainty on the basis of expert information with regard to the importance of indicators. This method allows for an expert assessment of the service system and to predict and select the best option to improve the quality of M and R power electric transformer substations taking into account not only technical but also organizational - legal, financial and economic activities. Formation of the electrified railways of Ukraine quality management system M and R TS will improve the efficiency and quality of maintenance of electric power transformer substation, and to prevent the occurrence or reduce the severity of possible equipment failures

Keywords: electricity, traction power supply system, traction substation, the technical condition of equipment, M and R, expert information, fuzzy sets, linguistic variables.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Khvorost M. V.*

О. О. АЗЮКОВСЬКИЙ (ДЕРЖАВНИЙ ВНЗ «НГУ»)

Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 49000, м. Дніпропетровськ, пр. Карла Маркса, 19, тел. +380562 47 23 85, ел.пошта: azalex@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1901-4333

ЗМІНА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПІДЗЕМНОГО МЕТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДУ ПІД ВПЛИВОМ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ СКЛАДОВОЇ НАПРУГИ СТАНЦІЙ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ

Вступ

Трубопровідний транспорт є найбільш ефективним для транспортування значних об'ємів сировини на великі відстані [1]. Природний газ є важливою складовою енергетичної системи України, яка має одну з найбільш розгалужених трубопровідних систем в Європі. Понад 90 відсотків цієї системи складають підземні металеві трубопроводи. Забезпечення транспортування енергетичної сировини без втрат є важливою задачею. Неконтрольовані витоки природного газу, аміаку, нафти окрім фінансових збитків несуть значні екологічні ризики. Мінімізацію втрат забезпечує цілісність трубопроводу, як елемента системи транспортування. Порушення цілісності металевого трубопроводу значною мірою зумовлено електрохімічною корозією. Зниження електрохімічних корозійних процесів забезпечується системою електрохімічного захисту від корозії підземних металевих трубопроводів. До цієї системи, в якості активних елементів входять станції електрохімічного (катодного) захисту (СКЗ). СКЗ створюють захисний потенціал на трубопроводі шляхом формування сталого напруги певної величини. Це зумовлює таке поле струмів в ґрунті, що перешкоджає стіканню струмів з трубопроводу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В Україні також є розвинена мережа залізничного електрифікованого транспорту [1,6]. Електротехнічна система залізничного транспорту для забезпечення живлення локомотивів в якості зворотного дроту використовує рейкову колію. Забезпечення теоретично мінімального опору на практиці не є можливим, що зумовлює стікання струму з рейок до ґрунту. Все це ускладнює поле струмі в навколишньому середовищі та зумовлює коливання захисного потенціалу за довжиною підземного трубопроводу [3-5]. Підвищення якості захисту підземного металофонду забезпечується використанням СКЗ нового схемотехнічного рішення [1]. До

такого відносяться використання високочастотних інверторів струму (напруги), що значно покращує не тільки масо-габаритні показники, а й забезпечує широкі регульовальні властивості СКЗ. Водночас, перехід до високочастотного перетворення електричної енергії вносить певні особливості у роботу електротехнічного комплексу системи електрохімічного захисту від електрохімічної корозії підземних металевих трубопроводів [2].

Матеріали досліджень

Розглянемо електротехнічну систему електрифікованого рейкового транспорту та підземний металевий трубопровід, що знаходиться під захистом СКЗ. Електричними параметрами такої системи є [2,6]:

R_p^r – перехідний опір рейкової колії;

R_p^t – перехідний опір підземного металевого трубопроводу;

Z_t – повний опір підземного металевого трубопроводу;

Z_{kd} – коефіцієнт, що враховує вплив контактного дроту на рейкову колію;

R_{tg} – перехідний опір між підземним металевим трубопроводом та умовною точкою виміру безпосередньо поблизу трубопроводу;

$\alpha_t = \sqrt{\frac{Z_t}{R_p^t}}$ – стала розповсюдження підземного металевого трубопроводу;

$\alpha = \sqrt{\frac{Z_p}{R_p^r}}$ – стала розповсюдження рейкової колії;

σ – провідність ґрунту.

Наведені електричні параметри визначаються на основі первинних параметрів електротехнічної системи, що розглядається:

σ_p – питома провідність рейок;

σ_t – питома провідність підземного металевого трубопроводу;

R_t^t – опір ізоляційного слою підземного металевого трубопроводу;

R_t^f – опір баласту рейкової колії;

μ_r – магнітна проникність рейок;

μ_t – магнітна проникність підземного металевого трубопроводу;

f – частота електромагнітного поля.

Повний опір трубопроводу залежить від значенні поглинання в матеріалі провідника (трубопроводу) $\gamma_t = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}}$. Для матеріалів, що

як зазвичай використовуються при виготовленні металевих труб прийємо:

$$\sigma_t = 7.7 \cdot 10^6 \text{ } 1/\text{ohm} \cdot \text{m}, \rho_t = 0.13 \text{ ohm} \cdot \text{mm}^2/\text{m},$$

$$\mu = 4\pi 10^{-7} 200, \omega = 100\pi \text{ - промислова частота.}$$

Коефіцієнт згасання для трубопроводу за таких

$$\text{умов дорівнює: } \gamma_t = \sqrt{\frac{61600 \cdot \pi^2}{2}} = 551 \text{ } 1/\text{m}.$$

Прийнявши мінімальну товщину стінок трубопроводу $h_t = 0.003 \text{ mm}$ визначимо коефіцієнт $\gamma_t \cdot h_t \geq 1.65$.

Повний опір трубопроводу визначається виразом:

$$Z_t = Z_{po} + \tilde{Z}_t \quad (1)$$

Поверхневий опір трубопроводу визначається згідно виразу:

$$Z_{po} = \frac{(1-i)\gamma_t}{2\pi r_t \sigma_t} \text{ctg}((1-i)\gamma_t h_t) \quad (2)$$

Опір трубопроводу, що зумовлено впливом навколишнього середовища (грунту) визначається як:

$$\tilde{Z}_t = \frac{\mu\omega}{8} + \frac{i\mu\omega}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t} \quad (3)$$

де $\mu = 4\pi 10^{-7}$ - магнітна проникність ґрунту,

$\gamma = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$ - коефіцієнт згасання в ґрунті, σ - провідність ґрунту. Враховуючи вираз, що визначає погонний опір трубопроводу сталому струму:

$$R_t^0 = \frac{1}{2\pi h_t r_t \sigma_t} \quad (4)$$

запишемо:

$$Z_t = R_t^0 \theta \left((1-i)\gamma_t h_t \right) + \frac{\omega\mu}{8} + \frac{i\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{1.3}{\gamma r_t} \quad (5)$$

де

$$\begin{aligned} \theta &= \theta'(\gamma_t h_t) + i\theta''(\gamma_t h_t) = \\ &= (1-i)\gamma_t h_t \times \text{ctg}(1-i)\gamma_t h_t \end{aligned} \quad (6)$$

Запишемо вирази для обчислення θ' та θ'' (комплексні функції безрозмірного параметра $\gamma_t h_t$):

$$\theta' = \gamma_t h_t \frac{\text{sh}2\gamma_t h_t + \sin 2\gamma_t h_t}{\text{ch}2\gamma_t h_t - \cos 2\gamma_t h_t}, \quad (7)$$

$$\theta'' = \gamma_t h_t \frac{\text{sh}2\gamma_t h_t - \sin 2\gamma_t h_t}{\text{ch}2\gamma_t h_t - \cos 2\gamma_t h_t} \quad (8)$$

За умови, коли виконується вираз $\gamma_t h_t = 0$ то $\theta' = 1, \theta'' = 0$ (випадок для сталого струму). У випадку, коли $\gamma_0 h > 2$ то $\theta' = \theta'' = \gamma_t h_t$ (полий провідник розглядається як суцільний, через вплив скін ефекту коли глибина скінпрошарку менше ніж товщина стінок трубопроводу).

Шляхом введення до виразу (5) ω, μ , враховуючи вираз (6) отримаємо вираз для визначення повного опору трубопроводу:

$$Z_t = R_t' + iR_t'' \quad (9)$$

$$R_t' = R_t^0 \theta' + 4.9 \cdot 10^{-5} \quad (10)$$

$$R_t'' = R_t^0 \theta'' + 6.3 \cdot 10^{-5} \ln \frac{93}{\sqrt{\sigma_t} r_t} \quad (11)$$

де R_t^0 - погонний опір трубопроводу; σ - провідність ґрунту; r_t - радіус труби; R_t' - активний опір трубопроводу змінному струму; R_t'' - реактивний опір трубопроводу змінному струму.

Вираз (10) містить складові, що залежать від частоти струму. На активний опір трубопроводу значною мірою впливає не тільки частота але й радіус трубопроводу (рис. 1). Трубопроводі мережі України крім трубопроводів високого та середнього тиску містять мережі низького тиску, які складаються з труб невеликого діаметру.

Збільшення діаметру трубопроводу зумовлює зменшення активного опору. Починаючи з радіусу $r_t = 0.4 \text{ m}$ спостерігається помітне збільшення активного опору. Використання труб невеликого діаметру є типовим для га-

з розподільчих мереж низького тиску, до якого підключені кінцеві споживачі. Активний опір такого сегменту трубопроводів найбільшою мірою залежить від частоти (рис.1). Використання в станціях катодного захисту перетворювачів електричної енергії, що зорганізовані

на сучасних схемотехнічних рішеннях зумовлює наявність високочастотних сигналів на їх виходу [2]. Це явище викликане наявністю інвертора, що забезпечує роботу високочастотного трансформатора.

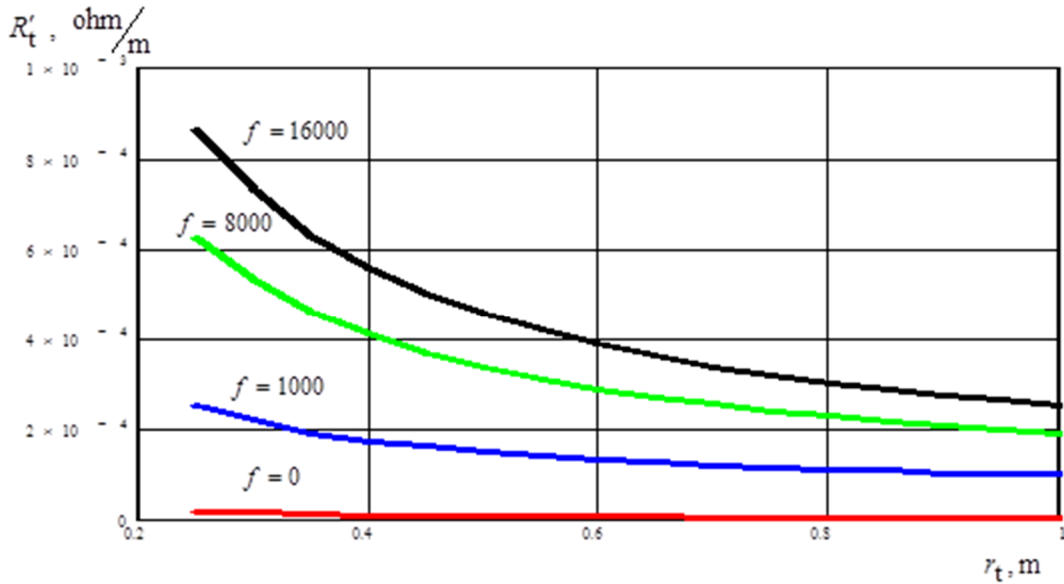


Рис. 1. Залежність активного опору трубопроводу від його радіуса

До того ж, слід розрізнити частоту сигналу на виході трансформатора та частоту комутації силових ключів, яка залежить від законів керування ключами. Формування захисного потенціалу підземного металевого трубопроводу СКЗ з високочастотним перетворювачем відбувається за інших умов, ніж для випадку класичних випрямлячів напруги промислової частоти

(рис.2). Трубопроводи невеликого діаметру (до 0.25m) характеризуються більшою залежністю від частоти ніж магістральні трубопроводи. Реактивний опір трубопроводу (11) також значною мірою залежить від частоти пульсацій випрямленої напруги для труб діаметром до 0.5m (рис. 3).

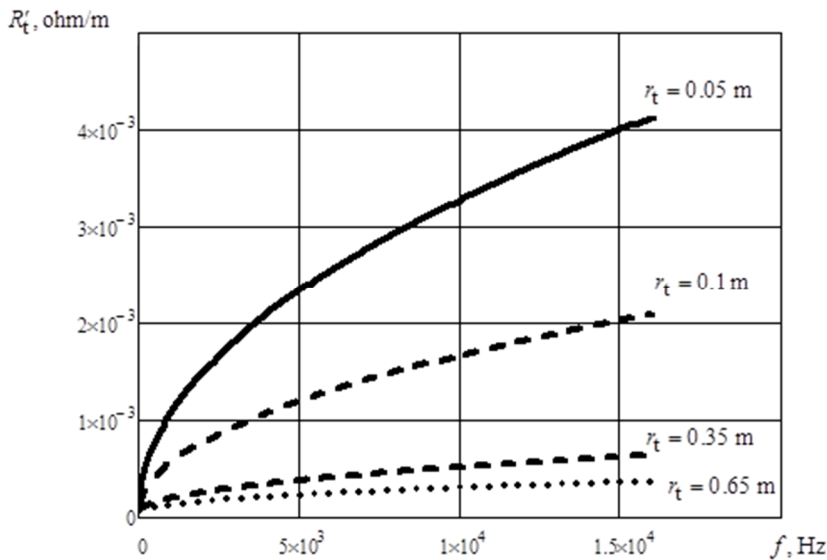


Рис. 2. Залежність активного опору трубопроводу від частоти струму

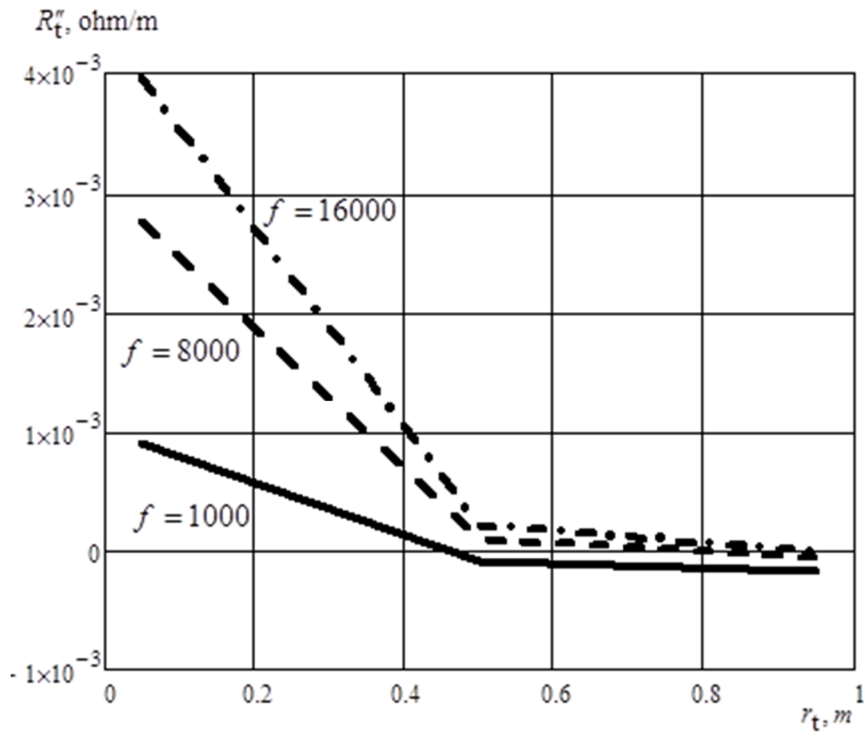


Рис. 3. Залежність реактивного опору трубопроводу від його радіусу

Повний опір трубопроводу (9) має аналогічну залежність від частоти пульсацій випрямленої напруги та радіусу трубопроводу. Слід зауважити, що збільшення опору трубопроводу зумовлює збільшення струмів, що стікають. Реактивний опір приблизно на порядок більше, ніж активний опір, що характеризує об'єкт навантаження станцій катодного захисту. Він також має тенденцію до збільшення зі зменшенням діаметру трубопроводів й зростанням частоти напруги, й має найбільше значення для діаметрів, що властиві розподільчим мережам (менше ніж 0.5 m).

