

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

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 15 / 2018

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Передплатний індекс 68641

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

ДНІПРО

№ 15, 2018

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 № 11 від 25.06.2018 р.

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

Сиченко В. Г. д.т.н., професор, 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);
Афанасов А. М. (Дніпропетровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна); 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); Саєнко Ю. Л.
(Приазовський державний технічний університет), Сокол Є. І. (Національний
технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); Максимчук В. Ф.
(Департамент електропостачання ПАТ «Укрзалізниця»)

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ

Аврамовіч З. (Транспортний інститут, Белградський університет, Сербія);
Бадьор М. П. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська
Федерація); Бочков К. А. (Білоруський державний університет транспорту,
Білорусь); Омарбеков А. К. (Науково-дослідний центр Казахстанеміржолі,
Казахстан); Васяк І. (Лодзинська політехніка, Інститут електроенергетики,
Республіка Польща); Стежецькі Р. (Інститут електротехніки, Варшава, Республіка
Польща); Палечек Й. (Остравський технічний університет, Чеська республіка).

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

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

Видання виходить 2 рази на рік з червня 2011 р.

електрорухомий склад / electric rolling stock

Сінчук О. М., Сінолиций А. П., Несмашний Є. О., Федотов В. О., Барановська М. Л., Лоташ П. В., Скапа Є. І.

Дослідження перехідних процесів у тяговому електроприводі двовісного шахтного електровозу .7

Синчук О. Н., Синолицый А. Ф.,

Sinchuk O. N., Sinolitsyy A. F.,

Несмашный Е. А., Федотов В. А., Барановская М.Л., Лоташ П. В., Скапа Е. И.

Nesmashnyy Ye.A., Fedotov V.A., Baranovskaya M.L., Lotash P.V., Scapa E. I.

Исследование переходных процессов в тяговом электроприводе двоосного шахтного электровоза..... 7

Investigation of transient processes in the electric traction drive of underground electric locomotives7

Муха А. М., Бондар О. І., Устименко Д. В., Куриленко О. Я.

Комп'ютерне моделювання режимів підвищеної частоти тягового трансформатора.....19

Муха А.Н., Бондарь О.И., Устименко Д.В., Куриленко Е. Я.

Mukha A.M., Bondar O.I., Ustimenko D.V., Kurylenko O. Y.

Компьютерное моделирование режимов повышенной частоты тягового трансформатора... 19

Computer simulation of the increased frequency modes for the traction transformer.... 19

електропостачання / power supply

Губський П. В.

Енергетичні канали живлення розподілених систем тягового електропостачання.....23

Губский П. В.

Hubsky P. V.

Энергетические каналы питания распределенных систем тягового электроснабжения 23

Energy channels of power of distributed systems of type electrical supply.....23

Денисюк С. П., Соколовський П. В.

Аналіз функціонування гнучкої генерації на етапі переходу до інтелектуальних мереж Smart Grid31

Денисюк С. П., Соколовский П. В.

Denysiuk S. P., Sokolovskyi P. V.

Анализ функционирования гибкой генерации на этапе перехода к интеллектуальным сетям Smart Grid..... 31

Analysis of the variable generation function on the step of transition to intellectual networks Smart Grid31

Курган М. Б., Байдак С. Ю., Хмелевська Н. П.

Дослідження ефективності електрифікації напрямку Запоріжжя - Комиш Зоря - Волноваха..43

Курган Н.Б., Хмелевская Н.П., Байдак С.Ю.

Kurhan M. B., Khmelevska N. P.,

Исследование эффективности электрификации направления Запорожье - Камыш-Заря - Волноваха..... 43

Baidak S. Yu.
Research efficiency of electrification directions Zaporozhye - Kamysh-Zarya – Walnovakh ..43

Саенко Ю. Л., Бараненко Т. К.

Підвищення надійності систем електропостачання як складова задачі оптимізації режимів електроспоживання54

Саенко Ю. Л., Бараненко Т. К.

Sayenko Yu. L., Baranenko T. K.

Повышение надежности систем электроснабжения как составляющая задачи оптимизации режимов электропотребления 54

Increase of reliability of power supply systems as a component of the problem of optimization of power consumption regimes54

Семененко О. І., Супрун О. Д., Семененко Ю. О., Одегов М.М.

Застосування активних фільтрів-стабілізаторів у розподіленій системі електропостачання...61

Семененко А. И., Супрун А. Д.,

Semenenko O. I., Suprun O. D.,

Семененко Ю. А., Одегов Н. Н.

Semenenko Y. O., Odegov M. M.

Применение активных фильтров-стабилизаторов в распределенной системе электроснабжения . 61

Application of active filters-stabilizers in a distributed electrical supply system61

Сокол Є. І., Замаруєв В. В., Івахно В. В., Стисло Б. О.

Застосування акумуляторних підсилюючих пунктів в системі електропостачання

залізничного транспорту.....	68
Сокол Е. И., Замаруев В. В., Ивахно В. В., Стысло Б. А.	Sokol Ye. I., Zamaruiev V. V., Ivakhno V. V., Styslo B. O.
Использование аккумуляторных усиливающих пунктов в системе электроснабжения железно- дорожного транспорта	The use of accumulator power station in the railway transport power supply system.....
68	68

автоматизация і діагностика / automation and diagnose

Стасюк О. И., Гайденко О. С., Гончарова Л. Л.	Stasiuk O. I., Haidenko O. S., Honcharova L. L.
Дифференциальные модели та комп'ютерно-орієнтовні методи інтелектуалізації процесів визначення інформативності параметрів режимів інтелектуальних мереж електропостачання залізниць	Differential models and computer-orientated methods of the processes determining paramete- ters modes informativeness of railways electric- ity supply intelligent networks intellectualiza- tion.....
75	75

енергозбереження / energy saving

Далека В. Х., Козлова О. С., Шкрятко А. В.	Daleka V. H., Kozlova O. S., Shkriabko A. V.
Методи підвищення ефективності систем електропостачання на міському електричному транспорті.....	Improving methods the power supply systems efficiency on municipal electric transport.....
84	84
Далека В. Ф., Козлова О. С., Шкрятко А. В.	Daleka V. H., Kozlova O. S., Shkriabko A. V.
Методы повышения эффективности систем электроснабжения на городском электрическом транспорте	Improving methods the power supply systems efficiency on municipal electric transport.....
84	84
Кузнецов В. Г., Кравцов А. В.	Kuznetsov V. G., Kravtsov A. V.
Розрахунок потенціалу енергозбереження за рахунок управління показниками потоку поїздів ...	Calculation of energy saving potential by controlling the flow of trains.....
91	91
Кузнецов В. Г., Кравцов А. В.	Kuznetsov V. G., Kravtsov A. V.
Расчет потенциала энергосбережения за счет управления показателями потока поездов..	Calculation of energy saving potential by controlling the flow of trains.....
91	91
Мартиненко В. И., Босий Д. О.	Martynenko V. I., Bosyi D. O.
Дослідження ефективності автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії побутових споживачів	Research of the efficiency of the automated system of commercial electricity consumption calculation for household consumers
99	99
Мартыненко В. И., Босый Д. А.	Martynenko V. I., Bosyi D. O.
Исследование эффективности автоматизиро- ванной системы коммерческого учета электро- энергии бытовых потребителей	Research of the efficiency of the automated system of commercial electricity consumption calculation for household consumers
99	99
Кім Є. Д., Чрзан К. Л.	Kim E. D., Chrzan K. L.
Ефективність використання лінійних полімерних ізоляторів в комбінації з скляними.....	Efficiency of the use of linear polymer insula- tors in the combination with glasses
109	109
Ким Е. Д., Чрзан К. Л.	Kim E. D., Chrzan K. L.
Эффективность использования линейных полимерных изоляторов в комбинации со стеклянными.....	Efficiency of the use of linear polymer insula- tors in the combination with glasses
109	109
Костенко І. О., Харченко В. Ф., Хворост М. В.	Kostenko I. O., Kharchenko V. F., Khvorost M. V.
Розрахунок магнітних характеристик тягового двигуна постійного струму з комбінованим збудженням для троллейбусів	Calculation of the magnetic characteristics of the traction dc motor with combined excitation for trolley buses.....
117	117
Костенко И. А., Харченко В. Ф., Хворост Н. В.	Kostenko I. O., Kharchenko V. F., Khvorost M. V.
Расчет магнитных характеристик тягового двигателя постоянного тока с комбинирован- ным возбуждением для троллейбусов	Calculation of the magnetic characteristics of the traction dc motor with combined excitation for trolley buses.....
117	117

УДК 622.625:621.333

О. Н. СИНЧУК, А. Ф. СИНОЛИЦЬЙ, Е. А. НЕСМАШНЫЙ, В. А. ФЕДОТОВ,
 М. Л. БАРАНОВСКАЯ, П. В. ЛОТАШ (КНУ),
 Е. И. СКАПА (КНУ ИМ. МИХАИЛА ОСТРОГРАДСКОГО)

Кафедра автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, ул. Виталия Матусевича, 11, 50027, Украина, +38056-409-17-30, e-mail: speet@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-7621-9979

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ДВООСНОГО ШАХТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Введение

Основным видом транспорта отечественных предприятий с технологиями подземного ведения работ является электровозный, обеспечивающий 100 % грузоперевозок товарной железной руды [1-6]. В общем объеме электроэнергопотребления подземных горнорудных предприятий доля внутришахтного рудничного транспорта в последние десятилетия возросла почти на 50 % по сравнению с 1990 годом и к 2015 году достигла более чем 20 % от общего объема энергопотребления шахт (рудников) [1-3].

Как показывают результаты исследований [7-14] такой «завышенный» уровень энергопотребления внутришахтного электровозного транспорта (ВШТ) железорудных шахт объясняется как усложнением горнотехнологических условий добычи железорудного сырья (ЖРС), в связи с понижением глубины добычи, так и морально устаревшими видами тяговых электромеханических комплексов (ТЭМК) электровозов, используемых для внутришахтных доставок добываемого сырья.

В последние годы в Украине для отечественных горных предприятий созданы экспериментальные образцы новых типов рудничных электровозов с энергоэффективными видами тяговых ТЭМК на основе IGBT-инверторов и асинхронных электрических двигателей с короткозамкнутым ротором [15-19].

В показателях энергоэффективности горно-транспортного комплекса подземных предприятий важную роль играют режимы функционирования движением ВШТ вообще и при погрузочно – разгрузочных операциях в частности. Более того, подчеркнем, что 100 % вышеобозначенных циклов – это переходные, неустановившиеся режимы функционирования ТЭМК, которые не только энергонезэффективны, но и создают дополнительный комплекс нежелательных моментов.

Цель

Анализ поведения тягового электромеханического комплекса электровозов при функционировании их в специальных условиях подземных горных выработок железорудных шахт.

Результаты исследования

Синтез тяговых электротехнических комплексов – сложных электромеханических систем, основан на системном подходе к анализу режимов их функционирования в составе электротехнического комплекса (системы) – электровозосостава (электровоз – вагонетки).

Поэтому анализ переходных режимов функционирования ТЭМК как доминирующих в процессе движения электровозосоставов в условиях железорудных шахт является треугольным моментом синтеза данных видов комплексов. Реально оценить динамику поведения ТЭМК электровозов в требуемом объеме в подземных условиях нереально. Поэтому в этом исследовательском варианте на первый план выходит моделирование этих режимов исходя из реальных исходных данных.

Схема математической формализации задачи выбора оптимального (лучшего) решения состоит в том, что необходимо фиксировать счетное множество M рассматриваемых элементов P и по нем определять функционал $J(P_1, P_2, \dots, P_i)$, $P \in M$, характеризующий качество комбинации элементов P . Ставится задача – найти множество M и такую комбинацию элементов P , при которой рассматриваемый функционал $J(P_1, P_2, \dots, P_i)$ достигает своего наименьшего значения $J(P_1, P_2, \dots, P_i) \rightarrow \min$. В общем случае, один из элементов комбинации, доставляющий минимум функционалу, может отсутствовать в рассматриваемом множестве M и тогда задача не будет иметь решения. Из-за этого недостатка общую задачу сформулируем в виде: найти последовательность комбинации параметров P_i множества M , на котором $J(P_i) \rightarrow \min$ при $P_i \rightarrow \infty$. Такая последователь-

ность всегда существует, раз существует точная низшая граница функционала. Кроме того, в инженерной практике целесообразно получить возможность оценки влияния каждого параметра – слагаемого тягового электромеханического комплекса, на значения функционала.

Уравнение движения системы – «шахтный электровоз – вагонетки» может быть представлено в виде системы дифференциальных уравнений, полученных на основе уравнения [20]:

$$\begin{cases} m_1 x_1 + h_1 x_1 + f(S)(x_1 + x_2) = F(t); \\ m_2 x_2 + h_2 x_2 - f(S)(x_1 - x_2) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где m_1, m_2 – массы соответственно электровоза и вагонеток; x_1, x_2 – координаты перемещения; $f(S)$ – характеристика автосцепного устройства; h_1, h_2 – коэффициент сопротивления движению электровозосостава; $h_i = G_i f$, f – коэффициент трения; G_1, G_2 – вес соответственно электровоза и вагонеток; $F(t)$ – обобщенная внешняя сила.

Для решения системы уравнений (1) необходимо определить вид функции $f(S)$, предельной по условиям сцепления значение движущей силы сопротивления передвижению, что требует проведения соответствующих дополнительных исследований.

При анализе процессов системы тягового электротехнического комплекса с целью упрощения процесса поиска без видимой погрешности конечного результата авторами приняты следующие ограничения:

- транзисторы и другие элементы в IGBT-преобразователе с ШИМ обладают идеальными характеристиками (прямое падение напряжения и обратный ток равны нулю);
- величина переходных потерь напряжения в преобразователе является постоянной;
- уровни напряжения источника питания, магнитного потока и скорости электродвигателя на протяжении одного периода переключения преобразователя, величина которого существенно меньше постоянных времени T_σ (тяговой аккумуляторной батареи), T_s, T_m , являются постоянными;
- преобразователь, работающий в ключевом режиме, имеет достаточно высокую частоту коммутации и обеспечивает непрерывный характер тока в цепи электродвигателя.

Уравнения динамики данной системы:

$$\frac{m_1 \cdot m_2}{C} \frac{d^3 V_1}{dt^3} + (m_1 + m_2) \frac{dV_1}{dt} = F - F_c + \frac{m_2}{C} \frac{d^2 F_1}{dt^2}; \quad (2)$$

$$\frac{m_1 \cdot m_2}{C} \frac{d^3 V_2}{dt^3} + (m_1 + m_2) \frac{dV_2}{dt} = F - F_c + \frac{m_1}{C} \frac{d^2 F_1}{dt^2}; \quad (3)$$

где m_1, m_2 – соответственно массы электровоза (с учетом приведенных масс электродвигате-

лей) и составов; C – коэффициент жесткости сцепки; V_1, V_2 – линейные скорости масс m_1 и m_2 ; F – движущее усилие, приложенное к массе m_1 ; F_c – сила статистического сопротивления, действующего на массу m_2 .

Общая структура рассматриваемой системы ТЭМК представлена на рис. 1, а. Полученная структура характеризуется жесткой параметрической связью по управляющему параметру γ и наличием существенных нелинейностей.

При рассмотрении данной структуры в условиях малых отклонений входных параметров получен линейный аналог модели системы ТЭМК шахтного электровоза, структура которого показана на рис. 1, б.

Разработанные модели позволяют выполнить анализ систем приводов рудничных контактно-аккумуляторных электровозов с целью поиска и реализации оптимальных режимов их функционирования.

При погрузочно-разгрузочных операциях ТЭМК рудничный электровоз работает в пуско-тормозных режимах. При этом реалистичной для разработки алгоритма управления ТЭМК является треугольная, а не трапецеидальная форма графиков движения (рис. 2) [2, 15-19].

В расчетах использовались модели электровозосостава – электровоза и вагонеток, учитывающие упругие и вязкие свойства как электровоза и вагонеток, так и аппарата сочленения. Расчетные ситуации, рассматриваемые при моделировании: соударения вагонов при формировании поезда, пуск поезда и полное служебное торможение.

Базовая (расчетная) модель шахтного электровоза приведена на рис. 3. В общем случае механическая часть представляет собой систему связанных масс, движущихся с различными скоростями вращательно или поступательно. При изменении нагрузки элементы системы (валы, опоры, клиноремные передачи, зубчатые зацепления и т.п.) деформируются, т. к. механические связи не являются абсолютно жесткими. Входной вал механизма приводится во вращение со скоростью ω_1 электромагнитным моментом M , возникающим на роторе двигателя.

Исследования динамики показывают, что в большинстве практических случаев реальные механизмы могут быть сведены к расчетным

Основное уравнение движения ТЭМК электровоза:

$$J_s \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (4)$$

где $J_s = J_1 + J_2$, $M_c = M_{c1} + M_{c2}$.

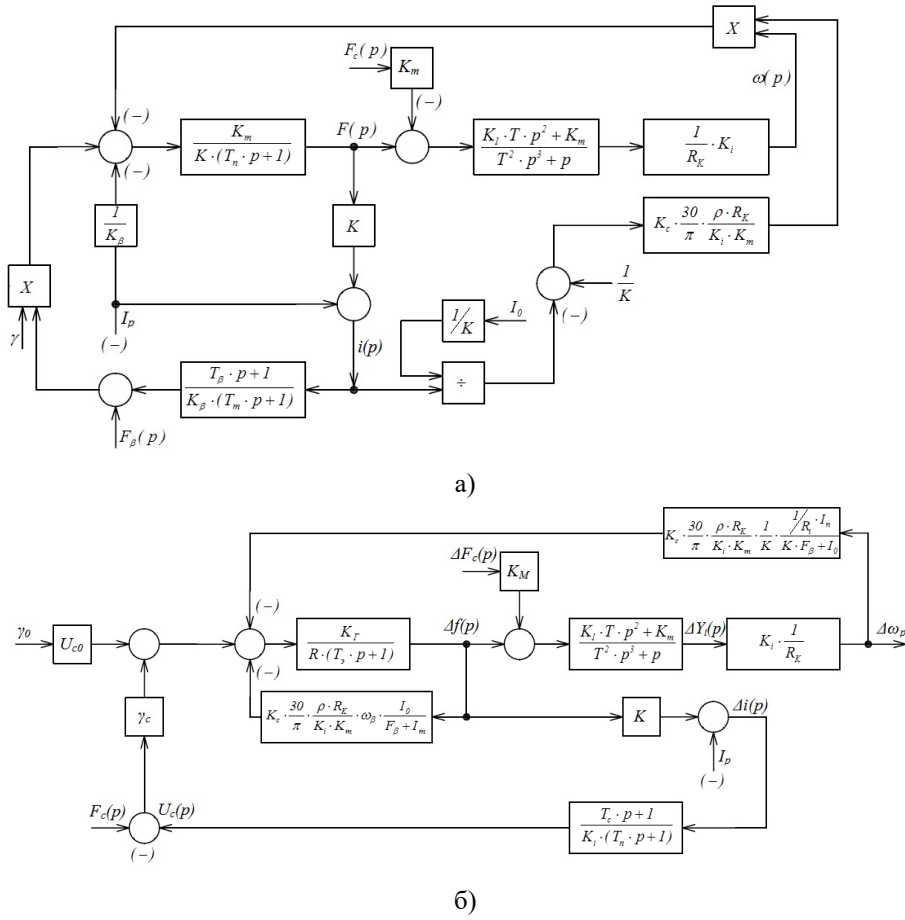


Рис. 1. Варианты структурных схем математической модели тягового электрического привода

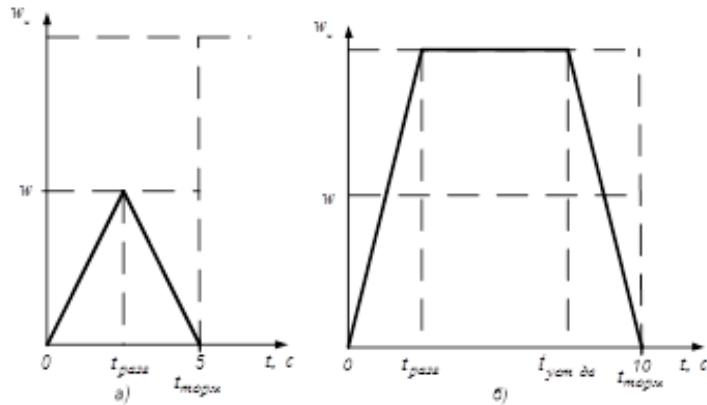


Рис. 2. Диаграммы движения рудничного электровозосостава при погрузке-разгрузке: а – орты-заезды, опрокид, б – при движении по главным откаточным выработкам (квершлагам)

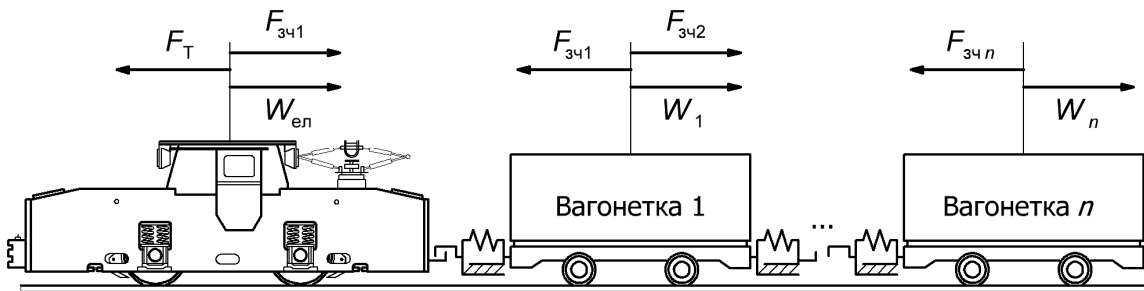


Рис. 3. Базовая (расчетная) модель рудничного электровозосостава

С помощью (4) можно по известному электромагнитному моменту двигателя и значениям J_1 и M оценить среднее значение ускорения ТЭМК, предсказать время, за которое двигатель достигнет заданной скорости, и решить многие другие практические вопросы даже в тех случаях, когда влияние упругих связей в системе существенно.

Для дальнейшего синтеза системы управления и регулирования, опишем динамику шахтного электровозного состава как трех массовую систему, состоящую из электровоза массой m_1 , загруженных вагонеток с суммарной массой m_2 и пустых вагонеток с суммарной массой m_3 . На перечисленные массы действуют силы, обусловленные трением качения, вязким трением и упругостью связи соединения между электровозом с нагруженными и пустыми вагонетками.

Структурная схема математической модели ТЭМК шахтного электровоза, приведенная к валу тягового двигателя, показана на рис. 4 (U_z – напряжение задания; C_{12}, C_{23} – суммарные коэффициенты упругости соединения электровоза с нагруженными вагонетками и пустыми вагонетками; Ck_{12}, Ck_{23} – коэффициенты вязкого трения нагруженных и пустых вагонеток, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – соответственно углы поворота колес электровоза, нагруженных и пустых вагонеток; M_{T1}, M_{T2}, M_{T3} – соответственно моменты трения электровоза, нагруженных и пустых вагонеток; T_3 – электромагнитная постоянная электропривода; T_{M1}, T_{M2}, T_{M3} – соответственно механические постоянные времени электровоза, нагруженных и пустых вагонеток).

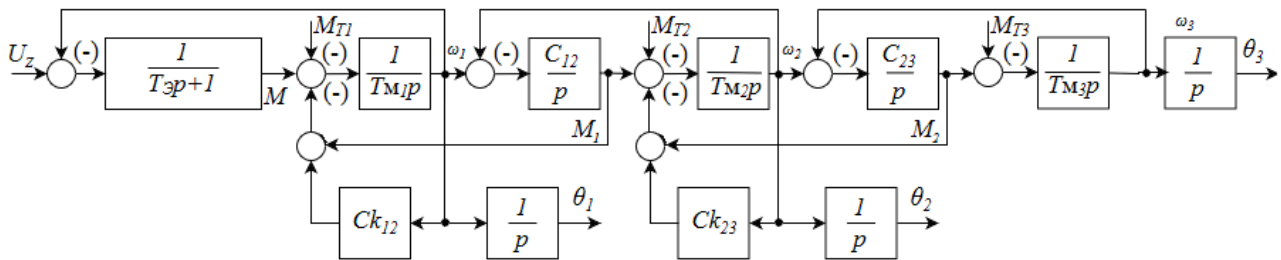


Рис. 4. Структурная схема математической модели тягового электромеханического комплекса шахтного электровоза

Система дифференциальных уравнений, описывающих электромеханические переходные процессы, приведенные к валу электродвигателя, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dM}{dt} = (U_z - M - \omega_1) / T_H \\ \frac{d\omega_1}{dt} = (M - M_1 - \omega_1 \cdot ck_{12} - signM_{TP1}) / T_{m1} \\ \frac{dM_1}{dt} = (\omega_1 - \omega_2) \cdot c_{12} \\ \frac{d\omega_2}{dt} = (M_1 - M_2 - \omega_2 \cdot ck_{23} - signM_{TP2}) / T_{m2} \\ \frac{dM_2}{dt} = (\omega_2 - \omega_3) \cdot c_{23} \\ \frac{d\omega_3}{dt} = (M_2 - signM_{TP3}) / T_{m3} \\ \frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1 \\ \frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2 \\ \frac{d\theta_3}{dt} = \omega_3 \end{cases} \quad (5)$$

Расчет переходных процессов проведен в относительных единицах.

Параметры электромеханической системы следующие: номинальная скорость вращения электродвигателя $n_n=1320$ об/мин; суммарное активное сопротивление электропривода $R_\Sigma=0,095$ Ом; номинальное напряжение двигателя $U_n=250$ В; коэффициент потока двигателя в исследуемом режиме $K_\Phi = 1,75$ В/с; приведенный момент инерции двигателя $J=4$ кг·м²; электромагнитная постоянная электропривода $T_3=0,01$ с; передаточное число редуктора $i=14,75$; диаметр колеса $D_k=0,76$ м; масса электровоза $m_{эл}=14$ т; масса вагона $m_в=4-6$ т; масса груза $m_г=10$ т; масса загруженного состава $m_c=160$ т; передвижение 0,5 длины вагона 6 с; передвижение 1 длины вагона 10 с; скорость электровоза $v = R_k \cdot \omega_n / i_{ред} = 0,38 \cdot 1320 \cdot 0,105 / 14,75 = 3,6$ м/с; радиус приведения $\rho = v / \omega = 3,6 / 138 = 0,026$ м; приведенный момент инерции электровоза $J_1 = m_{эл} \cdot \rho^2 = 14000 \cdot 0,026^2 = 9,464$ кг·м²; приведенный момент инерции нагруженного состава $J_2 = m_c \cdot \rho^2 = 160000 \cdot 0,026^2 = 108,16$ кг·м². За базовые единицы принимаем: $U_n=250$ В, $R_\Sigma=0,095$ Ом, $K_\Phi = 1,75$ В/с. В этом случае по-

стоянные времени рассматриваемой системы остаются в реальном времени.

На рис. 5 приведены графики переходных процессов по положению электровоза с вариантами загрузки одной, трех и шести вагонеток соответственно.

Из рис. 5 следует, что при нагруженной одной вагонетке электровоз и вагонетка отрабатывают одинаковое перемещение равно $\theta=0,78$; при трех нагруженных вагонетках – $\theta=0,7$; при шести – $\theta=0,6$. При отработке заданного перемещения $\theta=0,8$ при загрузке одной вагонетки ошибка при остановке составляет 2,5 % (процесс колебательный без перерегулирования); при загрузке трех вагонеток – 12,5% (перерегулирование по перемещению электровоза составляет 10 %); при загрузке шести вагонеток переходный процесс колебательный без перерегулирования по перемещению тягового электровоза и аperiodический по перемещению нагруженных вагонеток.

Переходные процессы по заданию и моменту электропривода при разном количестве нагруженных вагонеток представлены на рис. 6.

При треугольном законе изменения напряжения управления момент, развиваемый двигателем электропривода электровоза, носит колебательный знакопеременный характер. Частота и коэффициент затухания колебаний зависит от количества нагруженных вагонеток. Для одной нагруженной вагонетки $\omega_0 = 2\pi/(4,2-1,75) = 2,56$ рад/с, для трех – $\omega_0 = 2\pi/(3,5-1,75) = 3,6$ рад/с, для шести – $\omega_0 = 2\pi/(4,5-1,75) = 2,28$ рад/с. Непропорциональное изменение частоты колебаний системы можно объяснить одновременным изменением коэффициентов упругости и моментов инерции. Максимальное время регулирования (протекания переходного процесса) составляет $t_0 = 11,5$ с при нагруженной одной вагонетки. Для трех и шести нагруженных вагонеток время регулирования составляет $t_0 = 9,5$ с.

Графики переходных процессов по заданию и скорости вращения представлены на рис. 7. Переходный процесс – колебательный. Степень колебания скорости вращения электровоза, нагруженных и пустых вагонеток $m=1$ (количество полуолн).

Графики переходных процессов по положению представлены на рис. 8.

Повышение точности остановки нагруженных вагонеток улучшается за счет увеличения

амплитуды задающего сигнала при увеличении количества нагруженных вагонеток.

Результаты расчета при увеличении амплитуды задающего сигнала U_z с увеличением количества нагруженных вагонеток при дозированном увеличении амплитуды задающего сигнала при загрузке трех вагонеток на $\Delta U_z=0,06$; при загрузке шести вагонеток на $\Delta U_z=0,12$ приведены на рис. 9. Характер переходных процессов остался неизменным.

На рис. 10 графики 2 и 2а переходного процесса получены при увеличении задания на $\Delta U_z = 0,0125$, графики 3 и 3а при $\Delta U_z = 0,11875$. Отсюда следует вывод, что приращение амплитуды сигнала управления с увеличением нагруженных вагонеток имеет не линейный характер.

На рис. 11 приведена структурная схема математической модели электромеханической системы рудничного электровоза, в котором используется подчиненная система регулирования с настройкой по симметричному оптимуму контура момента (тока) и модульному оптимуму контура частоты вращения электропривода.

Графики переходных процессов по положению электровоза и поочередной загрузке первой, третьей и шестой вагонеток приведены на рис. 12.

Переходные процессы по перемещению шахтного электровоза с использованием регулируемого электропривода, настроенного на симметричный и модульный оптимум приведены на рис. 13. Максимальная установившаяся ошибка по перемещению при шести нагруженных вагонетках составляет 5 %.

Процессы носят колебательный характер с меньшим коэффициентом затухания. Время переходного процесса составляет от 12 с до 16 с, что больше времени при отсутствии системы автоматического управления процессом пуска-торможения. Максимальное перерегулирование составляет 45% при загрузке трех вагонеток.

Степень колебания системы: $m=7$ для одной нагруженной вагонетки, $m=3$ для трех нагруженных вагонеток, $m=1$ для шести нагруженных вагонеток. Отсюда видно, что с увеличением числа нагруженных вагонеток степень колебания уменьшается и при конструировании ТЭМК, а точнее СУ ими, достаточно учитывать переходные процессы для шести вагонеток в составе.

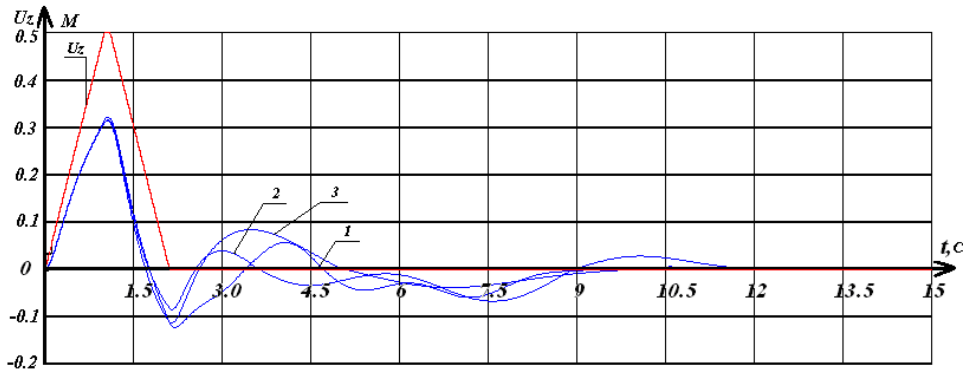


Рис. 5. Графики переходных процессов по положению: 1 – перемещение электровоза при нагруженной одной вагонетке; 1а – перемещение нагруженной вагонетки; 2 – перемещение электровоза при нагруженных трех вагонетках; 2а – перемещение трех нагруженных вагонеток; 3 – перемещение электровоза при шести нагруженных вагонетках; 3а – перемещение при шести нагруженных вагонетках

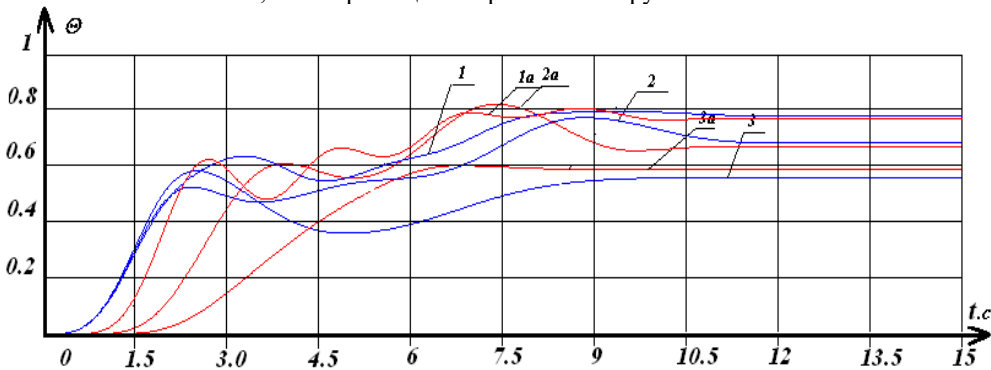


Рис. 6. Графики переходных процессов по заданию и моменту: 1 – загружена одна вагонетка; 2 – загружены три вагонетки; 3 – загружены шесть вагонеток

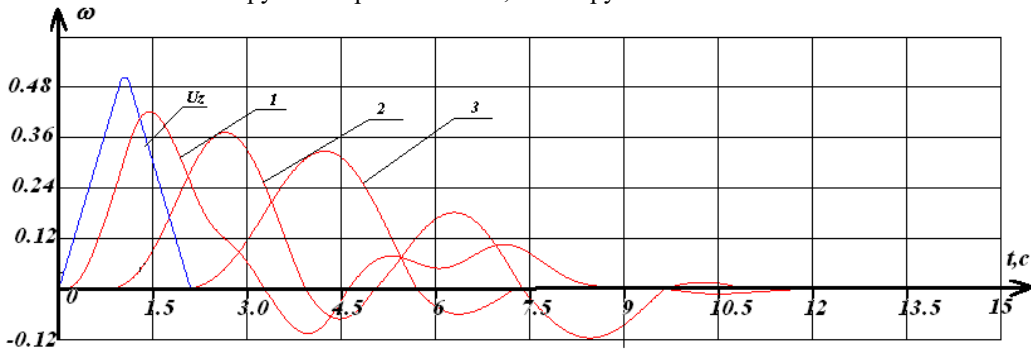


Рис. 7. Графики переходных процессов по заданию и скорости вращения электродвигателя электровоза: 1 – загружена одна вагонетка; 2 – загружены три вагонетки; 3 – загружены шесть вагонеток

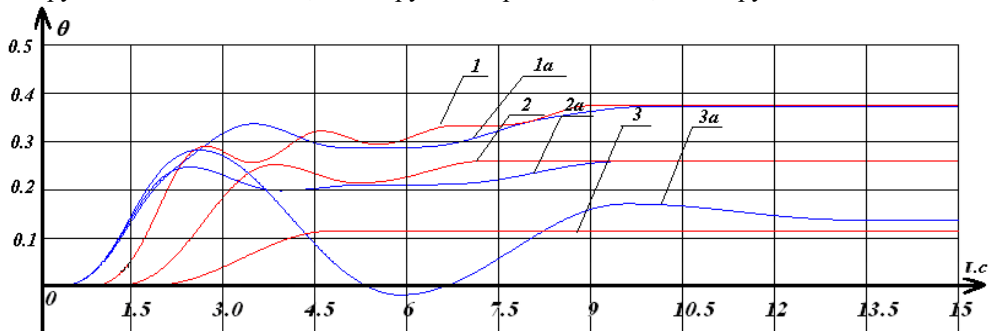


Рис. 8. Графики переходных процессов по положению: 1 – перемещение электровоза при нагруженной одной вагонетке; 1а – перемещение нагруженной вагонетки; 2 – перемещение электровоза при нагруженных трех вагонеток; 2а – перемещение трех нагруженных вагонеток; 3 – перемещение электровоза при шести вагонетках при свободном выбеге

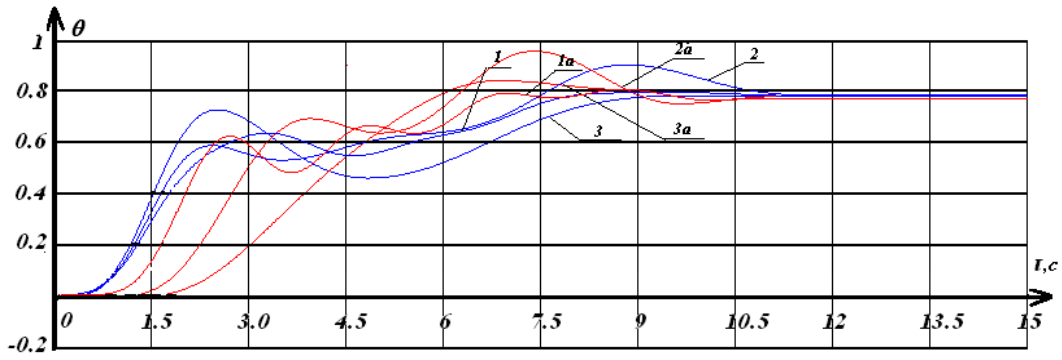


Рис. 9. Графики переходных процессов по перемещению при увеличении амплитуды сигнала соответственно электровоза – 1, 2, 3 и загруженных вагонеток – 1а, 2а, 3а для одной, трех и шести вагонеток

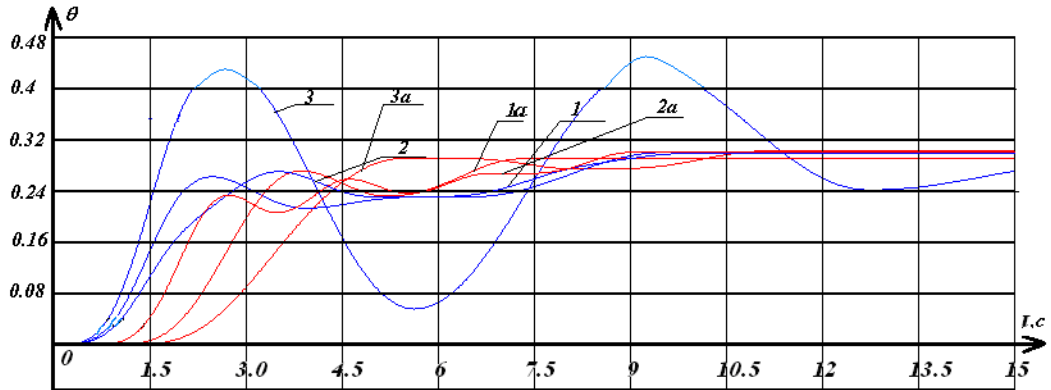


Рис. 10. Графики переходных процессов по перемещению соответственно электровоза – 1, 2, 3 и загруженных вагонеток - 1а, 2а, 3а для одной, трех и шести при увеличении амплитуды сигнала при свободном выбеге

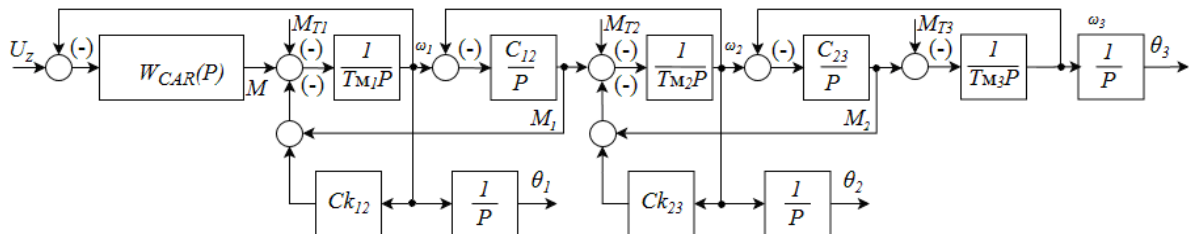


Рис. 11. Структурная схема математической модели тягового электромеханического комплекса шахтного электровоза с системой подчиненного регулирования

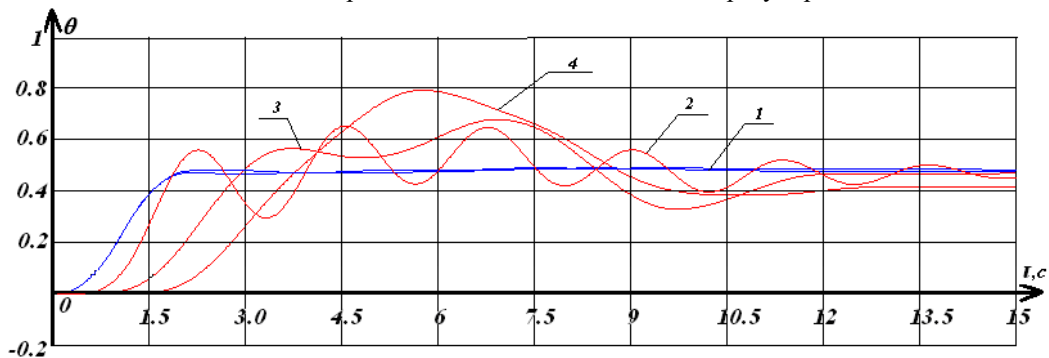


Рис. 12. Графики переходных процессов по положению: 1- перемещение электровоза при нагруженной одной вагонетки; 1а – перемещение нагруженной вагонетки; 2 - перемещение электровоза при нагруженных трех вагонеток; 2а – перемещение трех нагруженных вагонеток; 3 - перемещение электровоза при шести нагруженных вагонетках; 3а – перемещение при шести нагруженных вагонетках

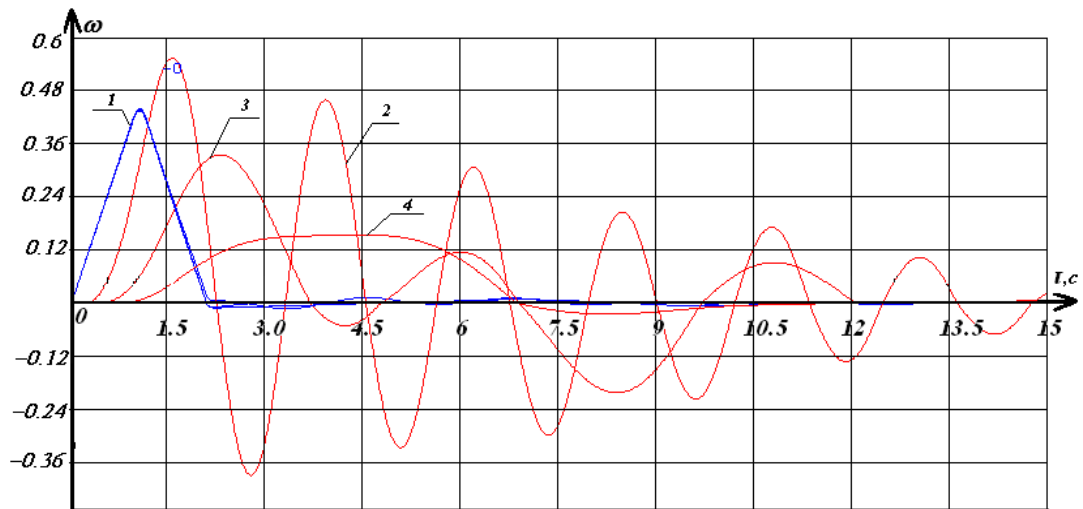


Рис. 13. Графики переходных процессов по скорости: 1 – скорость электровоза; 2- скорость одной загруженной вагонетки; 3- скорость трех загруженных вагонеток; 4 – скорость шести загруженных вагонеток

Выводы

На основании разработанной математической модели выявлено влияние системообразующих параметров на динамические свойства системы: рудничный «электровоз – вагонетки».

Определены оптимальные значения параметров системы, обеспечивающие требуемую точность установки вагонеток под погрузочным люком для погрузки: точность постановки рудничного электровозосостава под погрузку может быть повышена путем ступенчатого увеличения амплитуды сигнала задания на перемещение в зависимости от количества загруженных вагонеток, как в разомкнутой системе

регулирования, так и с применением систем подчиненного регулирования электроприводом. При этом переходный процесс при загрузке менее шести вагонеток носит резко колебательный характер.

Применение систем подчиненного регулирования тяговым электроприводом рудничного электровоза повысит степень колебания системы. Для улучшения качества переходного процесса по перемещению необходим алгоритм управления ТАП (тяговый асинхронный привод) и его реализация в комплексе СУ рудничным контактно-аккумуляторным электровозом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises' electricity supply systems / [O.M. Sinchuk, S.M. Boiko, F.I. Karamanyts та ін.]. – Warsaw: iScience Sp.z.o.o., 2018. – 77 с.
2. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкция, электрооборудование: под ред. д-ра техн. наук, проф. О.Н. Синчука / И.О. Синчук, Э.С. Гузов, В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый. – Кривой Рог: ЧП Щербатых А. В., 2015. – 428 с.
3. Дебелый В. Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А. Мельников. // Уголь Украины. – 2006. – С. 30–31.
4. Шахтарь П.С. Рудничные локомотивы. М.: Недра. – 1982. – 296 с.
5. Клепиков В.Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: моно-

REFERENCES

1. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises' electricity supply systems / [O.M. Sinchuk, S.M. Boiko, F.I. Karamanyts та ін.]. – Warsaw: iScience Sp.z.o.o., 2018. – 77 p.
2. Shakhthnyy elektrovoznyy transport. Teoriya, konstruktsiya, elektrooborudovanie: pod red. d-ra tekhn. nauk, prof. O.N. Sinchuka / I.O. Sinchuk, E.S. Guzov, V. L. Debelyy, L. L. Debelyy. – Krivoy Rog: ChP Shcherbatykh A. V., 2015. – 428 p.
3. Debelyy V. L. Osnovnye napravleniya razvitiya shakhtnogo lokomotivnogo transporta / V.L. De-belyy, L.L. Debelyy, S.A. Melnikov. // Ugol Ukrainy. – 2006. – P. 30–31.
4. Shakhtar P.S. Rudnichnye lokomotivy. M.: Nedra. – 1982. – 296 p.
5. Klepikov V.B. Dinamika elektromekhanicheskikh sistem s nelineynym treniem: monografiya / V. B. Klepikov. – Kh.: Izd-vo «Pidruchnik NTU

графія / В. Б. Клепиков. – Х.: Изд-во «Підручник НТУ «ХПІ»», 2014. – 408 с.

6. Геродес Г.А. Регулируемый тиристорный электропривод с импульсно-фазовым управлением в цепи переменного тока ротора / Г.А. Геродес, С.В. Эллис, С.И. Алехин. // Вестник Харьковского политехнического института. – 1980. – №166. – С. 43–45.

7. Оценочные исследования тягового асинхронного электродвигателя с пониженным напряжением питания для рудничного электровоза / О.В. Арсентьев, П. Р. Баранов, А. Д. Вильнин, С. Н. Кладиев. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – С. 126–138.

8. Yang, L. Game and Strategy of China in the World's Negotiation of Iron Ore Price [Text] / L. Yang, Z. He // 2016 International Conference on Industrial Informatics – Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII). – 2016. doi: 10.1109/iciicii.2016.0092

9. Ferrer-Coll, J. Characterisation of electromagnetic properties in iron-mine production tunnels [Text] / J. Ferrer-Coll, P. Angskog, J. Chilo, P. Stenumgaard // Electronics Letters. – 2012. – Vol. 48, Issue 2. – P. 62. doi: 10.1049/el.2011.3133

10. Wang Y., Liu J._X. Vibration properties of locomotive traction gear excited by load fluctuation // Journal of Traffic and Transportation Engineering – 2015. – V. 15. – P. 45–50.

11. Locomotive wheel slip detection based on multi-rate state identification of motor load torque / S. Wang, J. Xiao, J. Huang, H. Sheng // Journal of the Franklin Institute – 2016. – V. 353. – Iss. 2. – P. 521–540.

12. Sliding mode control of longitudinal motions for underground mining electric vehicles with parametric uncertainties / W. Ye, W. Shen, J. Zheng, D. Honnery, D. Dayawansa // International Journal of Modelling, Identification and Control. – 2016. – V. 26. – Iss. 1. – P. 68–78.

13. Fuzzy parameter tuning sliding mode control for longitudinal motion of underground mining electric vehicles based on a single wheel model / W. Ye, W. Shen, J. Zheng, D. Honnery, D. Day awansa // International Conference on Advanced Mechatronic Systems. – Melbourne, Australia, 2016. – P. 283–288.

14. Analysis of variants of differential torque control applied to induction motor with short-circuited rotor / A.E. Evstratov, V.M. Zavyalov, A.V. Grigoryev, I.Y. Semykina // ARPN Journal of

«KhPI»», 2014. – 408 p.

6. Gerodes G.A. Reguliruemyy tiristornyy elektropriwod s impulsno-fazovym upravleniem v tsepi peremennogo toka rotora / G.A. Gerodes, S.V. Ellis, S.I. Alekhin. // Vestnik Kharkovskogo poli-tekhnicheskogo instituta. – 1980. – №166. – P. 43–45.

7. Otsenochnye issledovaniya tyagovogo asinkh-ronnogo elektrodvigatelya s ponizhennym napryazhe-niem pitaniya dlya rudnichnogo elektrovoza / O.V. Arsentev, P. R. Baranov, A. D. Vilnin, S. N. Kla-diev. // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo unive-rsiteta. Inzhiniring georesursov. – 2017. – P. 126–138.

8. Yang, L. Game and Strategy of China in the World's Negotiation of Iron Ore Price [Text] / L. Yang, Z. He // 2016 International Conference on Industrial Informatics – Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration (ICIICII). – 2016. doi: 10.1109/iciicii.2016.0092

9. Ferrer-Coll, J. Characterisation of electromagnetic properties in iron-mine production tunnels [Text] / J. Ferrer-Coll, P. Angskog, J. Chilo, P. Stenumgaard // Electronics Letters. – 2012. – Vol. 48, Issue 2. – P. 62. doi: 10.1049/el.2011.3133

10. Wang Y., Liu J._X. Vibration properties of locomotive traction gear excited by load fluctuation // Journal of Traffic and Transportation Engineering – 2015. – V. 15. – P. 45–50.

11. Locomotive wheel slip detection based on multi-rate state identification of motor load torque / S. Wang, J. Xiao, J. Huang, H. Sheng // Journal of the Franklin Institute – 2016. – V. 353. – Iss. 2. – P. 521–540.

12. Sliding mode control of longitudinal motions for underground mining electric vehicles with parametric uncertainties / W. Ye, W. Shen, J. Zheng, D. Honnery, D. Dayawansa // International Journal of Modelling, Identification and Control. – 2016. – V. 26. – Iss. 1. – P. 68–78.

13. Fuzzy parameter tuning sliding mode control for longitudinal motion of underground mining electric vehicles based on a single wheel model / W. Ye, W. Shen, J. Zheng, D. Honnery, D. Day awansa // International Conference on Advanced Mechatronic Systems. – Melbourne, Australia, 2016. – P. 283–288.

14. Analysis of variants of differential torque control applied to induction motor with short-circuited rotor / A.E. Evstratov, V.M. Zavyalov, A.V. Grigoryev, I.Y. Semykina // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – V. 11

Engineering and Applied Sciences. – 2016. – V. 11 (7). – P. 4391–4398.

15. Моделирование динамических режимов работы тягового асинхронного электропривода контактно–аккумуляторного электровоза / О. Н. Синчук, Д. А. Шокарев, Е. И. Скапа // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – С. 56–61.

16. Modes and parameters of functioning of traction electromechanical complexes miner contact electric in iron mines / O. Sinchuk, I. Sinchuk, V. Fedotov, V. Chorna. // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2016. – № 6. – С. 22–27.

17. Сьомочкин А. Б. Порівняльний аналіз динамічних властивостей систем електроприводу рудничного електровоза в характерних режимах / А. Б. Сьомочкин, В. О. Федотов, Ю. О. Іщенко. // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. Кременчук: КрНУ. – 2015. – № 1/2015 (3). – С. 95–97.

18. Сьомочкин А. Б. Порівняльний аналіз динаміки шахтного електровозосостава з системами тягового приводу РКС і ПЧ-АД по можливості автоматизації управління переміщенням вагонеток під розвантаження / А. Б. Сьомочкин, В. А. Федотов, Л. В. Сменова. // Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні методики, інновації та досвід практичного застосування у сфері технічних наук»: Матеріали конференції, м. Люблін, Республіка Польща 27–28 грудня 2017 р. Riga: Izdevnieciba «Baltija Publishing». – 2017. – С. 150–154.

19. Sinchuk O. Development of a system to control the motion of electric transport under conditions of iron-ore mines / O. Sinchuk, I. Kozakevich, V. Fedotov, A. Somochkyn, V. Serebrenikov // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2017. – Том 3, № 2 (87). – С. 39–47.

20. Лурье А. И. Полиномиальное представление решения уравнений теории упругости / А.И. Лурье. // Проблемы механики твердого деформированного тела. – 1970. – С. 251–256.

(7). – P. 4391–4398.

15. Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov raboty tyagovogo asinkhronnogo elektroprivoda ko-ntaktno–akkumulyatornogo elektrovoza / O. N. Sinchuk, D. A. Shokarev, Ye. I. Skapa // Yelektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi. – 2012. – P. 56–61.

16. Modes and parameters of functioning of traction electromechanical complexes miner contact electric in iron mines / O. Sinchuk, I. Sinchuk, V. Fedotov, V. Chorna. // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2016. – № 6. – С. 22–27.

17. Somochkin A. B. Porivnyalniy analiz dinamichnikh vlastivostey sistem elektroprivodu rudnichnogo elektrovoza v kharakternikh rezhimakh / A. B. Somochkin, V. O. Fedotov, Yu. O. Ishchenko. // Problemi energoresursozberezhennya v elektrotekhnichnikh sistemakh. Nauka, osvita i praktika. Naukove vidannya. Kremenchuk: KrNU. – 2015. – № 1/2015 (3). – S. 95–97.

18. Semochkin A. B. Porivnyalniy analiz dinamiki shakhtnogo elektrovozostava z sistemami tyagovogo privodu RKS i PCh-AD po mozhlivosti avtoma-tizatsii upravlinnya peremishchennyam vagonetok pid roz-vantazhennya / A. B. Semochkin, V. A. Fedotov, L. V. Sменова. // Mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya «Suchasni metodiki, innovatsii ta dosvid praktichnogo zastosuvannya u sferi tekhnichnikh nauk»: Materiali konferentsii, m. Lyublin, Respublika Polshcha 27–28 grudnya 2017 r. Riga: Izdevnieciba «Baltija Publishing». – 2017. – S. 150–154.

19. Sinchuk O. Development of a system to control the motion of electric transport under conditions of iron-ore mines / O. Sinchuk, I. Kozakevich, V. Fedotov, A. Somochkyn, V. Serebrenikov // Skhidno-evropeyskiy zhurnal peredovikh tekhnologiy. – 2017. – Tom 3, № 2 (87). – S. 39–47.

20. Lure A. I. Polinomialnoe predstavlenie resheniya uravneniy teorii uprugosti / A.I. Lure. // Problemy mekhaniki tverdogo deformirovannogo tela. – 1970. – S. 251–256.

Стратегічно важливою проблемою для вітчизняних залізничних підприємств є стримування зростання собівартості виробленої продукції – фактора, що визначає конкурентоспроможність вітчизняної залізничної руди на світовому ринку сировини. У комплексі загальної собівартості видобутої залізничної сировини вагома роль належить внутрішньошахтному електровозному транспорту – транспортній артерії доставки руди. Для цього необхідно переоснащення внутрішньошахтного електровозного транспорту, особливо перехід на експлуатацію нових видів електровозів з сучасними високоефективними типами систем управління рухом електровозосоставів.

В даний час у всьому комплексі електровозної відкатки залізничних шахт самими недосконалими і стримуваними розвитком є системи прямого управління тяговими комплексами електровозів – тяговими електроприводами. При цьому важливо розуміти, що система тягових електроприводів електровоза – база будови автоматичних систем управління внутрішньошахтного електровозного транспорту. Автоматизація внутрішньошахтного електровозного транспорту передбачає створення ефективної структури тягового комплексу електровозів, на базі якої повинна будуватися система управління роботою всього тягового комплексу електровоза як в ручному, так і в автоматичному режимах. У цьому плані важливим моментом є пробна оптимізація перехідних процесів в тягових електроприводах.

У статті виконано моделювання перехідних режимів функціонування тягових електромеханічних комплексів, як домінуючих в процесі руху електровозосоставів, виходячи з реальних вихідних даних. У розрахунках використані моделі електровозопотягів, що враховують пружні і в'язкі властивості вагонеток, так і апарату зчленування. Промодельовані ситуації зіткнення вагонів при формуванні потяга, пуск потяга і повне службове гальмування. Наведено результати досліджень динамічних процесів в асинхронному тяговому електроприводі і практичні рішення по створенню системи автоматичного управління електромеханічним комплексом двошлісового шахтного контактної-акумуляторного електровоза при вантажно-розвантажувальних операціях технологічного циклу транспортування корисних копалин в умовах залізничних шахт.

Ключові слова: контактної-акумуляторний електровоз, перехідні процеси, тягові асинхронні двигуни, режим пуску-гальмування.

УДК 622.625:621.333

О. М. СІНЧУК, А. П. СІНОЛІЦІЙ, Є. О. НЕСМАШНИЙ, В. О. ФЕДОТОВ,
М. Л. БАРАНОВСЬКА, П. В. ЛОТАШ (ДВНЗ КНУ),
Є. І. СКАПА (КНУ ІМ. МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО)

Кафедра автоматизованих електромеханічних систем в промисловості і транспорті ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, вул. Віталія Матусевича, 11, 50027, Україна, + 38056-409-17-30, e-mail: speet@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-7621-9979

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЯГОВОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ДВОШЛІСОВОГО ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ

Стратегічно важливою проблемою для вітчизняних залізничних підприємств є стримування зростання собівартості виробленої продукції – фактора, що визначає конкурентоспроможність вітчизняної залізничної руди на світовому ринку сировини. У комплексі загальної собівартості видобутої залізничної сировини вагома роль належить внутрішньошахтному електровозному транспорту – транспортній артерії доставки руди. Для цього необхідно переоснащення внутрішньошахтного електровозного транспорту, особливо перехід на експлуатацію нових видів електровозів з сучасними високоефективними типами систем управління рухом електровозосоставів.

В даний час у всьому комплексі електровозної відкатки залізничних шахт самими недосконалими і стримуваними розвитком є системи прямого управління тяговими комплексами електровозів – тяговими електроприводами. При цьому важливо розуміти, що система тягових електроприводів електровоза – база будови автоматичних систем управління внутрішньошахтного електровозного транспорту. Автоматизація внутрішньошахтного електровозного транспорту передбачає створення ефективної структури тягових електроприводів, на базі якої повинна будуватися система управління роботою всього тягового комплексу електровоза як в ручному, так і в автоматичному режимах. У цьому плані важливим моментом є пробна оптимізація перехідних процесів в тягових електроприводах.

У статті виконано моделювання перехідних режимів функціонування тягових електромеханічних комплексів, як домінуючих в процесі руху електровозопотягів, виходячи з реальних вихідних даних. У розрахунках використані моделі електровозопотягів, що враховують пружні і в'язкі властивості вагонеток, так і апарату зчленування. Промодельовані ситуації зіткнення вагонів при формуванні потяга, пуск потяга і повне службове гальмування. Наведено результати досліджень динамічних процесів в асинхронному тяговому електроприводі і практичні рішення по створенню системи автоматичного управління електромеханічним комплексом двошлісового шахтного контактної-акумуляторного електровоза при вантажно-розвантажувальних операціях технологічного циклу транспортування корисних копалин в умовах залізничних шахт.

Ключові слова: контактної-акумуляторний електровоз, перехідні процеси, тягові асинхронні двигуни, режим пуску-гальмування.

© Сінчук О. М. та ін., 2018

UDC 622.625:621.333

O. N. SINCHUK, A. F. SINOLITSYY, YE. A. NESMASHNYY, V.A. FEDOTOV,
M. L. BARANOVSKAYA, P.V. LOTASH (SHEI KNU),
E. I. SCAPA (KREMENCHUG MIKHAILO OSTROHRADSKYI NATIONAL UNIVERSITY)

Department of Automated Electromechanical Systems in Industry and Transport SHEI "Kryvyi Rih National University", Kryvyi Rih, st. Vitaly Matusevich, 11, 50027, Ukraine, + 38056-409-17-30, e-mail: speet@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-7621-9979

INVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES IN THE ELECTRIC TRACTION DRIVE OF UNDERGROUND ELECTRIC LOCOMOTIVES

Underground electric locomotive transport of the major ore haulage artery plays a significant role in forming the total prime cost of iron ore materials. The underground electric locomotive transport needs updating, especially in terms of transition to operating new types of electric locomotives equipped with modern highly efficient systems of controlling locomotive operation. Models of electric locomotives and trolleys were used in calculations. These models take into account the elastic properties of an electric locomotive, trolleys and the junction apparatus.

Presents the research results of dynamic processes in the asynchronous electric traction drive and practical solutions of creating the system of automatic control over the electromechanical complex of a biaxial underground battery-trolley locomotive for loading and unloading operations of the mineral haulage cycle at iron ore underground mines. Currently, systems of direct control of traction complexes of electric locomotives, electric traction drives, are the most imperfect in the electric haulage complex at iron ore mines and they hinder the underground electric locomotive transport development to a great extent. Based on the developed mathematical model, the influence of system-forming parameters on the dynamic properties of the system is revealed: mine "electric locomotives - trolleys". Underground electric locomotive transport automation implies creating an efficient electric traction drives structure, which serves the basis for the control system of the whole traction complex of electric locomotives under both manual and automated modes. Test optimization of transient processes in the electric traction drives is essential in this context.

Keywords: battery-trolley locomotive, transient processes, asynchronous electric traction drives, start-braking mode.

Received 11.03.2018; accepted in revised form 12.04.2018.

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, к.125, м. Дніпро, 49010, Україна, тел.: +380563731547, e-mail: andremu@i.ua, etemdiit@gmail.com, ustimenko.1979@gmail.com, elena.kyrilenko@gmail.com; ORCID: orcid.org/0000-0002-5629-4058, orcid.org/0000-0003-3884-5589, orcid.org/0000-0003-2984-4381, orcid.org/0000-0003-2045-917X

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Вступ

Проблема модернізації електрорухомого складу (ЕРС) українських залізниць є на сьогодні вкрай актуальною через високий ступінь зносу останнього (~ 90%). Водночас важливою складовою задачі створення нового високошвидкісного та енергоефективного електрорухомого складу є розробка сучасних тягових силових трансформаторів призначених для роботи у складі єдиного електротехнічного комплексу «тяговий трансформатор – силовий перетворювач – асинхронних двигун».

На нашу думку, застосування комп'ютерного моделювання в рамках цієї задачі є раціональним шляхом прогнозування електричних величин у різних режимах роботи зазначеного електротехнічного комплексу.

Під час означеного моделювання слід враховувати, що на відміну від силових трансформаторів промислових електричних систем, у моделях яких в більшості випадків електрич-

ною ємністю можна знехтувати, модель тягового трансформатора має бути адекватною у широкому діапазоні частот і для цього має містити у своєму складі власні ємності окремих частин трансформатора, порядок визначення яких наведено, наприклад, у роботі [1]. Зокрема власна ємність обмоток трансформатора складається з ємностей між внутрішнім шаром обмотки та магнітопроводом, між шарами обмотки, між окремими обмотками. Існують також ємності між зовнішнім шаром обмотки та екраном або баком трансформатора, монтажні ємності та ємності підключених провідників.

Відомі на сьогодні схеми заміщення тягових трансформаторів базуються на теорії електричних кіл із взаємною індуктивністю [2]. Актуальною задачею на сьогодні є адаптація їх структури під стандартні модулі програм комп'ютерного моделювання, таких, як, наприклад, Matlab Simulink, з додаванням відповідних ємностей.

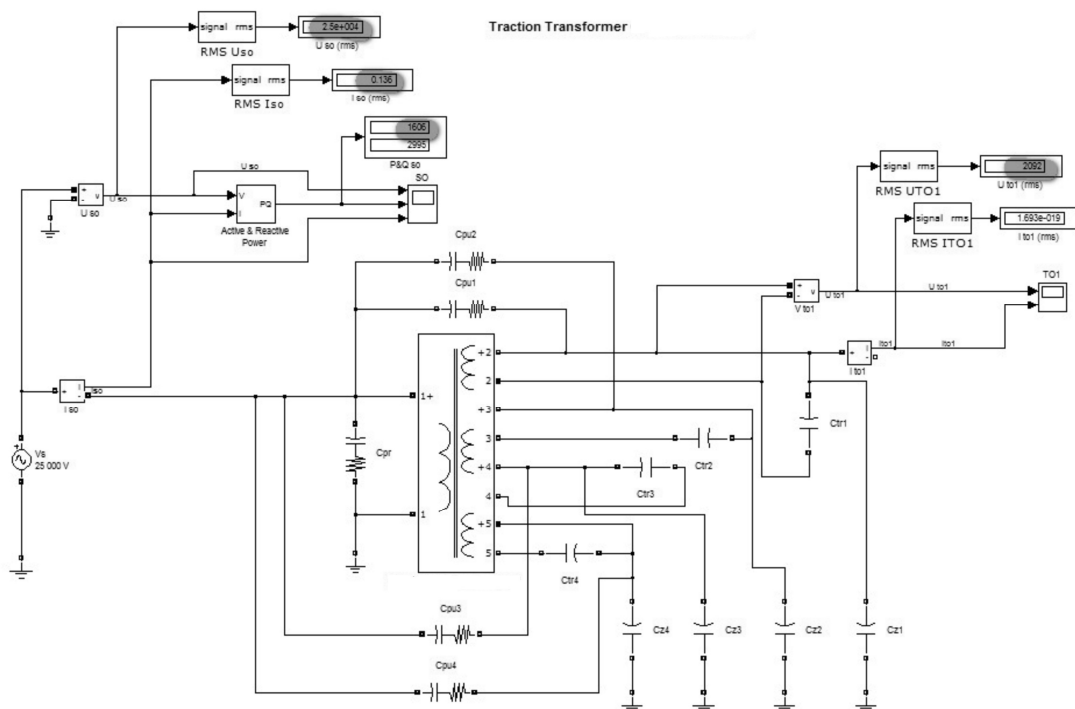


Рис. 1. Доповнена модель тягового трансформатора для системи Matlab Simulink.

© Муха А. М. та ін., 2018

Структура моделі та результати досліджень

В даній роботі наведено саме таку модель тягового трансформатора потужністю 7000 кВА, параметри якого наведені в табл.1 та результати здійснених на її основі результатів комп'ютерного моделювання високочастотних режимів роботи згаданого трансформатора. Моделювання проводилося для режиму неробочого ходу. Метою досліджень є виявлення можливих резонансних явищ у дослідному діапазоні. Результати представлені у табл.2.

Таблиця 1

Об-мотка	Позначення на моделі	Одиниці виміру	Значення
СО	Lpr	мГн	507417
	Lcctr	мГн	15,55
	Rpr	МОм	1182
	Cpr	пФ	37,7
	Cpu1	пФ	151,9
	Cpu2	пФ	151,9
	Cpu3	пФ	151,9
	Cpu4	пФ	151,9
ТО1	Ltr1	мГн	3553,0
	Lcctr1	мГн	3,67
	Rtr1	МОм	22,48
	Ctr1	пФ	361,3
	Cz1	пФ	353,5
ТО2	Ltr2	мГн	3553,0
	Lcctr2	мГн	3,67
	Rtr2	МОм	22,48
	Ctr2	пФ	361,3
	Cz2	пФ	353,5
ТО3	Ltr3	мГн	3553,0
	Lcctr3	мГн	3,67
	Rtr3	МОм	22,48
	Ctr3	пФ	361,3
	Cz3	пФ	353,5

Таблиця 2

Частота, Гц	25	50	175	420	480	580	720	780	4545
Наявність резонансних явищ (так/ні)	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні
Частота, Гц	5000	5555	10000	15000	20000	25000	30000	35000	40000
Наявність резонансних явищ (так/ні)	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні
Частота, Гц	45000	50000	55000	60000	65000	70000	75000	80000	85000
Наявність резонансних явищ (так/ні)	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні
Частота, Гц	90000	95000	100000	150000	200000	300000	400000	500000	
Наявність резонансних явищ (так/ні)	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	ні	

Продовження табл. 1.

ТО4	Ltr4	мГн	3553,0
	Lcctr4	мГн	3,67
	Rtr4	МОм	22,48
	Ctr4	пФ	361,3
	Cz4	пФ	353,5

Параметри моделі рис.1 обчислено за методиками, наведеними в [1] та [3]. Адекватність даної моделі підтверджено узгодженістю результатів розрахунку основних режимів роботи трансформатора з результатами протоколу випробувань його дослідного зразка, які були проведені згідно з [4] за участі фахівців галузевої науково-дослідної лабораторії «Надійність та уніфікація електрообладнання рухомого складу» ДПТУ.

Висновки

Проведені у роботі дослідження свідчать, що шляхи протікання струмів високих частот через трансформатор в діапазоні від 50 Гц до 100 кГц утворених головним чином частотним перетворювачем, не містять в своєму складі резонансних ділянок з відповідними небезпечними струмами або перенапругами.

Розроблена модель є цілком адекватною і може бути використана у подальшому у розрахунках електромагнітних процесів на усіх ділянках електротехнічного комплексу «тяговий трансформатор – силовий перетворювач – асинхронних двигун» зокрема з метою забезпечення електромагнітної сумісності нового електро рухомого складу, що також є необхідною умовою його впровадження в експлуатацію на залізницях України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания [Текст] / под ред. А. Н. Горского. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
2. Линьков, А. О. Совершенствование выпрямительной установки возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения : дис. ... к-та техн. наук : 05.22.07 / Линьков Алексей Олегович ; Иркутский гос. ун-т путей сообщений. – Иркутск., 2015. – 177 с.
3. Герман-Галкин, С. Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК [Текст] / С. Г. Герман-Галкин. – СПб.: Корона принт., 2003. – 256 с.
4. Railway applications – traction transformers and inductors on board rolling stock [Text]: International standard IEC60310/ International electro-technical commission. – Geneva., 2004. – 28 p.

REFERENCES

1. Raschet elektromagnitnykh elementov istochnikov vtorichnogo electropitaniya [Calculation of electromagnetic elements of secondary power supply sources - Text] / after red. A. N. Gorsky M:Radio I svyaz [publishing house] – 1988. – 176 p.
2. Linkov, A. O. Sovershenstvovanie vypryamitelnoy ustanovki возбуждения тяговых двигателей электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения: diss. ... kand tech. nauk : 05.22.07 [Enhancement of rectifier of excitation of traction motor for the AC current electric locomotive in the recuperative braking mode: Thesis for the candidate of technical science degree in speciality 05.22.07 – rolling stock, traction and electrification] / Linkov Alexey Olegovich ; Irkutskiy. gos. un-t putey soobscheniya [IRGUPS]– Irkutsk., 2015. – 177 p.
3. German-Galkin, S. G. Matlab&Simulink. Proektirovaniye mehatronnykh system na PK [Matlab&Simulink. Design of the mechatronic systems on the PC - Text] / S. G.. German-Galkin. SPb:Corona press [publishing house] – 2003. – 256 p.
4. Railway applications – traction transformers and inductors on board rolling stock [Text]: International standard IEC60310/ International electro-technical commission. – Geneva., 2004. – 28 p.

Ця стаття присвячена проблемам математичного моделювання електротехнічних пристроїв. В роботі представлена комп'ютерна модель багатообмоткового тягового трансформатора з урахуванням його активних опорів, індуктивностей та ємностей. Параметри моделі отримано з використанням підтверджених методик. Зазначену модель створено у програмному середовищі Matlab Simulink. Адекватність моделі підтверджено результатами випробувань трансформатора. На цій основі проведено моделювання режимів роботи трансформатора для струмів підвищеної частоти в діапазоні 50 Гц – 100 кГц. Результати показують відсутність небезпечних резонансних режимів у цьому діапазоні. В подальшому дана модель може бути використана у розрахунках електромагнітних процесів на усіх ділянках електротехнічного комплексу «тяговий трансформатор – силовий перетворювач – асинхронний двигун» зокрема з метою забезпечення електромагнітної сумісності нового електрорухомого складу, що є необхідною умовою його впровадження в експлуатацію на залізницях України.

Ключові слова: електромагнітні процеси, параметри електричного кола, комп'ютерне моделювання, тяговий трансформатор, сучасний електрорухомий склад, висока частота, електрична ємність.

УДК 621.311.3

А. Н. МУХА, О. И. БОНДАРЬ, Д. В. УСТИМЕНКО, Е. Я. КУРИЛЕНКО (ДНУЖТ)

Кафедра «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, к. 125, г. Днепропетровск, 49010, Украина, тел.: +380563731547, e-mail: andremu@i.ua, etemdiiit@gmail.com, ustimenko.1979@gmail.com, elena.kyrilenko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-5629-4058, orcid.org/0000-0003-3884-5589, orcid.org/0000-0003-2984-4381, orcid.org/0000-0003-2045-917X

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Эта статья посвящена проблемам математического моделирования электротехнических устройств. В работе представлена компьютерная модель многообмоточного тягового трансформатора с учетом его активных сопротивлений, индуктивностей и емкостей. Параметры модели получены с использованием подтвержденных методик. Указанная модель создана в программной среде Matlab Simulink. Адекватность модели подтверждена результатами испытаний трансформатора. На этой основе проведено моделирование работы

© Муха А. М. та ін., 2018

трансформатора для токов повышенной частоты в диапазоне 50 Гц – 100 кГц. Результаты показывают отсутствие опасных резонансных режимов в данном диапазоне. В дальнейшем данная модель может быть использована в расчетах электромагнитных процессов на всех участках электротехнического комплекса «тяговый трансформатор – силовой преобразователь – асинхронный двигатель» с целью обеспечения электромагнитной совместимости нового электроподвижного состава, что является необходимым условием его внедрения на железных дорогах Украины.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, электромагнитные процессы, параметры электрической цепи, тяговый трансформатор, современный электроподвижной состав, высокая частота, электрическая емкость, Matlab, Simulink.

UDC 621.311.3

A.M. MUKHA, O.I. BONDAR, D.V. USTIMENKO, O.Y. KURYLENKO (DNURT)

Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, office 125, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel.: +380563731547, e-mail: andremu@i.ua, etemdiit@gmail.com, ustimenko.1979@gmail.com, elena.kyrilenko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-5629-4058, orcid.org/0000-0003-3884-5589, orcid.org/0000-0003-2984-4381, orcid.org/0000-0003-2045-917X

COMPUTER SIMULATION OF THE INCREASED FREQUENCY MODES FOR THE TRACTION TRANSFORMER

This paper deals with the problems of mathematical modeling of electrical devices. In this work the computer model of the multi-winding traction transformer with values of its resistances, inductances and capacities is shown. The parameters of model have obtained by the approved techniques. The specified model is created in Matlab Simulink software environment. The adequacy of model is confirmed with transformer test results. On this basis simulation of transformer operation for currents of the increased frequency in the range of 50 Hz – 100 kHz is carried out. Results show absence of the dangerous resonant modes in this range. In the future time described model may be used for calculation of electromagnetic processes in all subcircuits of electric system “traction transformer – power converter – asynchronous drive” for modern electric rolling stock electromagnetic compatibility providing. It is necessary condition for it’s implementation on the Ukrainian railways.

Keywords: computer simulation, electromagnetic processes, parameters of electric circuit, traction transformer, modern electric rolling stock, high frequency, electrical capacity, Matlab, Simulink.

Received 24.01.2018; accepted in revised form 27.03.2018.

ЕНЕРГЕТИЧНІ КАНАЛИ ЖИВЛЕННЯ РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Вступ

Здійснюване нині впровадження швидкісного і високошвидкісного пасажирського транспорту, а також великовагового руху потягів обумовлює необхідність нарощування провізної здатності залізниць та покликане забезпечити конкурентоспроможність з іншими видами транспорту, як при перевезенні пасажирів, так і при доставці вантажів. Існуюча система тягового електропостачання постійного струму не завжди в змозі забезпечити передачу електроенергії необхідної потужності і високої якості для цих потягів через низку обмежень: використання централізованої системи тягового електропостачання; низьке використання потужностей тягових підстанцій; неможливість здійснення необхідного підсилення тягової мережі; неможливість забезпечення передачі електроенергії необхідної потужності і високої якості; стрімке моральне та фізичне старіння інфраструктури тягового електропостачання. Взаємодія вказаних факторів відбувається при зростанні пікових навантажень на тягові підстанції, збільшенні втрат напруги та енергії в пристроях тягового електропостачання, ускладненні умов струмознімання з підвищенням температури проводів контактної мережі.

На сьогоднішній день одним з найперспективніших засобів підсилення системи тягового електропостачання постійного струму (СТЕ) є застосування систем розподіленого живлення (СРЖ) [1]. Підвищення ефективності в цих системах досягається за рахунок зменшення перерізу дротів контактної мережі, зменшення втрат енергії, підтримки необхідного рівня напруги в контактній мережі і збільшення коефіцієнта використання потужності основного енергетичного устаткування при зниженні його встановленої потужності. Підсилення на основі розподіленого живлення припускає перехід до нової схемотехніки тягової мережі. Перевагою цієї системи також є підсилення тягової мережі, що не вимагає додаткової агрегатної потужності, а при використанні альтернативної енергії значно знижується витрата електричної енергії. Необхідно також

відзначити, що в системі тягового електропостачання розподіленого типу більш простіше знімаються критичні фактори як з боку пікових навантажень на зовнішнє електропостачання, так і з боку споживання збиткової енергії рекуперації навіть без використання випрямно-інверторних агрегатів на головних тягових підстанціях.

Енергетичні канали для живлення розподіленої СТЕ повинні забезпечувати надійність та безперебійність живлення, стійкість до непередбачуваних впливів та високу енергоефективність. На сучасному етапі, окрім вказаного, вони повинні бути електроенергоефективними та електромагнітносумісними з оточуючим середовищем на всіх рівнях передачі, перетворення та споживання електричної енергії. Вказані процеси забезпечуються низкою різноманітних пристроїв, утворюючих, власне, енергетичні канали (ЕК): лінії електропередачі, трансформатори, перетворювачі, інфраструктура тягової мережі та споживачі електричної енергії. Взаємодія підсистем ЕК представляє складний стохастичний процес, характеристики якого змінюються у просторі, площині та часі [2].

Метою роботи є оцінка можливості використання підвищеної напруги змінного струму для живлення одноагрегатних тягових підстанцій в розподілених системах живлення.

Аналіз виконаних досліджень

У централізованій системі тягового електропостачання ЕК складається із тягових перетворювальних підстанцій (ТП), живлення яких забезпечується централізовано від системи зовнішнього електропостачання (СЗЕ) та тягової мережі (ТМ), що включає в себе фідери контактної мережі (ФКМ), контактну (КМ) та рейкову мережі (РМ) [3].

При використанні ж СРЖ тягової мережі у міжстанційних зонах використовують два підходи:

- підсилення СТЕ за допомогою перетворювальних пунктів послідовного типу, які включаються у розріз контактної мережі на ділянках між тяговими підстанціями і живлен-

ня яких забезпечується від повздожньої трифазної системи живлення змінного струму;

- підсилення СТЕ за допомогою перетворювальних пунктів паралельного типу, які підключаються до тягової мережі на ділянках між тяговими підстанціями і живлення яких забезпечується від спеціального фідера тягових підстанцій підвищеної напруги постійного струму (у порівнянні з напругою тягової мережі).

На сьогодні також опрацьовано декілька інших варіантів побудови систем розподіленого живлення, у тому числі і з застосуванням змінного струму підвищеної частоти з напівхвильовим налаштуванням для живлення пунктів підсилення (ПП) тягової мережі.

У загальному випадку структура розподіленої системи тягового електропостачання має вигляд, представлений на рис. 1.

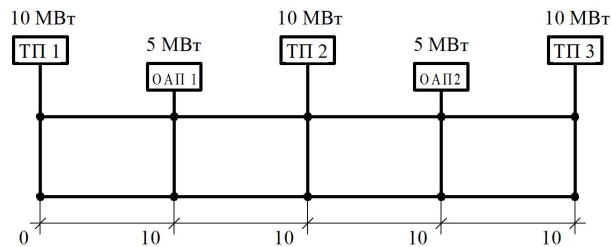


Рис. 1. Структурна схема системи тягового електропостачання розподіленого типу

Розглянемо більш детально існуючі схемотехнічні рішення побудови енергетичних каналів СТЕ розподіленого типу.

1) *Енергетичні канали з повздожньою лінією змінного струму.*

Вперше застосування ліній змінного струму було запропоноване для живлення вольтододаткових пристроїв (ВДП) для підсилення тягової мережі проф. Кисляковим В. О. [4]. Схема живлення ВДП представлена на рис. 2.

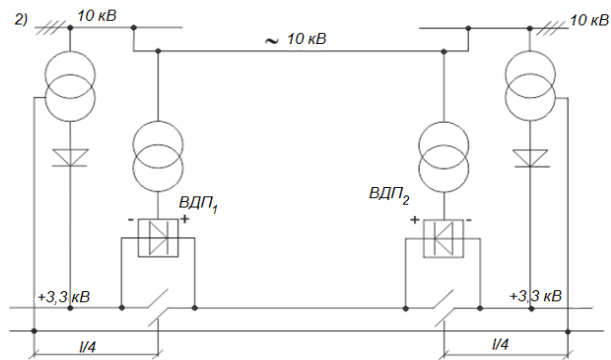


Рис. 2. Живлення ВДП від повздожньої високовольтної лінії змінного струму

На сьогоднішній день схемотехніка енергетичних каналів змінного струму не змінилась. Для підвищення економічних показників функціонування СТЕ на сьогодні пропонується застосування більш високих напруг – 35 та 110 кВ [5, 6].

2) *Енергетичні канали з повздожньою лінією постійного струму.*

Лінія постійного струму для живлення перетворюючих пунктів 6/3 кВ була запропонована в роботі [7]. На сьогоднішній день для підвищення енергетичної ефективності СТЕ пропонується застосування ліній постійного струму з напругою 12, 24, 48 кВ.

Враховуючи високий рівень існуючих напівпровідникових приладів, кабельної продукції, ізоляційних і феромагнітних матеріалів, найбільш перспективною схемою розподіленого тягового електропостачання постійного струму є схема (рис. 3) на основі повздожньої високовольтної лінії постійного струму з двостороннім живленням від перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій напругою 48 (24) кВ та перетворювальними пунктами живлення тягової мережі напругою 3 кВ на основі оборотних електронних трансформаторів постійної напруги 24/3 кВ [8].

В схемі рис. 3 двостороннє живлення повздожньої високовольтної лінії напругою 24 кВ забезпечується головними (опорними) тяговими перетворювальними підстанціями ГТПП, розміщеними у місцях розвинутого зовнішнього електропостачання, забезпечуючого ГТПП двома – трьома незалежними вводами трифазного змінного струму напругою 110 (220) кВ.

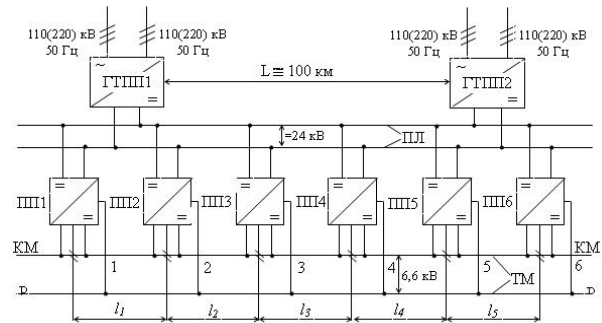


Рис. 3. Структурна схема децентралізованого (розподіленого) тягового електропостачання постійного струму напругою 6,6 кВ з повздожньою високовольтною лінією постійної напруги 24 кВ:

ГТПП1, ГТПП2 – головні (опорні) тягові перетворювальні підстанції; ПЛ – повздожня високовольтна лінія постійної напруги 24 кВ; ПП1-ПП6 – перетворювальні пункти живлення тягової мережі (ТМ); КМ – контактна мережа; РМ – рейкова мережа

Повздожня високовольтна лінія постійною напругою 24 кВ (ПЛ) представляє собою двохпровідну лінію, позитивний провід якої підвищується із зовнішньої сторони опор контактної мережі вздовж залізничної колії і рейок, виконуючих роль негативного провідника. Від повздожньої високовольтної лінії постійна напруга 24 кВ подається до одноагрегатних оборотних перетворювальних пунктів (ПП), забезпечуючих живлення тягової мережі напругою 3,3 кВ. Вони розміщуються вздовж залізничної колії на відповідній відстані один від одного для забезпечення розрахункової пропускної здатності лінії.

Однією з переваг розглянутої схеми децентралізованого тягового електропостачання з повздожньою високовольтною лінією є можливість використання гнучкого способу резервування потужності її перетворювальних частин. Так, при виході з ладу одноагрегатного перетворювального пункту живлення тягової мережі, розрахунковий розмір руху на ділянках лінії повинен забезпечуватися за рахунок півторакратного запасу потужності сусідніх перетворювальних пунктів живлення. Для резервування потужності головних тягових перетворювальних підстанцій доцільно використовувати традиційний спосіб, тобто установку на них одного резервного перетворювального агрегату.

3) *Енергетичні канали зі вставкою постійного струму.*

Основна перевага СРЖ полягає в скороченні кількості зв'язків з живлячою системою СЗЕ. В останні роки посилено розробляється для залізниць змінного струму варіант СРЖ з використанням в якості повздожньої лінії (ПЛ) однофазного кабелю при його живленні синусоїдальною напругою 50-100 кВ, 50 Гц. Пункт підсилення (ПП) виконується при цьому на основі однофазного трансформатора, що знижує напругу до величини 25 кВ в основній КМ [9]. Якщо застосувати СРЖ для живлення залізниць постійного струму, то на ПП, окрім понижуючого трансформатора необхідно встановити однофазний випрямляч з фільтром. Зберігаючи зазначену перевагу СРЖ, така структура має, проте, такі недоліки:

- несиметричне навантаження фаз СЗЕ;
- велика встановлена потужність трансформатора і фільтрів на ПП за рахунок низької частоти $f=50$ Гц напруги, що випрямляється.

Ці недоліки долаються, якщо тягова підстанція виконується як вставка постійного струму (ВПС), за допомогою якої в ПЛ формується однофазна напруга підвищеної частоти f_n з формою, близькою до прямокутної - меандру з

обмеженим спектром (МОС) [9]. Загальна структура СРЖ відповідає при цьому рис. 4, а структура базового перетворювача (тягової підстанції) - рис. 5.

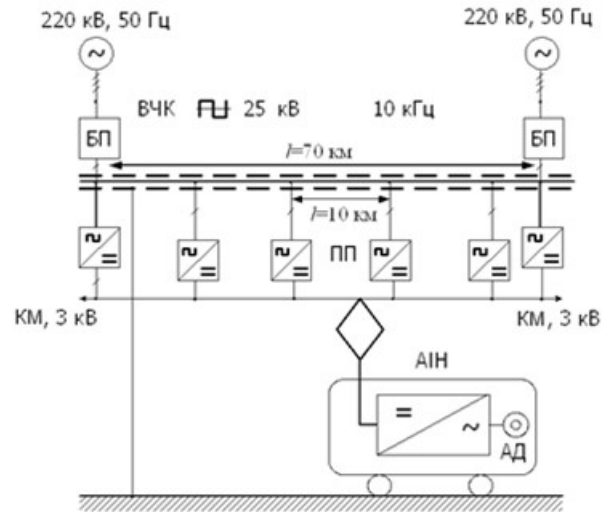


Рис. 4. Структура системи розподіленого живлення: ВЧК - високовольтний високочастотний кабель; АІН - автономний інвертор напруги; АД - асинхронний тяговий двигун

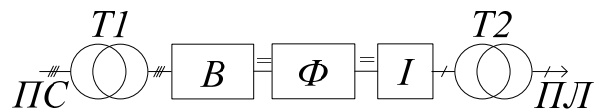


Рис. 5. Базовий перетворювач (тягова підстанція) як вставка постійного струму: Т1 і Т2 - живлячий і навантажувальний трансформатори; В - трифазний випрямляч; Ф - фільтр в ланці постійного струму; І - однофазний інвертор

4) *Енергетичні канали з проміжною ланкою підвищеної частоти.*

Перспективним напрямком створення ЕК є розробка систем живлення з проміжною ланкою підвищеної частоти. Структури напівпровідникових джерел живлення з проміжною ланкою підвищеної частоти (ПЛПЧ) отримали широке застосування при малій потужності навантаження. Їх основні переваги:

- за рахунок підвищення частоти радикальним чином скорочуються розміри силових електромагнітних елементів (трансформаторів і фільтрів);
- з тієї ж причини підвищується коефіцієнт корисної дії;
- за рахунок введення додаткових перетворювачів розширюються можливості управління.

Ці позитивні властивості актуальні для залізничного транспорту, проте використання

(ПЛПЧ) ще до недавнього часу було нереальним у зв'язку з відсутністю на ринку потужних швидкодіючих напівпровідникових приладів з необхідними характеристиками. Останніми роками такі прилади з'явилися, і разом з ними створилася можливість впровадження ПЛПЧ в систему живлення електрифікованих залізниць. Проте порівняно з традиційним застосуванням ПЛПЧ системи електропостачання доріг створюють ряд додаткових труднощів, пов'язаних з введенням в ПЛПЧ об'єкту з розподіленими параметрами (в даному випадку повздовжньої лінії) і підвищеною потужністю, що підсилює негативні ефекти при підвищенні частоти, зокрема, скін-ефект в провідниках повздовжньої лінії і додаткові втрати в ізоляції [10].

Вказана структура містить в якості первинного джерела живлення трифазну промислову мережу, яка підключається через тягові підстанції (ТП), розташовані на відстані приблизно 150–200 км одна від одної. На кожній підстанції встановлюється базовий перетворювач (БП), який виробляє однофазну напругу частотою 150 або 300 Гц, величиною порядку 50 кВ і формою, що наближається до прямокутної (меандр). Ця напруга подається в подовжню лінію, в якості якої доцільно використовувати коаксіальний кабель. Через проміжні пункти живлення (ПП), розташовані з інтервалом близько 10 км, від подовжньої лінії живиться основна контактна мережа (КМ) постійного струму напругою 3 кВ. Застосування підвищеної частоти 300 Гц на ПП дозволяє приблизно втричі скоротити розміри трансформаторів і фільтрів на ПП, що з великим запасом перекидає витрати на додаткове електроустаткування на ТП, оскільки його встановлена потужність у декілька разів менше сумарної встановленої потужності електроустаткування на ПП. Застосування меандра замість синусоїди майже удвічі скорочує встановлену потужність напівпровідникових приладів, а також покращує використання ізоляції кабелю за рахунок того, що для ідеального меандра співвідношення між амплітудним і діючим значеннями дорівнює одиниці, тоді як для синусоїди воно рівне $\sqrt{2}$. Можливе також подальше підвищення частоти в повздовжній лінії при умові вирішення задачі хвильового налаштування системи розподіленого живлення.

Для подолання зазначених проблем пропонується режим напівхвильового налаштування [10]. Він полягає у використанні такої частоти $f = 1/T$ основної гармоніки напруги в кабельній ПЛ, щоб на відрізку l_n між сусідніми ПЛ укладається одна напівхвиля напруги.

Застосування системи розподіленого живлення контактної мережі від кабельної подовжньої лінії з підвищеною частотою змінної напруги дозволяє приблизно на порядок зменшити масу силових електромагнітних елементів у випрямних агрегатах, скоротити в кілька разів число зв'язків з живильною енергосистемою й розширити можливості керування системою електропостачання

Режим напівхвильового налаштування системи усуває індуктивне падіння напруги в подовжній лінії, що дозволяє використовувати некеровані випрямлячі, і знижує чутливість до резонансних явищ, що дозволяє використовувати в подовжній лінії квазіпрямокутну форму напруг і струмів, що забезпечує більше високі енергетичні показники в порівнянні із синусоїдальною. Зміною співвідношення між хвильовим опором кабелю й опором номінального навантаження можна до 2-3 разів знизити втрати холостого ходу в подовжній лінії.

5) *Енергетичні канали з застосуванням альтернативних джерел електричної енергії.*

Концепція застосування альтернативних джерел для живлення ПП тягової мережі розвивається на кафедрі ІСЕ ДНУЗТ [1, 11]. На думку вчених, децентралізація виробництва електроенергії є важливою складовою інноваційно-технологічного забезпечення структурного реформування енергетичної галузі з метою підвищення її ефективності і дозволяє, серед іншого, зменшити втрати електроенергії при транспортуванні через максимальне наближення джерела до споживача, зменшити число і довжину магістральних ЛЕП, зменшити наслідки аварій на центральних електростанціях і головних ЛЕП, забезпечити взаємне багатократне резервування електрогенеруючих потужностей.

Перевага живлення ПП від сонячних батарей полягає в тому, що немає необхідності в монтажі додаткової живильної лінії від тягової підстанції і незалежність їх роботи від неї. До питань, підлягаючих вирішенню слід віднести: тип джерела поновлюваної електричної енергії; компенсація впливу погодних умов на рівень генерованої енергії; схемотехніка, компоновання і елементна база; техніко-економічне обґрунтування їх застосування з прив'язкою до надійності забезпечення живлення тягового навантаження з необхідними енергетичними характеристиками. Схема лінійного ПП складається з однофазного інвертора на IGBT транзисторах, перетворюючого трансформатора і випрямляча. Для зменшення вагогабаритних розмірів трансформатора використовується напруга підви-

щеної частоти (700 Гц), а сердечник трансформатора виконаний з аморфного сплаву [12].

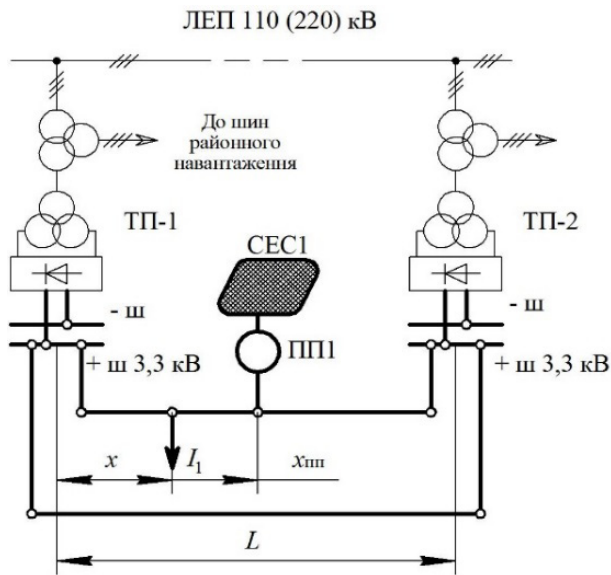


Рис. 6. Структура СТЕ з СЕС

Необхідно вказати, що розглянуті вище засоби для побудови каналів живлення пунктів підсилення мають, в більшості, теоретичний характер та потребують значних капіталовкладень в його інфраструктуру. Тому більш доцільно в подальшому розглядати засоби підвищення ефективності тягового електропостачання постійного струму напругою 3,3 кВ в рамках існуючої інфраструктури за рахунок використання на міжпідстанційних зонах елементів розподіленої структури живлення тягової мережі, тобто ліній повздожнього електропостачання змінного струму.

б) *Оцінка доцільності живлення пунктів підсилення напругою 35 кВ.*

В роботі [13] було показано, що найбільш доцільним варіантом для підвищення ефективності повздожніх ліній електропостачання на електрифікованих залізницях є застосування напруги 35 кВ. У цьому контексті доцільним є оцінка можливості застосування трифазних ліній електропостачання 35 кВ для побудови ЕК розподіленої СТЕ. Проведемо розрахунок цієї лінії за наступних умов: відстань між тяговими підстанціями 20 км; потужність пункту підсилення складає (5) 4 МВт; - ПП знаходиться посередині розрахункової зони. Розрахунок проводився по відомій методиці [14].

Для розрахунку приймається потужність мережевої обмотки трансформатора перетворювального агрегату 6300 кВА. Розрахунки проводились для ліній напругою 35 кВ та 10 кВ з

проводами АС-35, АС-50, АС-70, АС-95, АС-120 та АС-150. Результати розрахунку представлені на рис. 7 та 8.

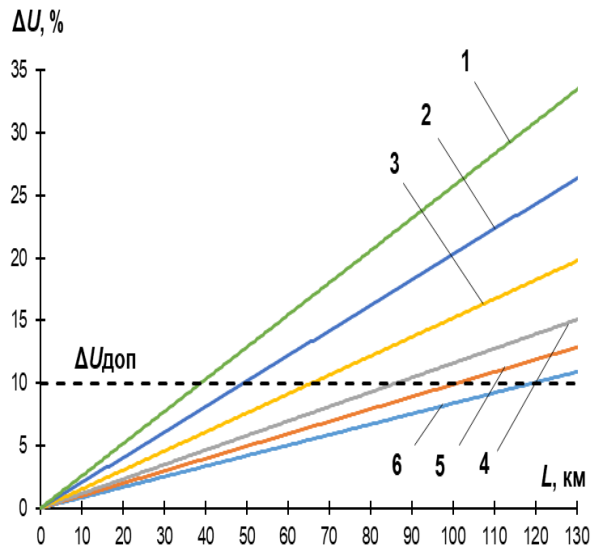


Рис. 7. Втрати напруги в лінії 35 кВ:
1 – провід АС-35; 2 – провід АС-50;
3 – провід АС-70; 4 – провід АС-95;
5 – провід АС-120; 6 – провід АС-150

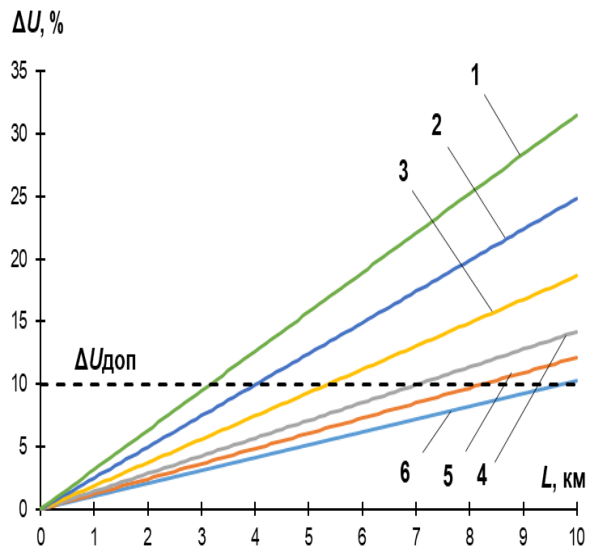


Рис. 8. Втрати напруги в лінії 10 кВ:
1 – провід АС-35; 2 – провід АС-50;
3 – провід АС-70; 4 – провід АС-95;
5 – провід АС-120; 6 – провід АС-150

За результатом розрахунку було отримано допустимі довжини ліній для живлення підсилюючого пункту (табл. 1).

Таким чином, при живленні ПП від мережі 35 кВ доцільно прокладати живлячу лінію проводами АС-35. При живленні ПП від існуючої лінії ПЕ-10 кВ, ПП необхідно розташовувати не далі ніж 5,5 км від ТП, в іншому випадку необхідно підсилювати лінію ПЕ. Необхідно

також зауважити, що для підвищення ефективності використання ліній 35 кВ, живлячих пункти підсилення у розподіленій системі, можливе застосування проводів СПП [15, 16].

Таблиця 1 – Допустимі довжини ліній

Марка проводу	Допустима довжина лінії 35 кВ, км	Допустима довжина лінії 10 кВ, км
АС-35	38,5	3,2
АС-50	49	4
АС-70	65,5	5,4
АС-95	86,5	7
АС-120	101	8,2
АС-150	119,5	9,8

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sychenko V. G., Bosiy D. O., and Kosarev E.M., «Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current», Archives of Transport, vol. 35, iss. 3, pp. 63 – 70, 2015.
2. Сиченко В. Г. Развитие научных основ повышения электромагнитной сумисности подсистем электрической тяги постоянного тока железнодорожного транспорта. Дис. на здобуття наукового ступеня д.т.н. 2011, - Дніпропетровськ, ДНУЗТ. 464 с.
3. Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург, Изд-о УрГУПС, 2014. – 431 с.
4. Кисляков В.А. Сравнительная оценка технических показателей различных способов усиления электрифицированных линий постоянного тока / МИИТ, 1978, вып. 604, с. 3 – 21 с.
5. Смирнов Д. Б. Совершенствование методики расчета распределенной системы тягового электроснабжения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2010, 22 с.12.
6. Аржанников Б. А., Набойченко И. О. Концепция усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ: монография, Екатеринбург: УрГУПС, 2015.
7. Третьяк Т.П. Расчет системы энергоснабжения постоянного тока повышенного напряжения [Текст] // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института ж.д. транспорта, 1968, №8, с. 14-17.
8. Хворост Н.В., Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В. Обратимый преобразователь для связи двух линий постоянного тока в системе распределенного тягового электроснабжения // Технічна електродинаміка. Тем. випуск „Проблеми сучасної електротехніки”, Київ. – 2004. – Ч. 6. – С. 99–106.
9. Панасенко Н.В., Гончаров Ю.П., Замаруев

Висновки

При розробці схемотехніки систем розподіленого типу важливим завданням є вибір енергетичного каналу для живлення пунктів підсилення. Існуючі на сьогоднішній день технічні рішення енергетичних каналів з використанням ліній електропередачі 10 кВ не дозволяють в повній мірі забезпечити економічність передачі енергії для живлення пунктів підсилення.