Повний опір трубопроводу визначається виразом, що містить модуль та фазу [6]:

$$Z_t = |Z_t| e^{i\phi_t} \quad (12)$$

Модуль повного опору трубопроводу на основі (10-11):

$$|Z_t| = \sqrt{(R_t')^2 + (R_t'')^2} \quad (13)$$

Фаза повного опору трубопроводу визначається згідно виразу:

$$\phi_t = \text{arctg}\left(\frac{R_t''}{R_t'}\right) \quad (14)$$

Прийнято вважати, що для випадку промислової частоти 50 Hz значення фази повного опору змінюється незначною мірою та належить діапазону $[75^\circ \div 83^\circ]$. Під час розрахунків значення фази приймається фіксованою, що впливає на розрахунок сталої розповсюдження трубопроводу [4,6]. У випадку, коли частота комутації ключів починається від 1000 Hz й сягає 16000 Hz й вище, твердження про незмінність фази повного опору є некоректним (рис. 4).

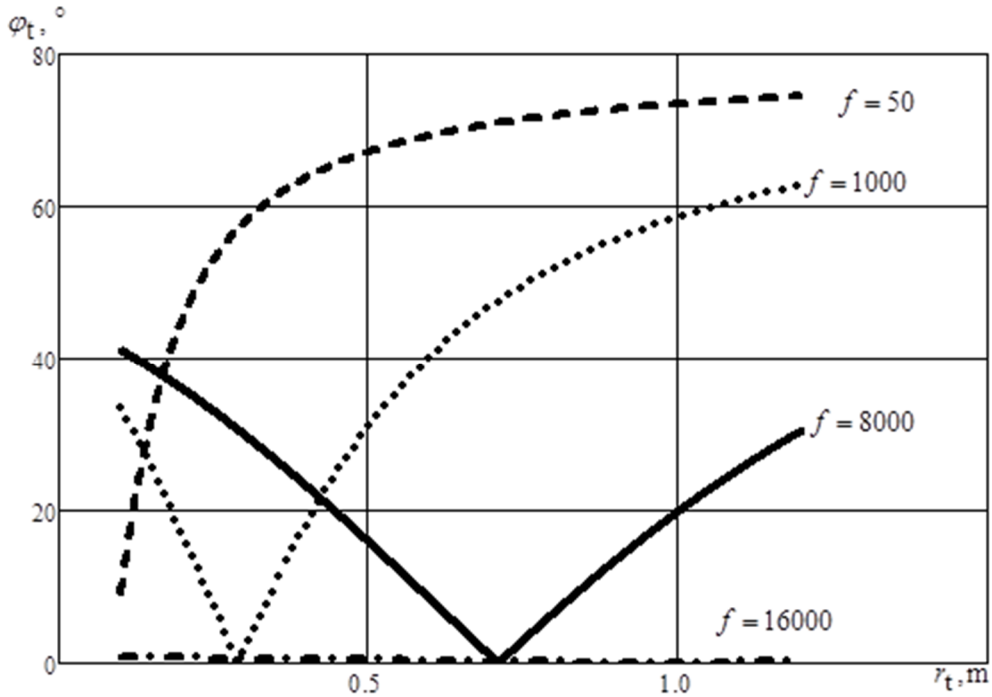


Рис. 4. Залежність фази повного опору трубопроводу від його радіусу

Дійсно, для частоти 50Hz починаючи з радіусу трубопроводу понад 0.08m значення фази повного опору стрімко зростає й набуває практично сталого значення з діаметру трубопроводу 0.5 m. Інша залежність спостерігається для частот від 1000Hz (рис. 4). Так, для частоти 1000Hz для діаметрів трубопроводу від 0.1m до 0.28m спостерігається зменшення фази повного опору практично до нульового значення. У подальшому, зі зростанням діаметру трубопроводу фаза повного опору також зростає й сягає діапазону значень $[75^\circ \div 83^\circ]$. Для частоти 8000Hz зменшення фази спостерігається вже до 0.75m. Частота напруги у 16000Hz взагалі починається зі значення у 0.9° для мінімальних значень трубопроводу й зменшується до нульового значення при радіусі, що дорівнює 0.95m, після чого фаза повного опору зростає (рис. 4,5).

Наведені залежності є основою для побудови нових підходів до формування захисного потенціалу підземного металевого трубопроводу враховуючи наявність у електротехнічній системі «СКЗ – підземний трубопровід – ґрунт – залізнична колія» нового частотного складу сигналів, що утворюються внаслідок використання сучасних схемотехнічних рішень. Крім

того, врахування високочастотної складової сигналу на виході СКЗ впливає на алгоритм визначення сталої розповсюдження трубопроводу під час розрахунку системи електрохімічного захисту підземних металевих трубопроводів.

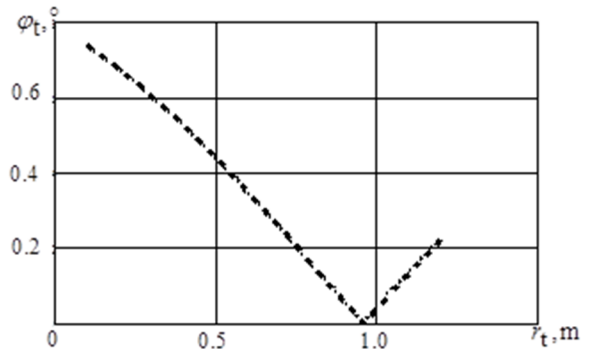


Рис. 5. Залежність фази повного опору трубопроводу від його радіусу для частоти напруги 16000 Hz

Відомо [5,6], що перехідний опір визначається з врахуванням опору ізоляційного покриття трубопроводу та перетинного опору:

$$R_t^p = R_t^{iz} + R_t^l \quad (15)$$

де R_t^{iz} - опір ізоляційного покриття трубопроводу.

Перетинний опір трубопроводу визначається як:

$$R_t^1 = \frac{1}{\pi\sigma} \ln \frac{1.12}{\gamma\sqrt{r_t H}} \quad (16)$$

де H - глибина залягання трубопроводу,

$\gamma = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$ - коефіцієнт згасання в ґрунті.

Перетинний опір трубопроводу від його радіусу має аналогічну до рис. 1 залежність. Також, він є залежним від частоти напруги на виході з СКЗ (рис. 6). Спостерігається тенденція до збільшення опору зі зменшенням радіусу трубопроводу та частоти напруги.

Стала розповсюдження підземного металевого трубопроводу $\alpha_t = \sqrt{\frac{Z_t}{R_p^t}}$ на відміну від

класичного випадку з використанням промислової частоти, за іншими частотними діапазонами має інші значення для малих радіусів трубопроводу (рис. 7).

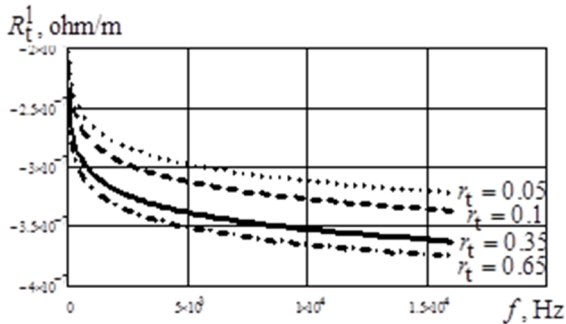


Рис. 6. Залежність повздовжнього опору трубопроводу від частоти

$$L_t = \frac{1}{(2\pi f)^2} \frac{1}{2\pi h_t r_t \sigma_t} \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}} h_t \cdot \frac{sh 2\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}} h_t - \sin 2\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}} h_t}{ch 2\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}} h_t - \cos 2\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_t}{2}} h_t} + \frac{6.3}{2\pi f} 10^{-5} \ln \left(\frac{93}{\sqrt{\sigma_t r_t}} \right) \quad (17)$$

Характер зміни індуктивності відрізняється для різних діаметрів трубопроводів та частот (рис. 8). Трубопроводи великого діаметру (магістральні, середнього та низького тиску) мають значення індуктивності близькі оди до од-

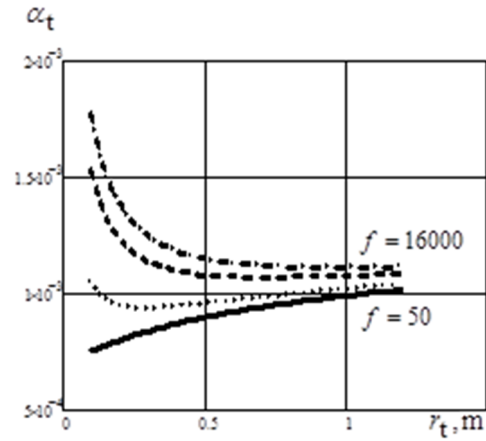


Рис. 7. Залежність сталої розповсюдження трубопроводу від його радіусу

значення сталої розповсюдження для височастотного діапазону відрізняється від значень, розраховуються для 50Hz (рис. 7), особливо для діаметрів трубопроводу $[0.25 \div 0.5]$ m. Це пояснюється змінами в значеннях фази повного опору трубопроводу (14), які для височастотного діапазону не можуть бути прийнятими такими, що не змінюються (рис. 4). Важливим параметром схеми заміщення трубопроводної мережі є індуктивність (рис. 8), яка визначається з врахуванням (9-11):

ного. Для трубопроводів з радіусом до 0,25m (розподільчі мережі низького тиску) цей параметр коливається в значних межах.

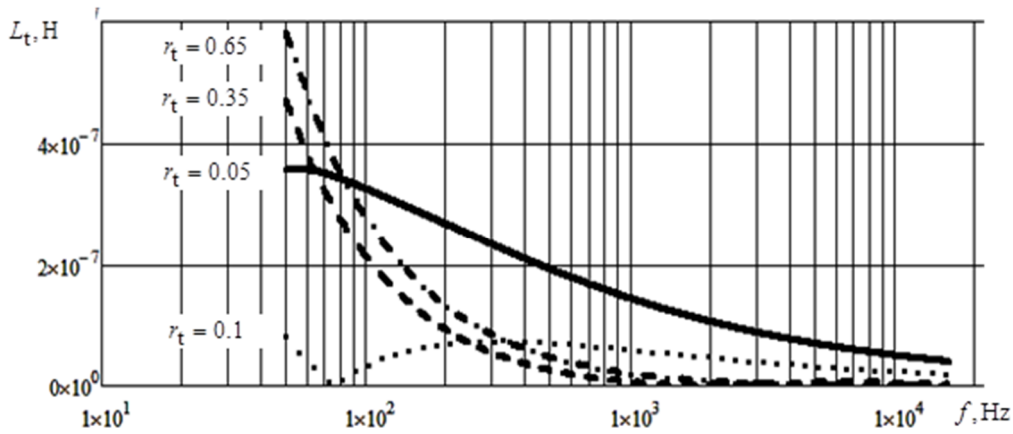


Рис. 8. Індуктивність трубопроводу в залежності від частоти при фіксованих діаметрах

Згідно (18) здійснивши аналіз зміни сталої такої частотний діапазон вихідної напруги розповсюдження трубопроводу визначається СКЗ, що забезпечує її найменше значення α_t .

$$\alpha_t = \frac{\frac{1}{2\pi h_t r_t \sigma_t} \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} \frac{sh 2sh 2\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t + \sin 2\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t}{ch 2\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t - \cos 2\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t} + 4.9 \cdot 10^{-5} + R_t^{iz} + \frac{1}{\sigma \pi} \ln \frac{1.12}{\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} \sqrt{r_t H}}}{i \left(\frac{1}{2\pi h_t r_t \sigma_t} \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t \frac{sh 2sh 2\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t - \sin 2\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t}{ch 2\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t - \cos 2\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} h_t} + 6.3 \cdot 10^{-5} \ln \frac{93}{\sqrt{\sigma_t t_t}} \right) + R_t^{iz} + \frac{1}{\sigma \pi} \ln \frac{1.12}{\sqrt{\frac{\omega \mu \sigma_t}{2}} \sqrt{r_t H}}} \quad (18)$$

Розрахунок параметрів підземного трубопроводу для сталого струму у сучасних умовах є неповною мірою інформативним та таким, що відповідає дійсності, оскільки сучасні поля струмів, що блукають та сигнали на виході СКЗ (на відстані декількох метрів від точки підключення до об'єкту, що захищається) містять значну змінну складову. Це змінює умови функці-

онування електротехнічної системи електрохімічного захисту підземних трубопроводів від корозії.

Електротехнічні параметри рельсової мережі розраховуються подібно до аналогічних параметрів трубопроводу. Повний опір подібно до (9) визначається як

$$Z_{rp} = R'_{r0} + iR''_{r0} = \left(\frac{\gamma_r}{2\pi r_q^r \sigma_r} + 4.9 \cdot 10^{-5} \right) + \left(\frac{\gamma_r}{2\pi r_q^r \sigma_r} + 6.3 \cdot 10^{-5} \ln \left(\frac{93}{\sqrt{\sigma_r^r}} \right) \right) \quad (19)$$

де $\sigma_r = \frac{10^6}{\rho_r} = \frac{10^6}{0.21}$ провідність ґрунту, r_q^r еквівалентний радіус рейки.

Зважаючи на те, що залізнична рейка на відміну від трубопроводу, уявляє собою суцільний металевий провідник з еквівалент-

ним радіусом, що належить діапазону $[0.045 \div 0.055] m$, розглянемо вплив частоти напруги на величину повного опору та його фази (рис. 9, 10).

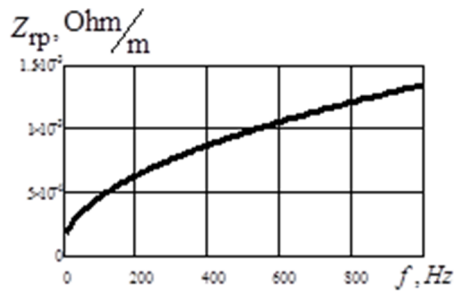


Рис. 9. Повний опір одношляхової колії в залежності від частоти

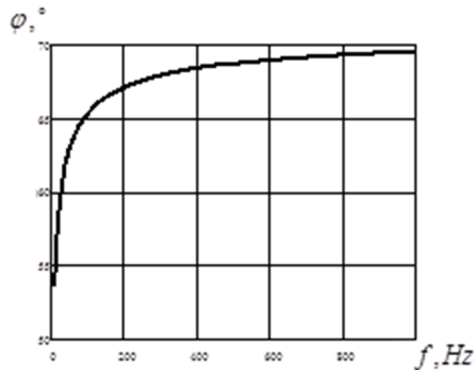


Рис. 10. Фаза повного опору одношляхової колії в залежності від частоти

Повий опір одноколіїної рейкової колії також як й у випадку з підземним металевим трубопроводом (рис. 2) є таким, що зростає із збільшенням частоти, що в свою чергу зумовлює збільшення струмів, які стікають з рейок до ґрунту й формують поле струмів, що блукають. Фаза повного опору (рис. 10) найбільш помітно

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aziukovskyi A. The electrochemical cathodic protection stations of underground metal pipelines in uncoordinated operation mode / A. Aziukovskyi // CRC Press. Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, London, UK 2013– P. 47 – 55.
2. Азюковський О.О. Формування високочастотним інверторним випрямлячем захисного потенціалу підземного сталевого трубопроводу. / О.О.Азюковський // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. 91. – С. 37-41.
3. Бешта О.С. Сумісна робота станцій катодного захисту підземних металевих трубопроводів від електрхімічної корозії / О.С. Бешта, О.О.Азюковський // Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали наук.-техн. конф. — Севастополь: Сев. НТУ, 2013. — С. 17-19.
4. Вербенць Б. Я. Безконтактний метод і прилади для контролю протикорозійного захисту підземних

змінюється в діапазоні частот від 50 Hz до 600 Hz, після чого сягає рівня $69 \div 73$ Hz де й лишається на незмінному рівні, що відповідає прийнятим під час розрахунку параметрам [4,6].

Висновки

Наведені результати аналізу впливу частот вихідної напруги станцій катодного захисту підземного металевого трубопроводу на електротехнічні параметри системи «СКЗ – підземний трубопровід – ґрунт – залізнична колія» свідчать про можливість побудови нового підходу до процесу формування захисного потенціалу шляхом врахування змін у величинах індуктивності, сталої розповсюдження (опосередкованої характеристики струмів, стікання з трубопроводу), частотного впливу на об'єкт, що захищається. Вказаний підхід найбільшою мірою є ефективним при використанні його у розподільчих газотранспортних мережах з трубопроводами невеликого діаметру, які є такими, що домінують за кілометражем у загальній газотранспортній системі України. До того ж, трубопроводи низького тиску розташовані в місцях, в яких є активними струми, що блукають, які зумовлені техногенними факторами.

Для рейкових колій, вплив високочастотної складової є помітним тільки під час формування повного опору рейкової колії. Фаза повного опору є такою, що змінюється у відносно низькому діапазоні частот, що викликає необхідність врахування цього явища під час розрахунку корозійної активності середовища.