Найбільш доцільним варіантом для підвищення ефективності повздовжніх ліній електропостачання на електрифікованих залізницях є застосування напруги 35 кВ. При цьому, при зниженні втрат напруги і потужності в самій лінії, можливо забезпечити передачу необхідної для живлення пункту підсилення потужності з використанням проводів АС-35 по всій довжині міжпідстанційної зони.

REFERENCES

1. Sychenko V. G., Bosiy D. O., and Kosarev E.M., «Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current», Archives of Transport, vol. 35, iss. 3, pp. 63-70, 2015.
2. Sychenko V. H. Rozvytok naukovykh osnov Pdivyshchennya elektromahnitnoyi sumisnosti pidsistem elektrichnoyi tyahy postynnoho strum zaliznychnoho transportu. Dys. na zdobuttya naukovooho stupeniv d.t.n. 2011, - Dnipropetrovs'k, DNUZT. 464.
3. Ter-Oganov E.V., Pyshkin A.A. Elektrosnabzheniye zheleznykh dorog. Yekaterinburg, Izd-v UrGUPS, 2014. 431.
4. Kislyakov V.A. ravnitel'naya otsenka tekhnicheskikh kharakteristik razlichnykh sposobov usileniya elektrifitsirovannykh liniy postoyannogo toka / МИИТ, 1978, вып. 604., 3-21.
5. . Smirnov D. B. Sovershenstvovaniye metodiki rascheta raspredelennoy sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya. Rabota Avtor na Soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Sankt-Peterburg, 2010, 22, 12.
6. Arzhannikov B. A., Naboychenko I. A.. Kontseptsiya usileniya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka 3,0 kV: monografiya, Yekaterinburg: UrGUPS, 2015.
7. Tretyak T.P. Raschet sistemy energosnabzheniya postoyannogo toka povyshennogo napryazheniya [Tekst] // Vestnik Vsesoyuznogo nauchno-issledovatel'skogo instituta zh.d. transporta, 1968, №8, 14-17.
8. Khvorost M.V., Honcharov YU.P., Panasenko N.V. Oborotnyy peretvoryuvach dlya zv'yazku dvokh liniy postynnoho strumu v systemi rozpodilenooho tyahovoho elektropostachannya // Tekhnichna elektrodinamika. Tym. vypusk "Problemy suchasnoyi elektrotekhniki", Kyiv. - 2004. - CH. 6. 99-106.
9. Panasenko N., Goncharov YU.P., Zamaruyev

© Губський П. В., 2018

V.V., Krivosheyev S.YU., Ivanov A.E., Morozov L.L., Sychenko V.G. Преобразователь формы напряжения для систем электроснабжения контактной сети переменного тока. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізничного транспорту ім. акад. Лазаряна – 2009. – Вип. 29. – С. 76-81.

10. Сокол Е.И., Гончаров Ю.П., Ивахно В.В., Сыченко В.Г. и др. Выпрямители с комбинированной фильтрацией для присоединения к системам переменного тока с выраженными резонансными свойствами. // Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ, Вип. 86 – 2011, с. 54-62.

11. Сиченко В. Г. Интеграция солнечной энергетики у систему тягового электропостачання постійного струму, Вісник Нац. техніч. ун-ту «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування, № 12 (1121), с. 364 – 368, 2015.

12. Гончаров Ю.П. Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей / Ю.П. Гончаров, Е.И. Сокол, В.В. Замаруев и др. // Вісник Приазовського державного технічного університету: Збірник наукових праць. - Маріуполь, 2015. - Випуск № 30. с. 200-211.

13. Сиченко В.Г., Кузнецов В. В., Міщенко А. В., Бондар О. І., Кордін О. П. Оцінка енергоефективності ліній повздожнього електропостачання залізниць при підвищенні напруги в мережі. Електрифікація транспорту. № 14 – 2017, - с. 94-101.

14. Бондар І.Л., Бондар О.І., Сиченко В.Г. Електричні системи та мережі нетягових споживачів залізничного транспорту: навчальний посібник (з грифом МОН). Дніпропетровськ. Вид-о Маковецький, 2009. – 184 с.

15. Горюнов В.Н., Бубенчиков А.А., Гиршин С.С., Петрова Е.В., Левченко А.А. Эффективность применения самонесущих изолированных проводов в современных электроэнергетических системах. Омский научный вестник. 2009, № 1, с. 106-108. Електронний ресурс. Доступно: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-primeneniya-samonesuschih-izolirovannyh-provodov-v-sovremennyh-elektroenergeticheskikh-sistemah>.

16. Бердянський кабельний завод. Каталог продукції. Електронний ресурс. Доступно: http://www.bkz.com.ua/cables/online_catalogue/xlpe/sip/sip-3/

V.V., Krivosheyev S.YU., Ivanov A.Ye., Morozov L.L., Sychenko V.G. Preobrazovatel' formy napryazheniya dlya sistem elektrosnabzheniya kontaktnoy seti peremennogo toka. // Vestnik Dnepropetr. nats. un-ta zheleznodorozhnogo transporta im. akad. Makarova - 2009. - Vyp. 29. 76-81.

10. Sokol Ye.I., Goncharov YU.P., Ivakhno V.V., Sychenko V.G. i dr. Vypryamiteli s kombinirovannoy fil'tratsii dlya prisoyedineniya k sistemam peremennogo toka s vyrazhennymi rezonansnymy svoystvami. // Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka. Naukovotekhnichnyy zbirnyk NHU, Vyp. 86 - 2011 roku, 54-62.

11. Sychenko V. H. Intehratsiya Sonyachnoyi enerhetyky u systemu tyahovoho elektropostachannya postiynoho strumu, Visnyk Nats. tekhnich. un-tu «KHPI». Seriya: Avtomatyka ta Pryladobuduvannya, № 12 (tysyacha sto dvadtsyat'-odyn), 364-368, 2015.

12. Honcharov YU.P. Systema peretvorennya enerhiyi, shcho heneruyet'sya v smuzi vidchuzhennya zaliznytsi za dopomohoyu sonyachnykh paneley / YU.P. Honcharov, YE.I. Sokil, V.V. Zamaruev i in. // Visnyk Pryazov's'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: Zbirnyk naukovykh prats'. - Mariupol', 2015. - Vypusk № 30. 200-211.

13. Sychenko V.H., Kuznyetsov V. V., Mishchenko A. V., Bondar O. I., Kordin O. P. Otsinka enerhoefektyvnosti liniy povzdovzhn'oho elektropostachannya zaliznyts' pry pidvishchenni napruhy v merezhi. Elektrifikatsiya transportu. № 14 - 2017, -94-101.

14. Bondar I.L., Bondar O.I., Sychenko V.H. Elektrichni systemy ta merezhi netyahovykh spozhivachiv zaliznychnoho transportu: navchal'nyy posibnyk (z hryfom MON). Dnipropetrovs'k. Vyd-o Makovets'kyy, 2009. – 184.

15. Goryunov V.N., Bubenchikov A.A., Girshin S.S., Petrova Ye.V., Levchenko A.A. Effektivnost' primeneniya samonesuschikh izolirovannykh provodov v sovremennykh elektroenergeticheskikh sistemakh. Omskiy nauchnyy vestnik. 2009, № 1, 106-108. Elektronnyy resurs. Dostupno :: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-primeneniya-samonesuschih-izolirovannyh-provodov-v-sovremennyh-elektroenergeticheskikh-sistemah>.

16. Berdyansk cable factory. Product catalog. Elektronnyy resurs. Dostupno: http://www.bkz.com.ua/cables/online_catalogue/xlpe/sip/sip-3/

Впровадження систем тягового електропостачання розподіленого типу для живлення швидкісних поїздів дозволяє забезпечити необхідний режим потужності та напруги в тяговій мережі. При розробці схематехніки систем розподіленого типу важливим завданням є вибір енергетичного каналу для живлення пунктів підсилення. На сьогоднішній день в якості таких каналів застосовуються лінії електропередачі постійного та змінного струму. Відомі також теоретичні розробки енергетичних каналів іншого типу: з підвищеною частотою, ланкою постійного струму та інші. В пропонуваній роботі представлені результати розрахунків лінії електропередачі змінного струму напругою 35 кВ в якості енергетичного каналу розподіленої системи тягового електропостачання для живлення пункту підсилення потужністю 5 МВт. Показано, що для забезпечення необхідних енергетичних показників достатнє використання проводів АС-35 як по нормованим втратам потужності, так і напруги.

Ключові слова: система тягового електропостачання розподіленого типу, тягова мережа, енергетичний канал, пункт підсилення, лінія електропередачі.

УДК 621.311

П. В. ГУБСКИЙ (ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА)

Институт железнодорожного транспорта, 04-275 Варшава, Польша, ул. Хлопицкого 50,
тел.: +48 22 4731453, эл. почта: Peter.Gybskiy@gmail.com

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ ПИТАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Внедрение систем тягового электроснабжения распределенного типа для питания скоростных поездов позволяет обеспечить необходимый режим мощности и напряжения в тяговой сети. При разработке схемотехники систем распределенного типа важной задачей является выбор энергетического канала для питания пунктов усиления. На сегодняшний день в качестве таких каналов применяются линии электропередачи постоянного и переменного тока. Известны также теоретические разработки энергетических каналов другого типа: с повышенной частотой, звеном постоянного тока и другие. В предлагаемой работе представлены результаты расчетов линии электропередачи переменного тока напряжением 35 кВ в качестве энергетического канала распределенной системы тягового электроснабжения для питания пункта усиления мощностью 5 МВт. Показано, что для обеспечения необходимых энергетических показателей достаточно использования проводов АС-35 как по нормированным потери мощности, так и напряжения.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения распределенного типа, тяговая сеть, энергетический канал, пункт усиления, линия электропередачи.

UDC 621.311

P. V. HUBSKY (INSTITUTE OF RAILWAY TRANSPORT)

Institute of Railway Transport, 50 Chlopickiego Str., 04-275 Warsaw, Poland,
e-mail: Peter.Gybskiy@gmail.com

ENERGY CHANNELS OF POWER OF DISTRIBUTED SYSTEMS OF TYPE ELECTRICAL SUPPLY

The introduction of distributed power supply systems for the supply of high-speed trains allows for the necessary mode of power and voltage in the traction network. In the design of circuitry systems of distributed type an important task is the choice of the power channel for feeding points of amplification. Today, as such channels, power lines are used for direct and alternating current. Also known are theoretical developments of power channels of another type: with high frequency, a link of direct current and others. The proposed work presents the results of calculations of the AC power line with voltage of 35 kV as an energy channel of a distributed traction power supply system for supplying a 5 MW power gain point. It is shown that in order to provide the necessary energy indices, the use of AC-35 wires is sufficient for normalized power losses and voltages.

Keywords: distributed type of traction power supply, traction network, power channel, point of gain, power line.

Received 16.01.2018; accepted in revised form 12.04.2018.

С. П. ДЕНИСЮК, П. В. СОКОЛОВСЬКИЙ (ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського)

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», вул. Борщагівська 115, Київ, Україна, 03056, ел. пошта: spdens@ukr.net, sokolovskyi_pavlo@ukr.net; ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680; orcid.org/0000-0002-0113-4479

АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГНУЧКОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ЕТАПІ ПЕРЕХОДУ ДО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ SMART GRID

Вступ

Використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема, змінних відновлюваних джерел енергії (Variable renewable energy (VRE)), відіграє все більшу роль в перетворенні світового ринку енергетики [1]. Зазначимо, що змінні відновлювані джерела енергії – це джерела електроенергії, як недиспетчеризується через його змінний характер (енергія вітру та сонячна), на відміну від контрольованого відновлюваного джерела енергії (гідроелектростанція або біомаса), або відносно постійного джерела такого як геотермальна енергія або гідроелектростанція, що працює на річці.

Понад 170 країн визначили ряд цільових показників в області ВДЕ, і близько 150 прийняли політику, направлену на стимулювати інвестиції в відновлювані технології. У багатьох країнах розглядається можливість активного залучення приватного сектора [1]. Результати досліджень, проведених Міжнародним агентством з відновлюваних джерел енергії (IRENA) і його партнерами показали, що ВДЕ стають все більш конкурентоспроможними та привабливими для інвесторів, створюють мільйони нових робочих місць і представляють інтерес з комерційної точки зору.

За даними Міністерства енергетики та вугільної промисловості України, частка «зеленої» електроенергії в Україні продовжує зростати. За результатами чотирьох місяців 2018 року було згенеровано завдяки вітровій енергетиці – 435 млн кВт·год, сонячній енергетиці – 245 млн кВт·год та біомасі – 89 млн кВт·год екологічно чистої електроенергії. Порівняно з аналогічним періодом 2017 року найбільший приріст зафіксовано по сонцю та біомасі – 52% та 45% відповідно. Крім того, сонячні та вітрові станції перевиконали показники прогнозного балансу виробництва електроенергії на 16% [2].

Проведені дослідження визначили, що сьогодні Об'єднана енергосистема (ОЕС) України може прийняти ще близько 3 тис. МВт нових потужностей сонячних і вітряних електростанцій (СЕС і ВЕС) без ризику розбалансування і

серйозних змін у своїй структурі [3]. Така встановлена потужність ВДЕ може бути введена в експлуатацію вже в грудні 2019 року. На разі ж встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики за 2017 рік становить 1375 МВт та за I квартал 2018 р. зросла на 159 МВт (рис. 1). При цьому обсяг вже виданих технічних умов на приєднання нових потужностей ВДЕ до енергосистеми складає 7426 МВт (ВЕС – 4200 МВт, СЕС – 3226 МВт) та продовжує зростати. Поява нових потужностей ВДЕ (у разі їх введення) призведе до необхідності пропорційного зниження базової потужності АЕС на 5,75 тис. МВт і зростання потужності ТЕС на 2,8 тис. МВт, що, у свою чергу, суперечить політиці декарбонізації, а «зелена» електроенергія в разі дорожче «атомної» [4].

Сучасні СЕС і ВЕС характеризуються показниками гнучкості роботи [5–6]. Гнучкість роботи – це здатність енергетичної системи реагувати на зміну попиту та пропозиції – є характеристикою перспективних електроенергетичних систем, більш високим рівнем енергозберігаючої змінної (поряд із програмами керування попитом) [5–6]. Для збільшення частки ВДЕ в енергобалансі України важливо задіяти «гнучкої генерацію» та програми керування попитом.

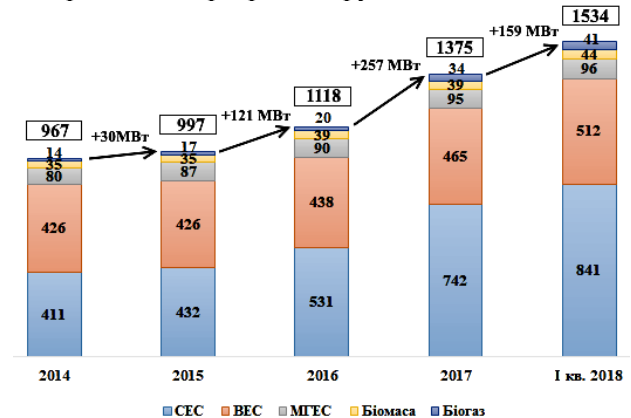


Рис. 1. Встановлена потужність об'єктів ВДЕ в Україні, які працюють за «зеленим» тарифом, МВт

Мета – провести оцінку можливості використання «гнучкої генерації» як нової інновацій-

ної складової при побудові інтелектуальних мереж Smart Grid.

Основні елементи гнучких енергетичних систем

Перехід до надійних, недорогих енергосистем, що залежать в першу чергу від змінних джерел відновлюваної енергії (VRES), передбачає відповідну трансформацію відповідно до планування та експлуатації електроенергетичних системи. Як розвиватиметься ця трансформація, буде залежати від умов конкретної системи – наявних ресурсів ВДЕ, наявності можливостей зберігання енергії, керування попитом, взаємозв'язку з іншими електроенергетичними системами. На рис. 2 показано основні елементи концепції гнучких енергетичних систем [7].



Рис. 2 Ключові елементи концепції гнучких енергетичних систем

Ключовими елементами сучасних гнучких енергетичних систем є [7]:

1. Гнучкість і енергоспоживання, властиві попиту, будуть в повній мірі використані, а активні споживачі енергії стануть повноправними учасниками (партнерами) енергосистеми.

2. Енергетичні ринки стануть більш ліквідними, що працюватимуть в режимі онлайн з високим рівнем прогнозування, з можливостями їх ефективного географічного розташування.

3. Змінні ВДЕ (СЕС, ВЕС) будуть контролюватися, ефективно підключатися до мережі, тим самим зменшуючи їх негативний вплив на мережу.

4. Будуть встановлені цінові стимули або інші механізми (система бонусної мотивації), які належно чином відображають відмінності в перевагах розвитку нових гнучких ВДЕ.

5. Буде створено сховища (накопичувачі) для зберігання великих обсягів енергії, яке буде охоплювати більш тривалі періоди (від декількох тижнів до декількох місяців) низького споживання енергії, згенерованої ВДЕ [8].

6. Буде забезпечена більш складна комунікація та засоби керування для координації гнучких ресурсів в залежності від попиту і пропозиції, а також між мережами передачі та розподілу – інтелектуальною мережею Smart Grid.

7. Широке застосування Smart-керування надлишковими обсягами електроенергії.

Джерела гнучкості та особливості їх роботи

Сьогодні вже відомо багато різних ресурсів для забезпечення гнучкості енергетичних систем як на короткостроковий період роботи, так і на довгостроковий період планування. Гнучкість може виходити від технічних активів, таких як системи накопичення енергії і установки для накопичення природного газу, але також може бути досягнута завдяки аналітичним операціям, зокрема, таким як короткострокове планування виробництва електроенергії і прогнозування стану погоди [9]. Як показано на рис. 3, сьогодні є кілька фізичних опцій, але вони залишаються більш дорогими, ніж поліпшені операції. Джерела гнучкості функціонують і можуть бути посилені за всіма фізичними та організаційно-управлінськими елементами енергетичної системи, включаючи системних операторів, енергетичні ринки, ресурси, сховища згідно попиту, генерацію та мережі передачі. Доступність гнучкості вимагає значного планування, для виконання задач оптимізації інвестування та забезпечення виконання як короткострокових, так і довгострокових програм розвитку енергетичних систем [10].

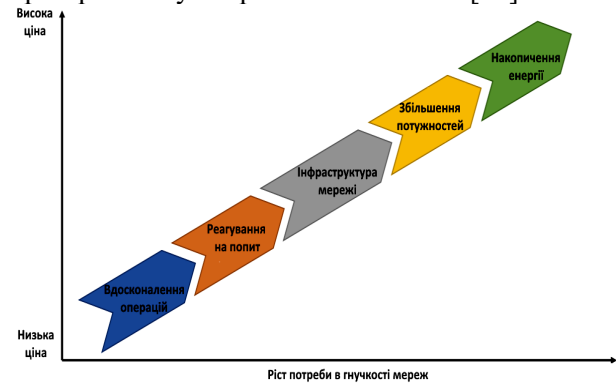


Рис. 3. Графік елементів гнучкості мережі

Високий рівень вітрової та сонячної генерації може збільшити потребу в гнучкості в енергетичній системі.

Енергія вітру є найменш передбачуваною з усіх варіантів гнучких відновлюваних джерел

© Денисюк С. П., Соколовський П. В., 2018

енергії. Мережеві оператори використовують прогнозування системи «доба наперед», щоб визначити, які з доступних джерел енергії використовувати на наступний день, а прогноз погоди використовується для прогнозування вірогідної потужності та потужності сонячної енергії. Співвідношення між виробництвом вітру та прогнозом може бути відносно високим. Так в Німеччині похибка такого співвідношення становить 8,8% протягом двох років [11]. Варіанти енергії вітру можна розглядати як одну з визначальних характеристик [12]. Сонячна енергія більш прогнозована, ніж енергія вітру і менш гнучка – так як вночі відсутня генерація. Взимку спостерігається спад генерації електроенергії у зв'язку з зменшенням сонячної інсоляції через скорочення світлового дня. Єдиними невідомими факторами для прогнозування сонячного виходу щодня є хмарне покриття, мороз та сніг. Багато днів поспіль в деяких місцях відносно безхмарне, точно так само, як багато днів поспіль в одній і тій самій або іншій місцевості пасмурно, що призводить до відносно високої передбачуваності.

Вітер походить від нерівномірного нагрівання земної поверхні [13] і може забезпечити близько 1% потенційної енергії, яка доступна від сонячної енергії. 86 000 ТВт сонячної енергії досягає поверхні світу проти 870 ТВт у всіх вітрах світу [14]. Загальний світовий попит на електроенергію сьогодні становить приблизно 12 ТВт, що в багато разів менше, потенційних обсягів генерації СЕС та ВЕС. Від 40 до 85 ТВт може бути забезпечена від вітру і близько 580 ТВт від сонячної енергії [15].

Зміни в практиці роботи на ринках можуть розблокувати значну гнучкість, часто за нижчих економічних витрат, ніж варіанти, які потребують зміни фізичної енергетичної системи. Регулювання планування виробництва на наступний день, що дозволяє наблизити зміни до реального часу, дозволяє приймати рішення щодо рівнів генерації на основі покращених прогнозів щодо змінної відновлюваної енергії та попиту. Це зменшує потребу в дорогих резервах і дозволяє більш точно та ефективно функціонувати на ринку.

Інші приклади інституційних та операційних джерел гнучкості включають розширення балансової зони енергетичної системи для забезпечення доступу до географічно різноманітних вітрових і сонячних ресурсів; поліпшення вітрового і сонячного прогнозування [16].

Керування попитом та відповідь на попит дозволяють споживачам брати участь у регу-

люванні навантаження на основі цінових сигналів. Механізми відповіді на попит включають автоматичний контроль навантаження оператором системи; Smart мережа та інтелектуальне вимірювання; ціноутворення в реальному часі; та терміни використання тарифів. Відповідь на запити може бути відносно недорогою, але вимагає жорсткого регулювання, пов'язаного з часом відповіді на запит, мінімальною величиною, надійністю та перевіркою ресурсів з боку попиту. Технології зберігання – у тому числі гідро- і термічне зберігання на основі нагнітання, а також енергозберігаючі акумулятори, вироблені під час періодів надлишкової виробки відновлюваної енергії, а потім виділяють цю енергію, коли це необхідно. Відносно реакції на запити та інших варіантів гнучкості, зберігання зазвичай має більшу капіталовкладення [17].

Звичайні електростанції та диспетчеризовані відновлювані генератори, зокрема на біомасі або геотермальні установки, забезпечують гнучкість, якщо вони мають можливість швидко набирати обертів і зменшувати виробництво, дотримуючись чистого навантаження; швидко закривається і запускається; і ефективно працювати на більш низькому мінімальному рівні під час високих періодів генерації відновлюваних джерел енергії. Нова та модернізована великомасштабна електростанція, а також розосереджена генерація меншого розміру (наприклад, мікрокомплекси ТЕЦ) може забезпечити гнучке виробництво [18]. Розширення ліній електропередач та з'єднань з сусідніми мережами забезпечує енергосистему більший доступ до ряду балансувальних ресурсів. Агрегація виробничих потужностей через взаємозв'язок покращує гнучкість та зменшує чисту мінливість у енергетичній системі. Інші джерела гнучкості включають розумні мережеві технології та розширені практики керування мережею, які мінімізують вузькі місця та оптимізують використання електропередачі [19].

Основні принципи щодо гнучкості генерації електроенергії

Всі енергетичні системи мають певний рівень гнучкості, призначений для розміщення змінного та невизначеного навантаження, а також непередбачені обставини, пов'язані з мережевими та звичайними відключеннями електростанцій. Таким чином, багато інструментів для доступу до гнучкості, такі як запаси генерації, автоматичний контроль генерації та короткі інтервали генерації в мережу, використовуються в системах навіть без значної відновлюваної генерації. Використовуючи існуючий

набір інструментів, оператори енергосистеми виявилися ефективними при включенні підвищеної мінливості та невизначеності без значних нових інвестицій у гнучкість системи, таких як нові сховища, відповідь на запити або передачу. Особливо при низьких рівнях проникнення вітру та сонячних променів великі інвестиції в додаткові гнучкі ресурси можуть бути не потрібні [20]. Найпростіші інструменти, такі як діаграми гнучкості, корисні для пояснення відносних сильних і слабких сторін у системі для підтримки гнучкості. Згідно з [21] виділяють такі способи проектування і експлуатації гнучких систем з ВДЕ:

- гнучкі розподілені джерела енергії, які географічно розташовують один біля одного (наприклад, вітрові, сонячні, біомаса), які значно підвищують рівень електропостачання (і попит);
- використання додаткових і негнучких систем генерування електроенергії (наприклад, гідроенергетики) для заповнення тимчасових проміжків між попитом і вітровою або сонячною енергією;
- використовувати Smart керування попитом для перенесення гнучких навантажень на інтервал часу, коли буде необхідність в електроенергії, зберігаючи її при необхідності в системах накопичення, для подальшого використання;
- збільшити потужність відновлюваних пікових потужностей, щоб звести до мінімуму час, коли доступна поновлювана потужність

менша за обсяг попиту і забезпечити накопичення надлишкової енергії;

- зберігати електроенергію в накопичувачах електричних транспортних засобів;
- прогнозувати стан погодних умов (вітри, сонячне світло, хвилі, припливи і опади) для кращого планування потреб в енергопостачанні.

Згідно з прогнозованими даними [22], для ОЕС України отримано графіки (див. рис. 4 та 5) навантаження робочих днів літо-зима 2019 року (ВДЕ < 3000 МВт – «точка перелому»).

Згідно графіка на рис. 4: базова потужність ГЕС – 5,8 млн. кВт·год; базова потужність ТЕС ГК – 44,9 млн. кВт·год; ТЕЦ та Промстанції – 19,2 млн. кВт·год; АЕС – 220,8 млн. кВт·год.

Згідно графіка на рис. 5: базова потужність ГЕС – 3,4 млн. кВт·год; базова потужність ТЕС ГК – 81,3 млн. кВт·год; ТЕЦ та Промстанції – 55,2 млн. кВт·год; АЕС – 259,2 млн. кВт·год.

На рис. 6 представлено приклад схеми з двома гнучкими ВДЕ: СЕС та ВЕС [23]. На рис. 6 показано типовий спосіб встановлення одного або декількох енергогенеруючих установок відновлюваної енергії (кластер виробництва відновлюваної енергії), що вказує на типовий розташування точки підключення блоку генерації (PGUC), точки підключення (РОС) та точки спільного з'єднання РСС).

Схеми складаються з двох або більше блоків сонячних панелей та вітрогенераторів перетворювальних приладів (інвертора) та інших необхідних компонентів та трансформатора.

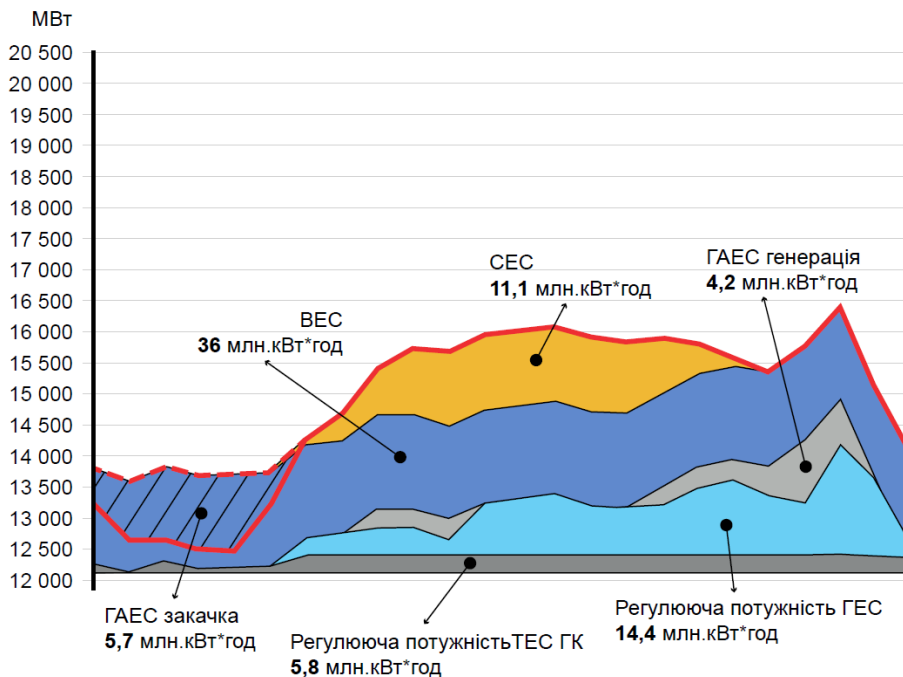


Рис. 4. Графік покриття робочого дня літа 2019 року (СЕС-1500 МВт, ВЕС-1500 МВт)

© Денисюк С. П., Соколовський П. В., 2018

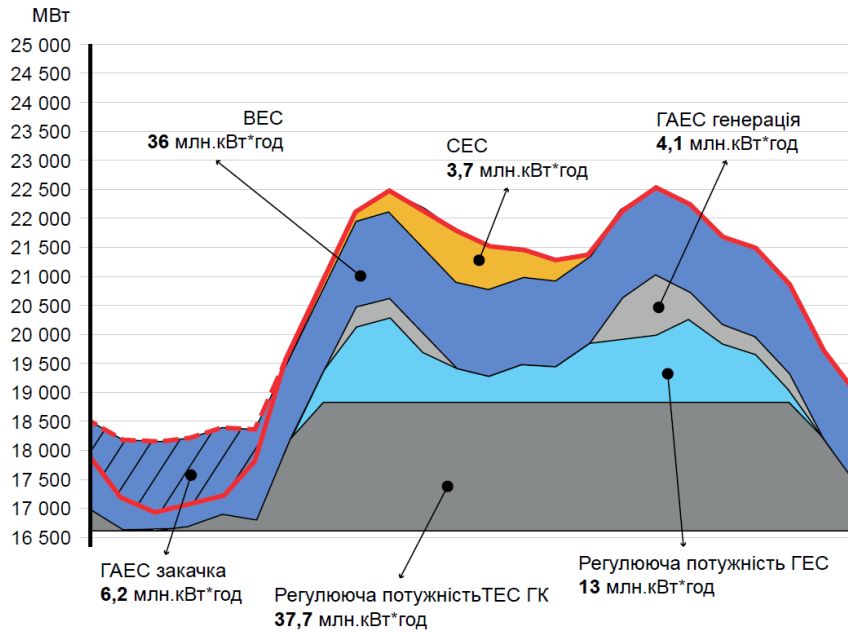


Рис. 5. Графік покриття робочого дня зими 2019 року (СЕС-1500 МВт, ВЕС-1500 МВт)

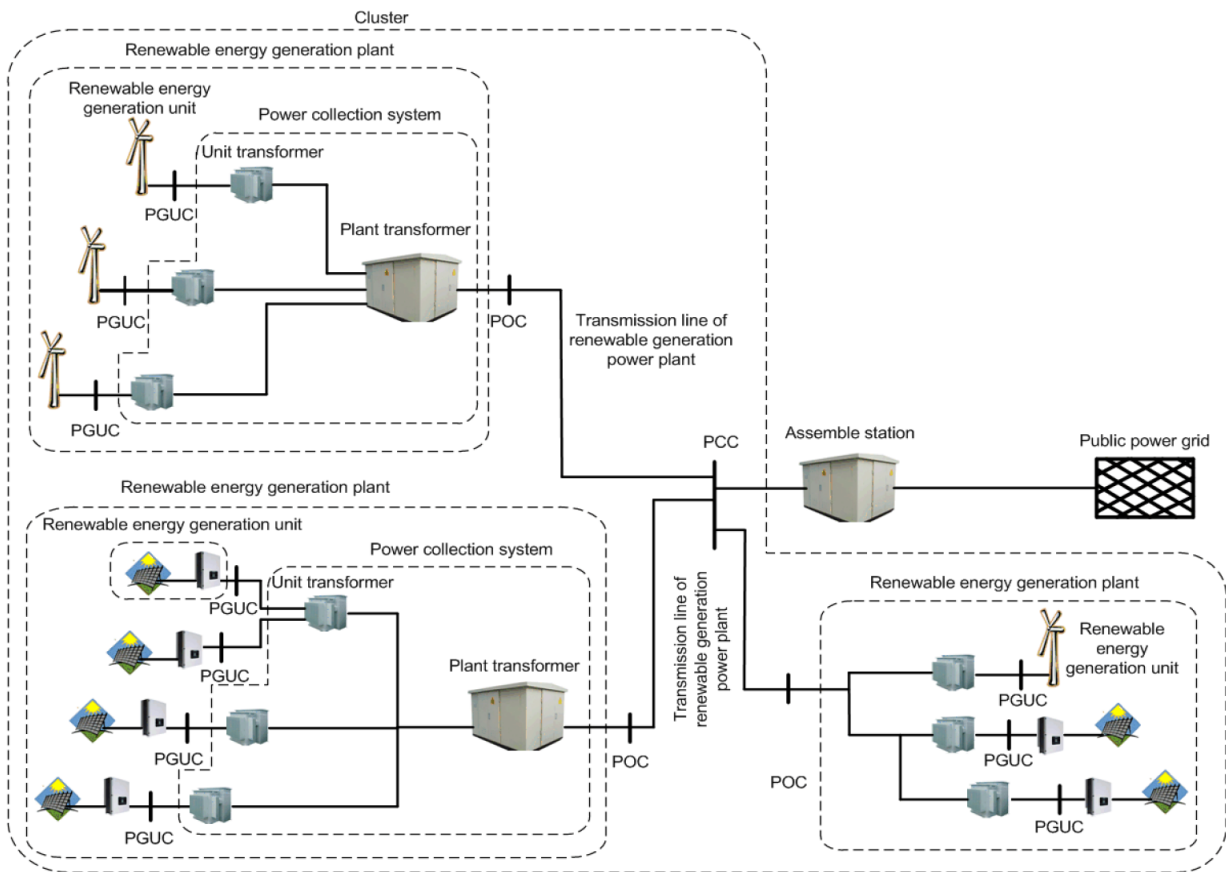


Рис. 6. Приклад схеми функціонування гнучких ВДЕ

На рис. 7–9 показані можливі варіанти підключення потужностей ВЕС [23], де на схемах позначено: 1 – електрогенератор; 2 – електростанція; 3 – вітропарк; 4 – точка приєднання електростанції; 5 – трансформатор підстанції, через яку здійснюється видача потужності; 6 –

підстанція, через яку здійснюється видача потужності. При цьому враховується, що комутаційні апарати та розподільчі пристрої вибираються при проектуванні.

Структурна схема типової СЕС, підключеної до мережі, наведена на рис. 10 [24].

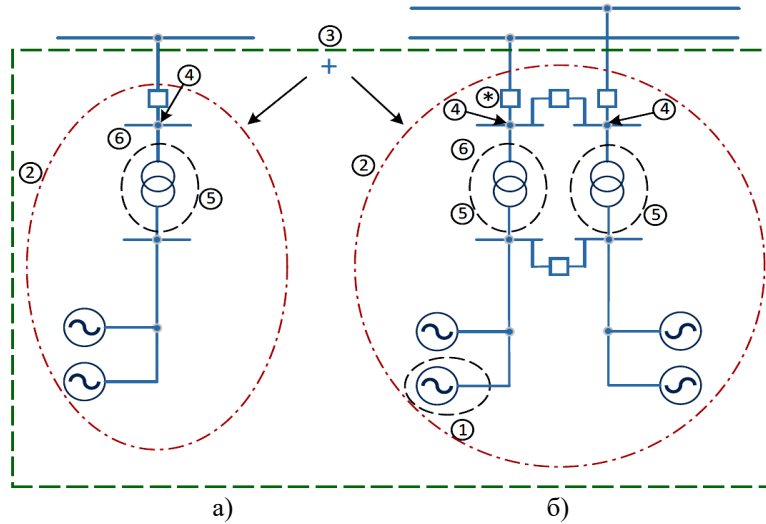


Рис. 7: а) приєднання до мережі 110 кВ і вище відгалуженням; б) приєднання до мережі 110 кВ і вище двома відгалуженнями

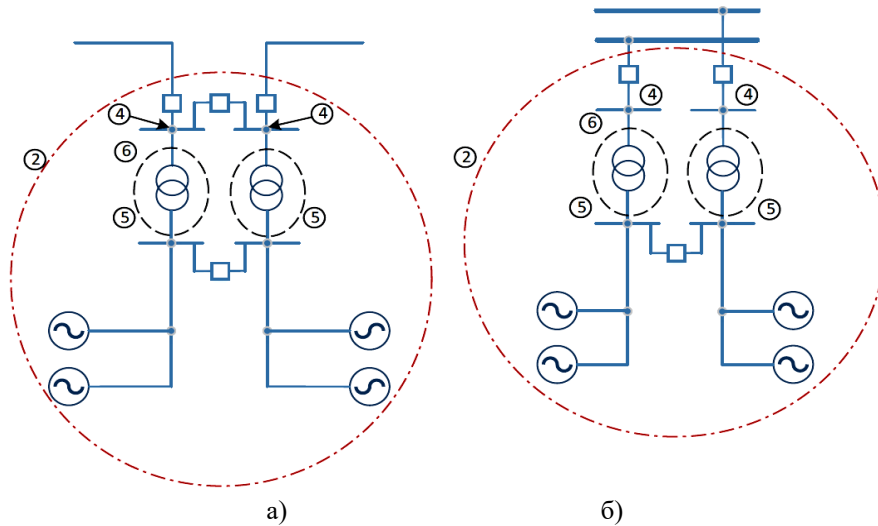


Рис. 8: а) приєднання до мережі 110 кВ і вище за схемою «вхід-вихід»; б) приєднання до існуючого РУ 110 кВ і вище

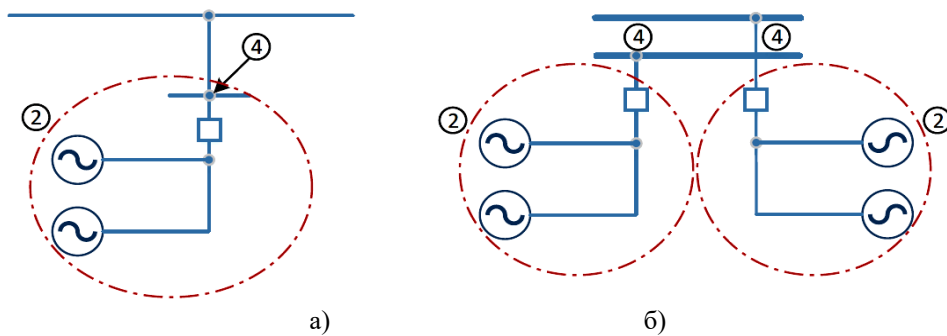


Рис. 9: а) приєднання до існуючого РУ 35 кВ і нижче; б) приєднання до мережі 35 кВ і нижче

Потужності «гнучких» ВДЕ чинять безпосередній вплив на зміну інфраструктури енергетики при збільшенні частки ВДЕ структурі загального енергобалансу [25]. Так, в табл. 1 наведено інформацію щодо впливу гнучких ВДЕ на роботу електричних мереж, а в табл. 2

– відсотковий розподіл за параметрами реагування, де * – величина частки на відсотковому інтервалі (* – мала величина частки; ** – середня величина частки; *** – велика величина частки).

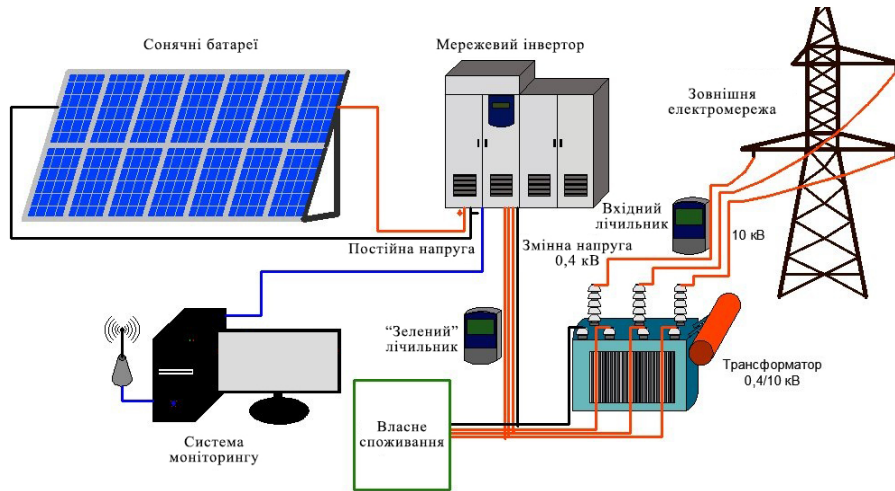


Рис. 10. Структурна схема типової СЕС, підключеної до мережі [24]

Таблиця 1 – Вплив гнучких ВДЕ на роботу електричних мереж, %

Характеристика	Частка генерації змінними ВДЕ				
	< 2 %	2 – 5%	5 – 10%	10 – 20%	20% – >50%
Вплив змінних ВДЕ	Відсутній помітний вплив.	На рівні оператора системи Приклади реагування на зміни в інфраструктурі, технологічні та оперативні заходи є невелике зростання невизначеності та нестабільності пропозицій. Обмежений вплив на роботу окремих електростанцій.	Зростання нестабільності та невизначеності пропозиції має суттєвий вплив на рівні оператора системи. Помітним є вплив на роботу окремих електростанцій.	Підвищена нестабільність пропозицій і невизначеність мають значний та визначальний вплив на рівні операторів системи. Помітним є вплив на роботу практично всіх електростанцій.	Найявним є структурний надлишок генерації від змінних ВДЕ та сезонні небаланси в енергосистемі.
Коригуючі дії	Корекція роботи мережі не потрібна.	Деякі типи регулювання в системі на рівні операторів системи і мережевої інфраструктури.	Значні зміни в роботі системи. Більша гнучкість попиту та пропозицій. Деяке посилення в мережі для стабільності напруги та частоти.	Визначальні зміни в роботі системи. Значна додаткова нестабільність попиту та пропозицій. Суттєве посилення інфраструктури мережі для стабільності напруги та частоти.	Додаткові заходи для керування дисбалансом попиту та пропозицій.
Приклади реагування на зміни в інфраструктурі, технологічні та оперативні заходи	Збір інформації про стан мережі і для планування включаючи, технічні стандарти для	Створення системи прогнозування виробництва енергії від ВДЕ. Впровадження сучасних технологій і процесів керу-	Керування нестабільністю розвинутими системами прогнозування генерації, покращення інфраструктури пере-	Значне підвищення ефективності і масштабу реагування масштабу реагування на попит і перевантаження за	Секторна взаємність – електропостачання, опалення, охолодження і транспорт для обміну генерацією енергії від ВДЕ.

	майбутнього збільшення кількості ВДЕ.	вання для ефективного планування та диспетчеризації системних ресурсів.	дачі і значно динамічніше оперативне керування постійно зростаючим числом ресурсів і елементів системи, які засновані на диспетчеризації. Координація об'єктів керування за допомогою розширеного обміну інформацією, технологією керування мережевими зв'язками і керування перетоками.	допомогою сучасних технологій обміну інформацією. Збільшення кількості додаткових прогресивних та швидкодіючих накопичувачів енергії в мережі, вимірювання та балансування енергії для покращення стабільності мережі та частоти.	Перетворення електроенергії в хімічні сполуки (водень), які можуть накопичуватись а зберігатись.
--	---------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------

Таблиця 2 – Відсотковий розподіл за параметрами реагування, %

Характеристика		Частка генерації змінними ВДЕ				
		< 2 %	2 – 5%	5 – 10%	10 – 20%	20% – >50%
Реагування	Прогноз. ресурсів		*	**	***	***
	Керування мережею		*	**	***	***
	Зберігання енергії			*	**	***
	Керування попитом			*	**	***
	Підсилення мережевої інфраструктури			*	**	***
	Секторні взаємозв'язки				*	***

Розподіл країн за рівнем впливу гнучких ВДЕ на роботу електричних мереж за країнами у відсотках:

- частка генерації змінними ВДЕ < 2 %: Індонезія, Мексика, ПАР;
- частка генерації змінними ВДЕ 2 – 5%: Австралія, Австрія, Бельгія, Бразилія, Чилі, Китай, Індія, Нідерланди, Нова Зеландія, Швеція;
- частка генерації змінними ВДЕ 5 – 10%: Німеччина, Греція, Італія, Португалія, Ісландія, Великобританія, Уругвай;
- частка генерації змінними ВДЕ 10 – 20%: Данія, Ірландія.

Основні завдання для розроблення політики щодо гнучкості енергетичної системи [25, 26]:

- енергетичні системи вже є гнучкими, призначені для розміщення змінної та невизначеною навантаження;
- у багатьох енергосистемах існує достатня гнучкість для інтеграції додаткової мінливості, але така гнучкість може бути недоступною без

змін у роботі енергосистем та інших інституційних факторів;

- у значних обсягах відновлювана енергія змінить форму вимог до диспетчеризації, щоб гнучкість системи була переоцінена, і підвищення рівня відновлюваних джерел енергії може вимагати підвищення рівня гнучкості;
- широкий спектр елементів енергетичних систем впливає на гнучкість системи, починаючи від передачі активів до характеристик генерації та операційної практики;
- незважаючи на те, що існує низка нових показників ефективності та методів оцінки, стандартний показник для вимірювання гнучкості на сьогодні не існує, а показники продовжують розвиватися;
- існує декілька підходів до вдосконалення гнучкості мережі, включаючи покращення можливостей нарощування парку диспетчерського керування генерацією, збільшення участі на рівні попиту та участі на рівні розподілу, а також посилення координації на кількох ринках або балансуванні областей;

– знаходження оптимального рівня інвестицій вимагає врахування не тільки короткострокових операційних вимог, а й довгострокової життєздатності для відшкодування витрат; невизначеність щодо рівня, часу та типу розгортання відновлюваної енергетики ускладнює проблему пошуку оптимального рівня інвестицій;

– виходячи з інвестиційних потреб, незалежно від змінної відновлюваної енергії та інтелектуальних мереж, енергосистеми в розвинутих та країнах, що розвиваються, можуть мати різні шляхи для нарощування гнучкості;

– пропозиції щодо гнучкості можуть бути інтегровані в розробку політики закупівель для нових видів виробництва відновлюваних джерел енергії (наприклад, податкові тарифи, субсидії), наприклад, шляхом надання підтримки на місцезположення виробництва, надання частотної підтримки, узгодження з попитом та / або інтеграція в оптимізацію диспетчеризації;

– політичні стимули можуть бути розроблені, щоб передбачити потреби в гнучкості та підтримувати гнучкість системи.

Необхідно також розглянути можливі методи стимулювання розвитку активних споживачів в Україні:

– зниження «зеленого» тарифу та введення надбавок (бонусів) за приєднання систем накопичення електричної енергії до загальної мережі;

– проведення модернізації мережевої інфраструктури шляхом створення паралельних масштабованих мереж для забезпечення електричною енергією до споживачів і окремо від виробників, включаючи активних споживачів, з системами накопичення електроенергії на усіх рівнях – локальних і приватних систем активних споживачів до мереж регіонального і національного рівня;

– введення систем агрегування, для збору окремих малопотужних та віддалених ВДЕ і максимально використовувати розподіл потужностей виробництва і зберігання, наближати їх до споживачів, ніж знижувати втрати в енергомережах і ефективно використовувати можливість локальних мереж;

– розвиток програм підтримки щодо питання підключення до мережі нових власників ВДЕ; стимулювати залучення активних споживачів, що володіють приватними системами накопичення електроенергії, до локальних мереж, таких як Microgrid та віртуальних електростанцій (VPP), та ефективно розподіляти енергію «агрегаторами»: компаніями, які беруть на себе не тільки функції внутрішнього обліку попиту і передачі енергії, а й здійснення «миттєвого» цінового реагування на зміни на ринках електроенергії.

– знаходження оптимального рівня інвестицій вимагає врахування не тільки короткострокових операційних вимог, а й довгострокової життєздатності для відшкодування витрат; невизначеність щодо рівня, часу та типу розгортання відновлюваної енергетики ускладнює проблему пошуку оптимального рівня інвестицій;

Висновки

1. Можливість використання «гнучкої» генерації в Україні як важливої технічної та економічної складової електричних мереж досить велика. Використання «гнучкої» генерації в Україні дозволить модернізувати електричні мережі, переорієнтувавши їх на роботу ВДЕ, виконати технічне переоснащення, оптимізувати графік завантаження мережі враховуючи можливість використання систем накопичення електроенергії.

2. Окремі виробники електроенергії створюють зворотній потік інформації до агрегаторів та електростачальних компаній, з метою точності та достовірності облікових даних, а також збільшення їх участі в формуванні цін. Створення таких локальних Smart мереж, як Microgrid та VPP, потребує залучення «гнучких» ВДЕ та залучення активних споживачів в якості їх ключових складових.

3. Забезпечення балансування потужністю агрегованих систем зберігання енергії є ще досить інноваційним, для якого не існує єдиної правової та регуляторної бази. Як наслідок, деякі питання, що стосуються їх рентабельності та навіть доцільності, залишаються невирішеними. Складність процесів, що забезпечують балансування потужності через агреговані системи зберігання енергії, а також ризики коливань цін та зміни регулюючих положень є високими.

4. Необхідно провести детальні математичні розрахунки, які визначать величину критичних значень потужності для СЕС і ВЕС, які можуть бути введені без ризику розбалансування ОЕС України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Renewable Energy Employs 9.8 million People Worldwide, New IRENA Report Finds [Електронний ресурс]. URL: <http://www.irena.org> (дата звернення 26.06.2018).

REFERENCES

1. Renewable Energy Employs 9.8 million People Worldwide, New IRENA Report Finds [Web source]. URL: <http://www.irena.org> (appeal date 26.06.2018).

2. Za 4 misyatsi 2018 roku Ukrayina zbil'shyla

2. За 4 місяці 2018 року Україна збільшила виробництво сонячної електроенергії більш ніж на 50% [Електронний ресурс]. URL: <https://interfax.com.ua> (дата звернення 20.06.2018).

3. Обсяги допустимих потужностей ВДЕ в структурі ОЕС України [Електронний ресурс]. URL: <https://ua.energy/> (дата звернення 18.06.2018).

4. Держенергоефективності: обсяги потужностей відновлюваної електроенергетики вже встановлено у I кварталі 2018 року [Електронний ресурс]. URL: <http://saee.gov.ua/> (дата звернення 20.05.2018).

5. Renewables 2016 Global Status Report, REN21. 2016 [Електронний ресурс]. URL: http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report (дата звернення 20.06.2018).

6. Kroposki B. et al., "Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy" [IEEE Power and Energy Magazine]. – March – April 2017 – № 15 – pp. 61-73.

7. Power System Flexibility Strategic Roadmap [Електронний ресурс]. URL: <http://www.ren21.net> (дата звернення 20.06.2018).

8. International Energy Agency, "Harnessing Variable Renewables: A Guide to the Balancing Challenge," International Energy Agency – Paris – 2011.

9. Ken Dragoon and Georgios Papaefthymiou GRID FLEXIBILITY: METHODS FOR MODERNIZING THE POWER GRID [European Copper Institute]. – 2016 [Web source]. URL: www.energyinnovation.org (appeal date 20.06.2018).

10. Paul Denholm et al., The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. National Renewable Energy Laboratory – 2010.

11. On-line Monitoring and Prediction of Wind Power [Електронний ресурс]. URL: <https://www.uni-kassel.de/> (дата звернення 20.05.2018).