REFERENCES

1. Aziukovskyi A. The electrochemical cathodic protection stations of underground metal pipelines in uncoordinated operation mode / A. Aziukovskyi // CRC Press. Balkema is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa business, London, UK 2013– P. 47 – 55.
2. Azyukovskiy O. Formuvannia vysokochastotnym invertornym vypryamlyachem zakhysnoho potentsialu pidzemnoho stalevoho truboprovodu. [Formation of high-frequency inverter rectifier protective potential of underground steel pipeline]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka: nauk. – tekhn. zb.* [Mining Electromechanics and Automation: Science.], 2013. Vol. 91, pp. 37-41.
3. Beshta A. Sumisna robota stantsij katodnoho zakhystu pidzemnykh metalevykh truboprovodiv vid elektrokhimichnoi korozii [Joint work stations of cathodic protection of underground metal pipelines from electrochemical corrosion]. *Problemy pidvyschennia efektyvnosti elektromekhanichnykh peretvorivachiv v elektroenerhetychnykh systemakh: Materialy nauk.-tekhn. konf.* [Prob-

трубопроводів: дис. кандидата технічних наук: 05.11.13 / Вербенець Богдан Ярославович. – Л., 2011. – 106 с.

5. Скляр С. А. Математические модели и информационные технологии автоматизированного управления системами противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов: дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.13.06/ Скляр Станислав Александрович.- Х., 2002 - 168с.

6. Стрижевский И. В. Теория и расчет влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения./ И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1967 – 227с.

Надійшла до друку 01.12.2012.

lems efficiency electromechanical converters in electric power systems, scientific-technical materials. Conf.]. Sevastopol, 2013, pp. 17-19.

4. Verbenets B. Ya. *Bezkontaktnyj metod i pryklady dlia kontroliu protykorozijnoho zakhystu pidzemnykh truboprovodiv* PhD, Diss. [Contactless method and instruments for monitoring corrosion protection of underground pipelines. PhD, Diss.]. Lviv., 2011, 106 p.

5. Skliarov S. A. *Matematycheskye modely i informatsyonnye tekhnolohyy avtomatyzirovannoho upravleniya systemamy protyvorozoyonnoj zaschyty mahystral'nykh truboprovodov* PhD, Diss. [Mathematical models and information technology of automated control systems of corrosion protection of pipelines. PhD, Diss.] Kharkiv., 2002, 168 p.

6. Stryzhevskiy I. V. *Teoriya y raschet vliyaniya elektrifytsirovannoy zheleznoj dorohy na podzemnye metallicheskiye sooruzheniya*. [Theory and calculation of the impact of electrified railway on underground metallic structures]. Moskva, Mechanical Engineering Publ., 1967, 227 p.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Муха А. М.*

Трубопровідний транспорт є найбільш ефективним для транспортування значних об'ємів природного газу. Електрохімічна корозія є одним з головних чинників руйнування цілісності підземного металевго трубопроводу, якій протидіє система електрохімічного (катодного) захисту. Метою та завданням роботи є аналіз процесів змін електротехнічних параметрів підземного металевго трубопроводу під впливом високочастотної складової напруги станцій катодного захисту (СКЗ).

Підвищення якості захисту підземного металофонду забезпечується використанням СКЗ нового схемотехнічного рішення з ланками високочастотного перетворення сигналу. Електротехнічні параметри системи можуть змінюватися в залежності від частоти сигналів на її вході. Методика, що використовується під час розгляду процесів полягає у математичному аналізі параметричних залежностей з використанням графічної ілюстрації. Основний матеріал статті містить аналіз математичних виразів, що описують вплив високочастотної складової напруги на виході СКЗ на об'єкт, що підлягає захисту.

Наведені результати аналізу впливу частот вихідної напруги станцій катодного захисту підземного металевго трубопроводу на електротехнічні параметри системи «СКЗ – підземний трубопровід – ґрунт – залізнична колія» свідчать про можливість побудови нового підходу до процесу формування захисного потенціалу шляхом врахування змін у величинах індуктивності, сталої розповсюдження (опосередкованої характеристики струмів, стікання з трубопроводу). Наукова новизна полягає у обґрунтованні можливості, шляхом вибору відповідної частоти сигналу на виході станцій катодного захисту, формування таких параметрів схеми заміщення підземного металевго трубопроводу, за яких стікання струмів з трубопроводу є мінімальним. Практичне значення полягає у отриманні залежностей параметрів електротехнічної системи від частоти сигналу, що дозволяє розраховувати елементи СКЗ.

Високочастотні сигнали на виході станцій катодного захисту зумовлюють зміни електротехнічних параметрів, що впливають на процес формування захисного потенціалу на підземному металевому трубопроводі.

Ключові слова: станція катодного захисту, підземний металевий трубопровід, електрохімічна корозія, повздовжній опір, фаза повздовжнього опору.

УДК 652.1:586.24

А. А. АЗЮКОВСКИЙ (ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВУЗ «НГУ»)

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», 49000, г. Днепропетровск, пр. Карла Маркса, 19, тел. +380562 47 23 85, эл.почта: azalexs@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1901-4333

ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДЗЕМНОГО СТАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ СТАНЦИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ

© Азюковський О. О., 2015

Трубопроводный транспорт является наиболее эффективным для транспортировки значительных объемов природного газа. Электрохимическая коррозия является одним из главных факторов нарушения целостности подземного металлического трубопровода. Коррозии противодействует система электрохимической (катодной) защиты. Целью и задачей работы является анализ процессов изменения электротехнических параметров подземного металлического трубопровода под влиянием высокочастотной составляющей напряжения станций катодной защиты (СКЗ).

Повышение качества защиты подземного металлофона обеспечивается использованием СКЗ нового схемотехнического решения со звеньями высокочастотного преобразования сигнала. Электротехнические параметры системы могут меняться в зависимости от частоты сигналов на ее входе. Методика, используемая при рассмотрении процессов, заключается в математическом анализе параметрических зависимостей с использованием графических иллюстраций. Основной материал статьи содержит анализ математических выражений, описывающих влияние высокочастотной составляющей напряжения на выходе СКЗ на объект, подлежащий защите.

Приведенные результаты анализа влияния частот выходного напряжения СКЗ подземного металлического трубопровода на электротехнические параметры системы «СКЗ - подземный трубопровод - почва - железнодорожная колея» свидетельствуют о возможности построения нового подхода к процессу формирования защитного потенциала путем учета изменений в величинах индуктивности, постоянной распространения (опосредованной характеристики токов стекания с трубопровода). Научная новизна заключается в обосновании возможности, путем выбора соответствующей частоты сигнала на выходе СКЗ, формирования таких параметров схемы замещения подземного металлического трубопровода, при которых стекания токов из трубопровода является минимальным. Практическое значение состоит в получении зависимостей параметров электротехнической системы от частоты сигнала, позволяет рассчитывать элементы СКЗ.

Высокочастотные сигналы на выходе станций катодной защиты обуславливают изменения электротехнических параметров, влияющих на процесс формирования защитного потенциала на подземном металлическом трубопроводе.

Ключевые слова: станция катодной защиты, подземный металлический трубопровод, электрохимическая коррозия, продольное сопротивление, фаза продольного сопротивления.

Внутренний рецензент *Сиченко В. Г.*

Внешний рецензент *Муха А. Н.*

UDC 652.1:586.24

O. O. AZIUKOVSKYI (NATIONAL MINING UNIVERSITY)

National Mining University, 49000, Dnipropetrovsk, 19, Karl Marks Str., tel. +380562 47 23 85, email: azalexs@mail.ru, ORCID: 0000-0003-1901-4333

CHANGING THE ELECTRICAL PARAMETERS OF UNDERGROUND STEEL PIPELINES UNDER THE INFLUENCE OF HIGH VOLTAGE COMPONENTS OF CATHODIC PROTECTION STATIONS

Pipeline transport is the most effective for transporting large volumes of natural gas. Electrochemical corrosion is one of the key factors destroying the integrity of underground of the metal pipelines. The corrosion process counteracts cathodic protection system. The purpose and objective of the article is to analyze the processes of change of electrical parameters of the underground metal pipelines, which is under the influence of part of high-frequency voltage of cathodic protection stations (CPS).

Improving the quality of protection provided by an underground pipeline, using the CPS with the new circuit solutions. These CPS units contain high-frequency signal conversion. Electrical parameters of the system may vary depending on the frequency of the signal at its input. The methodology, which is used in the analysis process, is the mathematical analysis of parametric dependencies with graphic illustrations. The main material of the article contains the analysis of mathematical expressions that describe the impact of high-frequency component of the output voltage CPS on the pipeline.

The results of analysis of influence of the frequency of the output voltage CPS of underground metal pipelines on the electrical parameters of the system "CPS - underground pipeline - soil - railway track" indicate the possibility of building a new approach to the formation of protective potential by taking into account changes in the values of inductance, the propagation constant. Scientific novelty consists in the justification opportunity, by selecting the appropriate frequency of the output signal CPS, make such the parameters of equivalent circuit of underground metal pipelines, which the provide the minimum currents. The practical significance is to provide a dependency the parameters of electrotechnical systems from the signal frequency. This allows you to calculate the elements of the CPS.

High-frequency signals at the output of cathodic protection stations cause changes in electrical parameters that affect the process of forming the protective capacity at an underground metal pipelines.

Keywords: cathodic protection station. underground metal pipeline, electrochemical corrosion, the longitudinal resistance, the phase of the longitudinal resistance.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Muha A. M.*

М. О. КОСТИН, А. М. МУХА, А. В. НІКІТЕНКО (ДНУЗТ)

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, к. 238, Дніпропетровськ, 49010, Україна, тел. +380563731537, e-mail: nkostin@ukr.net, andreemu@i.ua, nikitenko.diit@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0856-6397, 0000-0002-5629-4058, 0000-0002-6426-5097

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, РЕКУПЕРОВАНОЇ ЕЛЕКТРОВОЗАМИ ВЛ11М6 І ВЛ11М

Вступ

Ця робота являється продовженням і розвитком досліджень [1] з якості та спектрального складу рекуперованих напруги і струму на діючих ділянках магістральних залізниць.

Ступінь якості електричної енергії (ЯЕ) взагалі є важливою для її споживачів. Тому якість рекуперованої енергії треба аналізувати відносно точок 2-2' і 4-4' (рис.1). При цьому розглянемо два крайніх випадки.

Перший, коли вся енергія рекуперації споживається тяговими ЕРС, тоді треба аналізувати якість рекуперованої енергії відносно точок 2-2'. Другий – не вся енергія рекуперації споживається тяговим електрорухомим складом (ЕРС) і тоді її залишкову частину треба передати в ЛЕП зовнішнього електропостачання (і далі на районну підстанцію) шляхом перетворення її інверторними перетворювачами. В цьому випадку якість аналізується відносно точок 2-2' і 4-4'.

Як відомо, вимоги до якості електричної енергії на території України визначають стандартом ГОСТ 13109-97 «Електрична енергія. Електромагнітна сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення». В Російській Федерації до нього додається ще й ГОСТ Р 53333-2008 «Електрична енергія. Електромагнітна сумарність технічних засобів. Контроль якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення» [2]. В той же час, вимоги до якості електричної енергії в країнах ЄС більш жорсткіші: основний регламентуючий документ – це EN50160 – оцінка якості напруги; в США – IEEE Std. 1159-1995 «Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality» (Рекомендовані заходи по моніторингу якості електричної енергії). Важливим являється також розділ в стандарті NFPA 70B «Electrical Equipment Maintain» (Обслуговування електричного обладнання) [3-7].

ГОСТ 13109-97 включає одинадцять критеріїв для оцінки показників якості електричної

енергії. Він дозволяє чітко розподілити електричну енергію на ту, що відповідає нормам якості, та ту, яка цим нормам не відповідає. Ці критерії регламентують «нормально допустимі» та «гранично допустимі» значення показників якості електричної енергії, тобто допустимі відхилення напруги, частоти, гармонічного складу і т. д. від нормованих величин. Потрібно зазначити, що ГОСТ 13109-97 встановлює критерії та норми в електричних мережах систем електропостачання загального призначення змінного однофазного та трифазного струмів частотою 50 Гц. В той же час тягові двигуни ЕРС постійного струму, якими є електровози ВЛ11М6 і ВЛ11М, генерують електроенергію постійних напруги і струму. Таким чином постає питання, яким критеріям (показникам) повинна відповідати енергія рекуперації. Для цього частково скористаємося рекомендаціями, приведеними в [8,9], згідно яких для оцінки якості електроенергії в мережах постійного струму необхідно застосовувати такі критерії як відхилення і коливання напруги. До цих показників додаємо такі показники як імпульс напруги і тимчасова перенапруга, що приведені в ГОСТ 13109-97 (табл. 1).

Методи і прилади експериментальних досліджень

Для оцінки енергетичних і якісних показників енергії рекуперації, що надходить до тягової підстанції і далі інвертується і віддається в зовнішню мережу, було проведено часову реєстрацію напруг і струмів на тяговій підстанції (ТП) Воловець Львівської залізниці в режимі рекуперативного гальмування завантаженого електровоза ВЛ11М на ділянці Воловець-Батьово. ТП Воловець обладнана двома інверторами, один з яких розроблено фірмою ESTEL AS, тип И-ПТП-М2,0к-3,8к-50-12-УЗ, на якому і виконувався моніторинг. На рис. 2 приведена схема вимірювання напруги та струмів системи керування інвертором.

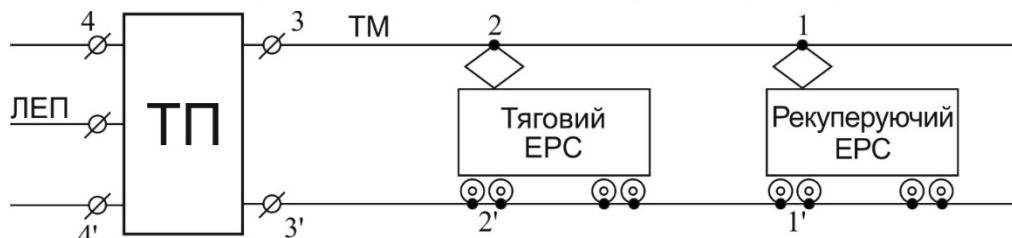


Рис. 1. Структурне розташування елементів електротяги на фідерній зоні в режимі рекуперації

Таблиця 1

Норми показників якості рекуперованої електроенергії

№ п/п	Властивості рекуперованої електроенергії	Показники якості рекуперованої енергії	Норми ЯЕ		Гранична відносна похибка вимірювання
			Нормально допустимі	Гранично допустимі	
1	Відхилення напруги	Усталене відхилення напруги $\delta U_y, \%$	± 5	± 10	---
2	Коливання напруги	Розмах зміни напруги $\delta U_t, \%$	---	---	± 8
3	Імпульс напруги	Імпульсна напруга $U_{\text{імп}}, \text{кВ}$	---	---	± 10
4	Тимчасова перенапруга	Коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}}U, \text{в.о.}$	---	---	± 10

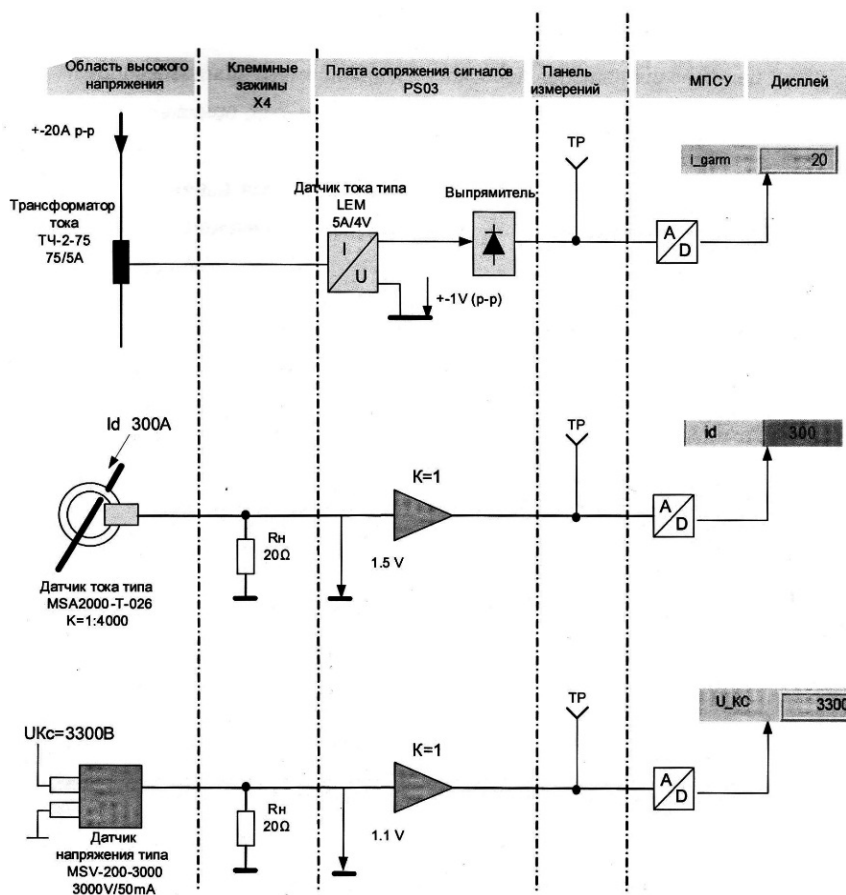


Рис. 2. Схема підведення вимірюваних струму та напруги до системи керування інвертором ТП Воловець Львівської залізниці

Система керування інвертором з достатньою точністю реєструє всі показники роботи інвертора і найголовніші – напругу і струм в режимі рекуперативного гальмування з боку шини 3,3 кВ постійного струму.