12. Clive, P. J. M. The emergence of eolies, TEDx University of Strathclyde Retrieved – 9 May 2014. [[Електронний ресурс]. <http://www.sgurrenergy.com> (дата звернення 20.05.2018).

13. Wind Turbines: Converting Wind Energy into Electricity [Електронний ресурс]. <http://www.bluewaterwind.com/howitworks.htm> (дата звернення 20.06.2018).

14. Global Exergy Flux [Електронний ресурс].

vyrobnytstvo sonyachnoyi elektroenerhiyi bil'sh nizh na 50% [During 4 months of 2018 Ukraine has increased solar power production by more than 50%] [Web source]. <https://interfax.com.ua> appeal date 26.06.2018).

3. Obsyahy dopustymykh potuzhnostey VDE v strukturi OES Ukrayiny [3. Volumes of admissible capacities of RES in the structure of the UES of Ukraine] [Web source]. URL: <https://ua.energy/> (appeal date 18.06.2018).

4. Derzhavne ahenstvo z enerhoefektyvnosti: obsyahy potuzhnostey vidnovlyuvanoyi elektroenerhetyky vzhe vstanovlenoyi u I kvartali 2018 roku [State Energy Efficiency Agency: The capacity of renewable electricity already set in Q1 2018] [Web source]. URL: <http://saee.gov.ua/> (appeal date 20.05.2018).

5. Renewables 2016 Global Status Report, REN21. 2016 [Web source]. URL: http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report (appeal date 20.06.2018).

6. Kroposki B. et al., "Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy" [IEEE Power and Energy Magazine]. – March – April 2017 – № 15 – pp. 61-73.

7. Power System Flexibility Strategic Roadmap [Web source]. URL: <http://www.ren21.net> (appeal date 20.06.2018).

8. International Energy Agency, "Harnessing Variable Renewables: A Guide to the Balancing Challenge," International Energy Agency – Paris – 2011.

9. Ken Dragoon and Georgios papaefthymiou grid flexibility: methods for modernizing the power grid [European Copper Institute]. – 2016 [Web source]. URL: www.energyinnovation.org (appeal date 20.06.2018).

10. Paul Denholm et al., The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. National Renewable Energy Laboratory – 2010

11. On-line Monitoring and Prediction of Wind Power [Web resource]. URL: <https://www.uni-kassel.de/> (appeal date 20.05.2018).

12. Clive, P. J. M. The emergence of eolies, TEDx University of Strathclyde Retrieved – 9 May 2014. [Web resource]. <http://www.sgurrenergy.com> (appeal date 20.05.2018).

13. Wind Turbines: Converting Wind Energy into Electricity [Web resource]. <http://www.bluewaterwind.com/howitworks.htm> (appeal date 20.06.2018).

14. Global Exergy Flux [Web resource]. <http://gcep.stanford.edu/research/exergy/resourcec>

<http://gcep.stanford.edu/research/exergy/resource/hart.html>(appeal date 20.06.2018).

15. Jacobson, Mark Z.; Delucchi, M.A. A Path to Sustainable Energy by 2030. *Scientific American*. 301 (5): 58 – 65. doi:10.1038/scientificamerican1109-58 November – 2009.

16. J. O'Sullivan, Y. Coughlan, S. Rourke, N. Kamaluddin, "Achieving the highest levels of wind integration: A system operator's perspective", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 819-825, Oct. 2012.

17. Paatero JV, Lund PD. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks. *Renewable Energy* 2007; 32:216–34.

18. Holttinen H. Wind integration: experience, issues, and challenges. *Wiley Interdiscip Rev Energy Environ* 2012; 1:243 – 55.

19. The Danish Government. The Danish Climate Policy Plan: towards a low carbon society – 2013.

20. The Press and Information Office of the Federal Government. Switching to the electricity of the future. Arch Der Bundesregierung; 2011. [Електронний ресурс]. http://archiv.bundesregierung.de/ContentArchiv/EN/Archiv17/Artikel/_2011/06/2011-06-09-regierungserklaerung_en.htm(appeal date 20.06.2018).

21. Delucchi, Mark A. and Mark Z. Jacobson. "Providing all Global Energy with Wind, Water, and Solar Power, Part II: Reliability, System and Transmission Costs, and Policies" – 2010.

22. Залучення сонячних та вітрових електростанцій до покриття навантаження ОЕС України [Електронний ресурс]. <https://ua.energy/> (дата звернення 20.06.2018).

23. Технические требования к ветроэлектрическим станциям при их работе в составе ЕЭС [Електронний ресурс]. <http://rawi.ru> (дата звернення 20.06.2018).

24. Мережеві промислові сонячні фотоелектричні станції [Електронний ресурс]. <https://rent techno.ua/ua/solar/utility-scale.html> (дата звернення 20.06.2018).

25. Renewables 2017 Global Status Report, REN21. 2017 [Електронний ресурс]. URL: <http://www.ren21.net/> (дата звернення 20.06.2018).

26. Солнечный просьюмеризм: проблема или решение? [Електронний ресурс]. <https://rent techno.ua/blog/prosumerism.html> (дата звернення 20.06.2018).

hart.html(appeal date 20.06.2018).

15. Jacobson, Mark Z.; Delucchi, M.A. A Path to Sustainable Energy by 2030. *Scientific American*. 301 (5): 58 – 65. doi:10.1038/scientificamerican1109-58 November – 2009.

16. J. O'Sullivan, Y. Coughlan, S. Rourke, N. Kamaluddin, "Achieving the highest levels of wind integration: A system operator's perspective", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 819-825, Oct. 2012.

17. Paatero JV, Lund PD. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks. *Renewable Energy* 2007; 32:216–34.

18. Holttinen H. Wind integration: experience, issues, and challenges. *Wiley Interdiscip Rev Energy Environ* 2012; 1:243 – 55.

19. The Danish Government. The Danish Climate Policy Plan: towards a low carbon society; 2013.

20. The Press and Information Office of the Federal Government. Switching to the electricity of the future. Arch Der Bundesregierung; [Web resource] http://archiv.bundesregierung.de/ContentArchiv/EN/Archiv17/Artikel/_2011/06/2011-06-09-regierungserklaerung_en.html org (appeal date 20.06.2018).

21. Delucchi, Mark A. and Mark Z. Jacobson. "Providing all Global Energy with Wind, Water, and Solar Power, Part II: Reliability, System and Transmission Costs, and Policies" – 2010.

22. Залучення сонячних та вітрових електростанцій до покриття навантаження ОЕС України [Involve ment of solar and wind power plants to cover the loading of the UES of Ukraine] [Web resource] <https://ua.energy/> (org (appeal date 20.06.2018).

23. Tekhnicheskiye trebovaniya k vetroelektrichesky m stantsiyam pry ykh rabote v sostave EES [Technical requirements for wind power plants in their work in the UES]. [Web resource] <http://rawi.ru> (org (appeal date 20.06.2018).

24. Merez evi promuslovi sonyachni fotoelektrichni stanchiy [Web resource] <https://rent techno.ua/ua/solar/utility-scale.html> (org (appeal date 20.06.2018).

25. Renewables 2017 Global Status Report, REN21. 2017 [Web resource]. URL: <http://www.ren21.net/> (appeal date 20.06.2018).

26. Solar prosumerism: a problem or a solution? <https://rent techno.ua/blog/prosumerism.html> (appeal date 20.06.2018).

Стрімкий розвиток впровадження нових розосереджених джерел енергії в електричні мережі та створення приватних генеруючих електростанцій, спонукає споживачів змінювати свій статус з пасивного стану (звичайні споживачі електроенергії) на активний і виступати як повноправний учасник ринку електроенергії.

У статті проведено аналіз та оцінено потенціал «гнучких» ВДЕ, як нової складової сучасних систем енергозабезпечення інтелектуальних мереж Smart Grid. Показано вплив «гнучких» ВДЕ на зміну графіків електричних навантажень. Описано можливі методи стимулювання розвитку окремих виробників електроенергії в Україні.

Ключові слова: ВДЕ, гнучкість, Smart Grid, Microgrid, системи накопичення енергії.

УДК 621.31

С. П. ДЕНИСЮК, П. В. СОКОЛОВСКИЙ (ИЭЭ КПИ ИМ. ИГОРЯ СИКОРСКОГО)

Институт энергосбережения и энергоменеджмента, Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ул. Борщаговская 115, Киев, Украина, 03056, эл. почта: spdens@ukr.net, sokolovskyi_pavlo@ukr.net; ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680; orcid.org/0000-0002-0113-4479

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГИБКОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ЭТАПЕ ПЕРЕХОДА К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ СЕТЯМ SMART GRID

Стремительное развитие внедрения новых рассредоточенных источников энергии в электрические сети и создание частных генерирующих электростанций, побуждает потребителей менять свой статус из пассивного состояния (обычные потребители электроэнергии) на активный и выступать как полноправный участник рынка электроэнергии.

В статье выполнен анализ и оценены потенциал «гибких» ВИЭ, как новой составляющей современных систем энергообеспечения интеллектуальных сетей Smart Grid. Показано влияние «гибких» ВИЭ на смену графиков электрических нагрузок. Описаны возможные методы стимулирования развития отдельных производителей электроэнергии в Украине.

Ключевые слова: ВИЭ, гибкость, Smart Grid, Microgrid, системы накопления электроэнергии.

UDC 621.31

S. P. DENYSIUK, P. V. SOKOLOVSKYI (IEE IGOR SIKORSKYI KPI)

Institute of Energy Saving and Energy Management National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 03056, Kyiv, Borschagivska st., 115, e-mail: spdens@ukr.net, sokolovskyi_pavlo@ukr.net; ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680; orcid.org/0000-0002-0113-4479

ANALYSIS OF THE VARIABLE GENERATION FUNCTION ON THE STEP OF TRANSITION TO INTELLECTUAL NETWORKS SMART GRID

The rapid development of the introduction of new dispersed energy sources into electric grids and the creation of private generating power plants encourages consumers to change their status from the passive state (ordinary consumers of electricity) to active and act as a full participant in the electricity market.

The article analyses and evaluates the potential of "flexible" renewable energy sources as a new component of modern Smart Grid power supply systems. The influence of "flexible" renewable energy sources on the change in the schedule of electrical loads is shown. Possible methods of stimulating the development of individual electricity producers in Ukraine are described.

Keywords: renewable energy, flexibility, Smart Grid, Microgrid, energy storage system.

Received 18.01.2018; accepted in revised form 03.04.2018.

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

Кафедра «Проектування і будівництво доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010,
тел./факс +38 (056) 373 15-48, ел. пошта: kunibor@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-8182-7709

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИФІКАЦІЇ НАПРЯМКУ ЗАПОРІЖЖЯ – КОМИШ ЗОРЯ – ВОЛНОВАХА

Історія питання

На сьогодні пропускна спроможність одноколіїних ділянок залізниць з тепловозною тягою не задовольняє вимогам щодо обсягів перевезень, швидкості руху, екології та економії енергоресурсів. Дослідження, що були проведені раніше [1-4] показали, що на одноколіїних ділянках уведення електричної тяги ефективно не стільки за рахунок збільшення пропускної спроможності, скільки за рахунок покращення економічних показників, зниження експлуатаційних витрат пов'язаних з рухом поїздів, економії енергоресурсів.

У 2015 році Укрзалізниця затвердила програму електрифікації залізниць на 2015-2020 рр. (наказ № 156-Ц/од від 25.05.2015). У рамках шести проектів передбачається електрифікувати понад 860 км колії на Одеській, Львівській, Південно-Західній та Придніпровській магістралях. При цьому три напрямки є принципово новими, а три, і серед них Волноваха – Комиш-Зоря – Запоріжжя, лишилися «у спадок» від аналогічної програми електрифікації залізниць на 2011-2016 роки, яка не була повністю реалізована із-за недостатнього фінансування.

Свого часу лінія Запоріжжя–Комиш-Зоря–Волноваха будувалася для розвантаження північного широтного ходу Долгінцеве (Кривий Ріг)–Катеринослав (Дніпро)–Чаплине–Гришине (Красноармійськ)–Ясинувата. Пік навантаження дільниці Запоріжжя–Комиш-Зоря–Волноваха припав на 80-ті роки минулого століття. Дільницею Запоріжжя–Комиш-Зоря курсувало до 36 пар вантажних поїздів на добу, а якщо додати ще й поїзди ділянки Федорівка–Комиш-Зоря, то обмін поїздами між Донецькою та Придніпровською залізницями по Комиш-Зорі доходив до 60 пар на добу. Після 1992 року вантажопотік цією дільницею суттєво знизився. Саме з цієї причини упродовж 1999–2003 років повністю демонтували на Придніпровській ділянці 12 двоколіїних вставок (сумарною довжиною 67 км) й роз'їзд Красний Восток (237 км), на Донецькій ділянці демонтували другу

колійу на перегонах Хлібодарівка–Зачатівська та Зачатівська–Рогівка, а у 2011 році закрили роз'їзд 347 км на перегоні Комиш-Зоря–Розівка.

Ще у 2012 році, на замовлення Придніпровської та Донецької залізниць, були проведені необхідні техніко-економічні обґрунтування, розроблені та затверджені комплексні проекти електрифікації ділянки Запоріжжя – Комиш-Зоря – Волноваха, але не реалізовані.

На даний час напрямком Запоріжжя – Комиш-Зоря – Волноваха використовується в основному для забезпечення транспортного зв'язку підприємств металургійного комплексу. На полігоні Придніпровської і Донецької залізниць це один з найбільш стабільних і зростаючих вантажопотоків, не враховуючи сезонних перевезень зернових вантажів в порти. Обмежена пропускна спроможність окремих ділянок цього напрямку, а також проблеми із забезпеченням тепловозної тяги, призвели до того, що частина вантажопотоку направляється з відхиленням від оптимального маршруту і, як результат, до зростання експлуатаційних витрат.

Отже, актуальним постало питання підвищення пропускної спроможності мариупольського напрямку для забезпечення вантажоперевезень підприємств металургійного комплексу з урахуванням суттєвого зносу парку тепловозів ПАТ «Укрзалізниця».

Мета роботи і методика дослідження

Представляється доцільним дослідити, на скільки покращуються тягово-енергетичні показники при заміні тепловозної тяги на електричну на ділянках, що характеризуються різними умовами експлуатації, різними параметрами плану й поздовжнього профілю.

Методика дослідження полягає в застосуванні розробленої математичної моделі, яка дозволяє виконувати тягові розрахунки і визначати експлуатаційні витрати пов'язані з рухом поїздів. В розрахунках використовуються дані щодо параметрів поздовжнього профілю, плану лінії, характеристики рухомого складу, рівня обмеження швидкості руху поїздів на станціях і

перегонах. Через такі показники як механічна робота локомотива, робота сил опору, час руху поїзда проводиться моніторинг використання електроенергії на тягу поїздів та аналіз отриманої інформації.

Характеристика об'єкта дослідження

Ділянка Запоріжжя–Комиш-Зоря–Волноваха була побудована в 1903 році і входить до складу південного широтного напрямку, що пов'язує Донецький і Криворізький регіони та надає

вихід до портів Чорного й Азовського морів (рис.1).

На початку, від ст. Запоріжжя до ст. Фісаки, і в кінці – від ст. Пологи і майже до ст. Комиш-Зоря ділянка характеризується складним планом і зтяжними підйомами й спусками. Протяжність ухилів крутіших за 6‰ – 24,3‰. Протяжність кривих радіусом до 600 м – 13,8‰. Інші характеристики наведені в табл. 1.

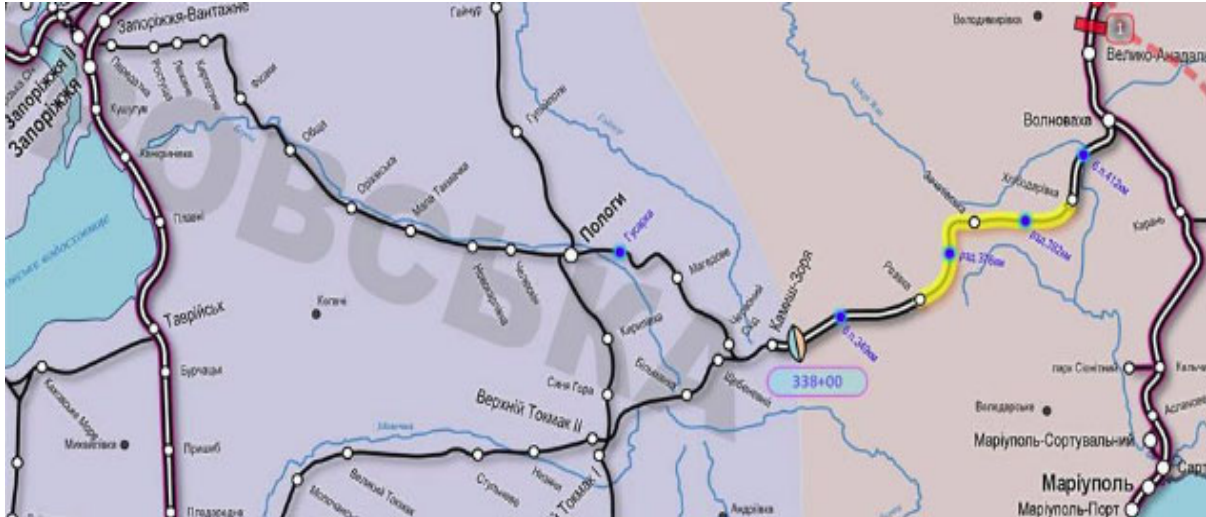


Рис. 1. Ділянка Запоріжжя-Комиш-Зоря-Волноваха

На початку, від ст. Запоріжжя до ст. Фісаки, і в кінці – від ст. Пологи і майже до ст. Комиш-Зоря ділянка характеризується складним планом і зтяжними підйомами й спусками. Протяжність ухилів крутіших за 6‰ – 24,3‰. Протяжність кривих радіусом до 600 м – 13,8‰. Інші характеристики наведені в табл. 1.

Технічний стан локомотивного парку на сьогодні в значній мірі визначається незадовільним його оновленням при високому ступені зношення. Відповідно до Програми [5] знос тягового рухомого складу складає: магістральні тепловози – 99,6%, магістральні електровази – 92%.

Забезпечення пропускної спроможності напрямку Запоріжжя – Комиш-Зоря - Волноваха, на даний час, слід розглядати також і з точки зору наявності тягового рухомого складу. Вантажні перевезення здійснюються тепловозами 2ТЕ116. Парк таких тепловозів нараховує 280 од. Всі локомотиви відпрацювали встановлений термін служби, що складає 20 років, а середній вік 29 років. З 2003 року проведенням заводського ремонту подовжено термін служби до 40 років 84 локомотивам, а 120 тепловозів підлягають списанню. Все це призводить до дефіци-

ту тяги і тривалого (більше тижня) простою вагонів в очікуванні відправки.

Після реконструкції ділянки з червня 2017 року фактична пропускна спроможність по вантажним перевезенням складає 16-18 пар поїздів на добу.

Стан тепловозного парку і дороговизна дизельного палива, ціна якого формується за межами України, не дозволяють здійснювати перевезення в повному обсязі. Зміна локомотивів тепловозної й електровозної тяги (мінімум 2 рази в одному напрямку) призводить до додаткових експлуатаційних витрат. Придбання нових магістральних тепловозів, які не виробляються в Україні, пов'язане зі значними витратами, в тому числі, з витратами на пристосування тепловозних депо до нових серій магістральних вантажних тепловозів. Виконання ремонту магістральних тепловозів з урахуванням стану ремонтної бази і відсутністю комплектуючих запчастин також проблематично.

Враховуючи, що підходи, які примикають до ділянки Запоріжжя – Волноваха електрифіковані й обслуговуються електровозами ВЛ10, доцільно розглянути можливість переведення на електричну тягу всього напрямку.

Технічна характеристика ділянки Запоріжжя–Комиш-Зоря–Волноваха

№ п/п	Показники	Вимірник	Величина
1	2	3	4
1.	Експлуатаційна довжина	км	240
2.	Керівний ухил	‰	9
3.	Число головних колій	шт.	1
4.	Вид тяги	-	тепловозна
5.	Тип вантажного локомотива	-	2ТЕ116
6.	Уніфікована маса рухомого складу	т	4400
7.	Довжина приймально-відправних колій	м	850
8.	Система СЦБ	-	автоблокування
9.	Тип верхньої будови колії:		
	- рейки	-	Р-65
	- шпали	-	залізобетонні
	- баласт: щебінь/пісок	-	30/20
10	Категорія залізниці		I
11	Вид тяги на лініях примикання		Електрична
12	Тип локомотива на лініях примикання		ВЛ10

Слід зазначити, що по парку вантажних електровозів постійного струму склалась також складна ситуація: ВЛ11м5 – 13 од., ВЛ11м6 – 26 од., з яких 22 од. відпрацювали встановлений термін служби 30 років, відсоток зносу 86,5%. Електровози ДЕ1 – 39 од., середній вік 13 років, але 22 од. потребують значного відновлення. Електровози ВЛ10 – 22 од., всі відпрацювали встановлений термін служби, що складає 30 років. З 2005 року заводським ремонтом подовжено термін служби до 45 років всім 22 локомотивам.

Урахування технічного стану тепловозів і електровозів [5] було враховано зменшенням розрахункової тяги локомотивів при виконанні тягових розрахунків.

Наявна й прогнозна пропускна спроможність

Для визначення наявної пропускної спроможності для тепловозної тяги, локомотив 2ТЕ116 і прогнозової – локомотив ВЛ10 були

виконані тягові розрахунки і результати наведено в табл. 2, 3 і представлено на рис. 2 і 3.

Пропускна спроможність одноколіїних перегонів при парному непакетному графіку визначалась за формулою [6]

$$N_n = \frac{(1440 - t_{\text{техн}}) \cdot \alpha_n}{T_{\text{пт}}} \quad (1)$$

де: $T_{\text{пт}}$ – період парного непакетного графіка, хв.;
 $t_{\text{техн}}$ – тривалість технологічного «вікна»;
 α_n – коефіцієнт надійності;

$$T_{\text{пт}} = t_x^m + t_x^o + \tau_1 + \tau_2 \quad (2)$$

де t_x^m, t_x^o час руху по перегону в парному і непарному напрямках з урахуванням часу на розгін і уповільнення, хв., визначався тяговими розрахунками (табл. 2, 3);

τ_1, τ_2 – станційні інтервали, хв.

Наявна пропускна спроможність (локомотив 2ТЕ116)

№ з/п	Найменування перегону	Довжина перегону, км	Час ходу, хв		Пропускна спроможність, пар поїздів на добу
			Парн.	Непарн.	
Запоріжжя - Комиш-Зоря					
1	Запоріжжя II – Передатна	4,10	7,7	7,3	62
2	Передатна – Ростуща	5,00	8,4	8,2	57
3	Ростуща – Лежино	5,50	11,4	8,3	50
4	Лежино – Кирпотіне	8,80	16,3	11,4	37
5	Кирпотіне – Фісаки	16,30	16,1	28,7	24
6	Фісаки – Обща	12,60	14,3	15,9	35
7	Обща – Оріхівська	15,50	19,4	17,6	29
8	Оріхівська – Мала Токмачка	10,40	15,1	13,1	37
9	Мала Токмачка – Новокарлівка	10,00	12,9	12,8	40
10	Новокарлівка – Челюскін	7,00	9,7	9,5	51
11	Челюскін – Пологи	9,80	15,0	12,5	38
12	Пологи – Гусарка	9,30	12,8	11,6	42
13	Гусарка – Магадево	14,30	27,8	21,0	23
14	Магадево – Роз. 327 км	16,70	29,5	22,9	21
15	Роз. 327 км – Комиш-Зоря	8,60	14,0	16,8	34
Комиш-Зоря - Волноваха					
16	Комиш-Зоря – Розівка	8,64	12,4	12,7	36
17	Розівка – РП68	19,08	24,4	23,7	21
18	РП68 – Зачатівка	18,88	21,4	27,8	21
19	Зачатівка – Хлібодарівка	17,93	25,1	22,7	21
20	Хлібодарівка – БП412	9,90	15,6	13,6	32
21	БП412 – Волноваха	7,83	15,1	14,1	32

Розрахунки пропускної спроможності за умови електрифікації залізниці наведено в табл. 3 і на рис. 3.

З аналізу діаграм на рис. 2 і 3 випливає, що пропускну спроможність всього напрямку (пар поїздів на добу) обмежують перегони: Кирпотіне-Фісаки (24), Гусарка-Магадево (23), Магадево-Роз. 237 км (21), Розівка-РП66 (21), РП66-Зачатівка (21) та Зачатівка-Хлібодарівка (21).

За оцінками експертів для забезпечити перевезення сировини з регіону Кривого Рогу та Запоріжжя на металургійні підприємства Донецького регіону та Маріуполя і повноцінної роботи Маріупольського торгового порту пропускна спроможність ділянки Комиш-Зоря – Волноваха на перспективу має бути не менше 29-30 пар поїздів на добу.

Прогнозна пропускна спроможність при електрифікації залізниці (локомотив ВЛ10)

№ п/п	Найменування перегону	Довжина перегону, км	Час ходу, хв		Пропускна спроможність, пар поїздів на добу
			Парн.	Непарн	
1	Запоріжжя II – Передатна	4,10	7,0	6,6	66
2	Передатна – Ростуща	5,00	7,7	7,9	60
3	Ростуща – Лежино	5,50	7,9	8,3	58
4	Лежино – Кирпотіне	8,80	11,1	11,2	45
5	Кирпотіне – Фісаки	16,30	15,8	16,9	32
6	Фісаки – Обща	12,60	13,1	13,2	39
7	Обща – Оріхівська	15,50	16,2	15,9	33
8	Оріхівська – Мала Токмачка	10,40	12,5	12,6	41
9	Мала Токмачка – Новокарлівка	10,00	12,1	12,2	42
10	Новокарлівка – Челюскін	7,00	9,1	9,1	53
11	Челюскін – Пологи	9,80	11,9	12,2	42
12	Пологи – Гусарка	9,30	11,4	11,5	44
13	Гусарка – Магадево	14,30	19,6	19,6	28
14	Магадево – Роз. 327 км	16,70	21,2	22,7	25
15	Роз. 327 км – Комиш-Зоря	8,60	14,0	14,0	37
Комиш-Зоря - Волноваха					
16	Комиш-Зоря – Розівка	8,64	11,9	12,0	42
17	Розівка – РП68	19,08	20,6	20,6	25
18	РП68 – Зачатівка	18,88	20,7	21,2	24
19	Зачатівка – Хлібодарівка	17,93	20,5	20,7	25
20	Хлібодарівка – БП412	9,90	12,7	12,8	37
21	БП412 – Волноваха	7,83	12,7	12,7	37

Для збільшення пропускну спроможності ділянки Комиш Зоря-Волноваха в кінці 2016 року була проведена реконструкція інфраструктури (на перегоні Розівка – Зачатівська покладено 17 км залізничної колії, 4 комплекти стрілочних переводів та відкрито додаткові роз'їзди на перегонах між станціями Розівка-Зачатівська, Зачатівська-Хлібодарівка). Із звіту статистичних даних по Укрзалізниці, прогнозована пропускна спроможність на добу 24 пари вантажних поїздів і 5 пасажирських не забезпе-

чується через дефіцит дизельного палива і технічний стан тепловозів.

Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів розглянуто в роботі [7]. Встановлено, що в данному випадку, підвищення швидкості руху поїздів на перегонах, що обмежують пропускну спроможність за рахунок модернізації колійної інфраструктури й реконструкції плану не вирішує повністю окреслену проблему (рис. 4)

© Курган М. Б. та ін., 2018

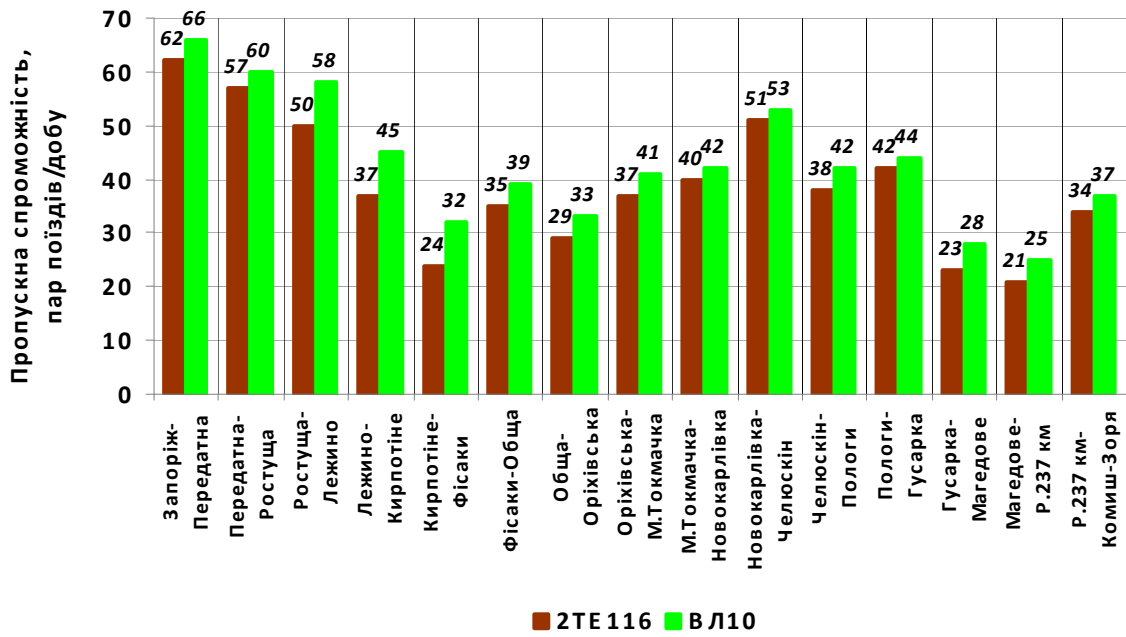


Рис. 2. Діаграма пропускної спроможності перегонів ділянки Запоріжжя – Комиш-Зоря при тепловозній та електричній тязі

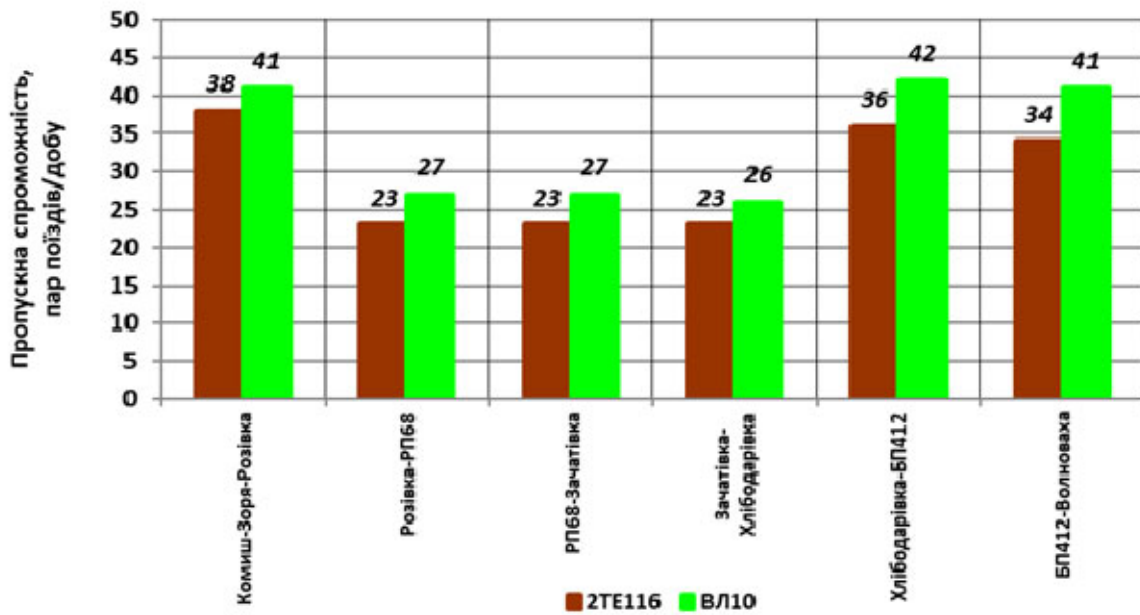


Рис. 3. Діаграма пропускної спроможності перегонів ділянки Комиш-Зоря – Волноваха при тепловозній та електричній тязі

Для порівняння характеру кривих швидкостей руху вантажних поїздів при тепловозній і електричній тязі на окремих лімітуючих перегонах наведено графіки на рис. 5-6. На рисунках (знизу вверху) показано обрис поздовжнього профілю, план лінії (кривизна) і крива швидкості руху поїзда

Суттєвої різниці в часі руху, а отже й в пропускній спроможності можна спостерігати й на

інших перегонах, що мають обрис затяжного підйому: Гусарка-Магедове, Магедове-Роз. 327 км, Рогівка-РП68-Зачатівка-Хлібодарівка. Пояснення цього явища надано в роботі авторів [2] і впливає з аналізу графіків сили тяги локомотива $F_k = f(V)$ і кривих опору руху $W_k = f(V)$ [8, 9].

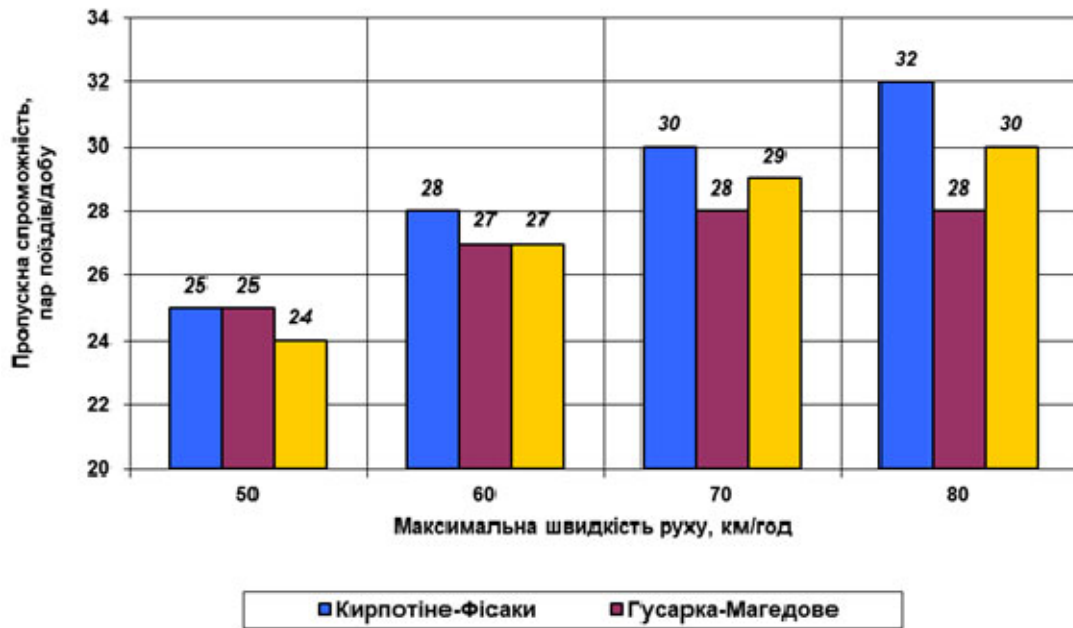


Рис. 4. Залежність пропускної спроможності від швидкості руху на лімітуючих (обмежуючих пропускну спроможність) перегонах

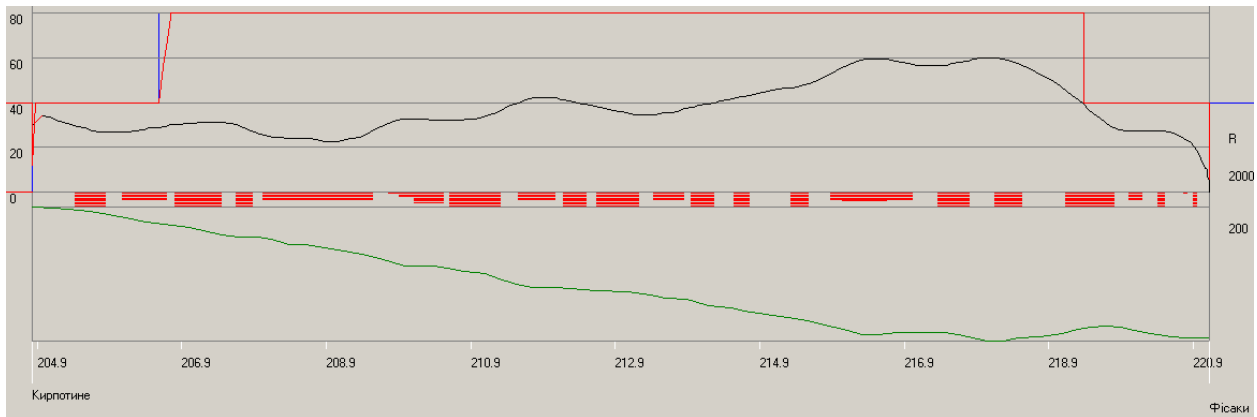


Рис. 5. Перегін Кирпотіне-Фісаки (2TE116, час руху на підйом 29 хв.)

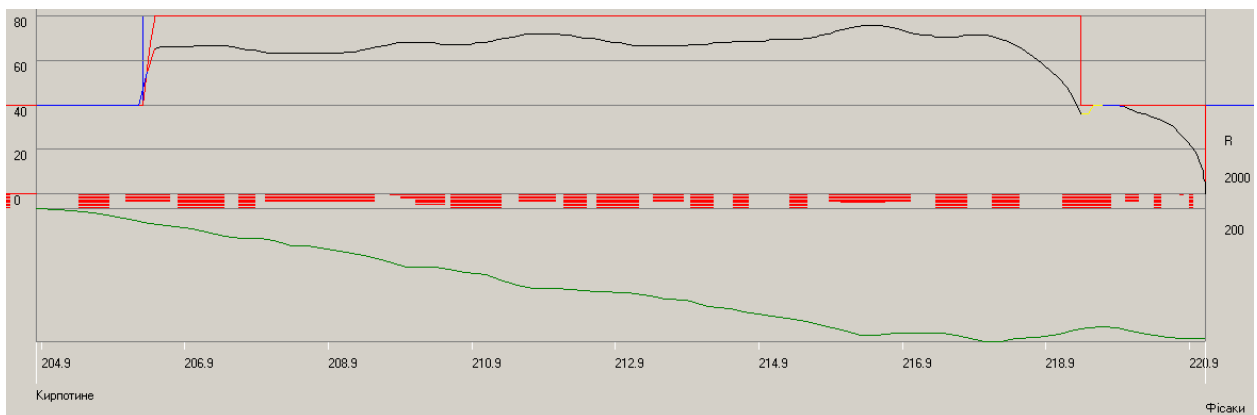


Рис. 6. Перегін Кирпотіне-Фісаки (VL10, час руху на підйом 17 хв.)

Так, наприклад, на підйомі 4‰ вантажний поїзд масою 4400 тонн при електричній тязі рухається зі швидкістю 70 км/год, а при тепло-возній – близько 45 км/год.

З аналізу рис. 2 і 3 можна встановити, що електрифікація всього напрямку дозволить підвищити пропускну спроможність лімітуючих (обмежуючих пропускну спроможність) пере-

гонів на 4-5 пар поїздів на добу, але не вирішує проблему в цілому.

При необхідності суттєвого збільшення пропускної спроможності виникає потреба відно-

вити демонтовані двоколіїні вставки на ділянці Запоріжжя-Комиш-Зоря і другу колію на перегонах Хлібодарівка-Зачатівська та Зачатівська-Рогівка.

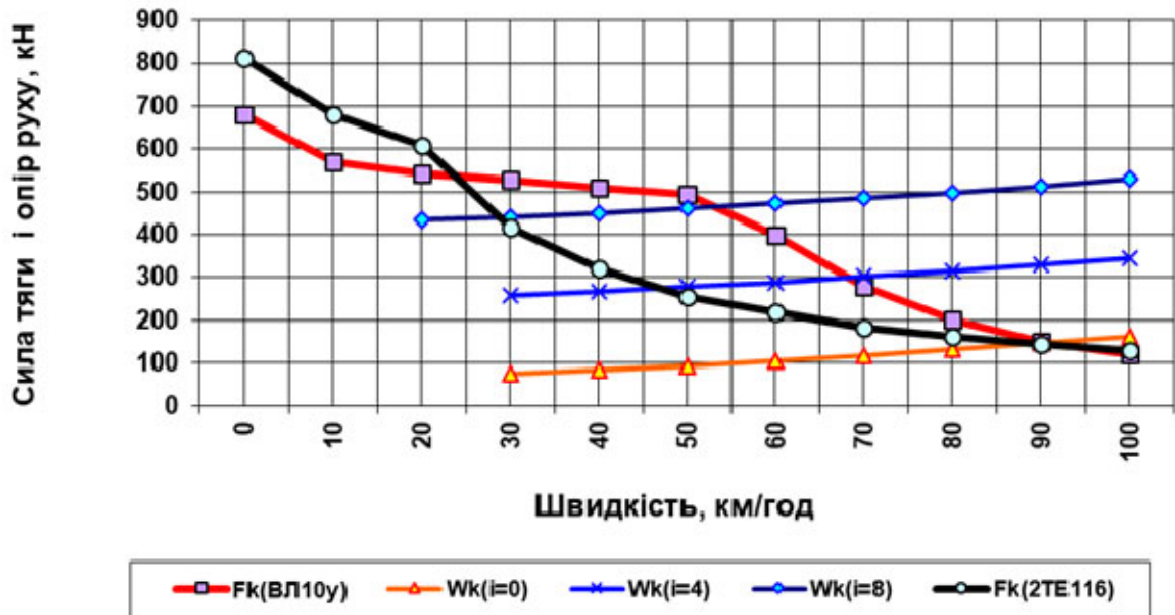


Рис. 7. Тягові характеристики і криві повного опору руху (маса 4400 т)

Аналіз результатів дослідження

За результатами тягових розрахунків встановлено, що перегони неідентичні за часом руху, період графіку для вантажних поїздів коливається від 20-22 хв. (Запоріжжя-Передатна-Ростуца) до 54-57 хв. (Гусарка-Магедово-Роз. 237 км). Найбільший ефект досягається на ділянках, де мають місце круті підйоми.

При існуючих обмеженнях швидкості руху перехід на електричну тягу дає можливість скоротити час руху вантажних поїздів на ділянці Запоріжжя-Волноваха на 20-30 хв. і збільшити поперегонну пропускну спроможність від 5-6-ти до 25-31%.

В роботі авторів [10] було досліджено питання зміни енергоємності вантажного поїзда, що рухається на різних за крутизною підйомів ділянках залізниці. Результати тягових розрахунків підтвердили, що для перегону, який має обрис зтяжного підйому, витрати електроенергії при зростанні швидкості теж збільшуються. Але при цьому в 1,4-1,5 рази зменшується час руху вантажного поїзда, що має велике значення для підвищення пропускної спроможності, перш за все, одноколіїних ділянок. Крім того,

економія досягається за рахунок збільшення маси вантажних поїздів до 6000 тонн при впровадженні електричної тяги.

Суттєве значення при формуванні собівартості вантажних перевезень на тягу поїздів має енергетична складова. Скорочення експлуатаційних витрат, а отже й собівартості перевезень, при електричній тязі залежить, в основному, від співвідношення вартості 1 кВт-год електроенергії і 1 кг дизельного палива

За даними Придніпровської залізниці на початок 2017 року вартість дизельного палива склала 20 грн./кг, а вартість 1 кВт-год електроенергії на тягу поїздів (з ПДВ) 1,25 грн. Для розрахунків на поточний 2018 рік прийнята вартість дизельного палива 24 грн./кг, а вартість 1 кВт-год електроенергії 1,5 грн. За результатами тягових розрахунків були отримані витрати на тягу поїздів для вантажного поїзда при тепловій і електричній тязі і розрахована вартість паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), табл. 4.

Як впливає з табл. 4, економія паливно-енергетичних ресурсів при електричній тязі збільшується в 3-3,5 рази у порівнянні з тепловою тягою.

Вартість паливно-енергетичних ресурсів для пропуску вантажного поїзда масою 4400 тонн

Ділянки залізниці	Витрати палива (кг) і електроенергії (кВт-год)		Вартість ПЕР, (грн.) на пропуск 1-го поїзда		Коефіцієнт співвідношення вартості $k = \frac{ПЕР_{мен}}{ПЕР_{ел}}$
	тепловоз 2ТЕ116	електровоз ВЛ10	тепловоз 2ТЕ116	електровоз ВЛ10	
Запоріжжя-Комиш-Зоря	1964	8962	47136	13443	3,51
Комиш-Зоря - Запоріжжя	1207	5617	28968	8425	3,44
Комиш Зоря - Волноваха	932	4333	22368	6500	3,44
Волноваха - Комиш Зоря	817	3846	19608	5769	3,40

Висновки і рекомендації

Електрифікація – невід’ємна складова стало-го розвитку українських залізниць, завдяки чому досягається зменшення експлуатаційних витрат на тягу поїздів, а відповідно й собівартості перевезень (при тепловозній тязі на 55-60 % більша, ніж при електричній). Крім того, забезпечується максимальна економія дизельного палива, поліпшується екологічний стан за рахунок зменшення шкідливих викидів в атмосферу.

В даний час пропускна спроможність ділянки Запоріжжя – Волноваха складає 23 пари поїздів на добу. Пропонується крім електрифікації колій перегонів і станцій, відновити чотири двоколіїні вставки на ділянці Запоріжжя–Комиш-Зоря та укласти другу колію на перегонах Хлібодарівка – Зачатівська, Зачатівська – Розівка, обладнати станції пристроями електричної централізації, а перегони пристроями автоблокування. Одночасно пропонується побудувати «південний обхід» по станції Волноваха, тобто укласти додаткову електрифіковану колію без заходу в парки станції Волноваха з мариупольського напрямку на Комиш-Зорю, що дасть можливість заощадити експлуатаційні витрати при курсуванні поїздів з електротягою без заходу й обробки в парках станції Волноваха.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Курган М. Б. Системний підхід до вирішення задачі енергозбереження в колійному господарстві / М. Б. Курган, С. Ю. Байдак, Н.П. Хмелевська // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 11 июня-14 июля 2013 г.) – Д.: ДНУЖТ, 2013 С.59-60.

© Курган М. Б. та ін., 2018

Результатом реалізації проекту буде збільшення пропускної спроможності до 100-110 пар поїздів на добу. Проте такий проект вимагає великих капітальних вкладень.

Фінансування електрифікації напрямку Запоріжжя - Комиш Зоря - Волноваха в умовах обмеження фінансових ресурсів, на наш погляд, можливо із залученням на взаємовигідних умовах ресурсів підприємств, які є основними споживачами вантажних перевезень за цим напрямком (насамперед: ПАТ «ММК ІМ. ІЛЛІЧА» та ПАТ «МК Азовсталь»). Інвестування в проект електрифікації й переведення вантажних потоків на напрямку Запоріжжя–Комиш-Зоря–Волноваха відповідає інтересам Укрзалізниці й зазначених підприємств.

Загальний очікуваний економічний ефект від реалізації електрифікації ділянки Комиш Зоря – Волноваха проглядається у підвищенні швидкості руху і продуктивності праці, зменшенні споживання дизельного палива (близько 30 тис. тонн на рік) і поліпшенні екологічної ситуації в регіоні за рахунок усунення шкідливих викидів (продуктів згоряння дизельного палива) в атмосферу.

Використання електровозів замість тепловозів, створить можливість відправляти великогазові поїзди масою до 6000 тонн.

REFERENCES

1. Kurhan M. B., Baidak S. Yu., Khmelevska N. P. Systemnyy pidkhid do vyrishennya zadachi enerhozberezhennya v koliynomu hospodarstvi [The systems approach to solving the problem of energy conservation in railroad facilities]. Materialy IV Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi

2. Курган М. Б. Ефективність впровадження нових типів електровозів / М. Б. Курган, Н. П. Хмелевська, С. Ю. Байдак / Електрифікація транспорту – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2014. – Вип. 8. – С. 93-98.

3. Курган М.Б. Дослідження ефективності електрифікації одноколіїних залізниць для підвищення пропускної спроможності / М.Б. Курган М.Б., С.Ю. Байдак, Н.П. Хмелевська // Електрифікація транспорту – 2015 – №9. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2015. - С. 44-49.

4. Курган М. Б. Ефективність електрифікації ділянки Куми-Новомосковськ Придніпровської залізниці / М.Б. Курган, С.Ю. Байдак, О.Ф. Лужицький, Н.П. Хмелевська // Електрифікація транспорту – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2015. – № 10. – С.21-28.

5. Програма оновлення рухомого складу ПАТ „Укрзалізниця” на період до 2021 року (проект). – К., 2016. – 66 с.

6. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України: (ЦД/0036). – К., - 2002. – 376 с.

7. 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.

8. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

9. Гребенюк П. Т. Тяговые расчеты: Справ очник / П. Т. Гребенюк, Долганов А. Н., Скворцова А. И. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.

10. Курган М.Б. Енергозберігаючі рішення при проектуванні залізниць / М.Б. Курган, С.Ю. Байдак, Н.П. Хмелевська, Я.С. Хмелевська // Електрифікація транспорту – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2017. – № 13. – С.108-116.

Ключові слова: вид тяги. електрифікація; паливно-енергетичні ресурси, енергоємність; модернізація колії, швидкість руху; постійний струм.

"Enerhozberezhennya na zaliznychnomu transporti i v promyslovosti (Volovets', 11.06 – 14.06.2013)" [Proc. of the 4th Int. Scientific and Practical Conf. "Energy efficiency on railway transport and in industry"]. Dnipropetrovsk, 2013, pp. 59-60.

2. Kurhan M. B., Khmelevska N. P., Baidak S. Yu. Efektyvnist' vprovadzheniya novykh typiv elektrovoziv [Implementation of new electric locomotives]. Scientific journal Electrification of transport. Dnipropetrovsk'kyi Natsional'nyy Universytet Zaliznychnoho transportu imeni imeni akademika V. Lazariana, 2014, issue 8, pp. 93-98.

3. Kurhan M. B., Baidak S. Yu., Khmelevska N. P. Research efficiency electrification single track railway to increase capacity. Scientific journal Electrification of transport. Dnipropetrovsk'kyi Natsional'nyy Universytet Zaliznychnoho transportu imeni imeni akademika V. Lazariana, 2015, issue 9, pp. 44-49.

4. Kurhan M. B., Baidak S. Yu., Luzhytskyi O. F., Khmelevska N. P. Efficiency of electrification the kuma-novomoskovsk direction of pridneprovskaya railway. Scientific journal Electrification of transport. Dnipropetrovsk'kyi Natsional'nyy Universytet Zaliznychnoho transportu imeni imeni akademika V. Lazariana, 2015, issue 10, pp. 21-28.

5. Programa onovlennya ruhomogo skladu PAT „Ukrzaliznitsya” na perlod do 2021 roku (proekt), Kyiv, 2016, 66 p.

6. Instruktziya z rozrahunku nayavnoyi propusknoyi spromozhnosti zallznits Ukraini, Kyiv, 2002, 376 p.

7. Korzhenevich I. P., Kurgan M. B., Barash Yu. S., Kurgan D. M. Vpliv pidvischennya shvidkosti ruhu poyizdiv na vitrati energoresursiv [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.