Досягти більш точних результатів дозволяє система виміру з використанням персонального комп'ютера (ПК) та цифрових осцилографів, які вмикались до силової системи через вимірювальні трансформатори та датчики напруги та струму. Через ці ж трансформатори та датчики отримує дані система керування інвертором. Вимірювання здійснювали з обох сторін: а) зі сторони 35 кВ змінного струму, де в режимі рекуперативного гальмування ЕРС було зареєстровано інвертований струм та напругу; б) зі сторони 3,3 кВ, де було зареєстровано струм та напругу на шинах підстанції в режимі рекуперативного гальмування ЕРС. Для реєстрації було використано два цифрових осцилографа: Hantek DSO1200 та АКТАКОМ АСК-3106. Процес вмикання та перевірки осцилографів супроводжувався безконтактною вимірювальною системою FLUKE. Дані вимірів цифрових осцилографів через USB інтерфейс передавались на ПК, де синхронно записувались. Ввесь процес був повністю автономний і відокремлений від живлячої мережі підстанції шляхом використання блока безперебійного живлення (БЖ). Як показав експеримент, без блока БЖ реєстрація даних не можлива, оскільки із-за неякісного струму в режимі інвертування сам ПК і цифрові осцилографи не працюють, що супроводжується відмовами і помилками системи і програмного забезпечення.

Крім того, за допомогою вагона-лабораторії ДЕЛ Львівської залізниці було отримано дані моніторингу з рекуперуючого електровоза ВЛ11М.

На ділянці Нижньодніпровсько-Вузол – Верхівцеве Придніпровської залізниці моніторинг рекуперованого струму і напруги на струмоприймачі електровоза ВЛ11М6 здійснювали за допомогою реєстраційної системи діагностування і контролю ДЛІ5.3N локомотива.

Показники якості рекуперованої енергії

Визначимо зазначені показники якості рекуперованої електроенергії при русі з поїздами електроозів ВЛ11М6 на ділянці Нижньодніпровськ-Вузол – Верхівцеве.

Усталене відхилення напруги визначають як відносну різницю між фактичним усталеним U_y та номінальним $U_{ном}$ значенням напруги на струмоприймачі ЕРС за формулою

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де U_y – усереднене усталене значення напруги на струмоприймачі ЕРС за хвилину, В; $U_{ном} = 1000$ В.

Згідно ГОСТ 13109-97, нормально допустимі і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги δU_y становлять відповідно ± 5 та $\pm 10\%$.

В роботі [8] під відхиленням напруги пропонують розуміти зміну напруги такої тривалості, яка призводить до зміни швидкості ЕРС. При цьому слід розуміти відхилення додатнім, якщо $U_y > U_{ном}$; або від'ємним, якщо $U_y < U_{ном}$.

Усереднені значення напруг на струмоприймачі ЕРС та їх відхилення в режимі рекуперативного гальмування наведені в табл. 2, із якої випливає, що максимальне відхилення напруги на струмоприймачі ЕРС у режимі рекуперативної складало 26,1%, а мінімальне – 12,72%. Тобто, у всіх фазах і поїздах величина δU_y значно перевищує навіть гранично допустиме значення.

Таблиця 2

Усталене відхилення напруги при рекуперативній

Номер фази рекуперативної	Номер поїздки			
	№1		№2	
	U_y , В	δU_y , %	U_y , В	δU_y , %
1	3783,4	26,1	3507,4	16,9
2	3622,5	20,75	3644,9	21,5
3	3654,7	21,82	3800,8	26,69
4	3434,7	14,49	3780,4	26,0
5	3381,7	12,72	3617,6	20,59
6	3421,8	14,06	3605,0	20,2
7	3451,4	15,05	3620,6	20,69
8	3613,7	20,46	3660,4	22,0
9	3646,5	21,55	3634,0	21,13
10	3515,2	17,17	3606,0	20,2
11	3573,8	19,13	3553,1	18,44

Під коливаннями напруги розуміють швидку зміну напруг, яка відбувається зі швидкістю 1-2% за секунду і більше. Автори робіт [8,9] під коливанням напруги в тяговій мережі пропонують розуміти зміну напруги такої тривалості, яка не призводить до зміни швидкості ЕРС. Коливання напруги характеризується амплітудою (розмахом) коливань та розраховується за формулою

$$\delta U_t = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Результати розрахунків коливань напруги на струмоприймачі ЕРС у режимі рекуперації зведені до табл. 3, із якої випливає, що мінімальне коливання напруги на дослідній ділянці Придніпровської залізниці $\delta U_t = 3,26\%$, а максимальне $\delta U_t = 19,47\%$.

Згідно з європейським стандартом EN50160, допускається коливання напруги до 6...10 %. З табл. 3 випливає, що в режимі рекуперації коливання напруги на струмоприймачі ВЛ11М6 європейським нормам не відповідає.

Таблиця 3

Колівання напруги при рекуперації

Номер фази рекуперації	Номер поїздки					
	№1			№2		
	U_{\max} , В	U_{\min} , В	δU_y , %	U_{\max} , В	U_{\min} , В	δU_y , %
1	3917	3517	13,3	3596	3430	5,53
2	3780	3438	11,4	3738	3447	9,7
3	3734	3514	7,33	3773	3481	9,73
4	3788	3367	14	3686	3102	19,4
5	3442	3277	5,5	3898	3586	10,4
6	3430	3216	7,13	3875	3633	8,07
7	3532	3368	5,46	3705	3541	5,47
8	3633	3535	3,26	3726	3531	6,5
9	3790	3398	13	3646	3464	6,07
10	3554	3388	5,53	3543	3276	8,9
11	3764	3393	12,3	3656	3488	5,6

Імпульс напруги $U_{\text{імп}}$ вимірюють як максимальне значення напруги при її різкій зміні. При цьому тривалість фронту імпульсу не має бути більшою 5 мс. Під імпульсом напруги розуміють різку зміну напруги в точці електричної мережі (в даному випадку між струмоприймачем та колією), за яким слідує відновлення напруги до попереднього значення. Імпульс напруги нормується її максимальним значенням. Тривалість імпульсу оцінюють за виразом:

$$\Delta t_{\text{імп}0,5} = t_{\text{к}0,5} - t_{\text{п}0,5}, \quad (3)$$

де $t_{\text{к}0,5}$, $t_{\text{п}0,5}$ – початковий та кінцевий моменти часу відповідно. Їх визначають як точки перетину кривої імпульсу напруги з горизонтальною лінією, проведеною на рівні половини амплітуди цього імпульсу $0,5 \cdot U_{\text{імп}}$.

Точно оцінити величину імпульсу для записаних реєстрограм неможливо. Це пов'язано з

тим, що проміжок часу запису значень напруги на струмоприймачі дорівнює секунді.

Тимчасова перенапруга $K_{\text{пер}U}$ розраховується за формулою:

$$K_{\text{пер}U} = \frac{U_{\max}}{U_{\text{ном}}} \quad (4)$$

Коефіцієнт тимчасової перенапруги характеризується тривалістю $t_{\text{пер}U}$. Для його визначення фіксують початковий момент часу $\Delta t_{\text{п.пер}}$ в точці перевищення напруги $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$, а також кінцевий момент часу $\Delta t_{\text{к.пер}}$ при спаді напруги до значення $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$. Для визначення тривалості перенапруги користуються наступною формулою:

$$t_{\text{пер}U} = t_{\text{к.пер}} - t_{\text{п.пер}}$$

Результати розрахунків тимчасової перенапруги на струмоприймачі ЕРС в режимі рекуперації приведені в табл. 4, із якої випливає, що мінімальна перенапруга становить $K_{\text{пер}U} = 1,14$, а максимальна – 1,31.

Приведений вище аналіз показує, що фактичні значення показників якості електроенергії рекуперації електровозів для постійного струму виходять за границі допустимих меж, а це в першу чергу призводить до додаткових її втрат не тільки в самому ЕРС, але і в усіх елементах системи тяги. Аналіз реєстрограм, записаних на струмоприймачі ЕРС в режимі рекуперації, показує, що на деяких ділянках залізниці застосування рекуперативного гальмування неможливе через значні коливання напруги, які призводять до спрацювання системи захисту як на самому ЕРС, так і на ТП.

Таблиця 4

Коефіцієнт тимчасової перенапруги при рекуперації

Номер фази рекуперації	Номер поїздки			
	№1		№2	
	U_{\max} , В	$K_{\text{пер}U}$, в.о.	U_{\max} , В	$K_{\text{пер}U}$, в.о.
1	3917	1,31	3596	1,2
2	3780	1,26	3738	1,25
3	3734	1,24	3773	1,26
4	3788	1,27	3686	1,23
5	3442	1,15	3898	1,3
6	3430	1,14	3875	1,29
7	3532	1,18	3705	1,24
8	3633	1,21	3726	1,24
9	3790	1,26	3646	1,22
10	3554	1,19	3543	1,18
11	3764	1,15	3656	1,22

Гармонійний склад інвертованих напруги та струму

Раніше була дана оцінка якості рекуперованої електроенергії, що передається від рекуперуючого ЕРС в тягову мережу і далі на тягову підстанцію. Важливою є також задача оцінки якості електроенергії, яка після підстанційного інвертування передається в первинну живлячу трифазну ЛЕП і далі на районну підстанцію (РП). Тому оцінимо гармонійний склад струму і напруги на виході ТП Воловець Львівської залізниці, від якої інвертована електроенергія поступає в трифазну лінію 35 кВ.

На рис. 3-5 приведені осцилограми одного періоду мережевої напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ однієї фази «А» для різних інтервалів квантування (відповідно для 20 і 50 кГц) їх експериментального моніторингу.

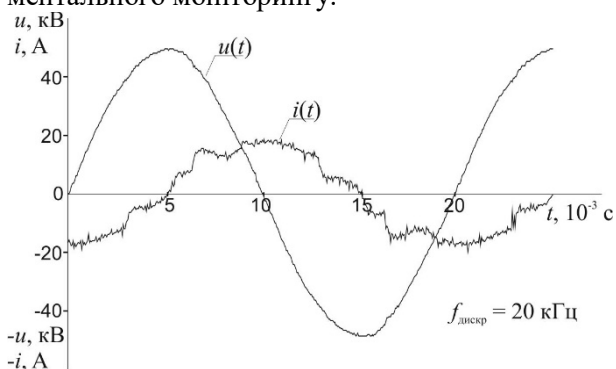


Рис. 3

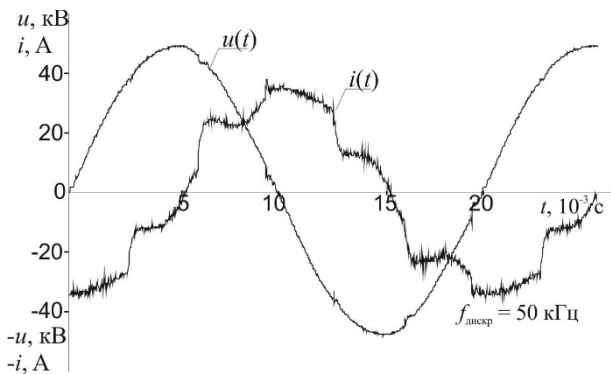


Рис. 4

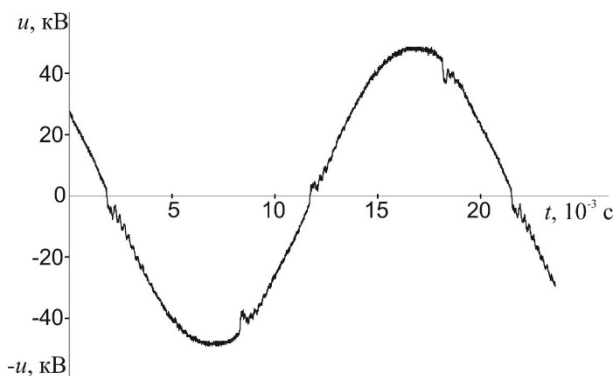
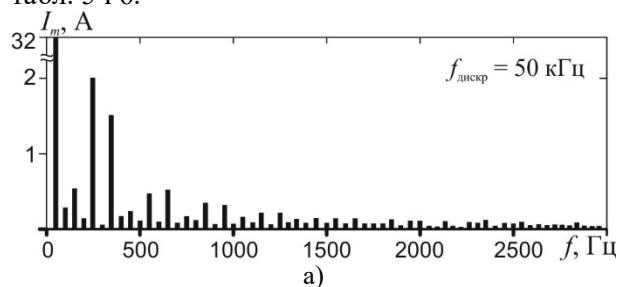


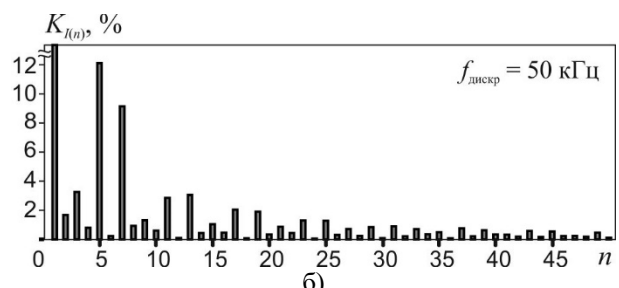
Рис. 5

Як випливає з цих рисунків, напруга є майже синусоїдною, а струм – спотвореним (несинусоїдним) і відстаючим за фазою від напруги на 83...85 електричних градусів. Останнє обумовлено значною індуктивністю ЛЕП 35 кВ, трансформатору та іншого електрообладнання районної підстанції. Спотворення струму обумовлено нелінійностями елементів інверторної установки ТП та електрообладнання РП.

Основний внесок в несинусоїдний характер зміни кривої струму вносять, окрім другої, непарні гармоніки від 3-ї до 25-ї включно. Спектральний склад струму приведено на рис. 6 і 7, а гармоніки, значення $K_{I(n)}$ (згідно з ГОСТ 13109-97) яких склали більше одиниці, подані в табл. 5 і 6.

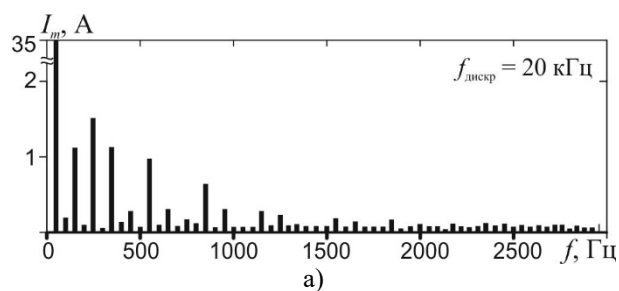


а)

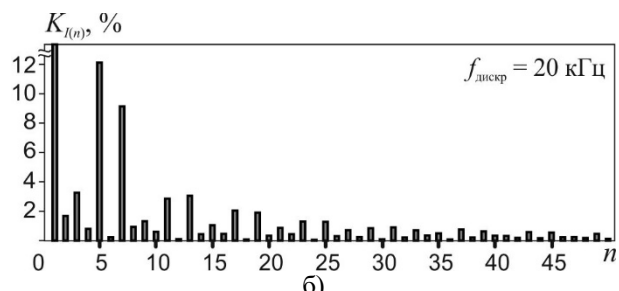


б)

Рис. 6



а)



б)

Рис. 7

Коефіцієнти k -тої гармонійної складової струму $K_{I(n)}$, %												THD_I , %	
k -та гарм.	2	3	5	7	9	11	13	15	17	19	23	25	16,85
$K_{I(n)}$, %	1,68	3,26	12,1	9,1	1,3	2,86	3,05	1,04	2,04	1,9	1,3	1,28	

Таблиця 6

Значення максимально допустимих коефіцієнтів k -тої гармонійної складової струму та інтегрального показника гармонійного складу струму в залежності від параметрів мережі

$I_{кз} / I_{ном}$	Максимально допустимий коефіцієнт k -тої гармонійної складової струму $K_{I(n)}$, %, %					THD_I , %
	$n \leq 11$	$11 \leq n \leq 17$	$17 \leq n \leq 23$	$23 \leq n \leq 35$	$35 < n$	
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20...50	7,0	7,0	2,5	1,0	0,5	8,0
50...100	10,0	10,0	4,0	1,5	0,7	12,0
100...1000	12,0	12,0	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	15,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Як відомо, несинусоїдний струм викликає несинусоїдний спад напруги на внутрішньому опорі мережі. Тому в закордонній електроенергетиці до гармонійного складу струму пред'являють все більші вимоги, які, згідно стандарту IEEE 519-1992, нормуються за інтегральним показником (гармонійного струму), що визначається коефіцієнтом гармонік (THD – Total Harmonic Distortion), за формулою [10, 11]:

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{49} [I^{(n)}]^2}}{I^{(1)}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Допустиме значення I_{THD} залежить від внутрішнього опору ЛЕП, по якій протікає досліджуваний струм. Це значення визначається по співвідношенню струму короткого замикання $I_{кз}$ і номінального струму $I_{ном}$. Всі трансформатори, що використовуються на Україні для живлення системи тяги постійного струму, мають напругу короткого замикання $u_{кз}$ більше 5%. Тоді $I_{кз} / I_{ном}$ буде менший за 20 і при аналізі інвертованого струму до його спектрального складу треба пред'явити найбільш жорсткі вимоги згідно першого рядка табл. 6 [10].

Порівняння максимально допустимих значень коефіцієнта n -ої гармонійної складової струму (табл. 6) з його фактичними значеннями (табл. 5) свідчить про те, що гармоніки 5, 7, 11, 13, 17, 19, 25 перевищують максимально допустимі значення (при $I_{кз} / I_{ном} < 20$).

Інтегральний показник гармонійного складу струму I_{THD} , що визначений за виразом (5), до-

сягає 16,87% (табл. 5) й тим самим перевищує допустиме значення 5% (табл. 6).

Не дивлячись на те, що напруга після інвертування візуально виглядає цілком синусоїдно (рис. 3-5), все ж було визначено її гармонійний склад (рис. 8). Як випливає із цього рисунка, в напрузі мають місце, окрім основної, непарні гармоніки (хоча з незначним вкладом). Їх коефіцієнти n -ої гармонійної складової, які згідно з ГОСТ 13109-97 визначаються за формулою

$$K_{U(n)} = \frac{U^{(n)}}{U^{(1)}} \cdot 100\% \quad (6)$$

і приведені на рис. 8, не перевищують максимально допустимі (згідно ГОСТ 13109-97 для ЛЕП 35 кВ) значення.

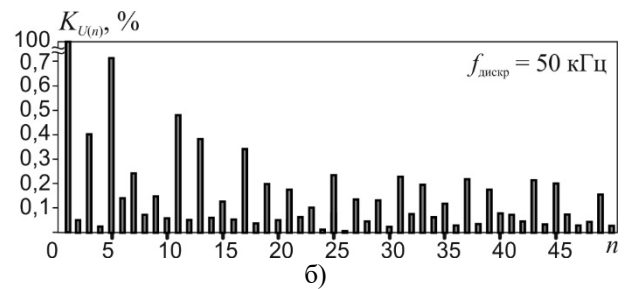
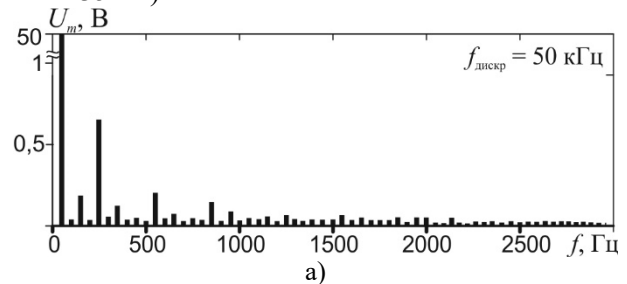


Рис. 8

Висновки

1. Необхідність розробки стандарту, подібного ГОСТ 13109-97, для оцінки показників і норм якості електроенергії в електричних мережах постійного струму являється актуальною задачею сучасної електроенергетики, оскільки зазначений струм, внаслідок технологічних факторів, суттєво, навіть випадковим чином, змінюється в часі, тобто фактично не являється постійним струмом.

2. Фактичні значення показників якості рекуперованої електроенергії виходять за границі допустимих меж. Особливо це стосується таких критеріїв як усталене відхилення і коливання напруги в режимах рекуперативного гальмування, їх значення в 2...3 рази перевищують гранично допустимі величини.

3. В режимах рекуперативного гальмування напруга на виході тягових підстанцій (після інвертування) залишається майже синусоїдною, хоча і містить непарні гармоніки, а струм спотворений також непарними гармоніками від 3-ої до 25-ої і відстає за фазою на 83...85 ел. градусів.

4. Інтегральний показник гармонійного струму (THD_I) після інвертування у 3,6 разів перевищує допустиме значення 5%, що свідчить про низьку якість інвертованої електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нікітенко, А. В. Показники якості електричної енергії рекуперованої на електрифікованих ділянках постійного струму [Текст] / Нікітенко А. В. // Науково-технічний збірник «Гірнична електромеханіка та автоматика». – Д.: Видавництво Дніпропетр. нац. гірничого ун-ту, 2014. – Вип. 92 – С. 127-132.

2. Привалов, С. Я. Анализ электрических величин на токоприемнике электровоза в режимах тяги и рекуперации / С. Я. Привалов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. – 2009. – Вып. 1. – С. 308-311.

3. Working Group WG2: Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 4: Voltage unbalance. – UIE, 1998. – 168 p.

4. IEC Standard 61000-4-30. Power quality measurement methods, 2003. – 200 p.

5. IEC Standard 32(1). Machines électriques tournantes. Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement, 1983. – 246 p.

6. EMC Guide for public power supply networks compatibility levels and permissible emission. – VDEW, 1992. – 120 p.

7. Golovanov N. Voltage Unbalance Vulnerability Areas in Power System Supplying High Speed Railway / N. Golovanov, C. Lazaroiu, M. Roscia, D. Zaninelli // PES General Meeting 2005 (June 12-17). – San Francisco, USA, 2005, pp. 120-132.

8. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 582 с.

9. Мамошин, Р. Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / Р. Р. Мамошин, А. Н. Зимакова. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.

10. Розанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) / Ю. К. Розанов // Электротехника. – 1998. – №3. – С. 10-17.

11. Dugan, Roger C. Electrical Power Systems Quality : second edition / Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty. – McGraw-Hill, 2003. – 528 p.

REFERENCES

1. Nikitenko, A. V. Pokaznyky jakosti elektrychnoji energiji rekuperovanoji na elektryfikovanykh diljankakh postijnogho strumu [Energy quality indices of recuperated electric energy in DC electrified sections]. *Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk «Ghirnycha elektromekhanika ta avtomatyka»* [Scientific-technical Bulletin «Mining electrical engineering and automation»], 2014, issue 92, pp. 127-132.

2. Privalov, S. Ya. Analiz elektricheskikh velichin na tokopriemnike elektrovoza v rezhimakh tyagi i rekuperatsii [Analysis of electrical values under current collector of electric locomotive in the traction and recuperative braking modes]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego vostoka* [Scientific problems in the transport of Siberia and Far East], 2009, issue 1, pp. 308-311.

3. Working Group WG2: Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 4: Voltage unbalance. – UIE, 1998. – 168 p.

4. IEC Standard 61000-4-30. Power quality measurement methods, 2003. – 200 p.

5. IEC Standard 32(1). Machines électriques tournantes. Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement, 1983. – 246 p.

6. EMC Guide for public power supply networks compatibility levels and permissible emission. – VDEW, 1992. – 120 p.

7. Golovanov, N. Voltage Unbalance Vulnerability Areas in Power System Supplying High Speed Railway / N. Golovanov, C. Lazaroiu, M. Roscia, D. Zaninelli // PES General Meeting 2005 (June 12-17). – San Francisco, USA, 2005, pp. 120-132.

8. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982, 582 p.

9. Mamoshin R. R. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1980, 296 p.

10. Rozanov Yu. K. *Sovremennye metody uluchsheniya kachestva elektroenergii (analiticheskij obzor)* [The state-of-the-art methods of energy quality improvement (analytical review)]. *Elektrotehnika* –

Надійшла до друку 01.12.2012.

Electrical engineering, 1998, no. 3, pp. 10-17.

11. Dugan, Roger C. *Electrical Power Systems Quality: second edition* / Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty. – McGraw-Hill, 2003. – 528 p.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Сасенко Ю. Л.*

Необхідність оцінки якості електроенергії, як споживаної електрорухомим складом (ЕРС) в режимі тяги, так і генерованої при рекуперативному гальмуванні, не дискутується. І якщо ця задача для тягових режимів розв'язана цілком достатньо, то в режимах рекуперації ЕРС постійного струму такі дослідження невідомі. В роботі в якості показників якості рекуперованої електроенергії уведені і використані такі критерії як відхилення і коливання напруги, а також імпульс напруги і тимчасова перенапруга. Виконано і приведено чисельну оцінку цих показників енергії рекуперованої (і далі не інвертованої) електровозами ВЛ11М6 при їх веденні поїздів на діючих ділянках Придніпровської залізниці. Встановлено, що фактичні значення усіх зазначених показників якості виходять за межі гранично допустимих величин. Якість інвертованої електроенергії досліджено для діючої ділянки Воловець-Батьово Львівської залізниці при русі по ній електровозів ВЛ11М; інвертування здійснювалось на тяговій підстанції Воловець. Встановлено, що напруга після інвертування майже синусоїдна (хоча і містить непарні гармоніки), а струм спотворений суттєво, інтегральний його показник THD_i у 3,6 разів перевищує допустиме значення, що складає 5%. За результатами досліджень робиться висновок, що рекуперована електроенергія являється енергією низької якості.

Ключові слова: електроенергія, рекуперація, якість, інвертування, напруга, струм, електровоз, гармоніки.

УДК 621.333.4-021.4

Н. А. КОСТИН, А. Н. МУХА, А. В. НИКИТЕНКО (ДНУЖТ)

Кафедра «Електротехніка і електромеханіка», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, к. 238, г. Днепропетровск, 49010, Украина, тел. +380563731537, e-mail: nkostin@ukr.net, andremu@i.ua, nikitenko.diit@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0856-6397, 0000-0002-5629-4058, 0000-0002-6426-5097

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, РЕКУПЕРИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОВОЗАМИ ВЛ11М6 И ВЛ11М

Необходимость оценки качества электроэнергии, как потребляемой электроподвижным составом (ЭПС) в режиме тяги, так и генерируемой в рекуперативном торможении, не дискутируется. И если эта задача для тяговых режимов решена вполне достаточно, то в режимах рекуперации ЭПС постоянного тока такие исследования неизвестны. В работе в качестве показателей качества рекуперированной электроэнергии введены и используются такие критерии как отклонение и колебание напряжения, а также импульс напряжения и временное перенапряжение. Выполнена и приведена численная оценка этих показателей рекуперированной энергии (и дальше не инвертированной) електровозами ВЛ11М6 при их ведении поездов на действующих участках Приднепровской железной дороги. Установлено, что фактические значения всех указанных показателей качества выходят за пределы гранично допустимых величин. Качество инвертированной электроэнергии исследовано для действующего участка Воловец-Батево Львовской железной дороги при движении по ней электровозов ВЛ11М; инвертирование осуществлялось на тяговой подстанции Воловец. Установлено, что напряжение после инвертирования почти синусоидальное (хотя и содержит нечетные гармоника), а ток искаженный существенно, интегральный его показатель THD_i в 3,6 раз превышает допустимое значение, что составляет 5%. По результатам исследований делается вывод, что рекуперированная электроэнергия является энергией низкого качества.

Ключевые слова: электроэнергия, рекуперація, качество, инвертирование, напряжение, ток, электровоз, гармоника.

Внутренний рецензент *Сиченко В. Г.*

Внешний рецензент *Сасенко Ю. Л.*

UDC 621.333.4-021.4

M. O. KOSTIN, A. M. MUKHA, A. V. NIKITENKO (DNURT)

Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian, Lazarian Str., 2, office 238, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel. +380563731537, e-mail: nkostin@ukr.net, andremu@i.ua, nikitenko.diit@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0856-6397, 0000-0002-5629-4058, 0000-0002-6426-5097

THE QUALITY OF ELECTRIC ENERGY RECUPERATED BY LOCOMOTIVES VL11M6 AND VL11M

The necessity of electric energy quality evaluation, consumed by electric rolling stock (ERS) in traction mode and generated in recuperative braking mode, is not discussed. If this task for the traction mode is solved sufficiently, then for the recuperative braking mode of DC ERS such investigations are unknown. In the paper the quality indices of recuperated electric energy are represented by the voltage deviation, the voltage oscillation, and also the voltage impulse and temporary overvoltage. The numerical evaluation of these indices is done and shown for recuperated (and further inverted) energy, which was generated by electric locomotives VL11M6 in the sections of Prydniprovsk railway. It is determined that the real values of all mentioned indices of quality are step outside the limits of admissible quantity. The quality of inverted electric energy is investigated for the section Volovets – Batiovo of Lviv railway at the moment of electric locomotive VL11M operation. Inverting was done on railway substation Volovets. It is established that the voltage after inverting almost sinusoidal (although has non-paired harmonics) and current which is unclear considerably, integral indicator THD_I in 3,6 times increases the accepted value, that is 5 %. As to the research results, the conclusion is the recuperated electric energy is the energy of low quality.

Keywords: electric energy, recuperation, quality, inverting, voltage, current, electric locomotive, harmonics.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*

УДК 620.92:338.45 (470+571)

В. А. ОВСЕЙЧУК (ЗАО ПФК «СКАФ», РОССИЯ),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО ГВУЗ «ПГТУ», УКРАИНА

ЗАО «Промышленно-финансовая компания «СКАФ», ул. Новочеремушкинская, 61, офис 71, Москва, Россия, 117418, тел.: (499) 124-3028

Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел.: (0629) 44-60-70, эл. почта: energy@pstu.edu

ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННОЕ НОРМИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В РОССИИ

Введение

Надежность электроснабжения потребителей и качество электроэнергии являются основными факторами, характеризующими энергетическую и технико-экономическую эффективность электроснабжения потребителей. Показатели (коэффициенты), их характеризующие, как правило, являются субъектами соответствующих нормативных документов (стандартов). Действующие в настоящее время в России стандарты во многом учитывают ситуацию, сложившуюся в энергетике и, безусловно, подлежат корректировке. Ниже рассчитываются индексы надежности и показатели качества электроэнергии субъектов энергетики отдельных районов и России в целом.

Надежность электроснабжения

В соответствии с Федеральным законом об электроэнергетике, одним из показателей энергоэффективности служит показатель надежности электроснабжения. Он характеризуется снижением доли ущерба от перерывов электроснабжения в валовом внутреннем продукте.

Надежность электроснабжения, в свою очередь, зависит от системной надежности, то есть от надежности поставки электроэнергии в пункты питания распределительных электрических сетей, надежности распределительных электрических сетей общего пользования, а также надежности схем электроснабжения конкретных потребителей. Это требует выстраивания системы технических и экономических взаимоотношений «по надежности» между субъектами рынка электроэнергии с конкретизацией требований и ответственности за их выполнение.

Для этого нужны корректные технические методы расчета надежности, которые позволяют автоматизировано рассчитывать интегральные показатели уровня надежности электрической сети в энергетических узлах, технико-

экономически обосновывать уровень надежности электроснабжения, требуемый на перспективу.

Энергетическая стратегия России до 2030 года, утвержденная Правительством РФ, ставит задачу повысить вероятность бездефицитной работы энергосистем (ключевой индикатор стратегического развития) с $P = 0,996$ до $0,9997$ и приблизить этот показатель к зарубежным нормативам надежности бездефицитного электроснабжения (США – $0,9997$, Франция – $0,9997$, Нидерланды – $0,9995$, Ирландия – $0,9991$, Скандинавские страны – $0,999$).

Фактически, по оценке, современный уровень надежности ряда энергообъединений России находится в диапазоне $0,96-0,98$ [6], что ниже норматива – $0,996$. Поэтому переход на норматив надежности, даже в отдаленной перспективе, потребует исключительно высоких капиталовложений в повышение надежности всех компонентов электроэнергетической системы (генерирующих мощностей, магистральных и распределительных электрических сетей, инвестиций в обеспечение устройств противоаварийной автоматики), а также технологических схем электроснабжения потребителей. Для достижения указанного показателя, по оценке, удельные инвестиции в повышение надежности необходимо увеличить с $3,95$ до $9,3$ миллиона рублей на мегаватт нагрузки [5].