8. Pravila tyagovyih raschetov dlya poezdnoy raboty [Terms traction calculations for train operation]. Moscow, Transport, 1985, 287 p.

9. Grebenyuk P. T. Tyagovyie raschetyi: Spravochnik [Traction calculations: Guide]. Moscow, Transport, 1987, 272 p.

10. Kurhan M. B., Baidak S. Yu., Khmelevska N. P., Khmelevska Y. S. Energy saving solutions for designing railways. Scientific journal Electrification of transport. Dnipropetrovsk'kyi Natsional'nyy Universytet Zaliznychnoho transportu imeni imeni akademika V. Lazariana, issue 13, pp. 108-116.

В даній статті на прикладі одноколіїної ділянки з тепловозною тягою Запоріжжя-Волноваха, що зв'язує Криворізький рудний басейн, металургійні підприємства Донецької області і порти Азовського моря досліджується ефективність електрифікації для підвищення пропускної спроможності. Для досягнення мети проаналізовано етапи створення і розвитку залізничного напрямку, починаючи з введення в експлуатацію - 1903 рік. Показано, як технічне оснащення ділянок залізниці впливає на експлуатаційні показники. За результатами розрахунків зроблено висновок щодо впливу експлуатаційних показників, параметрів профілю і плану, а також технічного стану локомотивів на ефективність електрифікації одноколіїних залізниць.

УДК 629.423.1.016.3

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

Кафедра «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@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-8182-7709

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ НАПРАВЛЕНИЯ ЗАПОРОЖЬЕ - КАМЫШ-ЗАРЯ - ВОЛНОВАХА

В данной статье на примере однопутного участка с тепловозной тягой Запорожье-Волноваха, связывающей Криворожский рудный бассейн, металлургические предприятия Донецкой области и порты Азовского моря, исследуется эффективность электрификации для повышения пропускной способности. Для достижения цели проанализированы этапы создания и развития железнодорожного направления, начиная с ввода в эксплуатацию - 1903 год. Показано, как техническое оснащение участков железной дороги влияет на эксплуатационные показатели. По результатам расчетов сделан вывод о влиянии эксплуатационных показателей, параметров профиля и плана, а также технического состояния локомотивов на эффективность электрификации однопутных железных дорог.

Ключевые слова: вид тяги. электрификация; топливно-энергетические ресурсы, энергоёмкость; модернизация пути, скорость движения; постоянный ток.

UDC 629.423.1.016.3

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

Department «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@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-8182-7709

RESEARCH EFFICIENCY OF ELECTRIFICATION DIRECTIONS ZAPOROZHYE - KAMYSH-ZARYA – WALNOVAKH

In this article, the efficiency of electrification for increasing the capacity is investigated using the example of a single-track section with diesel traction of Zaporozhye-Volnovakh connecting the Krivoy Rog ore basin, metallurgical enterprises of the Donetsk region and the ports of the Sea of Azov. To achieve the goal, the stages of the creation and development of the railway direction have been analyzed, starting from commissioning in 1903. It is shown how the technical equipment of the railway sections affects the performance indicators. Based on the results of the calculations, a conclusion was made about the impact of operational parameters, profile and plan parameters, as well as the technical state of locomotives on the electrification efficiency of single-track railways.

Keywords: type of thrust. electrification; fuel and energy resources, energy intensity; modernization of the way, speed of movement; constant electricity.

Received 06.02.2018; accepted in revised form 29.03.2018.

Ю. Л. САЄНКО, Т. К. БАРАНЕНКО (ДВНЗ «ПДТУ»)

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», кафедра Електроенергетичних комплексів та систем, Україна, 87555, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7, тел.: (0629) 44-65-88, (0629) 44-65-51, ел. пошта: yls62@i.ua, tbaranenko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700, orcid.org/0000-0002-9436-8484

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЯК СКЛADOVA ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

Вступ

Задачі оптимізації режимів електроспоживання потребують вирішення на всіх стадіях розвитку і функціонування електричних мереж – проектування, експлуатації, модернізації, реконструкції тощо. Для оптимізації параметрів режимів попередньо повинен бути обраний критерій оптимізації. При найбільш загальному підході в якості показника оптимізації виступає, як правило, не один, а кілька критеріїв, тобто доводиться вирішувати багатокритеріальну (багатоцільову) задачу. В якості таких критеріїв можуть виступати капітальні витрати, втрати електроенергії, пропускання здатність елементів електричної мережі, ступінь надійності електропостачання та ін. [1-3].

Серед можливих критеріїв оптимізації слід особливо виділити такий критерій, як надійність систем електропостачання. Задача забезпечення надійності систем електропостачання включає в себе комплекс заходів, спрямованих на скорочення збитків від порушення нормального режиму роботи споживачів електроенергії. Необхідно відзначити, що одним із пріоритетів енергетичної стратегії України до 2035 року є забезпечення надійності функціонування паливно-енергетичного комплексу [4].

Надійність системи електропостачання залежить від побудови схеми, резервування джерел електроенергії, надійності окремих елементів схеми з урахуванням їх перевантажувальної здатності. Для підвищення надійності електропостачання можуть бути використані різні технічні та організаційні засоби. Однак, незалежно від стадії вирішення проблеми надійності систем електропостачання, необхідне проведення відповідних розрахунків.

Постановка задачі

Розрахунки надійності систем електропостачання полягають у визначенні різних кількісних показників. З позицій теорії надійності можна виділити чотири стану, в які періодично

переходить елемент енергосистеми протягом експлуатації:

- робочий стан, коли елемент несе функціональне навантаження або знаходиться в навантаженому резерві;
- перебування в ненавантаженому резерві, коли справний елемент не несе ніякого навантаження;
- стан профілактики або планового ремонту, протягом якого проводиться технічне обслуговування елемента;
- аварійний стан, коли елемент у зв'язку з пошкодженням не здатний (або обмежено здатний) виконувати призначені йому функції.

Елементи, що знаходяться в аварійному стані, підлягають ремонту з метою відновлення їх вихідних параметрів або замінюються новими. Відновлювальні роботи вимагають певних витрат часу, тому роботу елемента енергосистеми з позиції теорії надійності можна розглядати як процес відновлення з кінцевим часом відновлення [5].

Існують різні методи розрахунку надійності, однак, для складних систем доцільно використовувати логіко-ймовірнісний підхід, викладений, наприклад, в [5, 6]. Відповідно до даної методики на підставі електричної схеми даної системи електропостачання складається його діаграма надійності і проводиться відповідний розрахунок.

Розрахунок надійності вузла головної знижувальної підстанції великого промислового підприємства

Безвідмовна робота підстанції в першу чергу визначається безвідмовною роботою збірних шин розподільного пристрою (РП), яка залежить від надійності роботи самих шин, схеми електричних з'єднань РП, кількості і протяжності підключених до РП ліній електропередачі, числа силових трансформаторів і ряду інших чинників. Можна виділити наступні основні причини погашення однієї системи (секції) збірних шин [5]:

© Саєнко Ю. Л., Бараненко Т. К., 2018

- пошкодження безпосередньо системи (секції) шин в результаті перекриття або руйнування ізоляції, порушення контактів на ошиновуванні і спусках, а також їх обриви, пошкодження вимірювальних трансформаторів струму і напруги, які встановлюються на збірних шинах, грозозахисних пристроїв та шинних роз'єднувачів, що призводять до виникнення коротких замикань на системі шин;

- пошкодження приєднаних до шин вимикачів, що призводять до розвитку аварії;
- помилки персоналу при проведенні оперативних перемикачів;
- неправильна робота релейного захисту збірних шин і пристрою резервування відмови вимикача (ПРВВ).

На рис. 1 приведена однолінійна принципова схема для розрахунку надійності вузла головної знижувальної підстанції (ГЗП). На рис. 2 приведена діаграма надійності однієї системи збірних шин 110 кВ ГЗП, що характеризує її погашення, на рис. 3 – діаграма надійності двох систем збірних шин 110 кВ ГЗП, що характеризує повне погашення ВРП-110 кВ.

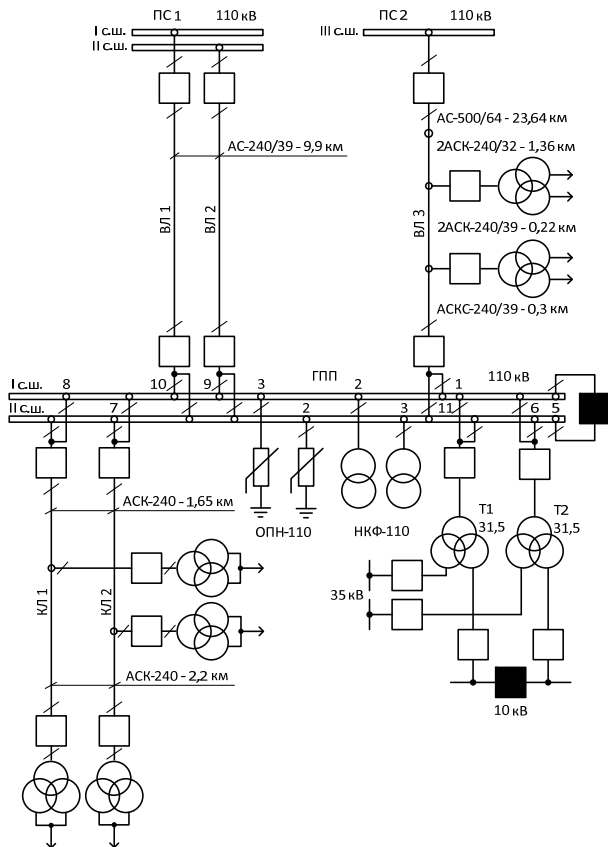


Рис. 1. Однолінійна принципова схема для розрахунку надійності вузла ГЗП

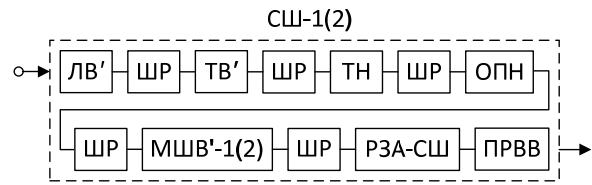


Рис. 2. Діаграма надійності однієї системи збірних шин 110 кВ ГЗП

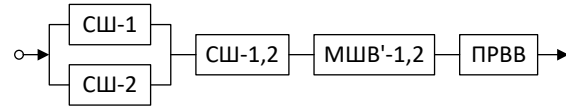


Рис. 3. Діаграма надійності двох систем збірних шин 110 кВ ГЗП

На рис. 2 і рис. 3 прийняті наступні умовні позначення: ЛВ' – відмова лінійного вимикача, що приводить до розвитку аварії (перекриття зовнішньої і внутрішньої ізоляції з боку живлячого елемента, пошкодження контактної системи, непогашення дуги гасильним пристроєм, пошкодження в механізмах приводів і колах управління); ШР – відмова шинного роз'єднувача; ТВ' – відмова трансформаторного вимикача з розвитком аварії; ТН – відмова трансформатора напруги; ОПН – відмова обмежувача перенапруг; МШВ' – відмова міжсекційного (міжшинного) вимикача з розвитком аварії; РЗА-СШ – неправильні дії релейного захисту та автоматики (РЗА), що діють на відключення секції шин; ПРВВ – неправильні дії ПРВВ; СШ-1(2) – відмова першої (другої) системи збірних шин; СШ-1,2 – погашення обох систем збірних шин.

Розрахункова формула для визначення відмови першої системи збірних шин ВРП-110 кВ ГЗП, $\lambda_{СШ-1}^{ав}$, 1/рік, що відповідає діаграмі надійності, наведеної на рис. 2, має такий вигляд:

$$\lambda_{СШ-1}^{ав(1)} = \left[\lambda_{ЛВ1}^{ав'} + 2 \left(\lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) \right] + \left[\lambda_{ЛВ2}^{ав'} + 2 \left(\lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) \right] + \left[\lambda_{ЛВ3}^{ав'} + 2 \left(\lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) \right] + \left(\lambda_{ТВ}^{ав'} + \lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) + \left(\lambda_{ТН}^{ав} + \lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) + \left(\lambda_{ОПН}^{ав} + \lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) + \lambda_{РЗА}^{ав} + \lambda_{ПРВВ}^{ав} + \left(\lambda_{МШВ1}^{ав'} + \lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right), \quad (1)$$

де $\lambda_i^{ав(ав')}$ – параметри потоків відмов відповідних елементів схеми.

Розрахункова формула для визначення відмови другої системи збірних шин ВРП-110 кВ ГЗП, $\lambda_{СШ-2}^{ав}$, 1/рік, має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \lambda_{СШ-2}^{ав(1)} = & \left[\lambda_{ЛВ4}^{ав'} + 2 \left(\lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) \right] + \\ & + \left[\lambda_{ЛВ5}^{ав'} + 2 \left(\lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) \right] + \\ & + \left(\lambda_{ТВ}^{ав'} + \lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) + \\ & + \left(\lambda_{ТН}^{ав} + \lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) + \\ & + \left(\lambda_{ОПН}^{ав} + \lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right) + \lambda_{РЗА}^{ав} + \\ & + \lambda_{ПРВВ}^{ав} + \left(\lambda_{МШВ}^{ав'} + \lambda_{СШ}^{ав} + \lambda_{ШР}^{ав} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Найбільш небезпечною аварією з точки зору наслідків є одночасне погашення обох систем (секцій) шин. До таких пошкоджень відносяться:

- аварійне відключення однієї системи (секції) під час аварійного або планового ремонту іншої системи шин;
- пошкодження однієї системи (секції) шин з розвитком аварії і перекиданням дуги на іншу систему (секцію) шин в схемах РП з паралельним розташуванням секцій;
- відмови міжшинного вимикача з розвитком аварії на обидві системи шин в схемах РП з двома системами шин і одним вимикачем на приєднання і схемах з секціонованою системою шин;
- помилки персоналу при переведенні приєднань з однієї системи шин в іншу в схемах РП з двома системами шин і одним вимикачем на приєднання;
- неправильна робота релейного захисту шин і ПРВВ, що призводить до повного погашення РП.

Таким чином, відмова обох систем збірних шин ВРП-110 кВ ГЗП, $\lambda_{СШ}^{ав(2)}$, 1/рік, визначається наступним виразом:

$$\begin{aligned} \lambda_{СШ}^{ав(2)} = & \left(\lambda_{СШ-1}^{ав(1)} + \lambda_{СШ-2}^{ав(1)} \right) \times \\ & \times \left(q_{СШ}^{ав(1)} + \bar{v}_{СШ}^{пл(1)} \right) + \lambda_{СШ-1}^{ав(1)} \lambda_{СШ-2}^{ав(1)} + \\ & + \lambda_{МШВ}^{ав(2)'} + \lambda_{ПРВВ}^{ав} \end{aligned} \quad (3)$$

де $q_{СШ}^{ав(1)}$, $\bar{v}_{СШ}^{пл(1)}$ – ймовірність аварійного стану і середньорічна тривалість планових відключень системи шин з приєднанням до неї обладнанням (шинні і збірні роз'єднувачі, трансформатори напруги, обмежувачі перенапруг, розрядники і т. ін.).

Ймовірність аварійного погашення двох секцій шин, в. о.,

$$\begin{aligned} q_{СШ}^{ав(2)} = & q_{СШ}^{ав(1)} q_{СШ}^{ав(1)} + \\ & + 2 q_{СШ}^{ав(1)} \bar{v}_{СШ}^{пл(1)} \frac{\bar{\tau}_{СШ}^{пл(1)}}{\bar{\tau}_{СШ}^{пл(1)} + \bar{\tau}_{СШ}^{ав(1)}} + \\ & + \lambda_{СШ-1}^{ав(1)} \lambda_{СШ-2}^{ав(1)} \bar{\tau}_{СШ}^{ав(2)} + \lambda_{МШВ}^{ав'} \bar{\tau}_{МШВ}^{ав'} \end{aligned} \quad (4)$$

де $\bar{\tau}_{СШ}^{пл(1)}$, $\bar{\tau}_{СШ}^{ав(1)}$ – середній час одного планового простою і середній час відновлення однієї системи збірних шин, год.

В результаті розрахунків за виразами (1) – (4) отримані показники надійності системи шин ВРП-110 кВ ГЗП, наведені в табл. 1. Аналогічно були виконані розрахунки показників надійності секцій шин 10 кВ ГЗП, результати яких також наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Показники надійності секцій шин ГЗП

Об'єкт	Показник надійності			
	$\lambda_{СШ-1}^{ав(1)}$, 1/рік	$\lambda_{СШ-2}^{ав(1)}$, 1/рік	$\lambda_{СШ}^{ав(2)}$, 1/рік	$q_{СШ}^{ав(2)}$, в. о.
Секції шин I та II РП - 110 кВ ГЗП	0,306	0,264	0,130	0,0000250
Секції шин I та II РП- 10 кВ ГЗП	0,330	0,360	0,172	0,0000364

На рис. 4 наведена діаграма надійності для розрахунку показників надійності ГЗП. На діаграмі (рис. 4) прийняті наступні умовні позначення: Р – відмова роз'єднувача; В – відмова вимикача; Л1 – відмова лінії ВЛ1; Л2 – відмова лінії ВЛ2; Л3 – відмова лінії ВЛ3; ТВ – відмова трансформаторного вимикача; Т1 – відмова трансформатора ГЗП Т1; Т2 – відмова трансформатора ГЗП Т2; В₁₀ – відмова вимикача 10 кВ; СШ I, II РП-110 (10) кВ ГЗП – відмова обох систем шин 110 (10) кВ ГЗП.

Вихідними даними для розрахунку показників надійності ГЗП є: параметр потоку

відмов кожного елемента діаграми надійності, $\lambda^{ав}$, 1/рік; середньорічна частота планових ремонтів, $\lambda^{пл}$, 1/рік; середній час відновлення, $\tau^{ав}$, г/відмова; середній час одного планового простою, $\tau^{пл}$, год/відкл. Перераховані вихідні дані були визначені по [5, 7, 8]. Результати розрахунку показників надійності ГЗП наведені в табл. 2. У табл. 2 прийняті позначення: $\lambda^{ав}$ – параметр потоку відмови ГЗП, $q^{ав}$ – ймовірність аварійного відключення ГЗП, T_c – середній час безвідмовної роботи, $T_{ср}$ – розрахунковий час безвідмовної роботи ГЗП, T_v – середній час відновлення ГЗП.

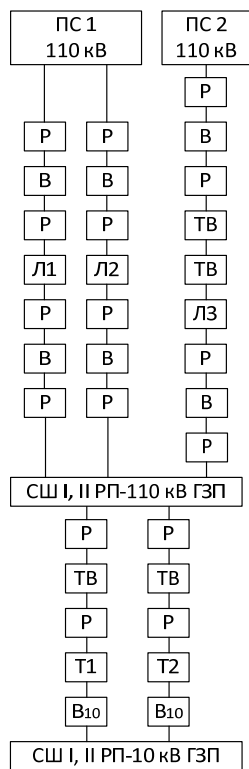


Рис. 4. Діаграма надійності ГЗП

Таблиця 2

Результати розрахунку показників надійності ГЗП

Об'єкт	Показник надійності				
	$\lambda^{ав}$, 1/рік	$q^{ав}$, в. о.	T_c , років	$T_{ср}$, років	T_v , год
ГЗП–СШ I, II 110 кВ	0,130	0,0000250	7,69	5,33	1,68
ГЗП–СШ I, II 10 кВ	0,305	0,0000615	3,28	2,27	1,76

Таким чином, за даними табл. 2 отримуємо,

© Саєнко Ю. Л., Бараненко Т. К., 2018

що повне погашення ГЗП по стороні 110 кВ може відбуватися в середньому раз в 5,3 роки, при середньому часу відновлення 1,68 год; повне погашення ГЗП по стороні 10 кВ – раз в 2,3 роки, при середньому часу відновлення 1,76 год.

Розглянемо визначення збитку від недовідпускання електроенергії через аварійні простой електроприймачів I категорії надійності електропостачання, підключених до шин ГЗП.

Річний збиток від недовідпускання електроенергії через аварійні простой

$$Z_{річн} = z_0 \cdot W_{нд} = z_0 \cdot q^{ав} \cdot W_{річн}, \quad (5)$$

де z_0 – питомий збиток, грн / (кВт·год);

$W_{нд}$ – кількість недовідпущеної електроенергії за рік, кВт·год;

$q^{ав}$ – ймовірність аварійного стану вузла системи електропостачання, в. о.;

$W_{річн}$ – річне споживання електроенергії вузлом системи електропостачання, кВт·год.

Величина питомого збитку може бути визначена наступним чином

$$z_0 = z_{01} \cdot k_{деф} \cdot UAH / USD, \quad (6)$$

де z_{01} – величина питомого збитку для відповідної галузі економіки, визначена за результатами статистичних досліджень попередніх років, дол / (кВт·год);

$k_{деф}$ – індекс-дефлятор капітальних вкладень і збитків від порушення електропостачання споживачів;

UAH / USD – офіційний курс Національного банку України (НБУ), грн / дол.

За даними [9] величина питомого збитку для металургійних заводів на 2005 рік склала 5,03 дол / (кВт·год), значення індексу-дефлятора при перерахунку з 2005 р. на 2018 р. склало 3,179.

Тоді при курсі НБУ на 18.06.2018 р. 26,3155 грн / дол отримаємо:

$$z_0 = 5,03 \cdot 3,179 \cdot 26,3155 = 420,79 \text{ грн/(кВт·год)}.$$

Величина збитку від недовідпускання електроенергії через аварійні простой за розрахунковий час безвідмовної роботи $T_{ср}$, тис. грн,

$$Z_{T_{ср}} = Z_{річн} \cdot T_{ср}. \quad (7)$$

У табл. 3 наведені величини збитків від недовідпускання електроенергії через аварійні простой, розраховані за виразами (5), (7).

Таблиця 3

Результати розрахунку збитків від аварійного невідпускання електроенергії

Об'єкт	Результати розрахунку				
	$W_{\text{річн}}$, кВт·год	$W_{\text{нд}}$, кВт·год	$Z_{\text{річн}}$, тис. грн	$T_{\text{ср}}$, років	$Z_{T_{\text{ср}}}$, тис. грн
ГЗП-110 кВ	444347379	11109	4675	5,33	24918
ГЗП-10 кВ	83640480	5140	2163	2,27	4910

Таким чином, в залежності від часу між двома послідовними відмовами, тобто від року до $T_{\text{ср}}$, збиток від невідпускання електроенергії через аварійний простою може скласти:

- для ГЗП по стороні 110 кВ від 4,675 млн. грн до 24,918 млн. грн;

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лежнюк П. Д. Оптимізація функціонування розосереджених джерел енергії в локальних електричних системах / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, Ю. В. Малогулко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Механіко-технологічні системи та комплекси. - 2014. - № 60. - С. 68-77
2. Caisheng, W. An Analytical Method for DG Placements Considering Reliability Improvements / W. Caisheng, M. Hashem Nehrir // IEEE Trans. Power Syst. - 2004. - Vol. 19. - P. 2068-2076
3. Циганенко Б. В. Оптиміальна реконфігурація розподільної електричної мережі / Б. В. Циганенко // Технічна електродинаміка. - 2016. - № 5. - С. 55-57
4. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=250250456>
5. Непомнящий В. А. Надежность оборудования энергосистем / В. А. Непомнящий. - М. : журнал «ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение», 2013. - 196 с.
6. Кінаш Б. М. Метод оперативного аналізу структурної надійності схем електричних мереж / Б. М. Кінаш, В. П. Кідиба // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». - 2001. - № 435 : Електроенергетичні та електромеханічні системи. - С. 85-90
7. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник : В 4-х т. / Под общ. ред. Ю. Н. Руденко. Т. 2. Надежность электроэнергетических систем. Справочник / Под ред. М. Н. Розанова. - М. : Энергоатомиздат, 2000. - 568 с.
8. Конохова Е. А. Надежность электроснабжения

- для ГЗП по стороні 10 кВ від 2,163 млн. грн до 4,910 млн. грн.

Висновки

Розрахунковий час безвідмовної роботи підстанції, тобто розрахунковий час між двома послідовними відмовами розглянутого вузла становить від 2,27 років до 5,33 років, в середньому – 3,31 років, що говорить про недостатню надійність системи електропостачання. Розрахунки показників надійності за умови підключення до секцій шин 10 кВ двох турбогенераторів (наявних на підприємстві, але в даний час виведених з роботи) показали, що розрахунковий час безвідмовної роботи підстанції збільшився приблизно в три рази, складаючи близько 10 років, що істотно збільшує надійність роботи розглянутого вузла, а збиток від невідпускання електроенергії через аварійний простій відповідно зменшується і не перевищує 8,3 млн. грн.

REFERENCES

1. Lezhnjuk P. D., Rubanenko O. Ye., Malogulko Ju. V. Optymizacija funkcionuvannja rozoseredzhenyh dzherel energii' v lokal'nyh elektrychnyh systemah [Optimization of functioning of distributed energy sources in the local electric systems]. Visnyk Nacional'nogo tehnicnogo universytetu "HPI". Serija : Mehaniko-tehnologichni systemy ta komplekxy [Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: Mechanical-technological systems and complexes]. 2014. Vol. 60. pp. 68-77
2. Caisheng, W., Hashem Nehrir M. An Analytical Method for DG Placements Considering Reliability Improvements. IEEE Trans. Power Syst. 2004. Vol. 19. pp. 2068-2076
3. Cyganenko B. V. Optymal'na rekonfiguracija rozpodil'noi' elektrychnoi' merezhi [The optimal reconfiguration of distribution power system] Tehnichna elektrodynamika [Tekhnichna Elektrodynamika]. 2016. Vol. 5. pp. 55-57
4. Energetychna strategija Ukrai'ny na period do 2035 roku «Bezpeka, energoefektyvnist', konkurentospromozhnist'» [Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035 "Safety, energy efficiency, competitiveness"]: Rozporjadzhennja Kabinetu Ministriv Ukrai'ny vid 18 serpnja 2017 r. Vol. 605-r [Elektronnyj resurs]. - Rezhym dostupu: <http://www.kmu.gov.ua/control/uk/cardnpd?docid=250250456>
5. Nepomnjashhij V. A. Nadezhnost' oborudovaniya energosistem [Reliability of power system equipment]. Moscow: zhurnal «JELEKTROJENERGIJA. Peredacha i raspredelenie» [ELECTRICITY. Transmission and distribution]. 2013. 196 P.
6. Kinash B. M., Kidyba V. P. Metod operatyvnogo analizu strukturnoi' nadijnosti shem elektrychnyh merezh [The method of operational analysis of structural reliability

промышленных предприятий : монография / Е. А. Конохова, Э. А. Киреева. - М. : НТФ "Энергопрогресс" : Энергетик, 2001. - 92 с.

9. Непомнящий В. А. Экономические потери от нарушения электроснабжения / В. А. Непомнящий. - М. : Издательский дом МЭИ, 2010. - 188 с.

of electric network schemes] Visnyk Nacional'nogo universytetu «L'viv'ska politehnika» [Proceedings of the National University "Lviv Polytechnic"]. 2001. - Vol. 435 : Elektroenergetychni ta elektromehanični systemy [Electricity and electromechanical systems]. pp. 85-90

7. Nadezhnost' sistem jenergetiki i ih oborudovaniya [Reliability of energy systems and their equipment]. Spravochnik : V 4-h t. / Pod obshh. red. Ju. N. Rudenko. T. 2. Nadezhnost' jelektrojenergeticheskikh sistem [Reliability of electric power systems]. Spravochnik / Pod red. M. N. Rozanova. Moscow: Jenergoatomizdat, 2000. 568 P.

8. Konjuhova E. A., Kireeva Je. A. Nadezhnost' jelektrosnabzheniya promyshlennyh predpriyatij : monografija [Reliability of power supply of industrial enterprises: monograph]. Moscow: NTF "Jenergoprogress" : Jenergetik, 2001. 92 P.

9. Nepomnjashhij V. A. Jekonomicheskie poteri ot narusheniya jelektrosnabzheniya [Economic losses from power failure]. Moscow: Izdatel'skij dom MJEI, 2010. 188 P.

Забезпечення надійності електропостачання - одна з головних задач ефективного і безпечного функціонування системи електропостачання будь-якого електроенергетичного об'єкта, а також одна зі складових комплексної задачі оптимізації режимів електроспоживання. Існує ряд методів оцінки надійності електроенергетичних систем. Для оцінки надійності складних систем електропостачання слід віддавати перевагу логіко-ймовірнісним методам. Такі методи відрізняються гнучкістю, наочністю, доступним математичним апаратом, що дозволяє розробляти універсальні алгоритми і програми розрахунків на ЕОМ. Таким чином, ця стаття присвячена оцінці надійності складної системи електропостачання з застосуванням логіко-ймовірнісних методів розрахунку на прикладі великого промислового підприємства.

Ключові слова: система електропостачання, оптимізація, надійність, діаграма надійності, збиток, безвідмовна робота.

УДК 621.31

Ю. Л. САЕНКО (ГВУЗ «ЛГТУ»), Т. К. БАРАНЕНКО (ГВУЗ «ЛГТУ»)

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», кафедра Электроэнергетических комплексов и систем, Украина, 87555, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7, тел.: (0629) 44-65-88, (0629) 44-65-51, эл. почта: vsayenko@gmail.com, tbaranenko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700, orcid.org/0000-0002-9436-8484

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Обеспечение надежности электроснабжения – одна из главных задач эффективного и безопасного функционирования системы электроснабжения любого электроэнергетического объекта, а также одна из составляющих комплексной задачи оптимизации режимов электропотребления. Существует ряд методов оценки надежности электроэнергетических систем. Для оценки надежности сложных систем электроснабжения следует отдавать предпочтение логико-вероятностным методам. Такие методы отличаются гибкостью, наглядностью, доступным математическим аппаратом, позволяющим разрабатывать универсальные алгоритмы и программы расчетов на ЭВМ. Таким образом, настоящая статья посвящена оценке надежности сложной системы электроснабжения с применением логико-вероятностных методов расчета на примере крупного промышленного предприятия.

Ключевые слова: система электроснабжения, оптимизация, надежность, диаграмма надежности, ущерб, безотказная работа.

UDC 621.31

Yu. L. SAYENKO (SHEI «PSTU»), T. K. BARANENKO (SHEI «PSTU»)

SHEI «Pryazovsky State Technical University», Department of Electrotechnical Complexes and Systems, Ukraine, 87555, Mariupol, ul. Universytets'ka, 7, tel.: (0629) 44-65-88, (0629) 44-65-51, e-mail: yls62@i.ua, tbaranenko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700, orcid.org/0000-0002-9436-8484

INCREASE OF RELIABILITY OF POWER SUPPLY SYSTEMS AS A COMPONENT OF THE PROBLEM OF OPTIMIZATION OF POWER CONSUMPTION REGIMES

Ensuring the reliability of electrical supply is one of the main tasks of efficient and safe operation of the power supply system of any power generating facility, as well as one of the components of the complex task of optimizing power consumption regimes. There are a number of methods for estimation the reliability of electric power systems. To estimate the reliability of complex power supply systems, we should give preference to logical-probabilistic methods. Such methods differ flexibility, visibility, accessible mathematical apparatus, which allows developing universal algorithms and computer programs. Thus, this article is devoted to estimating the reliability of a complex power supply system using the logic-probabilistic methods of calculation with the example of a large industrial enterprise.

Keywords: power supply system, optimization, reliability, reliability diagram, damage, trouble-free operation.

Received 05.02.2018; accepted in revised form 03.04.2018.

О. І. СЕМЕНЕНКО, О. Д. СУПРУН, Ю. О. СЕМЕНЕНКО, М. М. ОДЕГОВ (УКРДУЗТ)

Кафедра «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Українського державного університету залізничного транспорту, 61050 м. Харків, майдан Фейєрбаха 7, тел. +38(057)730-10-74, e-mail: semenoi@i.ua, adsup@ukr.net, slider2012@i.ua, 8084214@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-8885-6783, orcid.org/0000-0002-8732-7609, orcid.org/0000-0001-9422-3528, orcid.org/0000-0003-3967-9009

ЗАСТОСУВАННЯ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ-СТАБІЛІЗАТОРІВ У РОЗПОДІЛЕНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Вступ

Одною з найскладніших проблем, яка виникає при збільшенні інтенсивності перевезень або впровадженні швидкісного руху на ділянках тягової мережі постійного струму, є зниження якості енергії живлення електричного рухомого складу (ЕРС) та зростання електромагнітного впливу системи електропостачання (СЕП) на лінії залізничної сигналізації, автоблокування та зв'язку. Можливості застосування традиційних заходів по підсиленню контактної мережі вичерпані, тому в умовах подальшого зростання навантажень вони уже не гарантують ефективного та надійного функціонування СЕП постійного струму.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Широке застосування статичних перетворювачів електричної енергії на швидкодіючих силових напівпровідникових ключах створило умови для розробки та впровадження нових високоефективних СЕП постійного струму. Так, наприклад, для підвищення якості електричної енергії постійного струму та поліпшення електромагнітної сумісності СЕП з суміжними електроустановками в ряді робіт [1-2] запропоновано застосовувати в складі перетворювальних агрегатів (ПА) підстанцій вольтододаткові перетворювачі на базі трифазних випрямлячів напруги з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) або простіші за будовою активні фільтри-стабілізатори (АФС) послідовного типу [3-5].

Як показують розрахунки, при відстані між підстанціями більше 25 км застосування вольтододаткових перетворювачів в складі ПА підстанцій централізованої СЕП виявляється недостатньо ефективним, бо при реалізації регулювання вихідна напруга повинна досягати вище передбаченого в нормальних умовах максимального значення 3,6 кВ [6]. При цьому створюються значні проблеми для стабільного функціонування СЕП та надійної роботи колекторних тягових двигунів на ЕРС, який знаходиться в

цей момент близько від підстанції, спостерігаються також великі втрати енергії в тяговій мережі, що можуть навіть перевищувати 25 % від спожитої.

Іншим шляхом вирішення вказаної проблеми є застосування розподіленої СЕП, де в якості джерел енергії живлення тягової мережі крім підстанцій додатково використовуються пункти підвищення напруги (ППН) [7-9]. Їх розташовують в середній частині міжпідстанційних зон і для зниження втрат при передачі до них енергії живлять підвищеною напругою, а від ППН в тягову мережу вже подається енергія постійного струму напругою 3,3 кВ. Завдяки застосуванню розподіленої СЕП значно зменшуються сумарні втрати енергії та забезпечується необхідний для якісного живлення ЕРС рівень напруги по всій довжині міжпідстанційної зони.

Один із варіантів реалізації ППН передбачає застосування звичайного ПА із трансформаторно-випрямною структурою і живлення його від мережі трифазного змінного струму 35 або 10 кВ [8]. При великій потужності ППН, що складає 6-10 МВт, робота мережі змінного струму може призводити до погіршення якості енергії живлення ЕРС, тому таку лінію необхідно дещо віддаляти та виконувати на окремо розташованих опорах. Складним питанням є забезпечення в структурі такого ПА плавного регулювання або стабілізації вихідної напруги, яка потрібна також для того, щоб не виникали додаткові втрати енергії за рахунок струмів перетікання між підстанціями та ППН при двосторонньому живленні ділянок тягової мережі.

Щоб покращити якісні показники напруги живлення ЕРС та забезпечити стабілізацію вихідної напруги, можна використати ППН на базі понижувального широтно-імпульсного перетворювача з живленням від джерела постійного струму підвищеної напруги [7-9]. Поки що на дослідних ділянках тягової мережі застосовують в ППН понижувальний широтно-імпульсний перетворювач з напругою живлення 6,6 кВ постійного струму і з урахуванням високої вартості високовольних силових двоопераційних ключів та більших втрат енергії при

передачі до ППН такий варіант поступається простішому першому із трансформаторно-випрямною структурою.

Визначення мети та задачі досліджень

Перевірка доцільності застосування на тягових підстанціях та ППН в ПА із трансформаторно-випрямною структурою АФС послідовного типу для фільтрації та стабілізації напруги в розподіленій СЕП постійного струму шляхом дослідження ефективності його роботи в різних режимах.

Основна частина дослідження

При наявності потужної лінії змінного струму напругою 35 (10) кВ або при застосуванні підсиленої лінії поздовжнього електропостачання нетягових споживачів можна застосувати досить економний варіант ППН із трансформаторно-випрямною структурою. Для покращення якісних показників напруги живлення ЕРС стабілізацію та фільтрацію напруги живлення тягової мережі пропонується забезпечувати в такій системі використанням у складі ПА АФС послідовного типу з ємнісним накопичувачем енергії [3-4], схема якого наведена на рис. 1. Як видно зі схеми, перетворювач АФС увімкнений послідовно з основною випрямною установкою ВУ тягової підстанції, яка представляє собою діодний випрямляч. Це може бути дванадцятипульсна або шестипульсна схеми і останніх сьогодні на тягових підстанціях залізниць України переважна більшість. На виході ПА застосовано пасивний аперіодичний LC-фільтр. Система керування АФС, яка для спрощення не показана на рисунку, з іншими елементами схеми утворюють замкнену систему автоматичного регулювання, що забезпечує активну фільтрацію та стабілізацію вихідної напруги підстанції або ППН із трансформаторно-випрямною структурою.

Мостовий перетворювач напруги АФС має керовані двоопераційні тиристорний VS та транзисторний VT ключі (рис. 1), інші два ключі (VD1 та VD2) є некерованими [3-5]. Транзисторний ключ VT на базі IGBT перемикається з частотою ШІМ, а тиристорний ключ VS на базі IGCT – з невисокою частотою основної гармоніки випрямленої напруги u_d . Перетворювач напруги АФС формує із напруги ємнісного накопичувача U_c імпульсну напругу u_{ai} , з якої пасивним LC-фільтром виділяється сукупність усереднених на періоді ШІМ значень – гладка складова напруги, що показана штриховою лінією на рис. 2 і позначена u_{ar} .

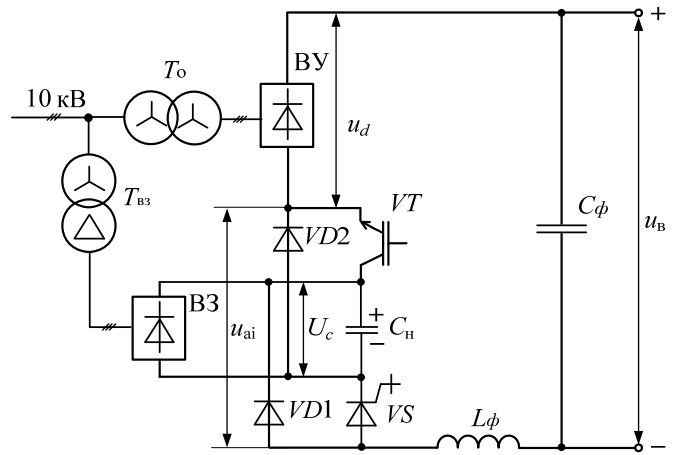


Рис. 1. Схема перетворювального агрегату з активним фільтром-стабілізатором послідовного типу на базі ємнісного накопичувача енергії

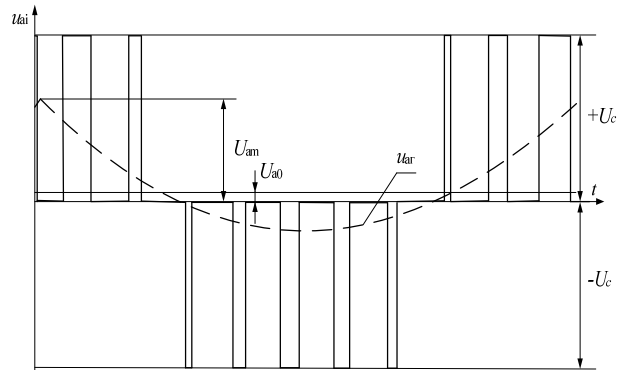


Рис. 2. Діаграма вихідної напруги активного фільтра-стабілізатора

З вихідної напруги випрямляча u_d та напруги АФС u_{ar} формується сумарна вихідна напруга ПА u_B . Вона практично не містить змінної складової, бо змінна складова напруги основної випрямної установки компенсується змінною складовою напруги u_{ar} . Як видно з діаграми, напруга u_{ar} містить також постійну складову U_{a0} , яка компенсує можливі відхилення або коливання вихідної напруги відносно заданого значення, тобто стабілізує напругу на виході ПА. Якісне формування напруги компенсації досягається застосуванням в перетворювачі АФС ємнісного накопичувача з низьким рівнем пульсації напруги U_c , що є перевагою даної схеми у порівнянні зі схемою вольтододаткового перетворювача на базі трифазних випрямлячів напруги з ШІМ, де імпульсна напруга компенсації формується із змінної напруги вторинних обмоток трансформатора.

При аналізі роботи АФС знехтуємо активними втратами в LC-фільтрі та на діодах випрямної установки. Для аналізу основних параметрів силового перетворювача напруги АФС слід розрахувати мінімально необхідне значення напруги та ємність накопичувача енергії, при яких буде

забезпечено якісну фільтрацію та стабілізацію вихідної напруги ПА в різних режимах роботи. Значення напруги ємнісного накопичувача U_c залежить від необхідного амплітудного значення гладкої складової напруги АФС U_{am} (рис. 2), яке визначається для найбільш несприятливих умов із співвідношення [4]:

$$U_{am} = \Delta U_{d0} + \Delta U_{d\gamma} + \sum_{k=1}^{\infty} U_{dkm} + \sum_{v=2}^{\infty} U_{dvm} \quad (1)$$

де ΔU_{d0} – зниження постійної складової випрямленої напруги U_{d0} за рахунок зниження напруги живлення ПА; $\Delta U_{d\gamma} = U_{d0} \frac{I_d}{I_{dn}} u_k \sin \frac{\pi}{m}$ – зниження постійної складової випрямленої напруги U_{d0} , що обумовлене комутацією (u_k – напруга короткого замикання трансформатора; m – пульсність випрямної установки); $U_{dkm} = U_{d0} \frac{2}{(km)^2 - 1}$ – амплітуда k -ої канонічної гармоніки випрямленої напруги (при $k = 1, 2, 3, \dots$); U_{dvm} – амплітуда v -ої неканонічної гармоніки випрямленої напруги, модуль якої може бути визначений в залежності від ε – коефіцієнта несиметрії напруги живлення випрямної установки:

$$\bar{U}_a = \begin{cases} \frac{-\varepsilon}{v-1} \cos\left(\frac{v-1}{2}\gamma_0\right) e^{-j\left[(1-v)\left(\alpha_0 + \frac{\gamma_0}{2}\right) - n\frac{\pi}{2}\right]}, & \text{для } v=2\cdot(1+3n) \\ \frac{\varepsilon}{v+1} \cos\left(\frac{v+1}{2}\gamma_0\right) e^{-j\left[(1+v)\left(\alpha_0 + \frac{\gamma_0}{2}\right) + n\frac{\pi}{2}\right]}, & \text{для } v=2\cdot(2+3n) \end{cases} \quad (2)$$

де $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Аналіз рівняння (1) показує, що необхідне амплітудне значення U_{am} досягає максимуму при мінімальній трифазній напрузі живлення ПА та максимальному навантаженні. Відомо, що мінімальна допустима напруга живлення ПА на 10 % нижче номінальної; також приймається, що тривале максимальне навантаження відповідає номінальному значенню струму. В таких умовах при номінальній величині вихідної напруги тягової підстанції 3300 В при застосуванні дванадцятипульсної випрямної установки розраховане згідно рівняння (1) максимальне значення U_{am} досягає 460 В, при застосуванні шестипульсної – 695 В.

Найбільша величина пульсації струму ємнісного накопичувача відповідає режиму роботи силового перетворювача АФС, при якому відсутній підзаряд C_n струмом основної випрямної установки при формуванні імпульсів напруги u_{ai} негативної полярності. Тому виконаємо розра-

хунок ємності накопичувача без урахування цієї складової струму, використовуючи рівняння:

$$C_n = \frac{I_{c3}}{\omega k_{nu} U_{c0}} \quad (3)$$

де I_{c3} – діюче значення змінної складової струму C_n , яке досягає максимуму при мінімальній і несиметричній напрузі живлення ПА та максимальному струмовому навантаженні [4];

ω – частота пульсації напруги ємнісного накопичувача енергії;

k_{nu} – коефіцієнт пульсації напруги (для фільтрових конденсаторів його приймають не більше 0,05);

U_{c0} – постійна складова напруги ємнісного накопичувача, яку для вказаних вище умов роботи ПА слід прийняти більшою від значення U_{am} на падіння напруги на елементах перетворювача напруги АФС.

Розраховані за допомогою рівняння (3) значення ємності накопичувача енергії складають 0,1 Ф для дванадцятипульсної та 0,08 Ф для шестипульсної схеми випрямляча. Такі батареї накопичувача енергії можна реалізувати, якщо застосувати, наприклад, конденсатори фірми *Electronicon Semicode E50.R29*, які виконані за технологією *MKP* з поліпропіленовим діелектриком [4]. Для цього потрібні 50 конденсаторів по 2000 мкФ номінальною напругою 900 В для АФС в складі перетворювального агрегату з дванадцятипульсним випрямлячем та 80 конденсаторів по 1000 мкФ номінальною напругою 1300 В з шестипульсним випрямлячем. Маса батарей конденсаторів складе близько 160 кг та 270 кг, що для перетворювачів такої потужності можна вважати прийнятним.

Для перевірки наведених вище результатів аналізу основних параметрів перетворювача напруги АФС було проведено моделювання роботи ПА з дванадцятипульсною [4] та шестипульсною випрямною установкою у програмному пакеті *MATLAB & Simulink*. На рис. 3 показана імітаційна комп'ютерна модель ПА з шестипульсною випрямною установкою та АФС. Частота ШІМ обрана рівною 6 кГц, щоб вона була кратною до основних частот гармонік випрямленої напруги та були помірними комутаційні втрати в ключі на базі *IGBT*. Г-подібний аперіодичний *LC*-фільтр має ємність батареї конденсаторів $C = 300$ мкФ.

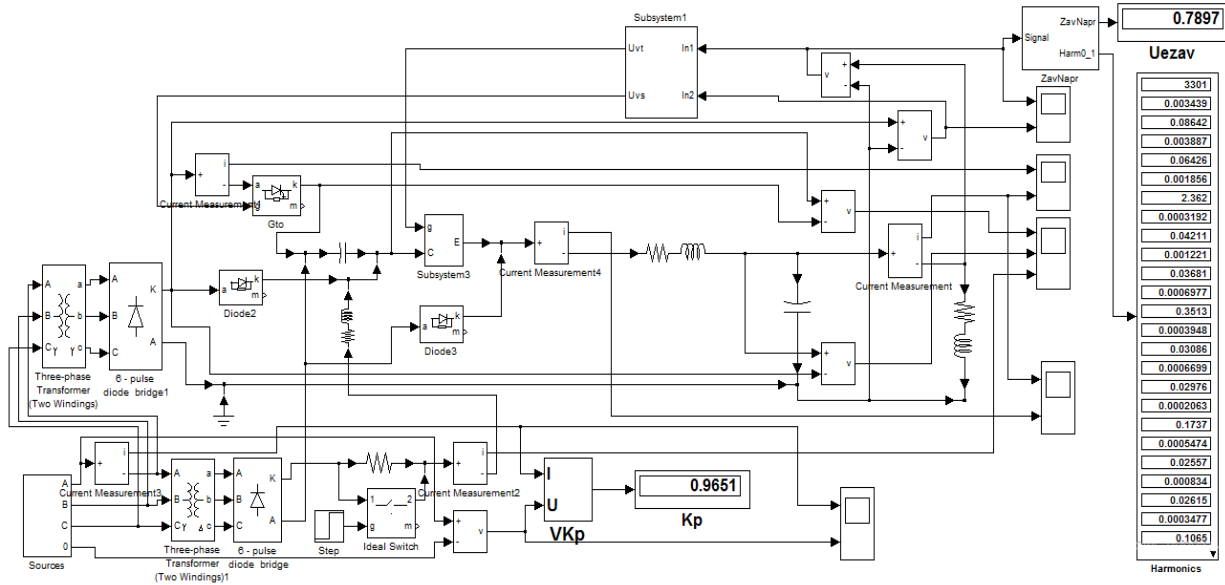


Рис. 3. Імітаційна модель ПА з шестипульсною випрямною установкою та АФС послідовного типу

Опір навантаження $R_H = 1 \text{ Ом}$, $L_H = 1 \text{ мГн}$, індуктивність струмообмежуючого реактора $L = 4,5 \text{ мГн}$, а його активний опір складає $r_p = 0,006 \text{ Ом}$. Дослідження було проведено при трьох різних режимах трифазної напруги живлення ПА: при номінальній напрузі, коли всі фазні напруги $U_\phi = 10,5/\sqrt{3} \text{ кВ}$, при мінімальній, тобто зниженій на 10% напрузі $U_\phi = 9,45/\sqrt{3} \text{ кВ}$ та при несиметричній напрузі, коли одна з фазних напруг $U_\phi = 9,45/\sqrt{3} \text{ кВ}$ і коефіцієнт несиметрії трифазної напруги $\varepsilon = 2\%$.

Для вимірювання коефіцієнта потужності ПА з АФС застосовується блок VKp , для вимірювання еквівалентної заважаючої напруги – $ZavNapr$, яка розраховується із рівняння:

$$U_{\text{ез}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (U_k \cdot p_k)^2} \quad (4)$$

де U_k – діюче значення напруги k -ої гармонічної складової;

p_k – коефіцієнт акустичного впливу k -ої гармоніки, що враховує неоднакову ступінь впливу гармонік на суміжні лінії зв'язку.

В табл. 1 наведені результати моделювання перетворювального агрегату з шестипульсною випрямною установкою та АФС, в табл. 2 – результати моделювання перетворювального агрегату з шестипульсною випрямною установкою без АФС. В останній застосовано дволанковий пасивний фільтр з режекторними фільтрами, налаштованими на 300, 600, 900 та 1200 Гц.