Оценочные расчеты индексов надежности субъектов российской энергетики до границ балансовой принадлежности (ГБП) электрических сетей потребителей показали, что интегральный индекс надежности на ГБП субъектов энергетики в различных регионах России в пределах $0,96-0,98$ обуславливает при вероятных расчетных отключениях электрической сети ущерб потребителям от 4 до 7 трлн. рублей в год (до 1 процента в пересчете на ВВП страны) – оценка профессора, академика РАЕН В.А. Непомнящего [5].

С учетом вышеизложенного, для выполнения требований Энергетической стратегии России (распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009г. №1715р) по обеспечению ключевых показателей бездефицитной работы электроэнергетических систем по периодам развития до 2030 г. (включая первый этап 2013-2015 гг.) необходимы:

1) систематическая оценка (один раз в три-пять лет) уровня надежности электроснабжения по регионам;

2) обоснование и расчет оптимального (экономически обоснованного) нормативного уровня надежности электроэнергетики регионов и отдельных крупных потребителей (оптимальным является уровень, при котором вложения в усиление надежности электроэнергетики не выше расчетного ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям);

3) разработка технических мероприятий и их учет в инвестиционных программах (в том числе для целей тарифного регулирования) по обеспечению нормативного (ключевого индикативного) уровня надежности электроэнергетики (по регионам) и последующий мониторинг мероприятий по достижению и поддержанию экономически обоснованного оптимального уровня надежности электроснабжения. Методики, соответствующие программные продукты и опыт выполнения этих работ имеются [1-4].

Методические указания (МУ) Минэнерго России (приказ №296 от 29.06.2010 г.) по расчету уровня надежности и качества менеджмента или услуг (не качества электроэнергии как товара) территориальных сетевых организаций не могут применяться для комплексной оценки технического уровня надежности электроснабжения и качества поставляемой электроэнергии потребителям.

МУ не учитывают экономические потери (вероятные ущербы в экономике) от ненадежности электроснабжения или от отклонений показателей качества электроэнергии от норм национального Стандарта России (ГОСТ 13109-97; ГОСТ Р 54149-2010; ГОСТ 32144-2013 – вводится с 01 июля 2014 г.). При разработке МУ неудачно использован (переведен) зарубежный термин «качество обслуживания потребителей электроэнергией», в котором в понятие «качество обслуживания» включаются: надежность электроснабжения, качество электрической энергии, обеспечение потребителя информацией выбирать экономически обоснованный тариф на электроэнергию. В связи с

изложенным, в соответствии с постановлением Правительства РФ от 31.12.2009 г. №1220 (п.9), необходимо было внести существенные изменения в МУ в части экономически обоснованного определения показателей надежности электроснабжения и качества поставляемой потребителям электроэнергии. Приказом Минэнерго России от 14.10.2013 г. № 718 утверждены новые МУ по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и услуг, в которых введены дополнительные индикативные показатели надежности (средние индексы частоты и длительности прерываний электроснабжения, объем недоотпущенной электроэнергии потребителям), которые в расчетах конечного показателя надежности и качества предоставляемых услуг по передаче электроэнергии не учитываются, носят лишь информативный характер и, судя по РПФР от 03 апреля 2013 г. № 511-р «Стратегия развития электросетевого комплекса России», нормативное использование индикативных показателей предполагается после 2017 г.

Дифференцированная цена на электроэнергию, системно учитывающая обеспечиваемый уровень надежности электроснабжения и качество электроэнергии, предоставляемой потребителям, и включающая, как затраты, связанные с повышением надежности электроснабжения, так и экономический эффект у потребителя (снижение ущерба при повышении надежности электроснабжения), является наиболее простым и эффективным инструментом управления надежностью и качеством электроснабжения потребителей [1]. При этом электроснабжающая система, гарантирующая потребителям экономически обоснованный уровень надежности и качество электроснабжения, (качество электроэнергии), в случае его нарушения должна быть подвергнута экономическим санкциям (через механизм страхования ответственности).

Качество электроэнергии

В период реформирования электроэнергетики вопросами качества электроэнергии (КЭ) уделялось недостаточное внимание, что привело к росту потерь электроэнергии и снижению уровня энергетической безопасности. Традиционно вопрос качества электроэнергии был, в основном, проблемой электрифицированного железнодорожного транспорта и крупных промышленных предприятий, но сегодня эта проблема касается всех потребителей, в том числе

коммунальной инфраструктуры, населения, государственных учреждений.

В последнее время появился ряд новых требований, которые определяют развитие электроэнергетики в России и в мире на ближайшее десятилетие. К их числу, в частности, относятся возросшие требования потребителей к качеству электроэнергии и надежности электроснабжения.

Все возрастающий объем индивидуального строительства домов и повышение использования электроэнергии, переход на инновационную платформу путем создания интеллектуальных электрических сетей, изменение структуры электропотребления бытовых потребителей (в частности за счет импульсных источников) приводит к появлению импульсов токов и искажению формы синусоид напряжения и тока. Более того, исследования показали, что даже при значениях показателей качества электроэнергии в допустимых согласно стандарту пределах нагрузочные потери в трансформаторах возрастают на 14-15%. Низкое качество электроэнергии приводит к увеличению метрологических потерь.

По зарубежным данным, в сетях низкого напряжения Швейцарии коэффициент искажения кривой напряжения (коэффициент несинусоидальности) увеличивается на 0,7% в течение каждых десяти лет. В целом в электрических сетях, несмотря на наличие стандартов и других документов, устанавливающих показатели параметров КЭ, наблюдается рост абсолютных значений этих параметров. Так, в промышленности увеличение производства в ряде случаев (металлургии, деревообрабатывающей промышленности и др.) сопровождается увеличением уровня электромагнитных помех, как правило, уровней высших гармоник и несимметрии напряжения. Это приводит к тому, что стоимость мероприятий по коррекции качества электроэнергии может быть равной или даже превосходить экономический эффект от повышения производительности за счет внедрения новой техники и технологии. Ярким примером может быть прогрессирующее внедрение в промышленность частотных преобразователей. Помимо известных достоинств частотного привода, следует отметить генерирование не только высших гармоник, но и так называемых интергармоник.

Исследования показали, что действующее значение интергармоник в некоторых режимах их работы может превосходить соответствующее значение канонических гармоник. Как

следствие, на ряде крупных предприятий, где значителен уровень гармоник и интергармоник, наблюдается повышенная аварийность электродвигателей за счет ускоренного старения и выхода из строя обмоток токоведущих частей. Вопрос рационального использования частотных преобразователей и минимизации уровней интергармоник требует решения в ближайшее время.

Проблема оценки и снижения уровней колебания напряжения, а также провалов напряжения в настоящее время относится к важнейшим задачам и требует соответствующих разработок; имеющиеся решения в части дозы фликера весьма громоздки, их результаты неоднозначны и не всегда отвечают требованиям проектной практики.

Необходима разработка программы расчетов и соответствующих (сертифицированных!) приборов, позволяющих однозначно определять долевое влияние субъектов рынка на показатели КЭ на границе раздела балансовой принадлежности (либо передачи электроэнергии), что позволит корректно учитывать долевое участие субъектов в показателях КЭ.

Представляется необходимым унифицировать расчеты показателей качества электроэнергии и обусловленных ими ущербов, чтобы исключить получение некорректных результатов. Целесообразно разработать оценочные экспресс-методы расчета показателей качества электроэнергии, что важно для эксплуатационного персонала.

Краткий обзор состояния основных вопросов качества электроэнергии в отечественной энергетике позволяет рекомендовать в договорах электроснабжения вновь учитывать скидки и надбавки к тарифам на электроэнергию от стоимости электроэнергии при несоблюдении норм стандартов на качество электроэнергии. Размер отчислений может быть установлен методом экспертных оценок аналогично тому, как это делается при установлении норм МЭК, Cenelec, СИГРЭ и других документов.

На современном этапе нормативно-правовая база по экономической оценке качества поставляемой потребителям электроэнергии в России отсутствует, кроме общих положений ГК РФ статья 542.

Используя сравнительный анализ зарубежных и отечественных оценок ущербов в экономике от несоблюдения норм качества электроэнергии, на основании наших оценок и расчетов, предлагаем в договорах электроснабжения учитывать скидки (надбавки) к тарифам на

електроенергію в розмірі 12% від вартості електроенергії при несоблюдении норм стандартів на якість електроенергії (для поставщиків електроенергії – скидка, для потребителів – надбавка до тарифу при відсутності пристроїв, забезпечуючих нормалізацію якості електроенергії). В якості предельного розміру штрафу за відпущену (потреблену) електроенергію з несоблюдением стандартів якості електроенергії рекомендується показувач до 25% від вартості відпущеної (потребленої) електроенергії з показувачами, не відповідаючими ГОСТ, як це було в доперестроєчний період в Правилах користування електричної енергією.

Оцінка Федерального Закону від 27.12.2002 г. №184 – ФЗ «Про технічне регулювання» (ТР), застосовно до надійності та якості електропостачання

Сфера технічного регулювання є ключовим інструментом конкурентоспроможності вітчизняної продукції, модернізації промисловості, забезпечення безпеки продукції та процесів її виробництва.

Закон № 184 – ФЗ є базовим нормативним актом, який закріплює основні принципи технічного регулювання, області регулювання, механізми реалізації правовідносин в сфері технічного регулювання. Назва Закону відносно не означає його виключно технічний характер.

Цей Закон створив сучасну правову систему технічного регулювання, створив техніко-юридичні норми правовідносин бізнесу та органів державної влади, які здатні забезпечувати підвищення конкурентоспроможності російської економіки та усунення адміністративних бар'єрів.

Техніко-юридичним нормам притаманні всі ознаки норм правових:

- вони походять від держави;
- в них виражається державна воля;
- їх дотримання забезпечується можливістю державного примусу;
- вони мають свою зовнішню форму вираження;
- вони регулюють суспільні відносини.

Мета Федерального Закону № 184 – ФЗ направлена на встановлення прийнятної рівноваги між правами покупців на безпечну продукцію та процеси надання послуг та правами виробників продукції та виконання

таких процесів надання послуг на вільне переміщення товарів, послуг та фінансових засобів.

Одна з основних цілей Федерального Закону № 184 – ФЗ – побудова двохрівневої системи нормативних актів, встановлюючих обов'язкові мінімальні вимоги (технічні регламенти) та актів добровільного застосування, передбачаючих більш навантажувальні конкретизуючі вимоги, включаючи національні стандарти, збори правил та ін.

Модель технічного регулювання (ТР) в Росії представляє собою поєднання способів зазначення вимог в технічних регламентах та національних стандартах та процедур відповідності цим вимогам.

Регулюючими заходами в обов'язковій сфері є:

- зазначення вимог до продукції для обов'язкового виконання та застосування;
- стандартизація;
- оцінка відповідності;
- державний контроль (нагляд) та ін.

З урахуванням особливостей зазначення вимог до продукції (послуг) в регламентах та можливих видах відповідності існує два види моделей ТР:

Тип А – модель передбачає застосування технічних регламентів, в яких встановлюються конкретні вимоги до продукції (наприклад, в електроенергетиці вимоги до надійності безперебійного електропостачання в формі ключових індикаторів показувачів бездефіцитної роботи енергосистеми по етапам розвитку до 2030 г. або індикативних показувачів втрати електроенергії в електричних мережах).

Тип В – модель передбачає застосування технічних регламентів, в яких встановлюються загальні вимоги до продукції з використанням посилань на стандарти (наприклад, в електроенергетиці це може стосуватися до технічного регламенту в формі загальних вимог до якості вироблюваної, передаваної по електричним мережам та постачаної споживачам електроенергії з відповідними посиланнями на міждержавний стандарт норм якості електроенергії). Цю модель в країнах Євросоюзу називають Європейською моделлю ТР.

Висновки

З урахуванням вищеописаного в Росії, для подальшого вдосконалення техніко-

правовых и экономических отношений в сфере обеспечения надежности, качества и безопасности электроснабжения, учитывая остроту проблемы управления надежностью электроснабжения и качеством электроэнергии, кроме проведения систематических схемно-технических расчетов при проектировании и эксплуатации надежности электроснабжения по обоснованию нормативных ключевых показателей надежности электроэнергетических систем по регионам и экономического обоснования инвестиционных программ развития электроэнергетики, необходимо:

1. Разработать Федеральный закон «О надежности и качестве электроснабжения потребителей» с комплексом системно дополняющих его документов (регламентов, свода правил и др.).

2. Отработать нормативные документы (стандарты, регламенты), касающиеся надежности электроснабжения, качества электроэнергии на всех уровнях субъектов современной электроэнергетики, включая потребителей электроэнергии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Методика расчета цен (тарифов) на услуги по обеспечению системной надежности в электроэнергетике. В 3 т. // Отчет ЗАО ПФК «СКАФ» по договору с ФСТ России. – М., 2006. – 262 с.

2. Оптимизация надежности электрических сетей 110–35–10(6) кВ ОАО «Ленэнерго» на период до 2010–2015 гг. с расчетом тарифов по методике RAB. В 5 т. // Отчет ЗАО ПФК «СКАФ». – М., 2009. – 1314 с.

3. Методика оценки схемно-технической надежности технологических электрических сетей ОАО «РЖД» и электрических сетей внешнего электроснабжения для синхронизации инвестиционных программ ОАО «РЖД», ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «Холдинг МРСК» // Отчет ЗАО ПФК «СКАФ». – М., 2012. – 103 с.

4. Непомнящий, В. А. Надёжность в задачах развития, управления и эксплуатации электроэнергетических систем и электрических сетей в условиях рыночных отношений (методы, модели и практика расчетов): учебно-методическое пособие / В. А. Непомнящий, В. А. Овсейчук, С. Н. Елифанцев. — М. : ИПКгосслужбы, 2010. – 115 с.

5. Непомнящий, В. А. Оптимизация распределения надежности по иерархическим уровням системы электроснабжения / В. А. Непомнящий // Надежность и безопасность энергетики. – 2011. – № 2 (13): Июнь. – С. 42–49.

6. Непомнящий, В. А. Проблемы надежности при проектировании и эксплуатации электрических сетей энергосистем / В. А. Непомнящий. – СПб. : ПЭИПК, 2010. – 130 с.

3. Разработать нормативно-правовые юридические документы, устанавливающие ответственность всех субъектов рынка электроэнергии за обеспечение надежности электроснабжения и качества электроэнергии, правила предъявления претензий в случае некачественного обслуживания потребителей, с учетом соблюдения соответствующих технических требований, оценку ущербов от несоблюдения надежности и качества электроснабжения, экономическую оценку размеров компенсации потребителям и поставщикам электроэнергии от невыполнения взаимных обязательств по обеспечению надежности и качества электроснабжения.

Отработать пакет документов для практического применения по Методикам, комплексам программам расчета технико-экономических показателей для оценки надежности и качества электроснабжения потребителей, оценки ущербов от несоблюдения требований нормативных документов в этой сфере.

REFERENCES

1. *Metodika Rascheta Tsen (Tarifov) na Uslugi po Obespecheniyu Sistemnoy Nadezhnosti v Elektroenergetike* [Calculation Technique for Prices (tariffs) on Services to Maintain the System Reliability in Power Industry]. Otchet ZAO PFK "SKAF" po dogovoru s FST Rossii. Moscow, 2006. 262 p.

2. *Optimizatsiya Nadezhnosti Elektricheskikh Setey 110-35-10(6) kV OAO "Lenenergo" na Period do 2010-2015 gg. s Raschetom Tarifov po Metodike RAB* [Reliability Optimization of the 110-35-10(6)-kV Electrical Networks of JSC "Lenenergo" During 2010-2015 years with the Tariffs Calculation via RAB Technique]. Otchet ZAO PFK "SKAF". Moscow, 2009. 1314 p.

3. *Metodika Otsenki Skhemno-Tekhnicheskoy Nadezhnosti Tekhnologicheskikh Elektricheskikh Setey OAO "RZhD" i Elektricheskikh Setey Vneshnego Elektrosnabzheniya dlya Sinkhronizatsii Investitsionnykh Programm OAO "RZhD", OAO "FSK YeES", OAO "Kholding MRSK"* [Estimation Technique for System and Technical Reliability of the Technological Electrical Networks of JSC "RZhD" and External Power Supply Electrical Networks for Synchronization of Investment Programs JSC "RZhD", JSC "FSK YeES", JSC "Kholding MRSK"]. Otchet ZAO PFK "SKAF" – Report of PFK "SKAF". Moscow, 2012. 103 p.

4. *Nepomnyashchiy V.A. Nadezhnost v Zadachakh Razvitiya, Upravleniya i Ekspluatatsii Elektroenergeticheskikh Setey v Usloviyakh Rynochnykh Otnosheniy (Metody, Modeli i Praktika Raschetov)* [Reliability in the Development, Control and Maintenance Tasks of the Electric Power Systems and Networks under Market Conditions (Methods, Models

Поступила в печать 01.12.2012.

and Practical Calculations)]. Moscow: IPKgossluzhby Publ., 2010. 115 p.

5. Nepomnyashchiy V.A. *Optimizatsiya raspredeleniya nadezhnosti po ierarkhicheskim urovnyam sistemy elektrosnabzheniya* [Optimization for Reliability Distributing onto Hierarchy Levels of the Electric Power Supply System]. *Nadezhnost i Bezopasnost Energetiki - Reliability and security of energy*. 2011; 2 (13), pp. 42-49.

6. Nepomnyashchiy V.A. *Problemy Nadezhnosti pri Proektirovanii i Ekspluatatsii Elektricheskikh Setey Energosistem* [Reliability Problems under Development and Maintenance of the Power System Electrical Networks]. Saint-Petersburg: PEIPK Publ., 2010. 130 p.

Внутренний рецензент *Сиченко В. Г.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

Надежность электроснабжения и качество электроэнергии потребителей являются основными показателями, характеризующими энергоэффективность производства и систем электроснабжения. В статье обоснована необходимость разработки корректных технических методов расчета интегральных показателей надежности. Приведены значения капитальных затрат в России, необходимых для обеспечения надежности в пределах 0,96 – 0,98.

Обращается внимание на факт, что в период реформирования электроэнергетики России вопросам качества электроэнергии и снижения потерь уделялось недостаточное внимание, за исключением электрифицированного железнодорожного транспорта и крупных промышленных потребителей. Отмечен рост потерь в целом; в частности за счет постоянно увеличивающегося искажения кривых напряжения – на 0,7 в течение каждых десяти лет, – а также существенное увеличение несимметрии напряжения. Прогрессирующее внедрение в промышленности частотных преобразователей по нашим данным привело к повышению аварийности электродвигателей на 10 – 15 %. Вопрос рационального использования и эксплуатации частотных преобразователей требует решения в ближайшее время.

Анализ потерь в экономике от несоблюдения норм качества электроэнергии показал, что необходимы скидки и надбавки к тарифам на электроэнергию по нашим расчетам в пределах ± 12 % от стоимости электроэнергии.

Федеральный Закон «О техническом регулировании» применительно к надежности и качеству электроснабжения нуждается в корректировке в направлениях: сертификации электроэнергии как товара, стандартизации; оценки соответствия и государственного контроля (надзора). Более целесообразной представляется разработка специального Федерального Закона «О надежности и качестве электроснабжения потребителей» с комплексом системно дополняющих элементов.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, качество электрической энергии, потребитель, несимметрия напряжений, Федеральный Закон.

УДК 620.92:338.45 (470+571)

В. О. ОВСЕЙЧУК (ЗАТ ПФК «СКАФ», РОСІЯ),

І. В. ЖЕЖЕЛЕНКО, (ДВНЗ «ПДТУ», УКРАЇНА)

ЗАТ «Промислово-фінансова компанія» СКАФ », вул. Новочерьомушкінська, 61, офіс 71, Москва, Росія, 117418, тел. : (499) 124-3028

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел.: (0629) 44-60-70, ел. пошта: energy@pstu.edu

ЕКОНОМІЧНО ОБҐРУНТОВАНЕ НОРМУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ У РОСІЇ

Надійність електропостачання та якість електроенергії споживачів є основними показниками, що характеризують енергоефективність виробництва і систем електропостачання. У статті обґрунтовано необхідність розробки коректних технічних методів розрахунку інтегральних показників надійності. Наведено значення капітальних видатків в Росії, необхідних для забезпечення надійності в межах 0,96 - 0,98.

Звертається увага на факт, що в період реформування електроенергетики Росії питань якості електроенергії та зниження втрат приділялася недостатня увага, за винятком електрифікованого залізничного транспорту та великих промислових споживачів. Відзначено зростання втрат в цілому; зокрема за рахунок постійно зростаючого спотворення кривих напруги - на 0,7 протягом кожних десяти років, - а також істотне збільшення несиметрії напруги. Прогресуюче впровадження в промисловості частотних перетворювачів за нашими даними призвело до підвищення аварійності електродвигунів на 10 - 15%. Питання раціонального використання та експлуатації частотних перетворювачів вимагає вирішення найближчим часом.

© Овсейчук В. А., Жежеленко І. В., 2015

Аналіз втрат в економіці від недотримання норм якості електроенергії показав, що необхідні знижки та надбавки до тарифів на електроенергію за нашими розрахунками в межах $\pm 12\%$ від вартості електроенергії.

Федеральний Закон «Про технічне регулювання» стосовно до надійності і якості електропостачання потребує корегування в напрямках: сертифікації електроенергії як товару, стандартизації; оцінки відповідності та державного контролю (нагляду). Більш доцільною представляється розробка спеціального Федерального Закону «Про надійність та якість електропостачання споживачів» з комплексом системно доповнюючих елементів.

Ключові слова: надійність електропостачання, якість електричної енергії, споживач, несиметрія напруг, Федеральний Закон.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Саєнко Ю. Л.*

UDC 620.92:338.45 (470+571)

V. O. OVSEYCHUK (CJSC PF COMPANY «SKAF», RUSSIA)

I. V. ZHEZHELENKO, (PSTU, UKRAINE)

CJSC «Productive and Financial Company «SKAF», Novocheremushkinskaya Street 61, Office 71, Moscow, Russia, 117418, phone: (499) 124-3028

State higher education institution «Pryazovskyi State Technical University», 7 Universitetskaya Street, Mariupol, Ukraine, 87500, tel.: (0629) 44-60-70, e-mail: energy@pstu.edu

ECONOMIC VALUE-ADDED STANDARDIZATION OF THE ELECTRICAL SUPPLYING RELIABILITY AND QUALITY OF CUSTOMERS IN RUSSIA

Reliability of electrical supplying and power quality are the main parameters to characterize the power efficiency of production and electrical supplying systems. Necessity to develop the correct technical methods for estimation of the integral reliability indices was justified in article. The values of capital expenditures in Russia needed to maintain the reliability index to be equal to about 0.96-0.98 are presented. It was underlined that the power quality and losses reduction problems during reforming of power industry in Russia not received the enough attention excluding the electrified railroad transportation and large industrial customers. The growth of losses in general (for example, the 0.7%-increasing after every 10 years due to steadily worsened voltage waveform distortion) and significant rising of the level of voltage unbalance were pointed out. According to our estimations, the wide proliferation of frequency converters into industry caused the rising of motors failures on 10-15%. It is needed that the problem of efficient operation and maintenance of frequency converters to be solved in near future. The adjustments and allowances for electricity tariffs that equal to $\pm 12\%$ from electricity charges are needed on the basis of analysis the losses for national economics due to power quality standards non-compliances. In terms of reliability and quality of electrical supplying, the Federal Law "On technical regulation" is needed to correct in the following ways: certification and standardization of electrical energy as product, state quality audit and conformance certification. The development of special Federal Law "On reliability and quality of the customers electrical supplying" with the complex of systemically supplemental positions is appear to be more reasonable.

Keywords: reliability of electrical supplying, power quality, customer, voltage distortion and unbalance, Federal Law.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*

Ю. Л. САЕНКО (ДНУЖТ) Д. Н. КАЛЮЖНЫЙ (ХНУГХ ИМ. А. Н. БЕКЕТОВА)

Приазовский государственный технический университет, кафедра электрификации промышленных предприятий, Украина, 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7, тел.: (0629)-44-65-51, эл. почта: yurisa-yenko@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, кафедра систем электроснабжения и электропотребления городов, Украина, 61002, г. Харьков, ул. Революции, 12, тел.: 050-560-68-35, эл. почта: KalyuzhnyyDN@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-7374-0734

ПРИНЦИП НАЛОЖЕНИЯ В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКИХ ВКЛАДОВ ЛИНЕЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ В ИСКАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

Постановка проблемы

Искажения напряжений в системах электро-снабжения (СЭС), выраженные через соответствующие коэффициенты, определяют качество эклектической энергии (КЭ) [1, 2]. В электрических сетях (ЭС) СЭС низкого и среднего напряжения КЭ в большинстве случаев не соответствует нормированным значениям [3]. В первую очередь это касается несимметрии и отклонения напряжений, возникающих в основном вследствие действия линейных источников искажений (ИИ).

Потребление и передача электрической энергии (ЭЭ) пониженного качества является причиной многих негативных последствий [4], которые в конечном счете приводят к экономическим убыткам потребителей и поставщиков ЭЭ. По данным, опубликованным в [5], финансовые потери от пониженного КЭ для различных секторов экономики могут находиться в пределах от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов евро за одно событие.

Очевидно, что при возникновении вопроса компенсации экономических убытков потерпевшей стороне следует решить задачу о фактическом вкладе (ФВ) каждого ИИ в искажение напряжений в точке общего присоединения (ТОП).

Анализ последних исследований и публикаций

На сегодняшний день насчитывается достаточно большое количество методов определения ФВ в понижение КЭ [6, 7]. Основная часть из них разработана в пространстве симметричных составляющих [8] и базируется на использовании соответствующих параметров режима работы и схем замещения элементов СЭС. Именно этот прием является главной причиной недостатков существующих методов определе-

ния ФВ, которые заключаются в следующем: не учитывается взаимное влияние ИИ друг на друга; определение схем замещения ИП и обобщенной нагрузки по обратной и нулевой последовательностям вызывают затруднения как методологического, так и технического характера. Поэтому практическое использование разработанных методов ограничивается случаями ТОП с одним явно выраженным доминирующим ИИ.

Цель статьи

Разработать математическую модель распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений в СЭС в пространстве фазных составляющих с учетом их распределенного характера.

Основные материалы исследования

В рамках данного исследования под линейным ИИ будем понимать любой элемент СЭС или его составную часть, который вызывает в ней такие изменения напряжений, которые приводят к несимметрии и отклонению напряжений без искажения их синусоидальной формы. Основными ИИ по несимметрии напряжений будем считать несимметричную нагрузку потребителей ЭЭ и несимметричное напряжение источника питания (ИП) СЭС. К основным ИИ по отклонению напряжения отнесем: часть электрической нагрузки потребителей ЭЭ, которая превышает проектную или договорную величину; ЭС, в том случае если ее пропускная способность не соответствует передаваемой мощности; ИП СЭС при неудовлетворительном уровне регулирования напряжения в ЭС.

Рассмотрим СЭС (рис.1), питающую двух потребителей ЭЭ (П1 и П2), которая состоит из ИП, обобщенной ЭС, линии электропередачи (ЛЭП) и силового трансформатора (Т). Режим работы СЭС считаем установившимся.



Рис. 1. Система электроснабжения

При составлении схемы замещения СЭС все ИИ выделяем отдельными элементами. Условимся схему замещения продольного пассивного элемента (ЛЭП, Т или ЭС) при наличии в нем ИИ представлять в виде последовательного соединения двух элементов (рис. 2, а). Схему замещения поперечного пассивного элемента (проводимости ЛЭП или силового трансформатора, а также потребителей ЭЭ) при наличии в нем ИИ – в виде параллельного соединения двух проводимостей (рис. 2, б). При этом $Z_{\Phi i}^{неиск}$ и $Y_{\Phi i}^{неиск}$ будут соответствовать фазным неискажающим частям элементов СЭС и потребителей ЭЭ, а $Z_{\Phi i}^{иск}$ и $Y_{\Phi i}^{иск}$ – их искажающим частям.

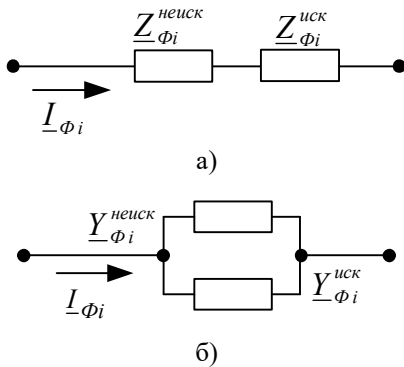


Рис. 2. Схемы замещения пассивных элементов СЭС и потребителей ЭЭ:
а) продольного; б) поперечного

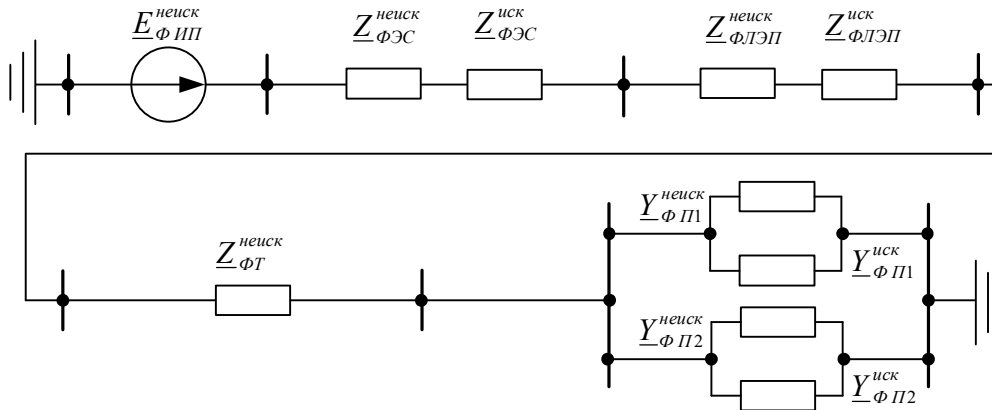


Рис. 4. Схема замещения СЭС двух потребителей ЭЭ

С учетом выделенных в схеме замещения СЭС ее неискажающих и искажающих частей выражение (1) запишем в следующем виде:

$$(Y_{неиск} + Y_{иск}) \times (\Phi_{неиск} + \Phi_{иск}) = I_{неиск} \quad (2)$$

Схему замещения продольного активного элемента СЭС (ИП) при наличии в нем ИИ будем представлять в виде, изображенном на рис. 3, где $E_{\Phi i}^{неиск}$ и $E_{\Phi i}^{иск}$ – ЭДС соответствующие фазной неискажающей и искажающей частям.

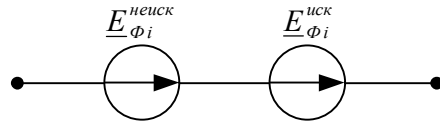


Рис. 3. Схема замещения активного элемента СЭС

Предположим, что ИИ находятся в ЭС, ЛЭП и у потребителей ЭЭ, а максимальное напряжение СЭС $U_{ном} \leq 35$ кВ. Тогда схема замещения СЭС (рис. 1), составленная для одной фазы, будет иметь вид, изображенный на рис. 4. Отметим, что способ представления элементов СЭС и потребителей ЭЭ для решения конкретного вида задачи может отличаться от условно принятого, но будет находиться в рамках последовательного или параллельного соединения пассивных элементов.

Согласно методу узловых потенциалов [8], математическая модель трехфазной СЭС питающая потребителей ЭЭ (рис. 1), схема замещения которой приведена на рис. 4, будет иметь вид:

$$Y \times \Phi = I \quad (1)$$

где Y – квадратная матрица узловых проводимостей; I – матрица-столбец узловых токов; Φ – матрица-столбец неизвестных узловых потенциалов.

где Y и Φ записаны в виде суммы аналогичных матриц ($Y_{неиск} + Y_{иск}$ и $\Phi_{неиск} + \Phi_{иск}$), но в соответствии с разделением элементов в схеме замещения на неискажающие и искажающие части (рис. 4).

Решение уравнения (2) относительно $\Phi_{иск}$ имеет вид:

$$\Phi_{иск} = (Y_{неиск} + Y_{иск})^{-1} \times I_{неиск} - \Phi_{неиск} \quad (3)$$

Узловые потенциалы матрицы $\Phi_{иск}$ определяют ФВ ИИ, вносимый в искажение потенциалов каждого узла. Как видно из выражения (3), узловые потенциалы искажений каждого узла невозможно представить в виде суммы узловых потенциалов, каждое слагаемое которой зависит от отдельного ИИ:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_{иск}^{IIIi} \neq f\left(\sum_{i=1}^n Y_{иск}^{IIIi}\right) \quad (4)$$

где n – общее количество ИИ в СЭС и со стороны потребителей ЭЭ.

Сделаем допущение, что все пассивные элементы, характеризующие ИИ, замененные на соответствующие активные элементы (рис. 5) в соответствии с принципом компенсации [8], являются независимыми друг от друга. Тогда уравнение (2) запишется следующим образом:

$$Y_{неиск} \times \left(\Phi_{неиск} + \sum_{i=1}^n \Phi_{искi} \right) = I_{неиск} + \sum_{i=1}^n I_{искi} \quad (5)$$

где $\Phi_{искi}$ – матрица искажающих узловых потенциалов, характеризующая отдельный ФВ i -го ИИ в общее искажение потенциалов элект-

рической сети; $I_{искi}$ – матрица узловых токов, отдельно характеризующая i -й ИИ.