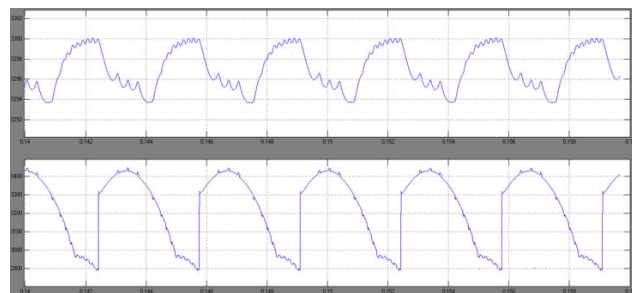
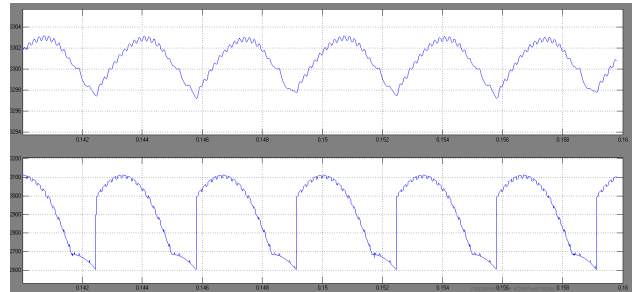


Рис. 4. Вихідна напруга ПА u_b та напруга випрямляча u_d при: а) зниженій симетричній напрузі живлення перетворювального агрегату; б) номінальній симетричній напрузі живлення перетворювального агрегату

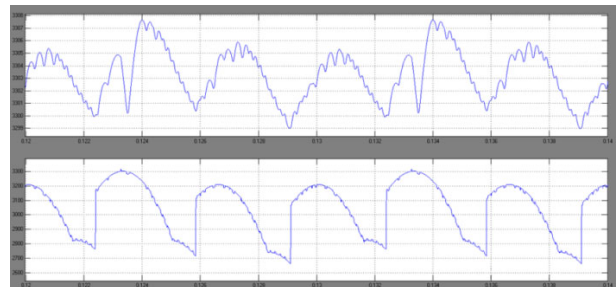


Рис. 5. Вихідна напруга ПА u_b та напруга випрямляча u_d при несиметричній напрузі живлення

Результати моделювання ПА з шестипульсною випрямною установкою та АФС

Режим напруги живлення	Діюче значення напруги, В гармоніки частотою, Гц						U_{es} , В	Коеф. потужн.
	100	200	300	600	900	1200		
Номинальна	0,026	0,029	3,404	0,512	0,647	0,270	1,350	0,9596
Знижена на 10%	0,083	0,063	2,360	0,351	0,174	0,107	0,789	0,9651
Несиметрична $\varepsilon = 2\%$	0,967	0,228	2,468	0,404	0,388	0,182	1,279	0,9673

Таблиця 2

Результати моделювання ПА з шестипульсною випрямною установкою та згладжуючим пристроєм

Режим напруги живлення	Діюче значення напруги, В гармоніки частотою, Гц						U_{es} , В	Коеф. потужн.
	100	200	300	600	900	1200		
Номинальна	0,003	0,048	17,14	0,699	0,082	0,021	5,076	0,9508
Знижена на 10%	0,006	0,022	15,53	0,645	0,052	0,016	4,611	0,9507
Несиметрична $\varepsilon = 2\%$	16,52	10,90	16,12	0,663	0,057	0,015	4,955	0,9531

При використанні в складі ПА тягової підстанції або ППН розподіленої СЕП вольтододакового перетворювача на базі трифазних випрямлячів напруги з ШІМ [1-2] на його створення потрібно було б шість швидкодіючих двоопераційних ключів на *IGBT*. При цьому кожен транзистор повинен бути послідовно поєднаним із діодом, який захищає *IGBT* від зворотної напруги в трифазному випрямлячі. У перетворювача напруги АФС лише два некерованих і два керованих двоопераційних ключі, та тільки один з них повинен бути швидкодіючим на *IGBT*. Таким чином при однаковій потужності перетворювачів кількість силових ключів, втрати енергії в них та вартість АФС будуть нижче, ніж у вольтододакових перетворювачів на базі трифазних випрямлячів напруги з ШІМ.

Висновки

Для підвищення ефективності роботи тягового електропостачання постійного струму на ділянках з інтенсивним та швидкісним рухом є

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Самсонкин В. М. Энергоэффективный преобразовательный агрегат с функциями фильтрации гармоник выходного напряжения тяговой подстанции системы электроснабжения постоянного тока напряжения 3 кВ / В. М. Самсонкин, М. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров, В. В. Божко // Вісник ДНУЗТ. 2008. – № 20. – С. 66-72.
2. Панасенко М.В. Проблеми електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного

доцільним застосування розподіленої системи, де на тягових підстанціях та ППН в ПА із трансформаторно-випрямною структурою використовуються АФС послідовного типу на базі ємнісного накопичувача енергії, що забезпечує якісну стабілізацію та активну фільтрацію вихідної напруги. Результати моделювання показали, що застосування АФС у перетворювальному агрегаті з шестипульсною випрямною установкою забезпечує суттєве зниження гармонік вихідної напруги у діапазоні низьких частот та підвищення коефіцієнта потужності на 0,9-1,4 %. Кількість силових ключів перетворювача напруги АФС, втрати енергії та вартість будуть нижче, ніж у вольтододакових перетворювачів на базі трифазних випрямлячів напруги з ШІМ, а якість вихідної напруги ПА тягових підстанцій та ППН розподіленої системи електропостачання постійного струму буде вище.

REFERENCES

1. Samsonkin V. M. Energy-efficient converter unit with filtration functions of harmonics of the output voltage of the traction substation of the 3 kV DC power supply system / V.M. Samsonkin, M.V. Panasenکو, Y.P. Honcharov, V.V. Bozhko // Herald DNUST. – 2008. – № 20. – P. 66-72.
2. Panasenکو M.V. Problems of electromagnetic compatibility of subsystems of electric drive of direct current and use of power electronics for solving them /

струму і використання засобів силової електроніки для їх вирішення / М.В. Панасенко, Ю.П. Гончаров, В.Г. Сиченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – №2 – С. 22-28.

3. Семененко О.І. Активний фільтр-стабілізатор для випрямної установки тягової підстанції / О.І. Семененко, Ю.О. Семененко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – Харків:УкрДАЗТ. – 2016. – №4(119). – С. 29-33.

4. Семененко Ю.А. Стабилизация и активная фильтрация выпрямленного напряжения в замкнутой структуре / Ю.А. Семененко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – 2016. – №166. – С. 131-140.

5. Shcherbak Ya. Analysis of dynamic characteristics of the active filter-stabilizer / Ya. Shcherbak, Yu. Semenenko, O. Semenenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – №2/8(86). – P. 10-15.

6. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № ЦЕ-0009. – К.: ТОВ „Швидкий рух”, 2005. – 80 с.

7. Гончаров Ю.П. Система електроснабження контактної мережі постійного струму з продольною лінією підвищеного напруги / Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко, В.Н. Козачок, В.В. Замаруєв, В.В. Івахно, С.Ю. Кривошеєв, А.І. Семененко // Вісник ДНУЗТ. – 2008. – № 20. – С. 42-48.

8. Семененко О.І. Трифазний ШПП для пункту підвищення напруги 10/3,3кВ / О.І. Семененко, Т.В. Ісакова, Є.А. Аветісов // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, № 126. – 2011 р. – С. 204-208.

9. Семененко О.І. Підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму / О.І. Семененко, Ю.О. Семененко // Збірник наукових праць УкрДУЗТ, № 153. – 2015. – С. 47-54.

M.V. Panasenko, Y.P. Honcharov, V.G. Sychenko // Electrical engineering and power engineering. – 2009. – №2 – P. 22-28.

3. Semenenko O.I. Active filter-stabilizer for rectifier traction substation installation / O.I. Semenenko, Y.O. Semenenko // Information and control systems on the railway transport – Kharkiv: UkrSART. – 2016. – №4(119). – P. 29-33.

4. Semenenko Y.O. Stabilization and active filtration of rectified voltage in a closed structure / Y.O. Semenenko // Collection of scientific works UkrSURT. – 2016. – №166. – P. 131-140.

5. Shcherbak Ya. Analysis of dynamic characteristics of the active filter-stabilizer / Ya. Shcherbak, Yu. Semenenko, O. Semenenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – №2/8(86). – P. 10-15.

6. Rules of arrangement of the traction power supply system of the railways of Ukraine. № ZE-0009. - K.: TOV "Fast movement", 2005. – P. 80.

7. Honcharov Y. P. The system of power supply of a contact network of a direct current with a longitudinal line of the raised voltage / Y.P. Honcharov, M.V. Panasenko, V.N. Kozachok, V.V. Zamaruev, V.V. Ivahno, S.Y. Krivosheev, O.I. Semenenko // Herald DNUST. – № 20. – 2008. – P. 42-48.

8. Semenenko O.I. Three-phase pulse-width converter for point of increase of voltage 10/3.3 kV / O.I. Semenenko, T.M. Isakova, Y.E. Avetisov // Collection of scientific works UkrSART. – № 126. – 2011. – P. 204-208.

9. Semenenko O.I. Increasing the efficiency of the system of traction power supply of direct current / O.I. Semenenko, Y.O. Semenenko // Collection of scientific works UkrSURT, № 153. – 2015. – P. 47-54.

В статті розглянуто шляхи створення системи розподіленого електропостачання постійного струму для підвищення якості енергії живлення електричного рухомого складу залізниць в умовах збільшення інтенсивності перевезень та впровадження швидкісного руху. Пропонується в системі розподіленого електропостачання для ефективної фільтрації та стабілізації вихідної напруги перетворювальних агрегатів тягових підстанцій та перетворювальних пунктів застосувати активні фільтри-стабілізатори послідовного типу. У перетворювальному агрегаті з шестипульсною випрямною установкою та активним фільтром-стабілізатором послідовного типу забезпечується суттєве зниження гармонік вихідної напруги у діапазоні низьких частот та підвищення коефіцієнта потужності на 0,9-1,4 %.

Ключові слова: система електропостачання, пункт підвищення напруги, перетворювальний агрегат, активний фільтр-стабілізатор.

УДК 621.314.6

А. И. СЕМЕНЕНКО, А. Д. СУПРУН, Ю. А. СЕМЕНЕНКО, Н. Н. ОДЕГОВ (УКРГУЖТ)

Кафедра «Электроэнергетика, электротехника и электромеханика» Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, 61050 г. Харьков, площадь Фейербаха 7, тел. +38(057)730-10-74, e-mail: semenoi@i.ua, ad-sup@ukr.net, slider2012@i.ua, 8084214@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-8885-6783, orcid.org/0000-0002-8732-7609, orcid.org/0000-0001-9422-3528, orcid.org/0000-0003-3967-9009

ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ-СТАБИЛИЗАТОРОВ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В статье рассмотрены пути создания системы распределенного электроснабжения постоянного тока для повышения качества энергии питания электрического подвижного состава в условиях увеличения интенсивности перевозок и внедрение скоростного движения. Предлагается в системе распределенного электроснабжения для эффективной фильтрации и стабилизации выходного напряжения преобразовательных агрегатов тяговых подстанций и преобразовательных пунктов применить активные фильтры-стабилизаторы последовательного типа. В преобразовательной агрегате с шестипульсной выпрямленной установкой и активным фильтром-стабилизатором последовательного типа обеспечивается существенное снижение гармоник выходного напряжения в диапазоне низких частот и повышения коэффициента мощности на 0,9-1,4%

Ключевые слова: система электроснабжения, пункт повышения напряжения, преобразовательный агрегат, активный фильтр-стабилизатор..

UDC 621.314.6

O. I. SEMENENKO, O.D. SUPRUN, Y.O. SEMENENKO, M.M. ODEGOV (UKRSURT)

Department «Electrical engineering, electrical engineering and electromechanics» Ukrainian State University of Railway Transport, 61050, Kharkiv, Feuerbach Square 7, tel. +38(057)730-10-74, e-mail: semenoi@i.ua, ad-sup@ukr.net, slider2012@i.ua, 8084214@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-8885-6783, orcid.org/0000-0002-8732-7609, orcid.org/0000-0001-9422-3528, orcid.org/0000-0003-3967-9009

APPLICATION OF ACTIVE FILTERS-STABILIZERS IN A DISTRIBUTED ELECTRICAL SUPPLY SYSTEM

In the article ways of creation of system of the distributed electric power supply of a direct current for increase of quality of energy of a food of an electric rolling stock in the conditions of increase of intensity of transportations and introduction of high-speed movement are considered. It is proposed to use active filter-stabilizers of a sequential type in the distributed power supply system for efficient filtration and stabilization of the output voltage of converter units of traction substations and conversion points. In the converter unit with a six-pulse rectified installation and an active filter-stabilizer of a sequential type, the harmonics of the output voltage in the low-frequency range are significantly reduced and the power factor is increased by 0,9-1,4%.

Keywords: power supply system, point of increase of voltage, transformer unit, active filter-stabilizer.

Received 17.01.2018; accepted in revised form 05.04.2018.

Е. И. СОКОЛ, В. В. ЗАМАРУЕВ, В. В. ИВАХНО, Б. А. СТЫСЛО (НТУ «ХПИ»)

Кафедра «Промышленная и биомедицинская электроника», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, Харьков, Украина, 61002, тел. +38 (057) 70-76-044, e-mail: bohdanstyslo@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-7057-3523

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ УСИЛИВАЮЩИХ ПУНКТОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Введение

Тенденция к развитию скоростного железнодорожного движения, изменения логистики движения товарных поездов обуславливает необходимость увеличения пропускной способности железных дорог. Применяемые сегодня системы тягового электроснабжения постоянного тока не всегда в состоянии обеспечить передачу требуемой мощности. К числу основных проблем относится снижение напряжения на токоприемнике электровоза ниже допустимого значения – 2700 В (для скоростного движения – 2900 В). Это приводит к увеличению мощности потерь, нагреву проводов контактной сети, что в свою очередь приводит к потере их механической прочности. [1-3].

На рис. 1 приведены результаты измерения уровня напряжения на токоприемнике электровоза, которые свидетельствуют о достаточно большом разбросе величины напряжения и выходе ее за допустимые границы на протяжении 18% времени движения.

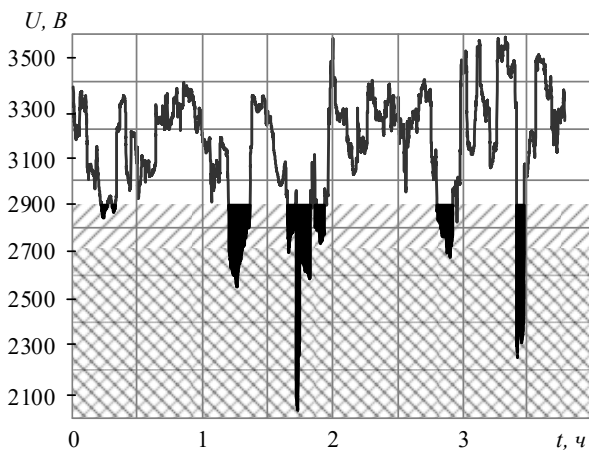


Рис. 1. Уровень напряжения на токоприемнике электровоза

Причиной пульсаций напряжения является пульсирующий характер потребляемой мощности. Как показано в [4-7] пульсации мощности

приводят к дополнительным активным потерям и требуют компенсации.

Снижение активных потерь может быть достигнуто использованием дополнительного провода и усиливающих пунктов [1].

Для компенсации пульсаций мощности в сети электроснабжения железной дороги предлагается использование батарейных накопителей электрической энергии (БСНЭ) [3, 5, 8] в структуре усиливающих пунктов распределенной системы электропитания. Их наличие позволяет также обеспечить утилизацию энергии рекуперации, интегрировать в существующую систему тягового электроснабжения альтернативные источники электрической энергии.

Целью данной работы является разработка средств улучшения качества электрической энергии системы электроснабжения железной дороги и формулировка рекомендаций по их использованию

Разработка двухканального усиливающего пункта

Для применения в системе распределенного питания железной дороги накопитель электрической энергии должен функционировать в условиях резкого изменения нагрузки и компенсировать колебания напряжения в различном частотном диапазоне. Как показывает анализ доступных источников, на сегодняшний день наиболее перспективным направлением является применение гибридных накопителей электрической энергии, состоящих из накопителей разного типа (рис. 2), что позволяет оптимизировать режим использования гибридной БСНЭ.

Из рис. 2 видно, что для компенсации колебаний мощности сети в широком диапазоне частот, необходимо включать в структуру БСНЭ электрохимические накопители разных типов, с различными временными характеристиками зарядно-разрядного цикла [3, 9, 10].

Задачей усиливающего пункта является компенсация потерь в линии постоянного тока

и минимизация амплитуды переменной составляющей мощности за счет ранее запасенной энергии в электрохимических накопителях электрической энергии. Согласно графику Рагони, ставшему промышленным стандартом классификации накопителей электрической энергии (рис. 2), и экспериментальным исследованиям [11, 12], для расширения частотного диапазона эффективной работы BESS в ее структуру целесообразно включать двухслойные конденсаторы и $LiFePO_4$ аккумуляторы, которые обладают улучшенными энергетическими характеристиками в сравнении с традиционными $Li-Ion$ аккумуляторами. Для эффективного подавления пульсаций широкого частотного спектра целесообразно использовать кооперативные преобразователи [13].

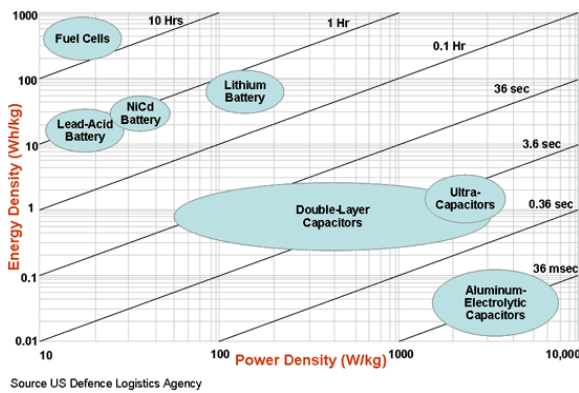


Рис. 2. График Рагони

Структурная схема подключения усиливающих аккумуляторных пунктов к контактной сети 3,3 КВ приведена на рис. 3.

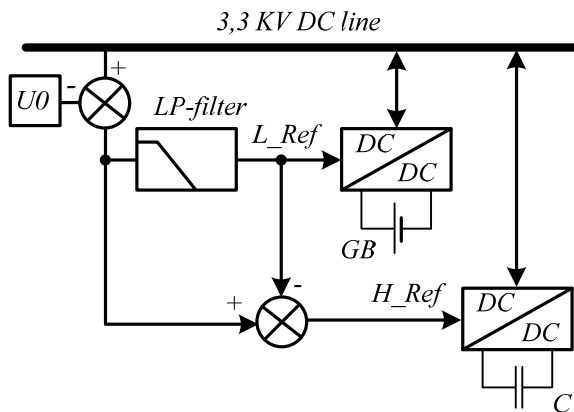


Рис. 3. Структурная схема реализации двухканального усиливающего пункта

Цифровой фильтр нижних частот ($LP-filter$) производит выделение низкочастотной переменной составляющей, которая является сигналом задания для DC/DC преобразователя, об-

служивающего низкочастотный канал усиливающего пункта. Частотное разделение, в первую очередь, позволяет продлить ресурс батареи, оптимизировав скорость процессов заряда (разряда).

Типовым временем заряда-разряда двухслойных конденсаторов составляет единицы – десятки секунд (рис. 2). С учетом этого, частота среза ФНЧ принимается равной 1/60 Гц. Возможно увеличение или уменьшение частоты среза ФНЧ в достаточно широком диапазоне. Фактически, это приведет лишь к увеличению установленной мощности высокочастотного в одном случае, и низкочастотного в другом случае, каналов гибридного накопителя.

Результат алгебраического вычитания низкочастотного сигнала L_Ref из исходного входного сигнала используется в качестве сигнала задания для высокочастотного канала усиливающего пункта, состоящего из DC/DC преобразователя, компенсирующего высокочастотные пульсации за счет энергии, запасенной в конденсаторах.

Наличие фильтра приводит к появлению временного сдвига между сигналами на его входе и выходе [14]. Наличие сдвига в сигнале задания преобразователя по отношению к низкочастотной переменной составляющей, которая подлежит фильтрации, порождает дополнительные пульсации, которые переходят в высокочастотную область и, практически, полностью компенсируется преобразователем высокочастотного канала системы. Такое решение позволяет использовать ФНЧ достаточно высокого порядка не внося дополнительные высокочастотные искажения в фильтруемый сигнал. Поскольку в предлагаемой системе используется регулирование по возмущению, что предполагает пропорциональность сигнала задания преобразователя и его выходного сигнала, то с увеличением порядка фильтра увеличивается установленная мощность высокочастотного канала системы.

Согласующий DC/DC преобразователь

Повышение частоты преобразования, сопровождается пропорциональным ростом динамических потерь силовых полупроводниковых ключей силовых коммутаторов преобразователя. Ограничение динамических потерь ключей может достигаться путем применением различных снабберов.

Вторым вариантом снижения коммутационных потерь является использование технологии разделенной коммутации [15-17].

Особенности системы электропитания железной дороги (линия постоянного тока 3,3 кВ) ограничивают применение схем на основе dual-active-bridge converters.

В качестве согласующего DC/DC преобразователя, обеспечивающего связь между накопителями электрической энергии и контактной сетью постоянного тока, предлагается структура двухзвенного преобразователя, реализующего алгоритм разделенной коммутации (рис. 4).

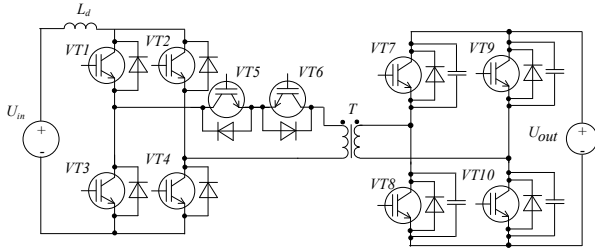


Рис. 4. Схема двухзвенного преобразователя

Схема состоит из двух коммутаторов с разделительным трансформатором. Первый коммутатор представляет собой мостовой инвертор тока (VT1-VT4), второй – выполнен по топологии мостового инвертора напряжения (VT7-VT10).

В результате реализации предлагаемого алгоритма управления [15], в каждом из коммутаторов происходит однородная коммутация: выключение ключей инвертора тока в режиме коммутации при нулевом токе – *Zerro Current Switching (ZCS)* и включение ключей инвертора напряжения в режиме коммутации при нулевом напряжении – *Zerro Voltage Switching (ZVS)*. Потери при принудительном включении ключей инвертора тока и выключении ключей инвертора напряжения ограничены бездиссипативными снабберами. Функцию индуктивного снаббера в звене инвертора тока выполняет индуктивность рассеяния разделительного трансформатора T.

Такой подход к построению схемы позволяет минимизировать мощность потерь в силовых полупроводниковых ключах.

Активный балансир с адресной передачей энергии между аккумуляторами стека

В низковольтном звене преобразователя как с экономической, так и технической точки зрения целесообразно применение низковольтных IGBT транзисторов (1200 В), что, с учетом запаса, соответствует номинальному напряжению аккумуляторной батареи $U_{nom} = 600$ В. При условии среднего напряжения на единичном

аккумуляторе $LiFePO_4 = 3,25$ В, количество последовательно соединенных аккумуляторов составит $600/3,25=185$ (шт.).

Как известно, последовательное соединение аккумуляторных батарей требует применения специализированных средств, обеспечивающих балансировку уровней напряжения на каждом из аккумуляторов стека. В работе [18] авторами предложена система активной балансировки с адресной передачей энергии между аккумуляторами стека, которая позволяет ускорить процесс балансировки за счет непосредственного обмена энергией между аккумуляторами с недостающим (акцептор) и избыточным (донор) зарядами. Дальнейшие исследования данного решения позволили применить в системе управления алгоритм оптимизации передачи энергии между аккумуляторами стека. На рис. 5 показаны эпюры напряжения на четырех последовательно включенных аккумуляторах при одном из вариантов адресной передачи энергии на разных этапах балансировки.

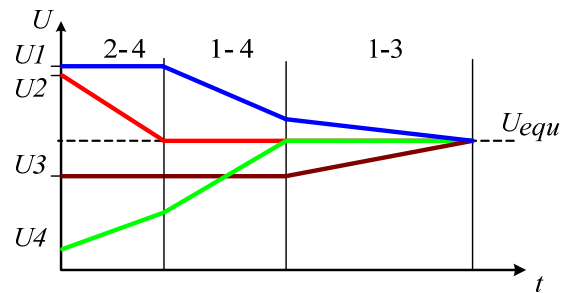


Рис. 5. Эпюры напряжений аккумуляторов на разных этапах балансировки

Система управления схемой активного балансира [18] позволяет вычислить в самом начале процесса балансировки уровень напряжения U_{equ} (рис. 5). Суть балансировки сводится к перераспределению энергии между аккумуляторами, обладающими избыточным зарядом (доноры) и аккумуляторами, с недостаточным зарядом (акцепторы). Таким образом, в системе имеется несколько возможных пар «донор-акцептор». Для каждой пары можно вычислить значение мощности статических потерь в элементах схемы. Применение алгоритма Монжа-Кантаровича [20, 21] для оптимизации процесса балансировки позволяет уменьшить мощность статических потерь в силовых полупроводниковых ключах до 1,7 раза, выбирая на каждом этапе балансировки такие пары, для которых значение мощности потерь минимально. На рис. 6 показаны значения мощности потерь для различных пар «донор-акцептор» для четырех последовательно соединенных аккумуляторов

муляторных батарей. За величину 100 % принято минимально возможное значение мощности потерь на данном этапе балансировки P_{min} .

Количественной мерой целесообразности оптимизации процесса балансировки предлагается использовать условие $(P_{max} / P_{min}) > 110$.

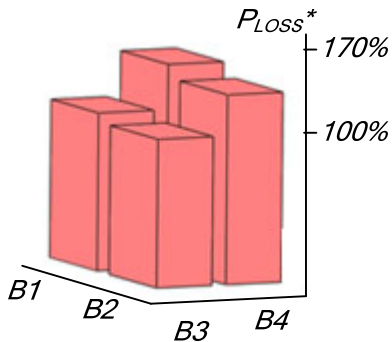


Рис. 6. Значения мощности потерь для различных пар «донор-акцептор»

Результаты эксперимента

Разработана математическая модель двухканального усиливающего пункта согласно структуре рис. 3. В экспериментальной модели проводилась математическая обработка экспериментальных данных полученных на участке Львовской железной дороги (рис. 1).

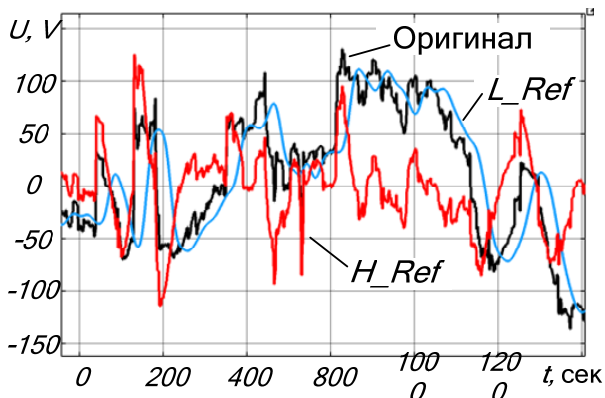


Рис. 6. Машинограммы переменной составляющей исходного сигнала (input), сигналов задания для низкочастотного (L_Ref) и высокочастотного (H_Ref) каналов системы

Результат фрагмента моделирования приведен на рис. 6. Результаты моделирования полностью подтверждают возможность применения одного низкочастотного фильтра для управления как низкочастотным, так и высокочастотным каналами усиливающего пункта. Из

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аржанников, Б.А., 2012. Система управляемого электроснабжения электрифицированных же-

© Сокол Є. І. та ін., 2018

рис. 6 видно, что наличие временного сдвига между входным (Оригинал) и выходным (L_Ref) сигналами фильтра порождает дополнительные пульсации, которые присутствуют в сигнале задания (H_Ref).

Задачей усиливающего пункта является компенсация пульсаций напряжения в линии постоянного тока. Результат работы двухканального усиливающего пункта в соответствии с предложенными алгоритмами управления приведен на рис. 7.

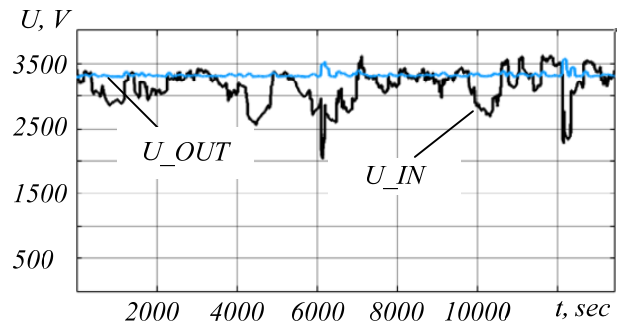


Рис. 7. Результат работы двухканального усиливающего пульсаций напряжения контактно сети с помощью предложенного метода

Выводы

Для подавления пульсаций мощности в системе электроснабжения железной дороги предложено применение двухканальных усиливающих пунктов.

Доказана возможность применения одного ФНЧ для формирования сигналов управления как низкочастотного, так и высокочастотного каналов.

Соотношение установленной мощности низкочастотного и высокочастотного каналов зависит от профиля железной дороги, типа подвижного состава и для рассматриваемой модели составляет 6:1.

Благодарность

Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам кафедры «Интеллектуальные системы электроснабжения» ДНУЖТ им. ак. Лазаряна и лично заведующему кафедрой – В.Г. Сыченко за предоставленные статистические данные и возможность участия в экспериментальных исследованиях.

REFERENCES

1. Arzhannikov, B.A., 2012. Sistema upravlyаемого elektrosnabzheniya elektrifitsirovannyih zhe-

лезных дорог постоянного тока // Монография. — Екатеринбург: УрГУПС, 2010. — 176 с.

2. V. Sychenko. *Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current*. V. Sychenko, D. Bosiy, E. Kosarev // The archives of transport. Volume 35, Issue 3, 2015, p. 63-70.

3. V. Sychenko and others *Research the voltage mode of system dc traction power supply* // Electrification of Transport, No. 11. - 2016.

4. M. H. Rashid "Power electronics handbook : devices, circuits, and applications handbook" 3rd. ed. Elsevier Inc. 2011, 1389 p.

5. Shibin, L. Yutian, C. Barth, L. Wen-Chuen, and R. C. N. Pilawa Podgurski, "Architecture and control of a high energy density buffer for power pulsation decoupling in grid-interfaced applications" in Proc. Of 16th IEEE workshop on Control Model. Power Electron. (COMPEL) 2015, pp. 1-8

6. Neumayr, D. Bortis, J. W. Kolar "Ultra Compact Power Pulsation Buffer for Single-Phase DC/AC Converter Systems" // Proceedings of the 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2016-ECCE Asia), Hefei, China, May 22-25, 2016

7. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," in IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), vol., no., pp.1-50, March 19 2010

8. Development of DC/DC Converter for Battery Energy Storage Supporting Railway DC Feeder Systems. Zhaofeng Li; Shunichiro Hoshina and others. // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016, V.52, p. 4218 – 4224

9. Jingyang Fang; Yi Tang; Hongchang Li; Xiaoqiang Li "A Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System for Implementing the Power Management of Virtual Synchronous Generators". // IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, Vol.33 P.2820 – 2824

10. A. Khaligh and Z. Li, "Battery, ultracapacitor, hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: state of the art" IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 59, DOI 10.1109/TVT.2010.2047877, no. 6, pp. 2806–2814, Jul. 2010.

11. Yevgen Sokol and others. "The specificity of electrical energy storage unit application" // IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017 DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100524

12. V. V. Zamaruiev "The use of the dirichlet kernel in the control systems of active filters for industrial power line" // Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference DOI: 10.1109/ELNANO.2013.6552048

13. E. Romero-Cadaval and M. I. Milanés-Montero, "Cooperative converters in power electronic systems" 2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, 2010, pp. 51-60. doi: 10.1109/BEC.2010.5630917

leznyh dorog postoyannogo toka // Monografiya. — Ekaterinburg: UrGUPS, 2010. — 176 s

2. V. Sychenko. *Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current*. V. Sychenko, D. Bosiy, E. Kosarev // The archives of transport. Volume 35, Issue 3, 2015, p. 63-70.

3. V. Sychenko and others *Research the voltage mode of system dc traction power supply* // Electrification of Transport, No. 11. - 2016.

4. M. H. Rashid "Power electronics handbook : devices, circuits, and applications handbook" 3rd. ed. Elsevier Inc. 2011, 1389 p.

5. Shibin, L. Yutian, C. Barth, L. Wen-Chuen, and R. C. N. Pilawa Podgurski, "Architecture and control of a high energy density buffer for power pulsation decoupling in grid-interfaced applications" in Proc. Of 16th IEEE workshop on Control Model. Power Electron. (COMPEL) 2015, pp. 1-8

6. Neumayr, D. Bortis, J. W. Kolar "Ultra Compact Power Pulsation Buffer for Single-Phase DC/AC Converter Systems" // Proceedings of the 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2016-ECCE Asia), Hefei, China, May 22-25, 2016

7. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," in IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), vol., no., pp.1-50, March 19 2010

8. Development of DC/DC Converter for Battery Energy Storage Supporting Railway DC Feeder Systems. Zhaofeng Li; Shunichiro Hoshina and others. // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016, V.52, p. 4218 – 4224

9. Jingyang Fang; Yi Tang; Hongchang Li; Xiaoqiang Li "A Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System for Implementing the Power Management of Virtual Synchronous Generators". // IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, Vol.33 P.2820 – 2824

10. A. Khaligh and Z. Li, "Battery, ultracapacitor, hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: state of the art" IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 59, DOI 10.1109/TVT.2010.2047877, no. 6, pp. 2806–2814, Jul. 2010.

11. Yevgen Sokol and others. "The specificity of electrical energy storage unit application" // IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017 DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100524

12. V. V. Zamaruiev "The use of the dirichlet kernel in the control systems of active filters for industrial power line" // Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference DOI: 10.1109/ELNANO.2013.6552048

13. E. Romero-Cadaval and M. I. Milanés-Montero, "Cooperative converters in power electronic systems" 2010 12th Biennial Baltic Electronics Conference, Tallinn, 2010, pp. 51-60. doi: 10.1109/BEC.2010.5630917

14. D. W. Tufts, D. W. Rorabacher, W. E. Mosier,

14. D. W. Tufts, D. W. Rorabacher, W. E. Mosier, "Designingsimple effective digital filters", IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. AU-18, pp. 142-158, June 1970.

15. V. Ivakhno, V. Zamaruiev, B. Styslo "Bidirectional isolated ZVS DC-DC converter with auxiliary active switch for high-power energy storage applications" IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017 DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100315

16. Kosenko, R.; Husev, O.; Chub, A., "Full Soft-Switching High Step-Up Current-Fed DC-DC Converters with Reduced Conduction Losses", IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), pp. 1-6, May, 2015.

17. Chub, A.; Kosenko, R.; Blinov, A.; Ivakhno, V.; Zamaruiev, V.; Styslo, B., "Full soft-switching bidirectional current-fed DC-DC converter", 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), pp.1-6, 14-14 Oct. 2015.

18. Ye. Sokol, B. Styslo "Активний балансир" // Патент на корисну модель UA 117731U (10.07.17., Бюл. #13)

19. Kantorovich L. *On the translocation of masses* // C. R. Acad. Sci. URSS (N. S.), 37:199-201, 1942.

20. Monge G. *Mémoire sur la théorie des déblais et de remblais. Histoire de l'Académie Royale des Sciences de Paris, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique pour la même année, pages 666—704, 1781.*

"Designingsimple effective digital filters", IEEE Trans. Audio Electroacoust., vol. AU-18, pp. 142-158, June 1970.

15. V. Ivakhno, V. Zamaruiev, B. Styslo "Bidirectional isolated ZVS DC-DC converter with auxiliary active switch for high-power energy storage applications" IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2017 DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100315

16. Kosenko, R.; Husev, O.; Chub, A., "Full Soft-Switching High Step-Up Current-Fed DC-DC Converters with Reduced Conduction Losses", IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), pp. 1-6, May, 2015.

17. Chub, A.; Kosenko, R.; Blinov, A.; Ivakhno, V.; Zamaruiev, V.; Styslo, B., "Full soft-switching bidirectional current-fed DC-DC converter", 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), pp.1-6, 14-14 Oct. 2015.

18. Ye. Sokol, B. Styslo "Активний балансир" // Patent na korysnu model UA 117731U (10.07.17., Bul. #13)

19. Ye. Sokol, B. Styslo "Активний балансир" // Patent na korysnu model UA 117731U (10.07.17., Bul. #13)

Monge G. *Mémoire sur la théorie des déblais et de remblais. Histoire de l'Académie Royale des Sciences de Paris, avec les Mémoires de Mathématique et de Physique pour la même année, pages 666—704, 1781.*

20. Kantorovich L. *On the translocation of masses* // C. R. Acad. Sci. URSS (N. S.), 37:199-201, 1942

Ппульсуючий характер потребляемой мощности в сети электроснабжения железной дороги является причиной появления пульсаций напряжения в контактной сети. Это приводит к снижению эффективности энергосистемы. Для компенсации пульсаций мощности в сети электроснабжения железной дороги предлагается использование гибридных накопителей электрической энергии. Предложено применение двухканальных усиливающих пунктов с соответствующей системой управления. В основу математической модели положены данные реальных измерений.

Ключевые слова: железная дорога, качество электрической энергии, БСНЭ, двухканальный усиливающий пункт, распределенная система энергоснабжения, ФНЧ, разделенная коммутация, балансировка аккумуляторов, энергоэффективность.

УДК 621.3

Є. І. СОКОЛ, В. В. ЗАМАРУЄВ, В. В. ІВАХНО, Б. О. СТИСЛО (НТУ «ХП»)

Кафедра «Промислова і біомедична електроніка», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002, тел. +38 (057) 70-76-044, e-mail: bohdanstyslo@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-7057-3523

ЗАСТОСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ ПІДСИЛЮЮЧИХ ПУНКТІВ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Ппульсуючий характер споживаної потужності в мережі електропостачання залізниці є причиною появи пульсацій напруги в контактній мережі. Це призводить до зниження ефективності енергосистеми. Для компенсації пульсацій потужності в мережі електропостачання залізниці пропонується використання гібридних накопичувачів електричної енергії. Запропоновано застосування двоканальних підсилюючих пунктів з відповідною системою керування. В основу математичної моделі покладено дані реальних вимірів.

Ключові слова: залізниця, якість електричної енергії, БСНЭ, двоканальний підсилює пункт, розбраті-поділена система електропостачання, ФНЧ, розділена комутація, балансування аккумуляторів, енергоефективність.

UDC 621.3

Ye. I. SOKOL, V. V. ZAMARUIEV, V. V. IVAKHNO, B. O. STYSLO (NTU "KHPI")

Department «Industrial and biomedical electronic» of National Technical University "Kharkiv polytechnic institute", Kyrpychova Str., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002, tel. +38 (057) 70-76-044,
e-mail: bohdanstyslo@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-7057-3523

**THE USE OF ACCUMULATOR POWER STATION IN THE RAILWAY
TRANSPORT POWER SUPPLY SYSTEM**

The pulsating mode of the power consumption in the railroad power supply network is the cause of the occurrence of voltage pulsations in the contact network. This leads to a decrease in the efficiency of the energy system. To compensate power fluctuations in the electric power supply network of the railway, it is proposed to use hybrid electric energy storage devices. The use of two-channel additional traction power station with an appropriate control system was proposed. The basis of the mathematical model is the data of real measurements.

Keywords: railway, power quality, BESS, two channel power station, distributed energy system, low-pass filter, separated commutation, cell equalizing, power efficiency.

Received 19.02.2018; accepted in revised form 29.03.2018.

О. І. СТАСЮК, О. С. ГАЙДЕНКО, Л. Л. ГОНЧАРОВА (ДУІТ)

Державний університет інфраструктури та технологій, кафедра «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту», вул. І. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049

ел. пошта: x177@rambler.ru, haidenko121@gmail.com, ktarael@yandex.ru;

ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680; orcid.org/0000-0002-0113-4479

ДИФЕРЕНЦІЙНІ МОДЕЛІ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВНІ МЕТОДИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ

Вступ

У процесі розвитку сучасних інформаційних і мережевих технологій, а також інтегральних технологій виготовлення надвеликих інтегральних схем і мікропроцесорних комплектів з'явилася реальна можливість створення необхідної, а в деяких випадках, навіть надлишкової потужності обчислювальних процесів в будь-яких точках і сегментах розподіленого комп'ютерного середовища, що реалізує керування в реальному часі складними енергетичними об'єктами [1-3]. Потреба у використанні досягнень у сфері організації високопродуктивних обчислювальних процесів реалізованих на основі сучасних архітектур комп'ютерних систем і мереж, відкрили широкі можливості розв'язання комплексної проблеми оптимізації процедур оперативного і стратегічного керування системами електропостачання залізниць і створили перспективи організації енергозберігаючих технологій та формування широкого спектру додаткових послуг у ринкових умовах [2, 4]. З'явилася нагальна потреба в створенні комп'ютерних мереж керування електропостачанням на тягу, в яких реалізується не лише реєстрація і представлення інформації про режими функціонування енергосистеми, а і, завдяки надлишковості обчислювальної потужності, можливість виконувати ряд достатньо складних процедур, пов'язаних із проведенням попереднього аналізу, оцінки та прогнозу технічного стану системи, реалізувати для споживачів інформації деякі рекомендації про розвиток аномальних ситуацій, тобто виконувати набір рутинних операцій, а також визначення попередніх інтегральних оцінок системи електропостачання. У подібних комп'ютерних системах отримало відображення у вигляді взаємointegraції інтелектуальних ресурсів управління в умовах слабо обумовлених і не повністю структурованих задач і великих можливостей в сфері продуктивності комп'ютерних обчислень як основи суттєвого покращення якості рішень, що

приймаються в сфері керування. Подальший розвиток комп'ютерних мереж керування системою енергетики привів до появи нового наукового напрямку досліджень, пов'язаного зі створенням інтелектуальних комп'ютерних мереж та інтелектуальних систем електропостачання [5,7]. Інтелектуальна система представляє собою апаратно-програмну організацію комп'ютерного середовища, яке забезпечує розв'язання складних математичних та логічних задач, завдяки чому відкриває можливість автоматизувати ряд окремих інтелектуальних дій людини, тобто здатних вирішувати спектр задач, які відносяться до класу традиційно творчих і належать до конкретної предметної області, знання про яку зберігаються в пам'яті системи [8,10]. Домінуючою особливістю інтелектуальних систем є те, що вони орієнтовані на формування і накопичення нових знань у відповідній предметній області як основи оптимального керування, мінімізації загальносистемних витрат і створення енергозберігаючих технологій.

Постановка задачі

Широкий спектр позитивних особливостей інтелектуальних комп'ютерних мереж керування електропостачанням, включаючи додаткові функціональні можливості, став основою розв'язання загальносистемної проблеми інноваційного перетворення тягових електричних мереж залізниць [1, 4]. Аналіз еволюції розвитку тягових систем електропостачання і сучасних публікацій показав, що формування процедур інтелектуалізації управління швидкоплинними технологічними процесами електропостачання на тягу може бути реалізовано шляхом організації моделі інтелектуалізації на основі глибокої взаємointegraції топології системи електропостачання і архітектури розподіленої комп'ютерної мережі керування, базуючись на принципах єдиного інформаційного простору, самовідновлення, саморегуляції, що в сукупності

ті представляє самоконтролюючу, аналізуючу та звітуючу інтелектуальну технологію [5, 10]. Концепція розумної енергетики передбачає інтелектуальну взаємодію широкого спектру таких показників як ціноутворення, ефективність використання енергоресурсів, технологічних процесів електропостачання і набуває широкого розвитку завдяки тому, що в ній відображається якісно новий рівень ефективності енергоспоживання. Напрямок наукових досліджень, пов'язаний із інтелектуалізацією енергетичних об'єктів і систем, базується на загальноновизнаних у світі технологіях SMART Grid, перспективність яких обумовлюється створенням нової моделі інтелектуалізації тягових електричних мереж, що передбачає інтеграцію сучасних наукових, інженерних та організаційних рішень у сфері комп'ютерних, мережевих та інтелектуальних технологій [1, 9]. Створення комп'ютерних мереж керування електропостачанням з інтелектуальними властивостями передбачає проведення суттєвих наукових досліджень і пошук нових шляхів синтезу обчислювальних архітектур обробки первинних багатоаспектних інформаційних даних на основі розробки сучасних математичних моделей, методів та комп'ютерно орієнтованих алгоритмів, особливість яких відкриває можливість виявляти і накопичувати нові знання про режими функціонування енергосистем, створювати нові технології енергозбереження та покращити рівень безпеки перевізного процесу. Такий підхід дозволить різко підвищити ефективність тягових мереж, реалізувати інтегральну тарифікацію та мінімізувати загальносистемні витрати.

Оскільки домінуючою функцією інтелектуальних систем є формування і накопичення нових знань у відповідній предметній області, то цей факт стимулював появу великого числа підходів до їх створення, а також більш глибокого розуміння комплексу завдань, вирішення яких необхідне в процесі управління складним енергетичним об'єктом. У результаті проведених досліджень у сфері розробки інтелектуальних систем можна виділити два основних підходи. Перший напрямок базується на синтезі сегментів інтелектуальних систем, таких як створення експертних систем, баз знань із системами логічного виводу, що імітують процеси творчості, мислення, емоцій. Другий напрямок пов'язаний із розробкою інтелектуальних комп'ютерних засобів моделювання на основі нечіткої логіки, нейронних і еволюційних обчислюваннях, генетичних алгоритмах і штучному інтелекті, що відкривають можливість автоматизувати окремі інтелек-

туальні дії людини на основі створення обчислювальних мереж таких як нейрокомп'ютер і біокомп'ютер [1, 2, 7].

У той же час результати дослідження методів та інтелектуальних мереж керування системами електропостачання показали, що для формування нових знань у сфері залізничної енергетики недостатньо досліджена проблема визначення всієї глибини інформативності зареєстрованої багатоаспектної первинної інформації, яка відображає динаміку швидкоплинних технологічних процесів постачання електроенергії, а також штатні, аномальні та аварійні режими, що протікають у системі електропостачання [1-3]. Неповнота інформативності отриманих первинних даних, що залежить від способів реєстрації первинної інформації та якості синхронізації вимірів у різних сегментах енергосистеми, є домінуючою в процесі визначення, формування і адекватності нових знань. Тому створення нових математичних моделей і методів підвищеної інтелектуальної складності та розмірності, орієнтованих на суттєве підвищення рівня інформативності зареєстрованої первинної інформації, що відображає стан енергетичних об'єктів, орієнтованих на формування та накопичування нових знань у залізничній енергетиці, як основи створення нових технологій енергозбереження та покращення безпеки швидкісних перевезень, є дуже актуальним.

Мета роботи – розробка диференціальних математичних моделей і комп'ютерно орієнтованих методів інтелектуалізації процесів визначення інформативності параметрів режимів інтелектуальних мереж електропостачання залізниць, орієнтованих на формування та накопичення нових знань у залізничній енергетиці як основи оптимізації електропостачання, споживання, енергозбереження та безпеки руху.

Диференціальні математичні моделі

Організацію математичних моделей і методів підвищеної інтелектуальної складності та розмірності розглянемо на прикладі динаміки струму або напруги аномальних режимів, що з'являються в процесі постачання електроенергії на тягу. Як показано на рис.1 а, аномальний чи аварійний процес постачання електроенергії залізницям може бути представлений сукупністю m миттєвих значень струму $i(t_0), i(t_1), i(t_2), \dots, i(t_j), \dots, i(t_m)$, та, відповідно, напруги $u(t_0), u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_j), \dots, u(t_m)$, на всьому інтервалі нестационарного процесу.

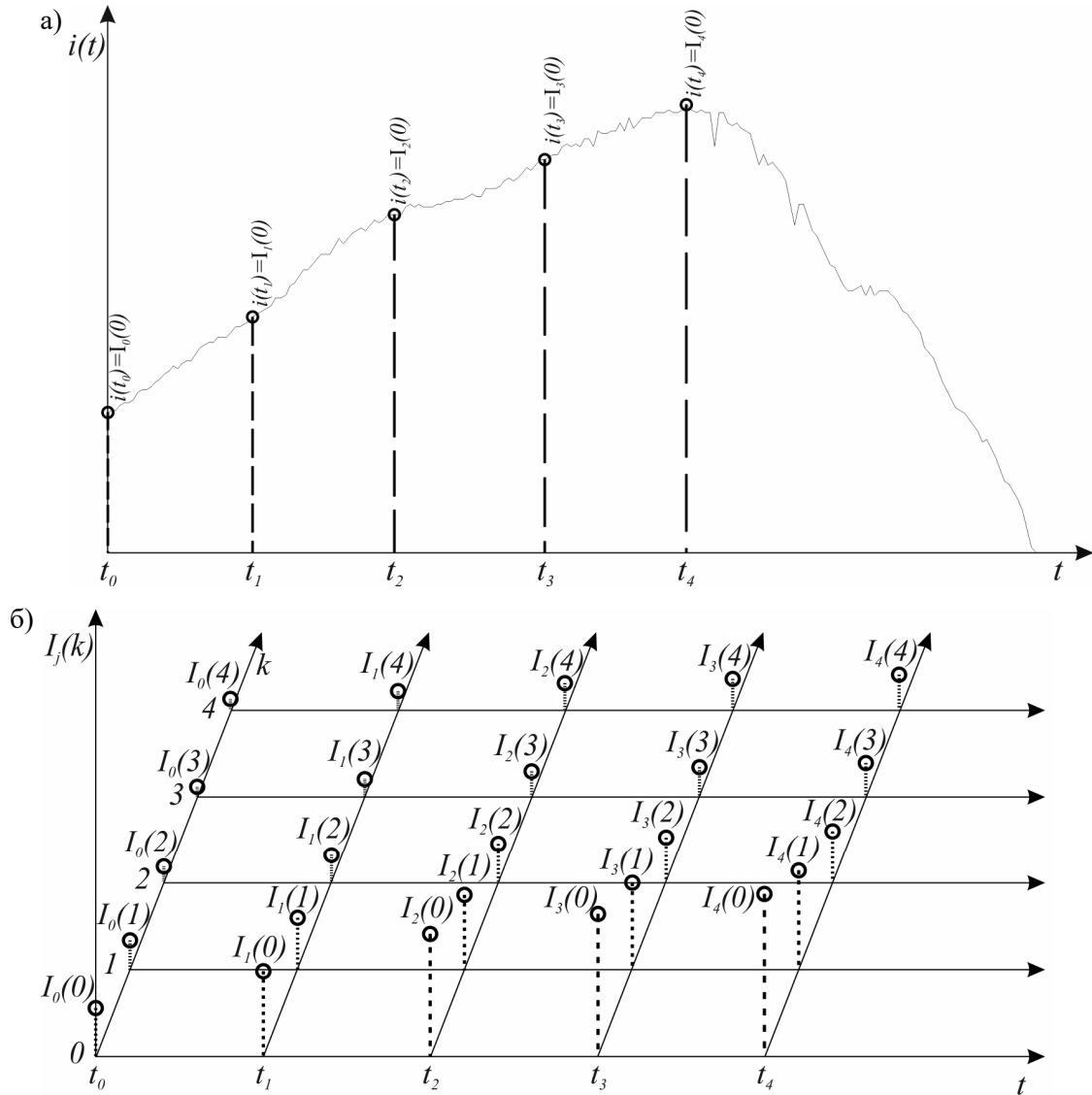


Рис. 1. Аномальний режим системи електропостачання

Зареєстровані багатоаспектні первинні дані
 $i(t_0), i(t_1), i(t_2), \dots, i(t_j), \dots, i(t_m),$
 $u(t_0), u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_j), \dots, u(t_m)$

і ряд інших, у сукупності представляють набір параметрів режимів аварійного процесу, які відображають стан системи електропостачання та силового електричного обладнання тягових підстанцій.