Решение уравнения (5) относительно $\sum_{i=1}^n \Phi_{искi}$:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_{искi} = Y_{неиск}^{-1} \times \sum_{i=1}^n I_{искi} \quad (6)$$

позволяет приближенно определить ФВ i -го ИИ в общее искажение узловых потенциалов от отдельного действия каждого ИИ:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_{иск}^{IIIi} \approx f\left(\sum_{i=1}^n Y_{иск}^{IIIi}\right) \quad (7)$$

Используя матрицу инцидентий (A) ФВ i -го ИИ в общее искажение напряжений СЭС будет определяться как:

$$\sum_{i=1}^n U_{искi} = A^T \times \sum_{i=1}^n \Phi_{искi} \quad (8)$$

Из выражений (6), (8) следует что, напряженные искажения $U_{искi}$, определяющее ФВ i -го ИИ в общее искажение напряжений в СЭС, выражаются от отдельного действия каждого ИИ $I_{искi}$ и, по своей сути, отображает решение рассматриваемой задачи на основе принципа наложения.

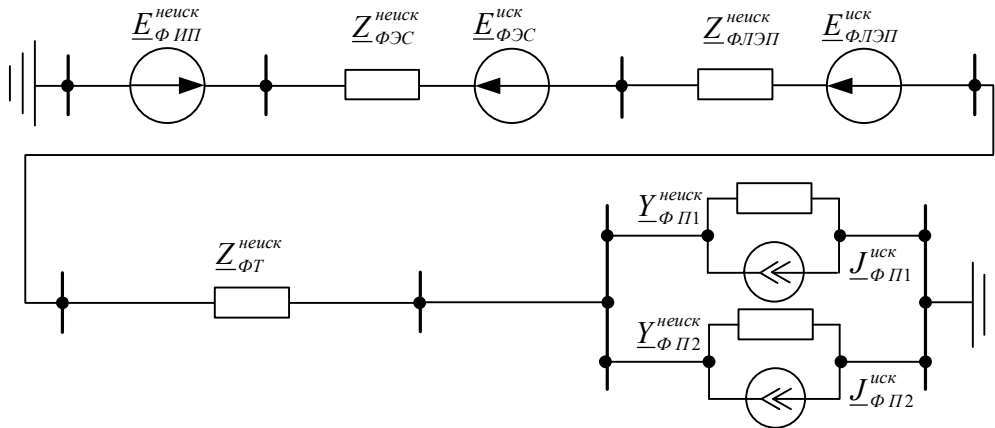


Рис. 5. Схема замещения СЭС двух потребителей ЭЭ после применения принципа компенсации

Выводы

Разработана математическая модель распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений в СЭС, основанная на принципе наложения. Представление искажающих частей ИИ в виде активных элементов схем замещения позволяет приближенно определить ФВ i -го ИИ в

общее искажение напряжений в СЭС отдельно от действия каждого ИИ. Отличительной особенностью предлагаемой математической модели является ее разработка в пространстве фазных составляющих с учетом распределенного характера ИИ в СЭС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
2. Качество электрической энергии в системах электроснабжения: учеб. пособие / О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, Д. Н. Калюжный и др. – Харьков: Харьк. нац. акад. город. хоз-ва, 2006. – 272 с.
3. Карташев, И. И. Качество электрической энергии в муниципальных сетях Московской области / И. И. Карташев, И. С. Пономаренко, В. Н. Тульский, Р. Г. Шамонов, Г. К. Масленников, В. В. Васильев // Промышленная энергетика. - 2002. – № 8. – С. 42-47.
4. Шидловский, А. К. Экономическая оценка последствий снижения качества электрической энергии в современных системах электроснабжения / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, В. Г. Николаенко. – К., 1981. – 49 с. Препринт / 253 ИЭД АН УССР
5. Чэпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии / Д. Чэпмэн // Энергосбережение. – 2004. – № 1. – С. 66–69.
6. Саенко, Ю. Л. Анализ методов определения фактических вкладов в понижение качества электрической энергии по несимметрии и несинусоидальности напряжений / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный // Электрификация транспорта. – 2015. – № 9. – С. 123–133.
7. Y. Sayenko. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages / Y. Sayenko, D. Kalyuzhnyi // IX Miedzynarodowe sympozjum Kompatybilnosc elektromagnetyczna w elektrotechnice i elektronice EMC'. - 2015. S. 84-88.
8. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов / Л. А. Бессонов. – 6 – е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1973. – 752 с.

Поступила в печать 01.12.2012.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Гриб О. Г.*

Потребление и передача электрической энергии пониженного качества является причиной многих негативных последствий, которые в конечном счете выражаются экономическими убытками потребителей и поставщиков электрической энергии. На сегодняшний день насчитывается достаточно большое количество методов определения фактического вклада в понижение качества электрической энергии. Основная часть из них разработана в пространстве симметричных составляющих и базируется на использовании соответствующих параметров режима работы и схем замещения элементов систем электроснабжения. Именно этот прием является главной причиной недостатков существующих методов определения фактических вкладов. Разработка новых математических моделей является ключом к созданию новых, более совершенных методов распределения фактических вкладов. В статье приведены результаты по разработке новой математической модели распределения фактических вкладов линейных источников искажения в искажении напряжений в системе электроснабжения, которая базируется на пространстве фазных составляющих и учитывает распределенный характер источников искажений. Основной идеей разработанной модели является выделение у всех источников искажения искажающих частей и определение их фактического вклада в общее искажение напряжений.

REFERENCES

1. Zhezhelenko I. V., Saenko Yu. L. *Kachestvo elektroenergii na promushlennukh predpriiatiakh* [Power quality in industrial plants.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 261 p.
2. Grib O. G., Senderovich G. A., Kaliuzhnyy D. N. and act. *Kachestvo elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniia* [The quality of electrical energy in power systems.]. Kharkov: Khark. nats. akad. gorod. khoz-va Publ., 2006. 272 p.
3. I. I. Kartashev, I. S. Ponomarenko, V. N. Tulskiy, R. G. Shamonov, G. K. Maslennikov, V. V. Vasilev. *Kachestvo elektricheskoy energii v munitsipalnyih setyah Moskovskoy oblasti* [The power quality of electricity networks in the municipalities of the Moscow region]. *Promyishlennaya energetika - Industrial Power Engineering*, 2002, no 8, pp. 42-47.
4. Shidlovskiy A. K. , Kuznetsov V. G. , Nikolaenko V. G . *Ekonomicheskaiia otsenka posledstviy s nizheniia kachestva elektricheskoy energii v sovremennukh sistemakh elektrosnabzheniia* [Economic evaluation of the effects of reducing the quality of electricity in modern power supply systems.]. Kiev, IED AN USSR Publ., 1981. 49 p.
5. Chepman D. Tsena nizkogo kachestva elektroenergii [Price low power quality]. *Energoberezhnie - Energy Saving*, 2004, no.1, pp. 66–69.
6. Saenko, Yu. L., Kalyuzhnyy, D. N. Analiz metodov opredeleniya fakticheskikh vkladov v ponizhenie kachestva elektricheskoy energii po nesimmetrii i nesinusoidalnosti [The analysis of methods for determining the factual contribution to lowering the power quality through asymmetry and non-sinusoidal voltage]. *Elektrifikatsiya transporta - Electrification of transport*, 2015, no 9. pp. 123–133.
7. Y.Sayenko, D.Kalyuzhnyi. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages. - IX Miedzynarodowe sympozjum Kompatybilnosc elektromagnetyczna w elektrotechnice i elektronice EMC'2015. S. 84-88.
8. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovu elektrotekhniki* [Theory of electrical engineering.]. – Moscow, «Vussh. shkola» Publ., 1973. 752 p.

Ключевые слова: Качество электрической энергии, точка общего присоединения, фактический вклад, несимметрия напряжений, отклонение напряжения.

УДК 621.31

Ю. Л. САЄНКО (ПДТУ), Д. М. КАЛЮЖНИЙ (ХНУМГ ІМ. О. М. БЕКЕТОВА)

Приазовський державний технічний університет, кафедра електрифікації промислових підприємств, Україна, 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7, тел.: (0629)-44-65-51, ел. пошта: YuriSayenko@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, кафедра систем електропостачання та електроспоживання міст, Україна, 61002, м. Харків, вул. Революції, 12, тел.: 050-560-68-35, ел. пошта: KalyuzhniyDN@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-7374-0734

ПРИНЦИП НАКЛАДЕННЯ В МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ РОЗПОДІЛУ ФАКТИЧНИХ ВНЕСКІВ ЛІНІЙНИХ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕНЬ У СПОТВОРЕННЯ НАПРУГ У ТОЧЦІ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ

Споживання й передача електричної енергії зниженої якості є причиною багатьох негативних наслідків, які в остаточному підсумку виражаються економічними збитками споживачів і постачальників електричної енергії. На сьогоднішній день налічується досить велика кількість методів визначення фактичного внеску в зниження якості електричної енергії. Основна частина з них розроблена в просторі симетричних складових і базується на використанні відповідних параметрів режиму роботи й схем заміщення елементів систем електропостачання. Саме цей прийом є головною причиною недоліків існуючих методів визначення фактичних внесків. Розробка нових математичних моделей є ключем до створення нових, більш досконалих методів розподілу фактичних внесків. У статті наведені результати по розробці нової математичної моделі розподілу фактичних внесків лінійних джерел спотворення у спотворення напруг у системі електропостачання, яка базується на просторі фазних складових і враховує розподілений характер джерел спотворень. Основною ідеєю розробленої моделі є виділення в усіх джерелах спотворень спотворюючих частин і визначення їх фактичного внеску в загальне спотворення напруг.

Ключові слова: Якість електричної енергії, точка загального приєднання, фактичний внесок, несиметрія напруг, відхилення напруги.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Гриб О. Г.*

UDC 621.31

Y. L. SAYENKO (PSTU), D. N. KALYUZHNIY (O.M. BEKETOV NUUE)

Pryazovskyi State Technical University, Department of Industrial Electrical Power Supply, Ukraine, 87500, Mariupol, 7 Universytets'ka, tel.: (0629)-44-65-51, e-mail: YuriSayenko@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Department of electrical supply and energy consumption systems of cities, Ukraine, 61002, Kharkiv, 12 Revolutsii, tel.: 050-560-68-35, e-mail: KalyuzhniyDN@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-7374-0734

SUPERPOSITION PRINCIPLE IN MATHEMATICAL MODELS OF THE FACTUAL CONTRIBUTION DISTRIBUTION OF LINEAR SOURCES OF DISTORTION IN VOLTAGE DISTORTION AT THE POINT OF COMMON COUPLING

The consumption and transmission of electric energy of reduced quality is the cause of many negative consequences that lead to economic losses of consumers and suppliers of electric power. Nowadays there are quite a great number of methods for the determination of the factual contribution in the quality power reduction. The main part of them is designed in the space of symmetrical components and is based on the usage of the relevant parameters of the operating regime and equivalent circuits of power systems elements. This technique is a major cause of disadvantages of existing methods for the determination of factual contributions. The development of new mathematical models is the key to the creation of new and better methods of factual contributions distribution. The results on the development of a new mathematical model of factual contributions distribution of linear sources of distortion in voltage distortion in the power supply system, which is based on the phase components space and accounts for the distributed nature of sources of distortion, are presented in the article. The main idea of the designed model is generation of distorting parts in all sources of distortion and determination of their factual contribution to the overall voltage distortion.

Keywords: Power quality, factual contribution, point of common coupling, voltage asymmetry, voltage deviation.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Grib O. G.*

© Саєнко Ю. Л., Калюжний Д. Н., 2015

**ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ
ТРАНСПОРТУ**

науковий журнал

**ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ
ТРАНСПОРТА**

научный журнал

**ELECTRIFICATION
OF TRANSPORT**

scientific journal

Свідоцтво про державну реєстрацію № 17327 – 6097P від 14.10.2010 р.

ISSN 2307-4221 (print) ISSN 2312-6574 (online)

Передплатний індекс 68641

*Відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України № 793 від 04.07.2014 р.
включений до Переліку наукових фахових видань України*

Передрук матеріалів здійснюється тільки з дозволу редакції

Члени редакційної колегії здійснюють рецензування та редагування статей

Статті друкуються українською, російською та англійською мовами

Журнал представлений у науково-метричних та реферативних базах даних

INDEX  COPERNICUS
INTERNATIONAL


URAN
Ukrainian Railway Academy



УрЖ **український реферативний журнал**
"Д Ж Е Р Е Л О"

*Редактор: Сиченко В. Г.
Комп'ютерна верстка: Босий Д. О.*

Поштова адреса:

49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2
ДНУЗТ, кафедра «Електропостачання залізниць»,
тел.: (056) 373-19-11, факс.: (0562) 47-16-74
E-mail: elpostz@i.ua URL: <http://etr.diit.edu.ua/>

Формат 60×84 ¹/₈ Ум. др. арк. 14,8. Зам. №
Наклад 150 прим.

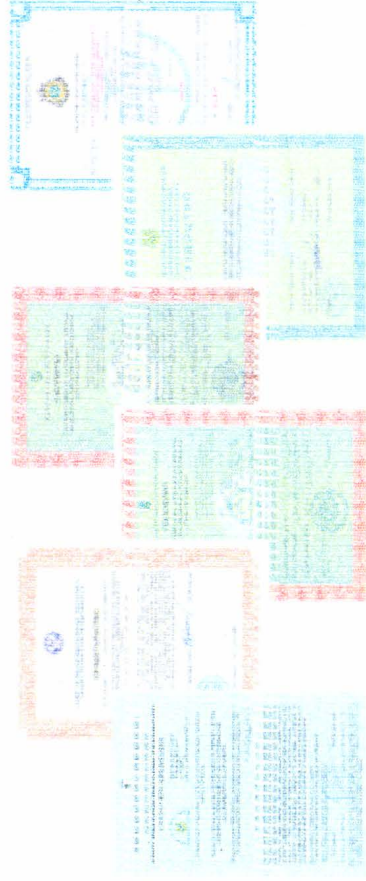
**Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна**

49010, Україна, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2
Тел.: +38(0562) 33-58-96, факс: +38(0562) 33-58-97

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ "ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА" (ГП "ДОСЖТ")

создано 31 августа 1994 года совместным приказом № 456/219 Министерства транспорта Украины и Госпотребстандарта Украины.

На протяжении почти двух десятилетий ГП "ДОСЖТ" успешно проводит работы в сфере сертификации продукции, производств, процессов и систем в железнодорожной отрасли.



Основными направлениями деятельности предприятия

являются:

- сертификация продукции для нужд железнодорожного транспорта;
- сертификация, аттестация производств железнодорожного транспорта;
- сертификация услуг, предоставляемых железнодорожным транспортом;
- сертификация импортной продукции, процессов и услуг;
- сертификация систем управления качеством;
- оценка соответствия продукции, процессов и услуг требованиям технических регламентов;
- обучение по сертификации, внутренним аудитам и системам управления качеством;
- проверка знаний работников субъектов перевозок опасных грузов железнодорожным, морским и речным транспортом;

- мероприятия по ознакомлению и внедрению системы IRIS;
- проведение периодических и частичных технических освидетельствований грузоподъемных кранов, лифтов, эскалаторов, энергетический аудит, электрические измерения, проверка цистерн для перевозки опасных грузов.

Мы помогаем предприятиям достигнуть успеха, расширяя границы возможностей и сбыта, не только на внутреннем, но и зарубежных рынках. И поэтому мы точно знаем:

УСПЕХ В СООТВЕТСТВИИ!

Наши сотрудники, высококвалифицированные специалисты, среди которых кандидаты технических наук, аудиторы по сертификации продукции, аудиторы по аттестации производств и систем управления качеством.

Преимущества работы с нашим предприятием

- 21 год успешной работы предприятия;
- компетентность сотрудников и высокое качество предоставляемых услуг;
- дифференцированные тарифы;
- индивидуальный подход к каждому заказчику;
- прозрачность и доступность выполняемых процедур;
- имеем репутацию надежного партнера.

Для обеспечения потребностей заказчиков нами постоянно осваиваются новые направления деятельности.

Нашими постоянными клиентами являются ведущие в железнодорожной отрасли предприятия: ПАО "Днепропетровский стрелочный завод", ПАО "Интерлайп НТЗ", ПАО "Азовмаш", ПАО "Днепровагонмаш", ГП "Стрийский вагоноремонтный завод", ЧАО "Ивано-Франковский локомотиворемонтный завод" и многие другие. Мы успешно сотрудничаем с предприятиями стран ближнего и дальнего зарубежья: Польши, России, Индии, Беларуси, Казахстана, Китая