Синтез диференціальних математичних моделей інтелектуалізації процесів визначення інформативності параметрів режимів енергосистем реалізуємо на основі теорії диференційних перетворень Пухова, фундаментальні положення якої можна, представити у вигляді наступної пари перетворень [8]

$$I_0(k) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k i(t)}{dt^k} \right]_{t=t_0} \quad \stackrel{\text{T}}{=} \quad i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k I_0(k), \quad t_0 = 0, \quad (1)$$

де $i(t)$ – первинна функція аргументу t , яка може бути n – раз диференційована та має відповідні обмеження разом із усіма своїми похідними; $I_j(k)$ – зображення функції – оригіналу $i(t)$, яке представляє собою дискретну функцію $I_j(k)$ цілочислового аргументу

$k = 0, 1, 2, \dots, j = 0, 1, \dots, m$; H – масштабний коефіцієнт, який має ту ж розмірність, що й аргумент t і, в більшості випадків, вибирається з умов $0 \leq t \leq H$, тобто на всьому діапазоні функції-оригіналу $i(t)$; $\stackrel{\text{T}}{=}$ – символ, що характеризує відповідність між оригіналом $i(t)$ і його диференціальним Т-зображенням $I_j(k)$,

($k = 0, 1, 2, \dots$). У математичній залежності (1) вираз, що знаходиться ліворуч від символу Ξ представляє собою пряме диференційне перетворення. Завдяки прямому диференційному перетворенню, на основі функції-оригіналу $i(t)$, формується Т-зображення дискретної функції $I_j(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, \dots$. Праворуч математичної залежності (1) – записано математичний вираз, що дозволяє за значенням Т-дискрет функції цілочислового аргументу

$I_j(k)$ $k = 0, 1, 2, \dots$ одержати функцію-оригінал $i(t)$.

Необхідно звернути увагу, що при $k = 0$ згідно (1), для будь-якого миттєвого значення t_j кожного j -го параметру $i(t_j)$ виконується відповідна рівність $i(t_j) = I_j^i(0)$. Для формування диференціальних математичної моделі скористуємося зворотним диференційним перетворенням і для кожного дискретного значення аргументу аномально-го параметру (рис.1.а) $t_0, t_1, t_2, \dots, t_m$ сформуємо систему диференціальних рівнянь виду

$$\begin{aligned} I_0(1) \cdot \frac{t_{j+1}}{H} + I_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+1}}{H}\right)^2 + I_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+1}}{H}\right)^3 + I_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+1}}{H}\right)^4 &= i(t_{0+1}) - I_0(0) \\ I_0(1) \cdot \frac{t_{j+2}}{H} + I_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+2}}{H}\right)^2 + I_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+2}}{H}\right)^3 + I_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+2}}{H}\right)^4 &= i(t_{0+2}) - I_0(0) \\ I_0(1) \cdot \frac{t_{j+3}}{H} + I_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+3}}{H}\right)^2 + I_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+3}}{H}\right)^3 + I_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+3}}{H}\right)^4 &= i(t_{0+3}) - I_0(0) \\ I_0(1) \cdot \frac{t_{j+4}}{H} + I_0(2) \cdot \left(\frac{t_{j+4}}{H}\right)^2 + I_0(3) \cdot \left(\frac{t_{j+4}}{H}\right)^3 + I_0(4) \cdot \left(\frac{t_{j+4}}{H}\right)^4 &= i(t_{0+4}) - I_0(0). \end{aligned} \tag{2}$$

На основі прямого диференційного перетворення $I_0(k) = \frac{H^k}{K!} \left[\frac{d^k i(t)}{dt^k} \right]_{t=t_0}$, згідно виразу (1), мають місце наступні рівності $i(t_0) = I_0(0)$, $i(t_1) = I_1(0)$, \dots , $i(t_j) = I_j(0)$, \dots , $i(t_m) = I_m(0)$, використавши які та розв'язавши систему алгебраїчних рівнянь (2) у випадку, коли $j = 0$ отримаємо наступну сукупність Т-дискрет $I_0(0), I_0(1), I_0(2), I_0(3), I_0(4)$ функції $I_0(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, \dots$, що є зображенням $i(t_0)$ в точці (t_0) . На основі аналізу отриманих результатів $I_0(0), I_0(1), I_0(2), I_0(3), I_0(4)$ можна звернути увагу на те, що функція $i(t)$ представлена в точці (t_0) (рис.1.б) є не лише величиною її миттєвого значення $i(t_0) = I_0(0)$, а і сукупністю Т-дискрет $I_0(1), I_0(2), \dots, I_0(k)$, кожна k із яких еквівалентна k -похідній функції $i(t)$ в

цій же точці t_0 . Таким чином, повна інформативність зареєстрованих первинних даних визначається завдяки тому, що при їх обробці використовуються не лише миттєві значення параметрів у точках t_j , а також і значення n похідних у цих же точках. Подібна процедура інтелектуалізації процесів визначення інформативності параметрів режимів інтелектуальних мереж електропостачання залізниць дозволяє ліквідувати дефіцит зареєстрованої первинної інформації, що відображає швидкоплинні технологічні процеси електропостачання і є основою формування і накопичення нових знань у сфері оптимізації та енергозбереження залізничних енергосистем.

На основі виразів (1), (2), поступаючи аналогічно вищеописаному, синтезуємо математичну модель для визначення сукупності диференціальних спектрів в кожній точці t_1, t_2, \dots, t_m перехідного процесу, представлену у вигляді

$$A_j I_j'(k) = F_j, \tag{3}$$

де $A_j = \begin{matrix} \frac{\tau_j}{H} & \left(\frac{\tau_j}{H}\right)^2 & \cdot & \left(\frac{\tau_j}{H}\right)^n \\ \frac{\tau_{j+1}}{H} & \left(\frac{\tau_{j+1}}{H}\right)^2 & \cdot & \left(\frac{\tau_{j+1}}{H}\right)^n \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{\tau_{j+n}}{H} & \left(\frac{\tau_{j+n}}{H}\right)^2 & \cdot & \left(\frac{\tau_{j+n}}{H}\right)^n \end{matrix}$ – матриця, яка формується відомим способом, враховуючи, що $\tau_j = t_j - t_{j-1}$;

$F_j = \begin{bmatrix} i(t_{j+1}) - I_j(0) & i(t_{j+2}) - I_j(0) & \cdot & i(t_{j+n}) - I_j(0) \end{bmatrix}'$ – вектор правих частин;

$I_j'(k) = \begin{bmatrix} I_j(0) & I_j(1) & I_j(2) & \cdot & I_j(n) \end{bmatrix}'$ – вектор невідомих величин, компоненти якого представляють собою диференційний спектр в точці j .

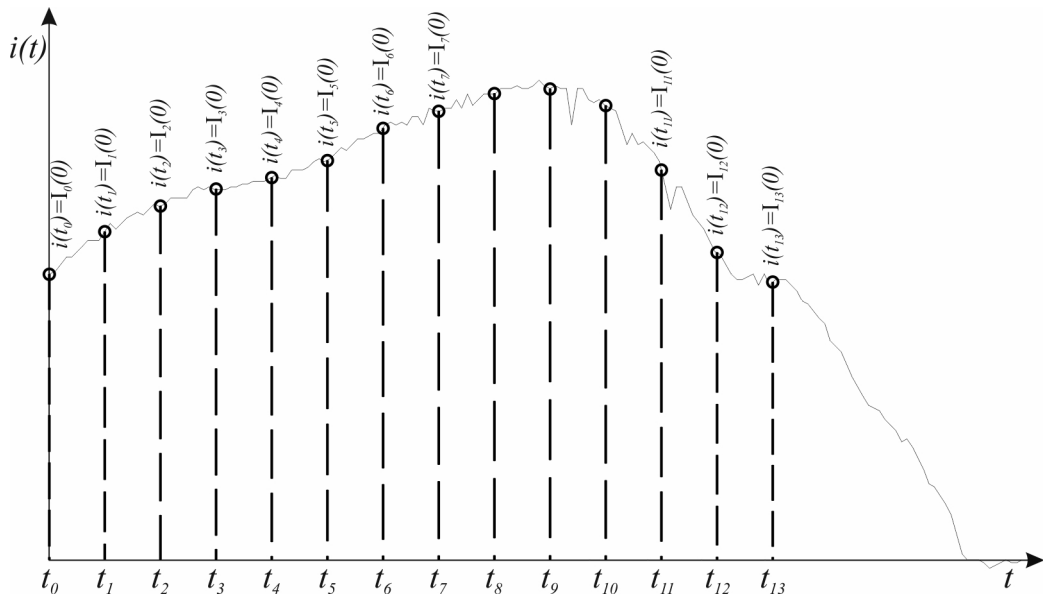


Рис. 2. Графік зміни струму після реєстрації аварійного режиму на тяговій підстанції Любінь Великий

Для формування диференційних спектрів використаємо набір миттєвих значень струму аварійного режиму в точках $t_0, t_1, t_2, \dots, t_j$ і представимо їх у табличній формі для перших m точок у вигляді

Таблиця 1

j	t_j , мс	$I(t_j)$, кА	j	t_j , мс	$I(t_j)$, кА
0	0	1.507	7	14	2.289
1	2	1.703	8	16	2.345
2	4	1.801	9	18	2.345
3	6	1.856	10	20	2.163
4	8	1.94	11	22	1.856
5	10	2.038	12	24	1.424
6	12	2.177	13	26	1.396

На основі математичної моделі (3) рішення відповідної системи рівнянь для кожної точки $t_0, t_1, t_2, \dots, t_j$ миттєвих значень параметру аварійного режиму, отримаємо сукупність диференційних спектрів представлених у сфері диференційних зображень в табличній формі (табл. 2).

На рис.3 наведено декілька графіків диференційних спектрів представлених у вигляді функцій $I_j(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Таблиця 2 – Сукупність диференційних спектрів

j	$I_j(0)$, кА	$I_j(1)$, кА	$I_j(2)$, кА	$I_j(3)$, кА	$I_j(4)$, кА
0	1.507	0.13	-0.017	6.146×10^{-4}	4.427×10^{-5}
1	1.703	0.045	-0.011	1.656×10^{-3}	-7.031×10^{-5}
2	1.801	-0.059	0.02	-1.831×10^{-3}	6.649×10^{-5}
3	1.856	0.093	-0.03	3.37×10^{-3}	-1.088×10^{-4}
4	1.94	-0.111	0.018	-5.79×10^{-4}	-4.836×10^{-7}
5	2.038	-0.228	0.04	-2.119×10^{-3}	3.532×10^{-5}
6	2.177	0.325	-0.068	4.742×10^{-3}	-1.083×10^{-4}
7	2.289	-0.924	0.14	-6.811×10^{-3}	1.052×10^{-4}
8	2.345	-0.265	0.04	-1.762×10^{-3}	2.098×10^{-5}
9	2.345	-4.673	0.644	-0.029	4.384×10^{-4}

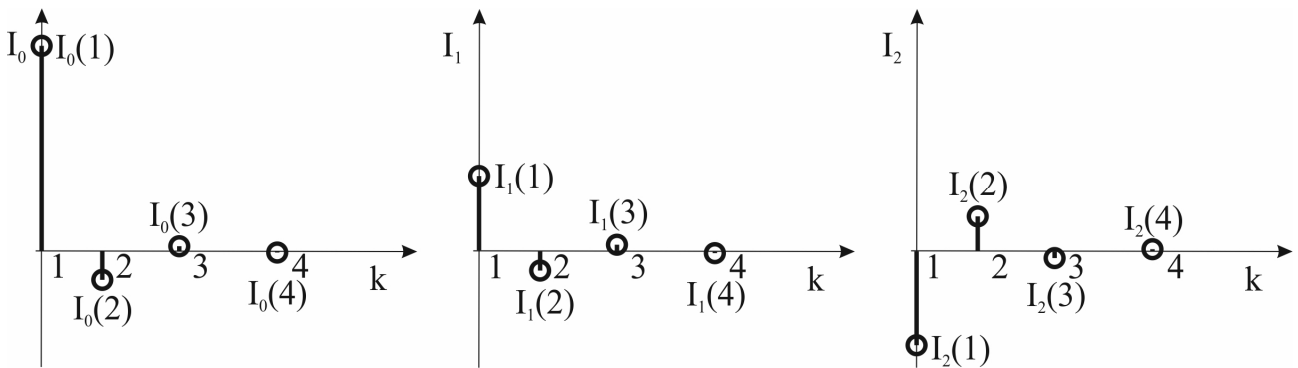


Рис.3. Графіки функцій $I_j(k)$ цілочислового аргументу $k = 0,1,2,3,4$

Отримані диференційні спектри є основою синтезу математичних методів підвищеної інтелектуальної складності, орієнтованих для визначення повної інформативності зареєстрованих багатоаспектних первинних даних аварійного режиму, що з'явився в процесі постачання електроенергії на тягу.

В інженерній практиці великою популярністю користуються інтегральні перетворення Фур'є з безкінечними та скінченими границями. В залізничній енергетиці дуже важливим є визначення комплексу перших гармонік аномального процесу, оскільки окремі із них мають великий вплив на надійність роботи залізничної автоматики, а в сукупності визначають якість електропостачання. В цьому плані розглянемо способи організації обчислювального процесу визначення гармонічних складових аварійного режиму енергосистеми на основі диференційних спектрів $I_0(0), I_0(1), \dots, I_0(k); I_1(0), I_1(1), \dots, I_1(k); I_m(0), I_m(1), \dots, I_m(k)$, що відображають зареєстровану первинну інфор-

мацію. Напишемо пряме перетворення Фур'є на кінцевому проміжку $(0, T)$

$$i(t) = \frac{1}{j^2} \sum_{\gamma=-\infty}^{\gamma=+\infty} e^{j\gamma\omega t} \dot{I}_\gamma, \quad (4)$$

де \dot{I}_γ – комплексна амплітуда γ -гармоніки струму, причому $\dot{I}_\gamma = I_\gamma e^{j\gamma\omega t}; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}; j^2 = -1$.

Оскільки $i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H}\right)^k I(k)$, то підставивши $i(t)$ у вираз (4), отримаємо наступну математичну залежність

$$\dot{I}_\gamma = \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{I(k)}{H^k} \left(\frac{j^2 T}{T} \int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt \right). \quad (5)$$

Значення інтегралу в математичній залежності (5) визначається наступним чином

$$\int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt = \frac{k!(-1)^k}{(-j\gamma\omega)^{k+1}} \left(1 - \sum_{m=0}^{m=k} \frac{(-j\gamma\omega T)^m}{m!} \right). \quad (6)$$

Підставивши значення інтегралу (6) в (5) та реалізувавши ряд перетворень, отримаємо математичну залежність формування з Т-спектру $I(k)$ значення \dot{I}_γ , тобто на основі спектру функції $I(k)$ цілочислового аргументу $k = 0, 1, 2, \dots$ визначимо сукупність комплексних амплітуд \dot{I}_γ γ -гармонік

$$\dot{I}_\gamma = \frac{1}{\pi\gamma} \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{k!}{(j\gamma\omega H)^k} \left[\sum_{m=0}^{m=k} \left(\frac{T}{H} \right)^m \frac{(-j\gamma\omega H)^m}{m!} - 1 \right] I(k). \quad (7)$$

Для формування математичної залежності визначення Т-спектра $I(k)$ на основі комплексних амплітуд \dot{I}_γ підставимо у вираз

$$I(k) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k i(t)}{dt^k} \right]_{t=t_0} \quad \text{значення оригіналу}$$

$$i(t) = \frac{1}{j^2} \sum_{\gamma=-\infty}^{\gamma=+\infty} e^{j\gamma\omega t} \dot{I}_\gamma \quad i, \text{ реалізувавши ряд пере-}$$

творень, отримаємо наступну математичну залежність

$$I(k) = \frac{1}{j^2} \sum_{\gamma=-\infty}^{\gamma=+\infty} \frac{(j\gamma\omega H)^k}{k!} \dot{I}_\gamma. \quad (8)$$

Відмітимо, що при $\gamma = 0$, формула (7) дає невизначеність, розкривши яку вираз (7) представляється в наступному вигляді

$$\dot{I}_0 = I^2 \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{T}{H} \right)^k \frac{1}{k+1} I(k). \quad (9)$$

Таким чином, на основі математичного апарату диференційних перетворень став можливим синтез математичних моделей і методів з

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стасюк О. І. Математичні диференційні моделі і методи оцінки кібербезпеки інтелектуальних комп'ютерних мереж керування технологічними процесами електропостачання залізниць // Стасюк О. І., Гришук Р. В., Гончарова Л. Л., Кібернетика і системний аналіз, ISSN 1019-5262. Київ – 2018, том 54, № 4 – С 107-116.

2. Стасюк О. І. Математичні моделі комп'ютерної інтелектуалізації технологій синхронних векторних вимірів параметрів електричних мереж // Стасюк О. І., Гончарова Л. Л., Кібернетика і системний аналіз, Київ-2016, том 52, №5 – С 41-49. ISSN 0023-1274.

3. Стасюк О. І. Диференційні математичні мо-

інтелектуальними властивостями для формування нових знань про штатні та нештатні режими функціонування систем електропостачання, як основи оптимізації електроспоживання та енергозбереження.

Висновки

1. Аналіз еволюції систем електропостачання і тягових мереж залізниць дозволи зробити висновок, що перспективним є напрямок наукових досліджень пов'язаних зі створенням інтелектуальних комп'ютерних мереж та інтелектуальних систем електропостачання, який базується на загальноновизнаних у світі SMART Grid технологіях, які реалізуються шляхом створення нової моделі інтелектуалізації мереж електропостачання, домінуючою особливістю якої є формування і накопичення нових знань у відповідній предметній області.

2. Запропоновано диференційні математичні моделі підвищеної інтелектуальної складності та розмірності визначення повної інформативності зареєстрованих первинних даних динамічних процесів аномальних і аварійних режимів систем електропостачання як основу формування нових знань у сфері енергопостачання для оптимізації процедур електроспоживання і створення інтелектуальних енергозберігаючих технологій.

3. Базуючись на концепції розумної енергетики, розроблено методи інтелектуалізації процедур гармонічного аналізу первинної інформації, представлені в області диференційних зображень у вигляді диференційних спектрів для визначення окремих гармонічних складових і їх особливостей, аномальних та динамічних режимів системи електропостачання, що відкриває додаткові можливості розв'язання загальносистемної проблеми інноваційного перетворення тягових електричних мереж залізниць.

REFERENCES

1. Stasiuk O. I., Hryshchuk R. V., Honcharova L. L. Matematychni dyferentsiini modeli i metody otsinky kibernetiky intelektualnykh kompiuternykh merezh keruvannya tekhnolohichnymy protsesamy elektropostachannia zaliznyts [Mathematical differential models and methods of estimation of cybersecurity of intelligent computer networks control of technological processes railways electric power supply]. *Kybernetyka i systemnyi analiz – Cybernetics and system analysis*, ISSN 1019-5262. Kyiv – 2018, Volume 54, No. 4 – P 107-116.

2. Stasiuk O. I., Honcharova L. L. Matematychni modeli kompiuternoї intelektualizatsii tekhnolohii synkhronnykh vektornykh vymiriv parametriv elektrychnykh merezh [Mathematical models of computer intellectualization tech-

делі дослідження комп'ютерної архітектури всережимої системи керування дистанції електропостачання залізниць // Стасюк О. І., Гончарова Л. Л., Кібернетика і системний аналіз, Київ-2017, том 53, № 1 – С 1-8. ISSN 0023-1274.

4. Стасюк О. І. Математичні моделі і методи аналізу комп'ютерних мереж керування електропостачанням залізниць // Стасюк О. І., Гончарова Л. Л., Кібернетика і системний аналіз, ISSN 1019-5262. Київ, 2018, том 54, № 1- С 134-145.

5. Стасюк О. І. Дифференциальные математические модели компьютерного исследования аномальных и переходных режимов систем электроснабжения железных дорог // Стасюк О. І., Гончарова Л. Л., Проблемы управления и автоматизации, ISSN 0572-2691. Киев-2018, №1 – С 99-112.

6. Стасюк О. І. Математичні моделі і методи аналізу комп'ютерних мереж керування електропостачанням тяговими підстанціями залізниць // Стасюк О. І., Гончарова Л. Л., Проблемы управления и автоматизации, ISSN 0572-2691. Киев-2017, № 1 – С 93-101.

7. Стасюк О. І. Методы оценки кибербезопасности распределенных компьютерных сетей управления электропотреблением дистанций электроснабжения // Стасюк О. І., Гончарова Л. Л., Голуб Г. М., Проблемы управления и информатики, 2017, №4, – С 119-127. ISSN 0572-2691.

8. Стасюк О. І. Математична модель кібербезпеки комп'ютерної мережі керування електропостачанням тягових підстанцій // Стасюк О. І., Гришук Р. В., Гончарова Л. Л., Кібернетика і системний аналіз, ISSN 0023-1274. Київ-2017. Том 53, № 3 – С – 170-179.

9. Пухов Г. Е. Преобразования Тейлора и их применение в электротехнике и электронике. Київ: Наук. думка, 1978. 259 с.

10. Буткевич О. Ф. Підвищення надійності моніторингу допустимості завантажень контрольованих перетинів енергосистем // Буткевич О. Ф., Левконюк А. В., Стасюк О. І. Технічна електродинаміка. 2014. № 2. С. 56–67

Ключові слова: диференційні моделі, диференційні перетворення, методи, інтелектуалізація, процес, оптимізація, гармонічний аналіз, інформативність, електричні мережі.

Ключевые слова: дифференциальные модели, дифференциальные преобразования, методы, интеллектуализация, процесс, оптимизация, гармонический анализ, информативность, электрические сети.

Keywords: differential models, differential transformations, methods, intellectualization, process, optimization, harmonic analysis, informativeness, electric networks.

nologies synchronous vector measurements of electrical parameters]. *Kibernetika i systemnyi analiz – Cybernetics and system analysis*, Kyiv – 2016, Volume 52, No. 5 – P 41-49. ISSN 0023-1274.

3. Stasiuk O. I., Honcharova L. L. Dyferentsiini matematychni modeli doslidzhennia kompiuternoї arkhitektury vserezhyimnoi systemy keruvannia dystantsii elektropostachannia zaliznyts [Differential mathematical models of research computer architecture of the interconnected control system of railways electric power supply]. *Kibernetika i systemnyi analiz – Cybernetics and system analysis*, Kyiv – 2017, Volume 53, No. 1 – P 1-8. ISSN 0023-1274.

4. Stasiuk O. I., Honcharova L. L. Matematychni modeli i metody analizu kompiuternykh mrezh keruvannia elektropostachanniam zaliznyts [Mathematical models and methods of computer networks of railways electric power supply analysis]. *Kibernetika i systemnyi analiz – Cybernetics and system analysis*, Kyiv – 2018, Volume 54, No. 1 – P 134-145. ISSN 1019-5262.

5. Stasiuk O. I., Honcharova L. L. Dyfferentsyalnye matematycheskye modely kompiuternoho issledovaniya anomalnykh i perekhodnykh rezhymov system elektrosnabzheniya zheleznykh doroh [Differential mathematical models of computer studies of the anomalous and transient modes of railways power supply systems]. *Problemy upravleniya i informatyky – Management and Informatics Problems*, Kyiv – 2018, №1, – P 99-112. ISSN 0572-2691.

6. Stasiuk O. I., Honcharova L. L. Matematychni modeli i metody analizu kompiuternykh mrezh keruvannia elektropostachanniam tiahovymu pidstantsiiamy zaliznyts [Mathematical models and methods of analysis computer networks of power supply control by traction substations of railways]. *Problemy upravleniya i informatyky – Management and Informatics Problems*, Kyiv – 2017, №1, – P 93-101. ISSN 0572-2691.

7. Stasiuk O. I., Honcharova L. L., Holub H. M. Metody otsenky kiberbezopasnosti raspredelennykh kompiuternykh setei upravleniya elektropotrebleniem distantsyi elektrosnabzheniya [Methods for assessing the cybersecurity of distributed computer networks power management power supply distances]. *Problemy upravleniya i informatyky – Management and Informatics Problems*, Kyiv – 2017, №4, – P 119-127. ISSN 0572-2691.

8. Stasiuk O. I., Hryshchuk R. V., Honcharova L. L. Matematychna model kiberbezpeky kompiuternoї mrezi keruvannia elektropostachanniam tiahovykh pidstantsii [Mathematical model of cyber security of computer network power supply control of traction substations]. *Kibernetika i systemnyi analiz – Cybernetics and system analysis*, Kyiv – 2017, Volume 53, No. 3 – P 170-179. ISSN 0023-1274.

9. Pukhov H. E. Preobrazovaniya Teilora i ikh primeneniye v elektrotekhnike i elektronike [Taylor transformations and their application in electrical engineering and electronics]. Kyiv, *Nauk. Dumka – Scientific thought*, 1978. 259 p.

10. Butkevych O. F., Levkonjuk A. V., Stasiuk O. I. Pidvyshchennia nadiinosti monitorynhu dopustymosti zavantazhen kontrolovanykh peretyniv enerhosystem [Increase reliability of monitoring the permissibility loading of controlled sections power systems]. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2014. №2. P. 56–67.

Наведено результати досліджень еволюції систем електропостачання і тягових мереж залізниць. Показано, що перспективним напрямком наукових досліджень є створення інтелектуальних комп'ютерних мереж і інтелектуальних систем електропостачання на базі загальноновизнаних у світі SMART Grid технологій. Розглянуто концептуальні підходи організації розумної енергетики. На основі теорії диференційних перетворень розроблено методи синтезу інтелектуальних математичних моделей визначення повної інформативності зареєстрованих первинних даних, що відображають динамічні процеси аномальних і аварійних режимів систем електропостачання. Запропоновано, в сфері диференційних зображень, методи інтелектуалізації процедур гармонічного аналізу первинної інформації для визначення особливостей окремих гармонічних складових аномальних режимів системи електропостачання. На основі диференційних математичних моделей наведено шляхи формування нових знань у сфері енергопостачання для оптимізації процедур електроспоживання та створення інтелектуальних енергозберігаючих технологій. Показано додаткові можливості розв'язання загальносистемної проблеми інноваційного перетворення тягових електричних мереж залізниць.

УДК 004.891.3

А. И. СТАСЮК, О. С. ГАЙДЕНКО, Л. Л. ГОНЧАРОВА (ГУИТ)

Государственный университет инфраструктуры и технологий, кафедра «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии транспорта», ул. И. Огиенка, 19, Киев, Украина, 03049, эл. почта: x177@rambler.ru, haidenko121@gmail.com, ktarael@yandex.ru; ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680; orcid.org/0000-0002-0113-4479

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ И КОМПЬЮТЕРНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Приведены результаты исследований эволюции систем электроснабжения и тяговых сетей железных дорог. Показано, что перспективным направлением научных исследований является создание интеллектуальных компьютерных сетей и интеллектуальных систем электроснабжения на базе общепризнанных в мире SMART Grid технологий. Рассмотрены концептуальные подходы организации разумной энергетики. На основе теории дифференциальных преобразований разработаны методы синтеза интеллектуальных математических моделей определения полной информативности зарегистрированных первичных данных, отражающих динамические процессы аномальных и аварийных режимов систем электроснабжения. Предложено, в сфере дифференциальных изображений, методы интеллектуализации процедур гармонического анализа первичной информации для определения особенностей отдельных гармонических составляющих аномальных режимов системы электроснабжения. На основе дифференциальных математических моделей приведены пути формирования новых знаний в сфере энергоснабжения для оптимизации процедур электропотребления и создание интеллектуальных энергосберегающих технологий. Показано дополнительные возможности решения общесистемной проблемы инновационного преобразования тяговых электрических сетей железных дорог.

UDC 004.891.3

O. I. STASIUK, O. S. HAIDENKO, L. L. HONCHAROVA (SUIT)

State University of Infrastructure and Technology, Department of Automation and computer-integrated transport technologies, 03049, Kyiv, I. Ogiienka St., 19, e-mail: x177@rambler.ru, haidenko121@gmail.com, ktarael@yandex.ru; ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680; orcid.org/0000-0002-0113-4479

DIFFERENTIAL MODELS AND COMPUTER-ORIENTATED METHODS OF THE PROCESSES DETERMINING PARAMETERS MODES INFORMATIVENESS OF RAILWAYS ELECTRICITY SUPPLY INTELLIGENT NETWORKS INTELLECTUALIZATION

The results researches of evolution electric power supply systems and railways traction networks are presented. It is shown that the promising direction of scientific research is the creation of intelligent computer networks and intelligent power supply systems based on world-known SMART Grid technologies. The conceptual approaches of intelligent energy engineering are considered. Methods of synthesis intelligent mathematical models for determining the complete informativeness of registered primary data reflecting the dynamic processes of abnormal and emergency modes of power supply systems have been developed on the basis of differential transformations theory. Methods of intellectualization the harmonic analysis procedures of primary information for the individual harmonic components of the power supply system abnormal modes characteristics determination are proposed in the field of differential images. Ways of forming new knowledge in the energy supply field for optimization procedures of electric power consumption and intelligent energy-saving technologies creation are presented on the basis of differential mathematical models. The additional possibilities of solving the system-wide problem of railways traction electric networks innovation transformation are shown.

Received 26.01.2018; accepted in revised form 05.04.2018.

© Стасюк О. І. та ін., 2018

В. Х. ДАЛЕКА, О. С. КОЗЛОВА, А. В. ШКРЯБКО (ХНУМГ)

Кафедра «Електричний транспорт», Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, Україна, 61002, +38 (066) 251 88 77, ел. пошта: dalekavf@ukr.net, Olha.Kozlova@kname.edu.ua, Artem.Shkriabko@kname.edu.ua; ORCID: orcid.org/0000-0002-3074-5500, orcid.org/0000-0002-8170-5963, orcid.org/0000-0003-4730-0986

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА МІСЬКОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Вступ

В процесі реформування міського електричного транспорту складаються нові умови, які спонукають до зниження собівартості пасажироперевезень, і в першу чергу до економії електроенергії на рух. Оскільки міський електричний транспорт є одним з крупних споживачів електричної енергії, то проблема енергозбереження є досить актуальною [1-3].

Системи електропостачання трамвая та тролейбуса, що були побудовані та використовувались протягом багатьох років у межах України проектувались за нормативами та даними, що визначались плануванням міст, кількістю рухомого складу, його характеристиками, особливою маршрутів тощо [4, 5].

В останні роки в значній мірі змінилися параметри пасажиропотоків, кількість і характеристики рухомого складу (РС) тому виникла необхідність у вирішенні питань найбільш ефективного використання уже діючої системи електропостачання в нинішніх умовах господарювання [6-8].

Дослідження в напрямі електропостачання міського електричного транспорту свідчать [5-8], що цей транспорт потребує, по-перше, оцінки ефективності використання електроенергії при існуючому порядку експлуатації, і по-друге, розробки організаційно-технічних заходів щодо зменшення енергоспоживання з їх економічною оцінкою.

Мета

Оцінка енергоспоживання на міському електричному транспорті для підвищення ефективності використання системи електропостачання в сучасних умовах.

Основна частина

Система планування енергоспоживання, яка була раніше складовою частиною економічної моделі міського електротранспорту, спрямованої на зростання валових показників, не стиму-

лює розробку та впровадження енергозберігаючих технологій, пошук шляхів виконання, заданих обсягів пасажирських перевезень з меншими витратами матеріальних, фінансових та енергетичних ресурсів. Такому стану також сприяли адміністративно встановлені пропорції між складовими експлуатаційних витрат і зокрема низькі тарифи на електроенергію [6-9].

На основі аналізу досліджень та складових витрат енергії, проведеного при оцінці ефективності її використання, можуть бути запропоновані такі рішення:

- нове розташування зупиночних пунктів з ліквідацією нераціонально розміщених та з малим пасажиропотоком при збереженні середнього часу пересування пасажирів;
- раціональне розподілення рухомого складу на маршрутах;
- зміна схеми руху автотранспорту на трасах міського електротранспорту, ліквідації ряду світлофорів, або обладнання рухомих одиниць апаратурою пріоритетного пропуску;
- зміна схеми електропостачання, застосування підсилюючих кабелів, проводів, реконструкція тягових підстанцій для зниження втрат напруги і т.п.

В умовах зміни тарифів і вартості ресурсів, оцінку ефективності використання енергії та економічної ефективності даних заходів, доцільно проводити в натуральному обчисленні.

Таким чином основним показником ефективності енергоспоживання слід вважати питомі витрати тобто витрати електроенергії на одиницю пробігу РС.

Вихідними даними для аналізу ефективності фактичного використання електроенергії є дані служби електрогосподарства, де фіксуються відомості про витрату енергії (в тому числі про витрату енергії на власні потреби підстанцій), і служби руху що надає інформацію про виконані пробіги РС за маршрутами, видах і типах рухомого складу, і їх відповідної частоти руху. Формування вихідних даних починається з роз-

гляду маршрутної системи та схеми електропостачання. [10]

На кожному районі живлення за окремими маршрутами виділяють рухомі одиниці за типами і середньорічними значеннями їх частот руху f_i в години пік.

Для впорядкування даних приймемо таку систему індексів:

t - позначення виду або типу РС, а саме:

$t1$ – трамвайні вагони Т-3;

$t2$ – трамвайні вагони Т6А5;

$t3$ – трамвайні вагони Т6В5;

M - позначення маршруту;

$q = 1, 2, \dots, 12$ - позначення місяця року;

j - позначення району живлення;

m - позначення ділянки живлення;

E – витрати енергії, кВт*год

$E1$ – витрати енергії на власні потреби, кВт*год

$T1$ - середньомісячна температура, °С.

Накладанням на маршрутну систему схеми електропостачання, виділяються райони живлення за числом тягових підстанцій.

Для прикладу, розглянемо частину трамвайних маршрутів та районів живлення міста Харкова, що представлені на рисунку 1. Район живлення №9 Журавлівської тягової підстанції (рис. 2), забезпечує функціонування трамвайних маршрутів № 16, 16А та 26. Характеристика ділянок маршрутів у цьому районі наведена в табл. 1. Загальна довжина ділянок маршрутів в районі живлення 2,5 км.

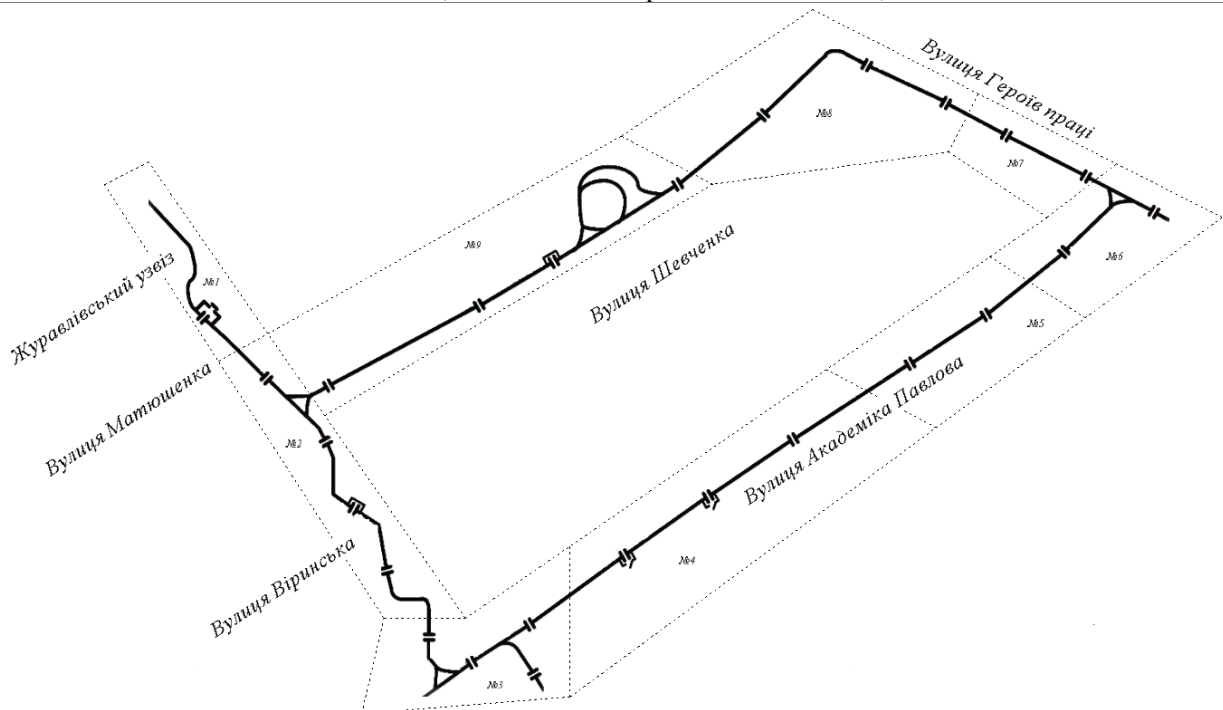


Рис. 1. Схема частини трамвайних маршрутів та районів живлення міста Харкова

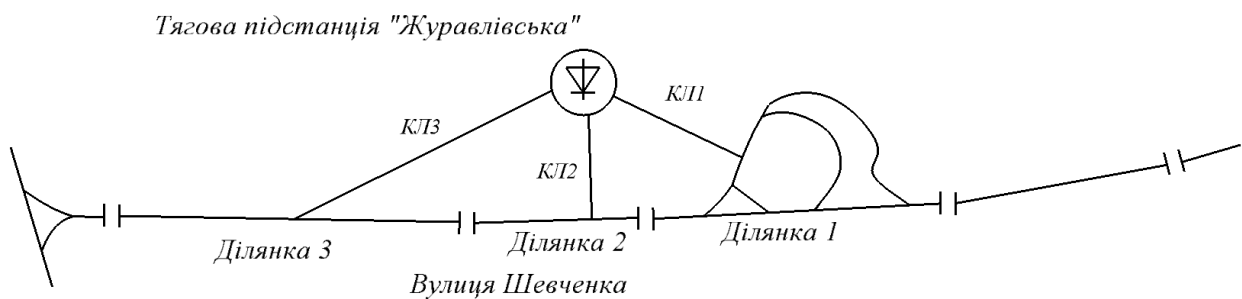


Рис. 2. Схема району живлення №9 Журавлівської тягової підстанції:

КЛ – кабельні лінії, СІ – секційні ізолятори

Таблиця 1 – Характеристика ділянок маршрутів в районі живлення №9

№ ділянки L_j	Довжина ділянки, L_d , км	Вид РС, t	№ маршрута, M	Частота руху, f ваг/год, f
1	0,5	T-3	26,16,16A	14
2	0,6	T6A5	16	4
3	1,4	T6B5	16A	4

Значення частоти руху усіх трамвайних вагонів в районі живлення №9, де проходить маршрути №16, 16А, 26, відповідно до таблиці 1:

$$f_{\text{int}} = 14 + 4 + 4 = 22 \text{ од/год.}$$

Далі визначаються частки пробігу РС, що приходяться на райони живлення маршрутів за видами (типами) РС і за місяцями року. Попередньо виписуються звітні дані про щомісячні пробіги P_{qm} на маршрутах в вагоно – кілометрах, середньодобовий час перебування РС на маршруті (лінії) T_m (в середньому за рік), частоті руху в годину пік f_m . Якщо на маршруті використовуються кілька типів РС, додатково виписують дані про середньодобовий час перебування на лінії кожного типу T_{mt} і його частоті f_{mt} . З загального місячного пробігу на маршруті P_{qm} виділяють місячний пробіг конкретного типу РС P_{qmt} за формулою:

$$P_{qmt} = P_{qt} \frac{T_{mt} f_{mt}}{T_m f_m}, \quad (1)$$

де - P_{qt} - звітні дані про щомісячні пробіги;

T_m - середньодобовий час перебування РС на маршруті;

f_m - частота руху в годину пік/

Таким чином отримуються дані про щомісячні пробіги на маршрутах з поділом за типами РС Пробіг, який припадає на j -ий район живлення знаходять за формулою:

$$P_{qjmt} = P_{qmt} \frac{\sum_{j=1}^m L_{jMm}}{\sum L_M}, \quad (2)$$

де - $\sum_{j=1}^m L_{jMm}$ - сумарна довжина ділянок в j -му

районі живлення, за якими проходить вагони m -го маршруту t -го типу в одному напрямку;

$\sum L_M$ - довжина маршруту в одному напрямку.

По кожному району живлення складають таблицю пробігів по місяцях року і за типами РС як це представлено в таблиці 2 для району №9.

Таблиця 2 – Пробіги рухомого складу на ділянках живлення №9

Місяці	Тип РС	Вагони Т-3	Вагони Т6А5	Вагони Т6В5
		мт№26, 16, 16А	мт№16	мт№16А
Січень -1		13,4	2,94	2,87
Лютий -2		13,3	2,85	2,85
Березень - 3		13,2	2,87	2,8
Квітень - 4		13,3	2,85	2,85
Травень - 5		13,2	2,75	2,75
Червень - 6		13,2	2,73	2,73
Липень - 7		13,1	2,71	2,71
Серпень - 8		13	2,7	2,7
Вересень - 9		13,5	3	2,9
Жовтень - 10		13,4	2,8	2,88
Листопад - 11		13,2	2,82	2,85
Грудень - 12		13,5	2,97	2,85

Відповідно до пробігів РС (таблиця 2) в районах живлення складаються відповідні таблиці витрат енергії за місяцями, в тому числі втрати енергії на потреби тягових підстанцій. Також фіксуються середньомісячні температури повітря. Для даного прикладу таблиця 3 витрат енергії по району живлення № 9 має наступний вигляд.

Таблиця 3 – Витрати енергії за місяцями

Місяці	Показники	Витрати енергії, кВт*год, E	Власні потреби, кВт*год, E1	Температура повітря, °С
1		3188	32	-5,5
2		2631	26	-2,4
3		3471	26	+3,1
4		1702	22	+9,9
5		2094	24	+16,1
6		1933	19	+19,8
7		2624	24	+21,7
8		2260	22	+22,1
9		2725	25	+16,2
10		2811	28	+6,5
11		2797	27	+1,7
12		3144	32	-1,3

Таблиця 4 – Витрати електроенергії за типами вагонів на ділянці живлення №9

Місяці	T-3, кВт*Год	T6A5, кВт*Год	T6B5, кВт*Год
1	2223,8	487,9084	476,2915
2	1841,7	394,65	394,65
3	2428,045	527,9157	515,0397
4	1191,4	255,3	255,3
5	1478,118	307,9412	307,9412
6	1367,395	282,8023	282,8023
7	1856,069	383,9654	383,9654
8	1596,739	331,6304	331,6304
9	1896,263	421,3918	407,3454
10	1974,182	412,5157	424,3019
11	1956,566	417,9936	422,4404
12	2196,894	483,3168	463,7888

Перш за все врахуємо, що питомі витрати різних типів і видів РС за всіма районами живлення однаково залежать від середньомісячних температур T1 (збільшуються при негативних і зменшуються при позитивних температурах). Тому значення витрати енергії на рух по місяцях необхідно привести до середньорічної температури розділивши на коефіцієнт:

$$k_{T1} = 1,025 - 0,005 \cdot T1 \quad (3)$$

Витрату енергії на рух отримаємо, віднімаючи з витрат, оплачених енергозбутовій організації, витрати енергії на власні потреби тягової підстанції. Для наведеного вище прикладу розрахунки наведені в таблиці 5.

За даними таблиць пробігів та витрат енергії визначаються питомі витрати електроенергії на рух за формулою

$$a_j = \frac{E_j}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (4)$$

Крім даних пробігів (таблиця 2) і витрати енергії (таблиця 3), по кожному району необхідно мати інформацію про особливості руху, його режими, інженерне забезпечення тощо.

Фактори що безпосередньо впливають на рівень витрат електроенергії:

- тип рухомого складу;
- відомості про розташування секційних ізоляторів, спецчастин контактної мережі;
- довжини ділянок живлення;
- електричні опори живлячих та відсмоктувальних кабелів;

- електричні опори контактної мережі та рейок по ділянках;
- відомості про розташування спецчастин трамвайної колії;
- додатковий опір руху від ухилів та кривих по ділянках.

Фактори що призводять до додаткових зупинок та пусків:

- наявність світлофорів і їх цикли;
- інтенсивність руху автотранспорту на смузі руху трамвая;
- кількість та розміщення зупиночних пунктів.

Швидкість сполучення, або планові значення часу проходження контрольних пунктів за маршрутами.

Таблиця 5 – Витрати електроенергії на рух, приведені до середньорічної температури

Місяці	k _{T1}	Витрати енергії на рух T-3, кВт*ч	Витрати енергії на рух T6A5, кВт*ч	Витрати енергії на рух T6B5, кВт*ч
1	1,0525	2132,77	481,17	461,92
2	1,037	1779,33	382,92	385,76
3	1,0095	2391,61	529,87	508,08
4	0,9755	1223,62	263,33	265,28
5	0,9445	1556,13	316,54	318,89
6	0,926	1468,33	294,35	296,53
7	0,9165	1998,47	400,83	403,8
8	0,9145	1709,85	345,67	348,24
9	0,944	2042,8	472,79	445,07
10	0,9925	2007,83	410,86	437,9
11	1,0165	1913,93	409,39	421,25
12	1,0315	2165,91	491,31	455,76

Ці вихідні дані подаються у вигляді банку даних на комп'ютері. У тих випадках, коли тягова підстанція живить крім ділянок маршрутів також депо, такі ситуації можна не розглядати. При необхідності нормування витрат енергії на потреби депо слід

визначити частину витрат, що йде на рух в районі живлення за середнім значенням питомої витрати і відняти її від загальної величини. Порівняння питомих витрат за окремими районами живлення з урахуванням умов руху дозволяє визначити фактори, що призводять до збільшення споживання електроенергії.

Таблиця 6 – Питомі витрати електроенергії по типам рухомого складу

Місяць	T-3	T6A5	T6B5
1	167,5179	172,2536	169,3983
2	138,7345	139,3292	140,3616
3	182,9035	186,3782	183,1795
4	89,7477	90,1324	90,8002
5	111,3459	108,7171	109,5226
6	103,0053	99,8419	100,5817
7	139,8169	135,5571	136,5615
8	120,2817	117,0805	117,948
9	142,8446	148,7703	144,8768
10	148,7143	145,6366	150,9076
11	147,3873	147,5706	150,2455
12	165,4911	170,6326	164,9516

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України "Про енергозбереження" // Постанова Верховної Ради України №75/94-ВР від 01.07.1994.
2. Ковалко М. П. Енергозбереження пріоритетней напрямком державної політики України / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк, А. К. Шидловський - К.: УЕЗ, 1998. – 506 с.
3. Кузнецов В.Г. Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / Кузнецов Валерій Геннадійович – Дніпропетровськ, 2012. – 390 с.
4. Малярєнко В.А. Енергозбереження як діючий важіль реформування житлово-комунального господарства // Коммунальное хоз-во городов.- Вып. 53. К.: Техніка, 2003.- С. 8-15.
5. Христюк Н.М. Взаимосвязь между планировочной структурой и энергопотреблением пассажирским транспортом города // Проблемы энергосбережения.- К.: Институт проблем энергосбережения НАН Украины, 1994, № 3, с. 37-41.
6. Карпушин Е.І. Визначення експлуатаційних витрат енергії рухомих складом трамвая і тролейбуса з застосуванням нечітких множин при моделюванні руху // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті; 2(23). Харків: ХарДАЗТ, 2000. - С. 48-50.
7. Далека В.Х. Управління проектами ресурсозбереження на міському електротранспорті // Управління проектами та розвиток виробництва: Збірник наукових праць. Під ред. В.А. Рач.- 2004.- № 3(11).
8. Далека В.Х. Оцінка ресурсовикористання на підприємствах міського електротранспорту // Коммунальное хоз-во городов.- Вып. 46. К.: Техніка, 2002.- С. 189-196.
9. Галузеві комунальні норми ГКН 02.07.005 – 2001. Витрати електроенергії трамвайними вагонами та тролейбусами. Нормативи. Методи розрахунку // Г.П.

Висновки

Таким чином за даною методикою можна оцінити рівень енергоспоживання на міському електричному транспорті в сучасних умовах, визначити наскільки ефективно використовується діюча система електропостачання та розробити відповідні заходи.

REFERENCES

1. The Law of Ukraine "On Energy Saving". (1994). The Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine No. 75/94-VR dated July 1, 1994. (in Ukrainian)
2. Kovalko, M. P., Denisyuk, S. P. & Shidlovsky, A. K. (1998). Energy conservation of the state policy priority direction of Ukraine. K.: UEZ. (in Ukrainian)
3. Kuznetsov, V. G. (2012) Development of theoretical bases of energy saving in power supply systems of traction of trains of direct current: diss. Dr. Tech. Sciences. (in Ukrainian)
4. Malyarenko, V. A. (2003) Energy saving as an active lever of reforming housing and communal services farms. Communal hosts of cities. Vol. 53. K.: Technics. (in Ukrainian)
5. Khristyuk, N. M. (1994). The relationship between the planning structure and energy consumption of the passenger transport of the city. Problems of energy saving. - K.: Institute of energy saving problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, No. 3, p. 37-41. (in Russian)
6. Karpushin, E. I. (2000) Determination of operating costs of energy by rolling stock of tram and trolleybus with the use of fuzzy sets in modeling the movement. Information and control systems in the railway transport. Kharkiv: KharkAZT, P. 48-50. (in Ukrainian)
7. Daleka, V. H. (2004) Project Management of Resource Saving in Urban Electric Transport. Project Management and Production Development: Collection of Scientific Papers. Ed. VA Rach.- No. 3 (11). (in Ukrainian)
8. Daleka, V. H. (2002) Estimation of resource use at the enterprises of the city electric transport. Kommunalnoye hozy-o gorodov.-Vip. 46. K.: Technics, P. 189-196. (in Ukrainian)
9. Sheherbina, G. P., Zbarsky, L. V., Karpushin, E. I., Budnychenko, V. B., Daleka, V. H. & Krivulya, V. V. (2001). Sectoral utility codes GKN 02.07.005 - 2001. Electricity consumption by tram cars and trolleybuses. Standards.

Щербина, Л.В. Збарський, Е.І. Карпушин, В.Б. Будниченко, В.Х. Далека, В.В. Кривуля. Чинний від 01.01.2001.-К: Держбуд України, 2001. – 23с.
10. Харків транспортний, режим доступу: gortransport.kharkov.ua.

Methods of calculation. Effective from 01.01.2001. -К: StateBuild of Ukraine, - 23s. (in Ukrainian)
10. Kharkov transport, access mode: gortransport.kharkov.ua

Оцінка енергоспоживання на міському електричному транспорті для підвищення ефективності використання діючої системи електропостачання в сучасних умовах. Системи електропостачання трамвая та троллейбуса, що були побудовані та використовувались протягом багатьох років у межах України проектувались за нормативами та даними, що визначались плануванням міст, кількістю рухомого складу, його характеристиками, особливою маршрутів тощо. В останні роки в значній мірі змінились параметри пасажиропотоків, кількість і характеристики рухомого складу, тому є актуальним вирішення питань найбільш ефективного використання вже діючої системи електропостачання в нинішніх умовах господарювання.

На основі даних про фактичні витрати електроенергії на міському електротранспорті, гідрометеоцентру, трамвайних підприємств, умов руху на маршрутах проведена оцінка ефективності використання діючої системи електропостачання для розроблення відповідних заходів. Запропоновано методику визначення питомих витрат електроенергії за окремими районами живлення, що визначаються розташуванням тягових підстанцій, з урахуванням видів рухомого складу та їх умов руху. Використання в якості оцінки рівня енергоспоживання універсального показника питомих витрат електроенергії дозволяє співставити рівень ефективності складових системи електропостачання.

На основі досліджень складових витрат енергії, проведеного при оцінці ефективності її використання, можуть бути запропоновані такі рішення: нове розташування зупиночних пунктів з ліквідацією нераціонально розміщених та з малим пасажиропотоком при збереженні середнього часу пересування пасажирів; раціональне розподілення рухомого складу на маршрутах; зміна схеми руху автотранспорту на трасах міського електротранспорту, ліквідації ряду світлофорів, або обладнання рухомих одиниць апаратурою пріоритетного пропуску; зміна схеми електропостачання, застосування підсилюючих кабелів, проводів, реконструкція тягових підстанцій для зниження втрат напруги і т.п. Удосконалено методику оцінки енергоспоживання на основі порівняння питомих витрат енергії з урахуванням умов руху. Запропонована методика дозволяє розробити обґрунтовані заходи для підвищення ефективності систем електропостачання на міському електричному транспорті в сучасних умовах.

Ключові слова: електричний транспорт, трамвай, енергоспоживання, район живлення, рухомий склад, питоми витрати, оцінка ефективності.

УДК 621.311.4 : 621.332.6

В. Ф. ДАЛЕКА, О. С. КОЗЛОВА, А. В. ШКРЯБКО (ХНУМГ)

Кафедра «Электрический транспорт», Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, Украина, 61002, +38 (066) 251 88 77, эл. почта: dalekavf@ukr.net, Olha.Kozlova@kname.edu.ua, Artem.Shkriabko@kname.edu.ua; ORCID: orcid.org/0000-0002-3074-5500, orcid.org/0000-0002-8170-5963, orcid.org/0000-0003-4730-0986

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ГОРОДСКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Оценка энергопотребления на городском электрическом транспорте для повышения эффективности использования действующей системы электроснабжения в современных условиях. Системы электроснабжения трамвая и троллейбуса, которые были построены и использовались в течение многих лет в пределах Украины проектировались по нормативам и данным, которые определялись планированием городов, количеством подвижного состава, его характеристиками, особенностью маршрутов и тому подобное. В последние годы в значительной степени изменились параметры пассажиропотоков, количество и характеристики подвижного состава, поэтому является актуальным решение вопросов наиболее эффективного использования уже действующей системы электроснабжения в нынешних условиях хозяйствования.

На основе данных о фактических затратах электроэнергии на городском электротранспорте, гидрометеоцентра, трамвайных предприятий, условий движения на маршрутах проведена оценка эффективности использования действующей системы электроснабжения для разработки соответствующих мероприятий. Предложена методика определения удельных расходов электроэнергии по отдельным районам питания, которые определяются расположением тяговых подстанций, с учетом видов подвижного состава и их условий движения. Использование в качестве оценки уровня энергопотребления универсального показателя удельных расходов электроэнергии позволяет сопоставить уровень эффективности составляющих системы электроснабжения.

На основе исследований составляющих затрат энергии, проведенных при оценке эффективности ее использования, могут быть предложены следующие решения: новое расположение остановочных пунктов с ликвидацией нераационально размещенных и малым пассажиропотоком при сохранении среднего времени передвижения пассажиров; рациональное распределение подвижного состава на маршрутах; изменение схемы движения автотранспорта на трассах городского электротранспорта; ликвидации ряда светофоров или оборудование подвижных единиц апаратурою пріоритетного пропуску; изменение схемы электроснабжения, применение усилительных кабелей, проводов, реконструкция тягових підстанцій для снижения по-

терь напряжения и т.п. Усовершенствована методика оценки энергопотребления на основе сравнения удельных расходов энергии с учетом условий движения. Предложенная методика позволяет разработать обоснованные меры по повышению эффективности систем электроснабжения на городском электрическом транспорте в современных условиях.

Ключевые слова: электрический транспорт, трамвай, энергопотребление, район питания, подвижной состав, удельные затраты, оценка эффективности.

V. H. DALEKA, O. S. KOZLOVA, A. V. SHKRIABKO

Department of Electric transport, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshal Bazhanov St., 17, Kharkiv, Ukraine, 61002, +38 (066) 251 88 77,

e-mail: dalekavf@ukr.net, Olha.Kozlova@kname.edu.ua, Artem.Shkriabko@kname.edu.ua;

ORCID: orcid.org/0000-0002-3074-5500, orcid.org/0000-0002-8170-5963, orcid.org/0000-0003-4730-0986

IMPROVING METHODS THE POWER SUPPLY SYSTEMS EFFICIENCY ON MUNICIPAL ELECTRIC TRANSPORT

Power consumption estimation in municipal electric transport for increasing the efficiency of using an existing power supply system in modern conditions. The electric power supply systems of the tram and trolleybus, which were built and used for many years in Ukraine, were designed according to the norms and data determined by city planning, the rolling stock number, its characteristics, route features, etc. In recent years, the passenger traffic parameters, number and characteristics of rolling stock have changed considerably, therefore, the actual solution of the issues of already existing electricity supply system most efficient use in the current conditions of topical issue management.

On data of the actual electricity consumption on municipal electric transport, hydrometeorological center, tram enterprises, traffic conditions on routes, received an estimation of the use electricity supply system existing efficiency for appropriate measures was carried out. The method of specific energy consumption determination by separate power areas, determined by the location of traction substations, taking into account the types of rolling stock and their traffic conditions, is proposed. The use of a universal indicator of specific energy consumption as an estimate of the energy consumption level makes it possible to compare the level of electricity supply system components efficiency.

On data of the research the energy expenditures spent components of use efficiency evaluation, the following solutions may be proposed: a new location of stopping points with the elimination of irrationally located and low passenger traffic while maintaining the average passenger travel time; rational distribution of rolling stock on routes; change of the motor transport scheme on the lines of municipal electric transport, the elimination of a traffic lights number, or the equipment of moving parts equipment with right-priority pass; change of the power supply scheme, the use of amplifying cables, wires, reconstruction of traction substations to reduce voltage losses, etc. The method of estimating energy consumption on the basis of comparison of specific energy consumption taking into account traffic conditions is improved. The proposed methodology allows us to develop grounded measures for increasing the efficiency of electric power supply systems in municipal electric transport in modern conditions.

Keywords: electric transport, tram, energy consumption, power district, rolling stock, specific costs, efficiency estimation.

Received 08.02.2018; accepted in revised form 04.04.2018.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. (056) 793-19-11, ел. пошта: vkuz@i.ua,
ORCID: orcid.org/0000-0003-4165-1056

РОЗРАХУНОК ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗА РАХУНОК УПРАВЛІННЯ ПОКАЗНИКАМИ ПОТОКУ ПОЇЗДІВ

Вступ

Для господарств залізничного транспорту важливим завданням є оцінка потенціалу енергозбереження. Дане завдання важливе як у теоретичному, так і практичному плані. Маючи науково-обґрунтований потенціал енергозбереження можна виявити раціональні напрямки інвестицій в енергозберігаючі проекти, ефективно управляти споживанням паливно-енергетичних ресурсів і в цілому проводити політику енергозбереження на залізничному транспорті. При експлуатації систем електропостачання залізниць важливим є рівень використання величини потенціалу енергозбереження при стимулюванні енергозбереження. На сьогоднішній день не досить використовується потенціал енергозбереження в господарствах електрифікації й електропостачання, існують значні резерви [1, 2].

В даний час на залізничному транспорті існує багато різних методів енергозбереження, вони представляють собою різноманітні способи покращення енергоефективності. Споживання електроенергії транспортом знаходиться на 4-му місці після промисловості, населення та комунально-побутових споживачів у загальному енергетичному балансі України. Економія навіть незначного відсотка споживання електроенергії викликає відчутну економію коштів [3,4]. Забезпечення чітко визначеного руху поїздів впливає на споживання електроенергії. В першу чергу споживання електроенергії залежить від організації перевізного процесу та значною мірою визначається узгодженою роботою всіх підрозділів: локомотивних та вагонних депо, станцій,

сигналізації та зв'язку, станцій та дистанцій електропостачання. Існує низка розроблених методів щодо оптимізації руху поїздів за режимними картами [5-7]. Згадані методи були прийняті за основу створення програмного комплексу для тренування машиністів локомотивів.

В даній роботі розглянуто метод покращення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання за рахунок оптимізації графіків руху поїздів. Цей метод може бути реалізований без значних витрат коштів [8-10]. В статті аналізується потенціал енергозбереження за рахунок корегування потоку поїздів. Розрахуємо втрати потужності в тяговій мережі при існуючому графіку руху поїздів та запропонуємо корегований графік з меншою нерівномірністю.

Розрахунок втрат в системі тягового електропостачання при існуючому графіку

Схема розрахункової електрифікованої ділянки наведена на рис. 1.

Вихідні дані для електричного розрахунку:

- на тягових підстанціях використовуються випрямлячі ВТПКД-МБ-12п-3150А-3,3кВ, УВКЕ-1-3000А-3,3кВ;
- пікети тягових підстанцій, а також ППС та ПСК;
- тип контактної підвіски на ділянці М-120+2МФ-100;
- схема живлення тягової мережі-паралельна;
- довжина міжпідстанційної зони – 14,9 км;
- типи електровозів, що курсують на ділянці – ВЛ8, ДЕ1, ЧС7.

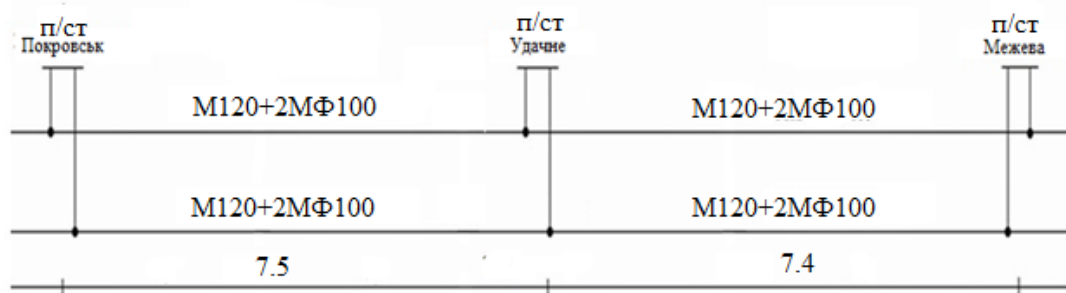


Рис. 1. Розрахункова схема електрифікованої ділянки

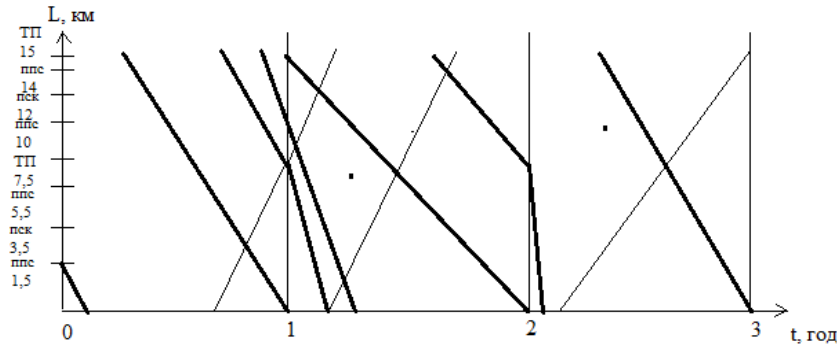


Рис. 2. Існуючий графік руху поїздів на електрифікованій ділянці 'Покровськ-Межева'

Будемо використовувати методику розрахунків систем тягового електропостачання, яка розроблена в ДНУЗТ [3].

На ділянці електропостачання 'Покровськ-Межева' існує нерівномірний графік руху поїздів наведений на (рис.2). Даний графік не є енергоефективним, за допомогою вирівнювання інтервалів між поїздами можна зменшити втрати електроенергії в тяговій мережі, не вкладаючи значних інвестицій.

В якості показника нерівномірності потоку поїздів будемо використовувати коефіцієнт варіації міжпоїздного інтервалу. Визначимо коефіцієнт нерівномірності та його складові.

Коефіцієнт варіації визначається за формулою (1):

$$K_B = \frac{\sigma_T}{m_T}, \quad (1)$$

де m_T - математичне очікування інтервалу між поїздами;

σ_T - середноквадратичне відхилення інтервалів між поїздами.

Математичне очікування міжпоїздного інтервалу визначається за формулою (2) на основі аналізу графіку руху поїздів

$$m_T = \frac{\sum t_i}{n}, \quad (2)$$

де $\sum t_i$ - сума інтервалів між поїздами;

n - кількість інтервалів між поїздами.

Середньоквадратичне відхилення визначається (3)

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sum (t_i - m_T)^2}{n - 1}}, \quad (3)$$

Скориставшись формулами (2) та (3) для існуючого графіку руху поїздів отримано $m_T=20$ хв., $\sigma_T=11,18$ хв., $K_B=0,559$.

За розрахунковою схемою електрифікованої ділянки створено схему заміщення (рис.3).

Тяговий розрахунок проводився для потягу ВЛ-8. Для розглянутої задачі приймаємо, що на ділянці рухаються поїзди однієї категорії.

За допомогою тягового розрахунку для дослідної ділянки були визначені струми електровозу (рис.4)

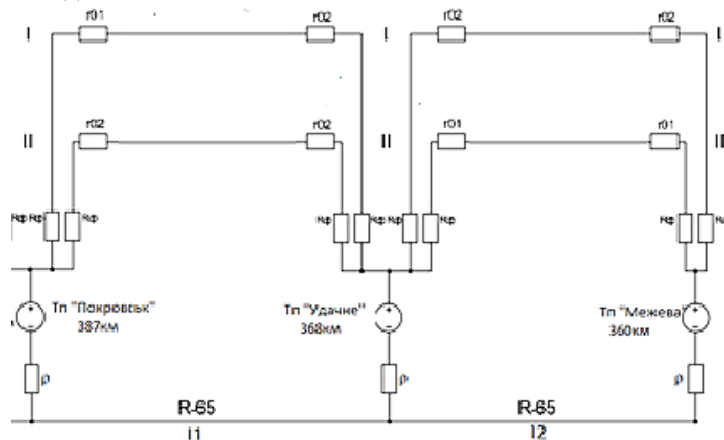


Рис. 3. Схема заміщення дослідної ділянки 'Покровськ - Межева' $r01, r02$ – опір контактної мережі, $Rф$ – опір фідера, p – опір тягової підстанції, $R65$ – тип рейок

© Кузнецов В. Г., Кравцов А. В., 2018

Таблиця 1 - Характеристики поїздів різних категорій

№ категорії поїзду	Характеристика		
	Категорія	Вага брутто, т	Тип електровозу
1	Вантажний	1400	ВЛ-8

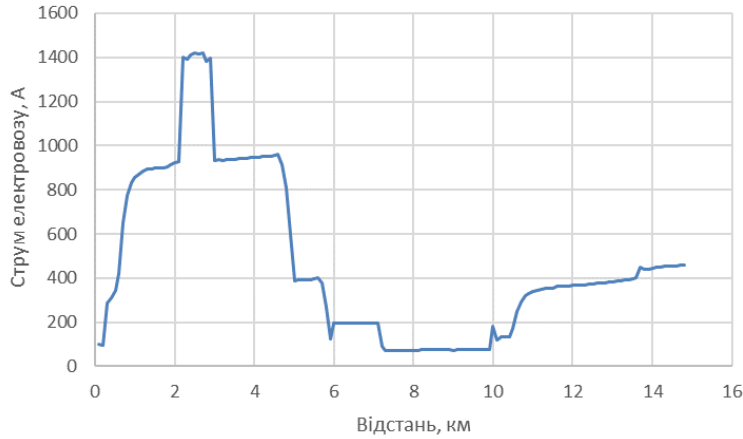


Рис. 4. Результати тягового розрахунку

Всі розрахунки значень втрат проводились у середовищі Maple.

Розрахунок проводиться погодинно, для першої реалізації приведені падіння напруги, графік струмів і миттєві втрати потужності.

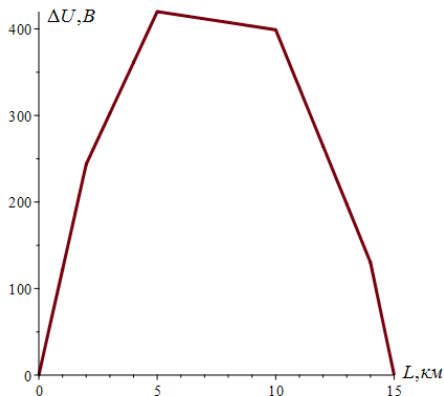


Рис. 5. Падіння напруги на міжпідстанційній зоні

Сумарні втрати потужності в тяговій мережі для першого перерізу графіку склали 3031 кВт.

Розрахунок втрат при коригованому графіку руху

Проведемо корегування графіку руху поїздів. Спільно з поїздним диспетчером визначено межі корегування існуючого графіку для забезпечення зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі. Розрахунки проводились аналогічно розрахункам для існуючого нерівномірного графіку руху для ділянки Покровськ – Межева.

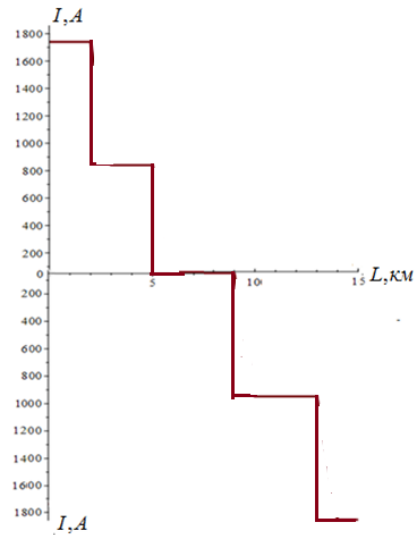


Рис. 6. Графік струмів

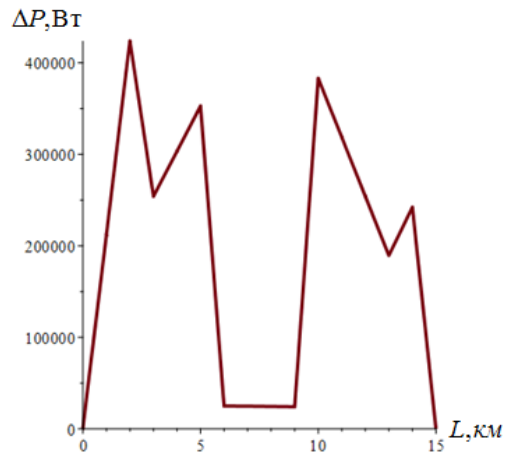


Рис. 7. Миттєві втрати потужності

Коригований графік руху

Пропонований коригований графік руху представлений на рис. 8.

Як і в випадку існуючого графіку був розрахований коефіцієнт варіацій міжпоїздного інтервалу. Для коригованого графіку руху поїздів K_v склав 0,109.

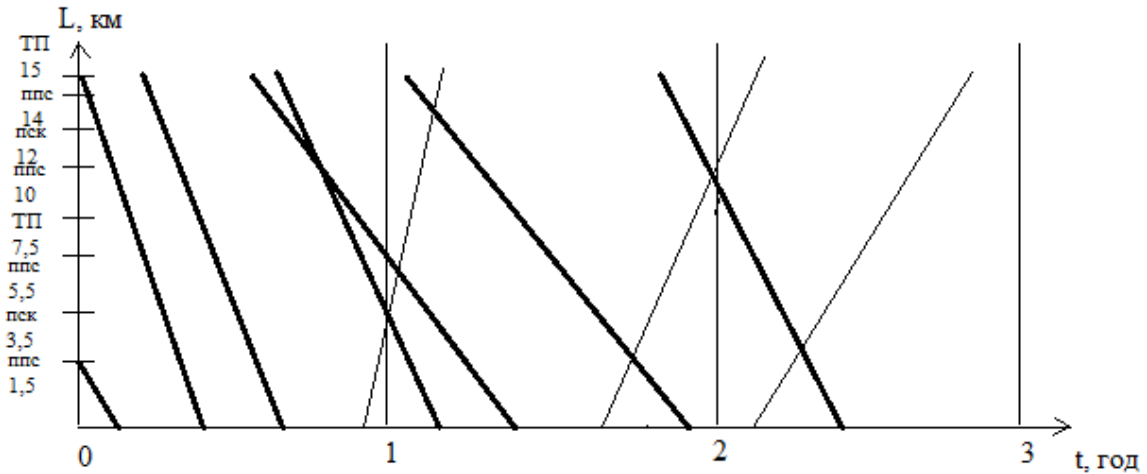


Рис. 8. Коригований графік руху

Розрахунок втрат електроенергії при коригованому графіку руху

За допомогою програми Maple побудуємо графіки падіння напруги (рис.9), графік струму (рис. 10), розподіл миттєвих втрат на ділянці (рис.11) аналогічно першого випадку для першої точки перерізу графіку руху.

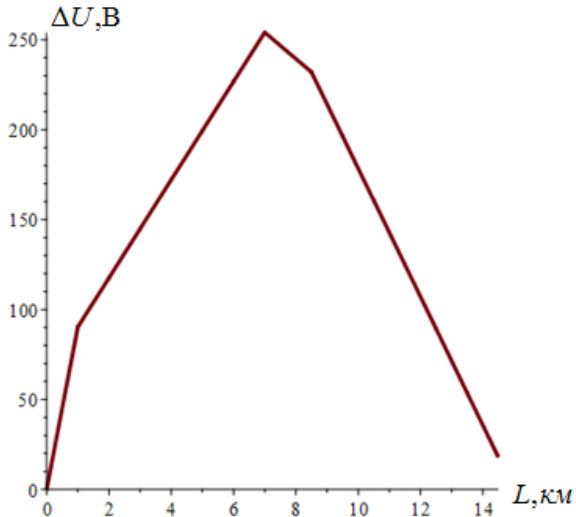


Рис. 9. Падіння напруги на ділянці для коригованого графіку руху

Сумарні миттєві втрати в тяговій мережі для першої точки перерізу графіку руху склали 997,45 кВт.

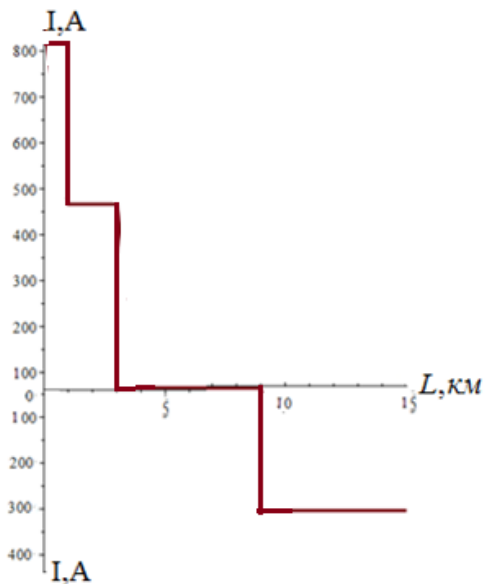


Рис. 10. Графік струмів для коригованого графіку руху

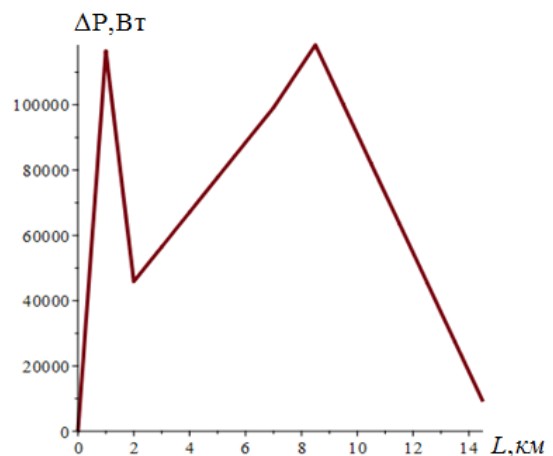


Рис. 11. Розподіл миттєвих втрат для коригованого графіку руху

Розрахунок потенціалу енергозбереження

Виконавши електричні розрахунки для тягової мережі при існуючому та корегованому графіках руху було побудовано графік втрат потужності для обох графіків руху (рис. 12). Максимальні значення втрат склали відповідно

3031,56 кВт для існуючого і 1355,54 кВт для корегованого графіків руху поїздів.

Виконавши розрахунок відсоткових втрат, був отриманий графік відсоткових втрат потужності (рис. 13). На цьому ж рисунку показано область потенціалу енергозбереження.

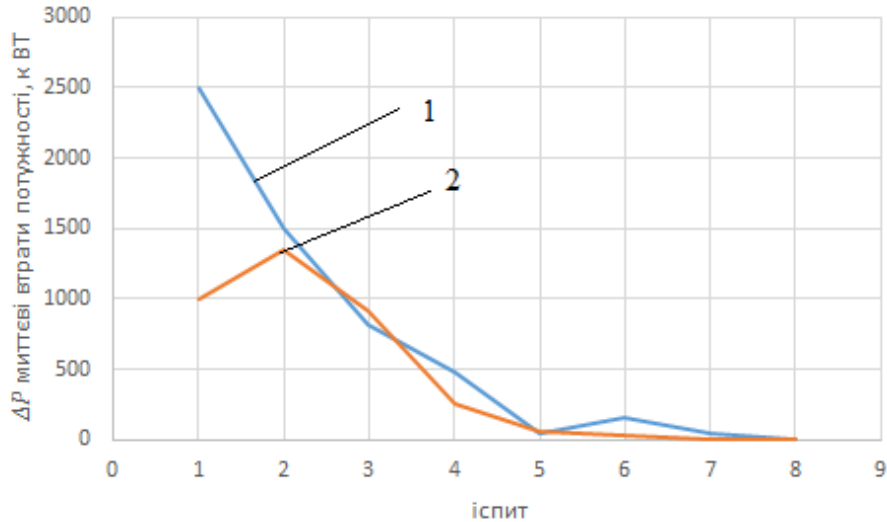


Рис. 12. Миттєві втрати потужності: 1 – нирвномірний , 2 – корегований

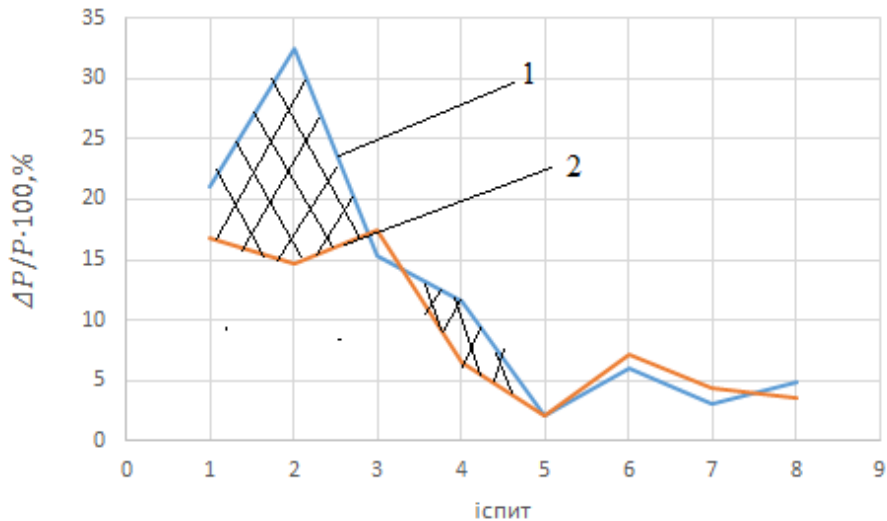


Рис. 13. Відсоткові втрати потужності в тяговій мережі: 1 – нирвномірний , 2 – корегований

Висновки

В даній роботі розглядалося питання енергоефективності діючих графіків руху поїздів на ділянці Покровськ – Межева . В результаті досліджень можна зробити такі висновки:

1. Нирвномірність потоку поїздів в тяговій мережі впливає на енергетичні характеристики. Величина втрат електроенергії в елементах системи електропостачання є визначальним фактором оцінки ефективності процесів електропостачання і електроспоживання в будь-якій електроенергетичній системі.

2. Згідно з проведеним дослідженням, розрахунок відсотків втрат в тяговій мережі показав, що при нирвномірному графіку руху найбільші втрати склали 32,5 %, при корегованому 17,5 %, найменші 2,09 % для нирвномірного графіку, 2,02 % для корегованого графіку руху, різниця втрат складає в кращому випадку 15 %, в найменшому 0,074 %. Таким чином за рахунок коригування графіку руху поїздів на ділянці можна зменшити втрати потужності в тяговій мережі на 0,1...15 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузнецов, В. Г. Оценка потенциала энергосбережения систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока [Текст] / В. Г. Кузнецов, Б. А. Костюковский // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”.-2012.-№26.-С.109-116.
2. Кузнецов, В. Г. Подходы к определению потенциала энергосбережения железнодорожного предприятия [Текст] / В. Г. Кузнецов, Н. М. Ковальчук // Тези 1-ї науково-практичної конференції "Енергооптимальні технології перевізного процесу".-2016.-Д.: ДНУЗТ.-С.78-79.
3. Сиченко, В. Г. Энергетика тяговых сетей [Текст]: монографія / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, О. І. Саблін.-Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017.-210с.
4. Денисюк С. П. Энергозбереження та енергетичний менеджмент у пристроях тягового електропостачання [Текст]: навчальний посібник / С. П. Денисюк, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко, О. М. Крупинський; Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015.– 264с.
5. Модульный тренажер машиниста / А. С. Акулов, К. І. Железнов, О. М. Заболотний, Л. В. Урсуляк, Є. В. Чабанюк, Д. В. Черняєв, А. О. Швець // Локомотив-інформ. – 2017. – № 7–8. – С. 42–49.
6. Навчальні модульні тренажери для спеціалізованої техніки / А. С. Акулов, К. І. Железнов, О. М. Заболотний, Л. В. Урсуляк, Є. В. Чабанюк, Д. В. Черняєв, А. О. Швець. – Локомотив-інформ. – 2017. – № 11–12. – С. 46–51.
7. Програмне забезпечення для візуалізації та вивчення електричних та пневматичних схем тягового рухомого складу / А. С. Акулов, К. І. Железнов, О. М. Заболотний, Л. В. Урсуляк, Є. В. Чабанюк, Д. В. Черняєв, А. О. Швець. – Локомотив-інформ. – 2017. – № 9–10. – С. 44–49.
8. Кузнецов, В. Г. Дослідження впливу показників транспортного потоку на втрати електроенергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях, А. О. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — Д., 2011. — Вип. 36. — С. 84—87
9. Калашников, К. О. Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень : авт. дис. к. т. н. / К. О. Калашников ; Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. - 20 с.
10. Кузнецов В. Г. Управління транспортним потоком для зменшення експлуатаційних витрат електрифікованих залізниць / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, К. О. Калашников // Електрифікація транспорту. — 2013. — № 6. — С. 71—79.

REFERENCES

1. Kuznetsov, V. G. Otsenka potentsyala enerhosberezheniya system elektrosnabzheniya tiahv poezdov postoiannoho toka [Assessment of the energy saving potential of DC traction power supply systems] / V. G. Kuznetsov, B. A. Kostyukovskiy // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu „KhPI”.-2012.-№26.-S.109-116.
2. Kuznetsov, V. H. Podkhody k opredeleniyu potentsyala enerhosberezheniya zheleznodorozhnoho predpriyatiya [Approaches to the definition of the energy saving potential for a railway enterprise] / V. G. Kuznetsov, N. M. Kovalchuk // Tezy 1-yi naukovopraktychnoi konferentsii "Enerhooptymalni tekhnolohii pereviznoho protsesu".-2016.-D.: DNUZT.-S.78-79.
3. Sychenko, V. G. Enerhetyka tiahovykh mrezh [Power engineering of traction networks]: monohrafiia / V. H. Sychenko, V. H. Kuznetsov, D. O. Bosyi, O. I. Sablin.-Dnipro: Vyd-vo PF «Standart-Servis», 2017.-210s.
4. Denysiuk S. P. Enerhozberezhennia ta enerhetychni menedzhment u prystroiakh tiahovoho elektropostachannia [Energy saving and energy management in traction power devices] : navchalnyi posibnyk / S. P. Denysiuk, V. H. Kuznetsov, V. H. Sychenko, O. M. Krupynskiy; Dnipropetr. nats. un-t zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana. – Dnipropetrovsk, 2015.– 264s.
5. Modulnyi trenazher mashynista [Modular simulator of driver] / A. S. Akulov, K. I. Zhelieznov, O. M. Zabolotnyi, L. V. Ursuliak, Ye. V. Chabaniuk, D. V. Cherniaiev, A. O. Shvets // Lokomotyv-inform. – 2017. – № 7–8. – S. 42–49.
6. Navchalni modulni trenazhery dlia spetsializovanoi tekhniki [Training modular simulators for specialized equipment] / A. S. Akulov, K. I. Zhelieznov, O. M. Zabolotnyi, L. V. Ursuliak, Ye. V. Chabaniuk, D. V. Cherniaiev, A. O. Shvets. – Lokomotyv-inform. – 2017. – № 11–12. – S. 46–51.
7. Prohramne zabezpechennia dlia vizualizatsii ta vyvchennia elektrychnykh ta pnevmatychnykh skhem tiahovoho rukhomoho skladu [Software for visualization and study of electric and pneumatic circuits of rolling stock] / A. S. Akulov, K. I. Zhelieznov, O. M. Zabolotnyi, L. V. Ursuliak, Ye. V. Chabaniuk, D. V. Cherniaiev, A. O. Shvets. – Lokomotyv-inform. – 2017. – № 9–10. – S. 44–49.
8. Kuznetsov, V. G. Doslidzhennia vplyvu pokaznykiv transportnoho potoku na vtraty elektroenerhii v tiahovii mrezhzi [Дослідження впливу показників транспортного потоку на втрати електроенергії в тяговій мережі] / V. G. Kuznetsov, O. M. Poliakh, A. O. Poliakh // Visn. Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana. — D., 2011. — Vyp. 36. — S. 84—87
9. Kalashnykov, K. O. Zmenshennia vtrat elektroenerhii v tiahovii mrezhzi postoiinoho strumu shliakhom vyboru ratsionalnoi dyslokatsii tiahovykh navantazhen [Reduction of electric power losses in the DC traction network by choosing a rational dislocation

© Кузнецов В. Г., Кравцов А. В., 2018

of traction loads]: avt. dys. k. t. n. / K. O. Kalashnykov ; Dnipropetr. nats. un-t zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana. - D.: Vyd-vo Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana, 2014. - 20 s.

10. Kuznetsov V. G. Upravlinnia transportnym potokom dlia zmeshennia ekspluatatsiinykh vytrat elektryfikovanykh zaliznyts [Transport flow management to reduce the operating costs of electrified railways] / V. . Kuznetsov, D. O. Bosyi, K. O. Kalashnykov // Elektryfikatsiia transportu. — 2013. — № 6. — S. 71—79.

У роботі аналізується потенціал енергозбереження системи тягового електропостачання за рахунок корегування показника нерівномірності потоку поїздів для електрифікованої ділянки. Розглянуто порівняння двох графіків руху поїздів з різної нерівномірністю за критерієм втрат електроенергії в тяговій мережі. Розглянуто діючий графік руху поїздів на дистанції електропостачання. Для діючого графіку розраховано втрати електроенергії в тяговій мережі для. Запропоновано коригований графік руху поїздів, в якому показник нерівномірності менший. Діючий і запропонований графік руху поїздів порівняно за критерієм втрат електроенергії в тяговій мережі. Величина втрат електроенергії в елементах системи електропостачання є визначальним фактором оцінки ефективності процесів електропостачання і електроспоживання в будь-якій електроенергетичній системі. В якості показника нерівномірності потоку поїздів прийнято коефіцієнт варіації.

Зменшити втрати електроенергії в тяговій мережі можливо за допомогою коригування показників нерівномірності транспортного потоку. Чим менша нерівномірність потоку поїздів тим менші втрати електроенергії в елементах системи тягового електропостачання. Запропоновано коригований графік потоку поїздів. Встановлено границі технічно досяжного потенціалу енергозбереження в системі тягового електропостачання за рахунок корегування показника нерівномірності потоку поїздів на електрифікованій ділянці. В сучасних умовах роботи залізницям України необхідно шукати шляхи енергозбереження з мінімальними інвестиціями. За рахунок корегування нерівномірності потоку поїздів можна зменшити втрати електроенергії в тяговій мережі. Встановлення потенціалу енергозбереження дозволяє планувати витрати на енергоощадні заходи, ранжувати їх по заданим критеріям, шукати дофінансування від фінансових інституцій.

Ключові слова: графік руху, енергозбереження, система тягового електропостачання, втрати електроенергії, тягова мережа.

УДК 621.331

В. Г. КУЗНЕЦОВ, А. В. КРАВЦОВ (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. (056) 793-19-11, эл. почта: vkuz@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0003-4165-1056

РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ УПРАВЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ПОТОКА ПОЕЗДОВ

В работе анализируется потенциал энергосбережения системы тягового электроснабжения за счет корректировки показателя неравномерности потока поездов для электрифицированного участка. Рассмотрено сравнение двух графиков движения поездов с различной неравномерностью по критерию потерь электроэнергии в тяговой сети. Рассмотрены действующий график движения поездов на дистанции электроснабжения. Для действующего графика рассчитаны потери электроэнергии в тяговой сети. Предложено скорректированный график движения поездов, в котором показатель неравномерности меньше. Действующий и предлагаемый график движения поездов сравниваются по критерию потерь электроэнергии в тяговой сети. Величина потерь электроэнергии в элементах системы электроснабжения является определяющим фактором оценки эффективности процессов электроснабжения и электропотребления в любой электроэнергетической системе. В качестве показателя неравномерности потока поездов принято коэффициент вариации.

Уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети возможно с помощью корректировки показателей неравномерности транспортного потока. Чем меньше неравномерность потока поездов тем меньше потери электроэнергии в элементах системы тягового электроснабжения. Предложено скорректированный график потока поездов. Установлено границы технически достижимого потенциала энергосбережения в системе тягового электроснабжения за счет корректировки показателя неравномерности потока поездов на электрифицированном участке. В современных условиях работы железным дорогам Украины необходимо искать пути энергосбережения с минимальными инвестициями. За счет корректировки неравномерности потока поездов можно уменьшить потери электроэнергии в тяговой сети. Установление потенциала энергосбережения позволяет планировать расходы на энергосберегающие мероприятия, ранжировать их по заданным критериям, искать дофинансирование от финансовых институтов.

Ключевые слова: график движения, энергосбережение, система тягового электроснабжения, потери электроэнергии, тяговая сеть.

© Кузнецов В. Г., Кравцов А. В., 2018

UDC 621.331

V. G. KUZNETSOV, A. V. KRAVTSOV (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport Academician named after Academician V. Lazaryan, Laraziana str., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. (056) 793-19-11, e-mail: vkuz@i.ua,
ORCID: orcid.org/0000-0003-4165-1056

CALCULATION OF ENERGY SAVING POTENTIAL BY CONTROLLING THE FLOW OF TRAINS

The paper analyzes the energy saving potential of the traction power system by adjusting the unevenness of the flow of trains for the electrified section. The comparison of two train schedules with different non-uniformity according to the criterion of electric power losses in the traction network is considered. Considered the current timetable of trains on the section of power supply. For the current timetable, the power losses in the traction network was calculated. An adjusted train timetable is proposed, in which the index of unevenness is smaller. The current and proposed timetable of trains is compared on the criterion of electric power losses in the traction network. The amount of electricity losses in the elements of the power supply system is a determining factor for assessing the efficiency of the power supply and electricity consumption processes in any power supply system. The coefficient of variation is proposed as an indicator of uneven flow of trains.

Reducing power losses in the traction network is possible by adjusting the traffic flow unevenness indicators. The less uneven flow of trains is the less electric power loss in the elements of the traction power system. It was proposed the corrected train flow timetable. It was established the boundaries of the technically accessible potential of energy saving in the traction power supply system due to the correction of the unevenness of the flow of trains on the electrified section. In current s working conditions, railways in Ukraine need to look for ways to save energy with minimal investment. By adjusting the uneven flow of trains, it's possible to reduce the power losses in the traction network. Setting up energy saving potential allows you to plan the costs of energy-saving measures, rank them according to specified criteria, seek co-financing from financial institutions.

Keywords: traffic timetable, energy saving, traction power system, power losses, traction network.

Received 23.01.2018; accepted in revised form 12.04.2018.

В. І. МАРТИНЕНКО, Д. О. БОСИЙ (ДНУЗТ)

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна, тел.: +380679491246, ел. пошта: leraposta@gmail.com, dake@i.ua; ORCID: orcid.org/0000-0003-1818-2490

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОМЕРЦІЙНОГО ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПОБУТОВИХ СПОЖИВАЧІВ

Вступ

Висока вартість електроенергії наразі та постійне подорожчання енергоносіїв призвели до того, що необхідно переоцінювати підхід до організації обліку, контролю та управління електроенергією на промислових підприємствах.

Споживачі повинні розраховуватися за отриману електроенергію не за допомогою старих приладів, за встановленою потужністю або за договорами, а за допомогою точних засобів вимірювальної техніки. Сучасна торгівля енергією та енергоносіями заснована на використанні системи автоматизованого обліку електроенергією, яка містить мінімальний відсоток людського фактору у зборі, обробці та передачі даних з підприємства та гарантує чіткий та об'єктивний облік. Саме з цією метою споживачі створюють на промислових об'єктах автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) [1]. Ця система містить комплекс технічних, алгоритмічних, математичних та програмних засобів та використовується для:

- контролю потужності, яка споживається в часи максимуму навантаження;
- підвищення точності обліку;
- обліку споживання електроенергії;
- контролю параметрів вимірювальних приладів;
- перерозподілу споживання електроенергії, планування добового графіку роботи основних цехів промислового підприємства;
- накопичення та зберігання даних про споживання електроенергії в базі даних.

Переваги організації обліку електроенергії за допомогою автоматизованих систем обліку, контролю та управління досить відомі. Системи такого складу використовуються як на вітчизняних промислових підприємствах, так і за кордоном. Крім функції обліку, ці системи також здійснюють контроль та управління електроспоживанням на таких підприємствах. Основний економічний ефект АСКОЕ полягає в тому, що зменшується сплата за споживану електроенергію та потужність, а для енергокомпаній в часи зниження максимумів споживання – в зменшенні капіталовкладень на збільшення генеруючої потужності. За рахунок різниці в тарифах можливо отримати значний економічний ефект, який дозволяє компенсувати витрати на створення такої системи за декілька місяців [3].

Основні техніко-економічні задачі, які необхідно вирішити шляхом застосування таких систем, полягають у наступному:

1. Комерційні розрахунки за електроенергію між енергопостачальником та споживачем, а також між енергопостачальними організаціями енергосистеми в цілому.

2. Економічні розрахунки за міжсистемні перетоки електроенергії та потужності.

3. Контроль за виконанням договірних значень споживання електроенергії та потужності промислових споживачів.

4. Визначення та планування виробництва та втрат електроенергії та питомих втрат палива на електростанціях різного типу.

5. Визначення вартісних показників виробництва, передачі та розподілу електроенергії.

6. Складання балансів електроенергії та потужності для різних підприємств енергосистеми [1 – 4].

Метою застосування АСКОЕ є:

1. Точний вимір кількості електроенергії, що передана споживачеві.

2. Досягнення максимальної економії електроенергії.

3. Використання інтегрованих та розрахункових даних та графіків.

4. Підвищення оперативності управління режимами електроспоживання.

5. Зменшення обсягу збору, обробки отриманих даних.

6. Оптимізація режимів електроспоживання.

7. Моніторинг величин енергії та потужності.

У загальному понятті ці системи мають позначення «AMR systems» Automatic meter reading (AMR – система автоматичного обліку

показників лічильників). Дуже багато зусиль було витрачено на створення простих, надійних та дешевих систем особливо для побутових споживачів. При цьому намагалися максимально дотримуватися таких моментів: по-перше, система повинна бути окупною та здатна забезпечити надійність функціонування системи електропостачання взагалі. На даний час такі системи виробляються на серійному підприємстві та поступово впроваджуються у багатьох країнах з різним економічним рівнем [1].

Якщо проаналізувати стан використання АСКОЕ в різних країнах, необхідно зауважити, що першими використовувати ці комплекси почали США, Канада, Японія, Германия, Ізраїль, Франція, Італія, Швейцарія. Ці країни, безумовно, є лідерами у використуванні цих технологій. Такі країни, як Іспанія, Бразилія та Україна також активно використовують комплекси АСКОЕ [2].

На даний час найбільш поширеною технологією для зв'язку AMR є радіозв'язок, а потім – технологія низьковольтного PLC-зв'язку.

У системах AMR використовують деякі технічні рішення на базі PLC-технологій що дозволяють:

- у більшості споживачів зберегти однотарифні лічильники індукційної системи, які є досить дешевими, або електронні з передачею показників від них по силовій мережі в групі пристроїв збору даних;
- впроваджувати у кожного споживача будь-які тарифні системи, при цьому змінюється лише програмне забезпечення у пристрої збору даних, не проводяться ніякі монтажні роботи з метою заміни лічильників;
- зчитувати показники лічильників у багатоквартирних будинках за декілька секунд, дистанційно, при цьому не потрібно заходити до приміщення, де ці лічильники розташовані;
- можливо виявляти факти розкрадання електроенергії, приймати сигнали щодо усього та дистанційно відключати тих споживачів, які не розраховуються за спожиту електроенергію.

Системи з передачею інформації по силовій мережі є досить універсальними та багатофункціональними, оскільки разом з обробкою та аналізом інформації про споживання різних видів енергетичних ресурсів можуть бути розширені за допомогою інших функцій, серед яких можуть бути системи пожежогасіння та сигналізації. Такий підхід знижує термін окупності та підвищує ефективність використання таких систем [3].

Впровадження системи АСКОЕ

Як вже зазначалося раніше, використання автоматизованих систем обліку та контролю електроенергії (АСКОЕ) дозволяє отримувати точну та достовірну вимірювальну інформацію, підвищує ефективність управління процесом виробництва, розподілу та споживання електроенергії в цілому.

Також використання цієї системи дає можливість створювати цілком реальні баланси електроенергії та потужності для поточних режимів споживання, також робити тривале та короткочасне прогнозування, оформлення різноманітних фінансових документів на всіх рівнях системи електропостачання промислового об'єкту [1-3].

На економічну нестабільність в галузі електроенергетики України дуже суттєво впливають втрати електричної енергії.

Комерційні втрати, які відомо, містять у своєму складі метрологічні втрати, які обумовлені трансформаторами струму і напруги, лічильників електричної енергії, неодноточним збором показників лічильників та розкраданням електричної енергії.

Точність вимірювальної інформації системи обліку визначається похибками вимірювань в точках обліку різних рівнів, синхронізацією проведення вимірювань, а також похибками обробки результатів вимірювань [3].

Для зниження комерційних втрат доцільно стимулювати споживачів, на всіх рівнях споживання електроенергії використовувати АСКОЕ на основі точної вимірювальної техніки з використанням сучасної апаратури зв'язку [5].

Основним елементом АСКОЕ є електронний мікропроцесорний лічильник електроенергії класу точності 1,0 S. Така система дозволяє здійснити високоточне вимірювання, автоматизований одночасний збір показників вимірювань, обробку отриманої інформації та передачу даних про електроспоживання організації, що постачає електроенергію споживачеві [4].

Для передачі даних в АСКОЕ широко використовуються виділенні та комуруючі телефонні лінії.

Але у цей час Енергоринок працює, застосовуючи засоби телемеханіки, при цьому середня результуюча похибка досягає 15 % [1]. Однак, на сьогоднішній день найбільш перспективним слід вважати використання цифрового GSM-стандарту.

Дослідження системи АСКОЕ на прикладі ПАТ ДТЕК Дніпрообленерго

ДТЕК Дніпрообленерго активно впроваджує АСКОЕ з 2010 року. Як приклад, зниження загальних втрат за 3 роки з моменту впровадження проекту на двох трансформаторних підстанціях (1536 споживачів) у житловому масиві Комунар районних електричних мереж в порівнянні з відповідним періодом 2009 року склало близько 36%.

Переваги впровадження АСКОЕ беззаперечні – зниження загальних втрат електроенергії; простота процесу відключення / підключення споживачів, зняття показань - все це можливо виконати безпосередньо з офісу компанії.

На зниження комерційних втрат направлено впровадження автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії. У Дніпрі з її роботою вже знайомі більше 83 000 абонентів.

Автоматизоване робоче місце оператора дозволяє в оперативному режимі стежити за станом всієї системи, контролювати параметри мережі, відстежувати споживання електроенергії в реальному часі. Тепер у ПАТ ДТЕК Дніпрообленерго немає необхідності направляти в зону обслуговування ТП і КТП контролерів для зняття показань приладів обліку. Вся інформація з ТП і підстанцій збирається за допомогою модемів на сервер. Фахівці Дніпрообленерго в режимі реального часу мають доступ до споживання кожного абонента, можуть контролювати його добові витрати. Головний аргумент на користь АСКОЕ в тому, що комерційні втрати в тих житлових масивах де вже встановлена система зведені нанівець.

Система АСКОЕ ПАТ ДТЕК Дніпрообленерго складається з трьох рівнів:

- нижній рівень (НР) АСКОЕ включає в себе первинні вимірювальні прилади;
- середній рівень (СР) АСКОЕ – розташовано на трансформаторних підстанціях – це пристрої збору й передачі даних (ПЗПД). У ролі ПЗПД виступають контролери з вбудованим програмним забезпеченням енергообліку. Контролери здійснюють у заданому циклі інтервалу усереднений цілодобовий збір вимірювальних даних з територіально розподілених ПВП, обробку й передачу цих даних на верхній рівень.
- верхній рівень (ВР) АСКОЕ – Центральний сервер АСКОЕ.

Всі рівні АСКОЕ пов'язані між собою каналами зв'язку.

Процес збору та передачі даних виконується наступним чином: на тих об'єктах, де встанов-

лений контролер збору даних (трансформаторні підстанції) кожен день в певний час, збирається і накопичується інформація з лічильників електроенергії про спожиту електроенергію.

Дані з точок комерційного обліку, котрі не заведені в АСКОЕ, додаються в базу даних в ручному режимі шляхом введення показників знятих з лічильника візуально та переданих диспетчеру Енергозбуту.

Далі інформація передається до центрального серверу АСКОЕ, де після цього формуються макети о споживанні електричної енергії.

Апаратні засоби у системі АСКОЕ Дніпрообленерго

Як вже зазначалось раніше основним елементом АСКОЕ є електронний мікропроцесорний лічильник електроенергії класу точності 1,0. (рис.1), який призначений для вимірювання сумарного значення спожитої активної енергії в одному або декількох тарифах. Лічильники мають вбудований модуль радіоінтерфейсу у виконанні з внутрішньою антеною та здійснюють передачу даних за стандартом IEEE 802.15.4 (2,4 ГГц) і протоколом «ZigBee». Лічильник обладнаний реле керування навантаженням, стан якого контролюється через радіоканал оператором.

Основні технічні характеристики лічильника NIK 2102:

- клас точності – 1,0;
- номінальна напруга – 220 В;
- номінальна сила струму – 5 А;
- номінальна частота мережі – 50 Гц.



Рис. 1. Лічильник електричної енергії NIK 2102 багатотарифний

Проміжними елементами між лічильниками та сервером є комутаційний контролер (КК) та Контролер збору даних (КЗД).

Комутаційний контролер КК-01-02 (рис.2) Призначений для забезпечення передачі даних між лічильниками електроенергії і контролером збору даних.

КК-01-02 оснащений радіомодулем НІК-002. Передача даних може забезпечуватися через радіоканал стандарту ІЕЕ 802.15.4 (2,4 ГГц), або через радіоканал та інтерфейс RS-485.



Рис. 2. Комутаційний контролер КК-01-02

Основні технічні характеристики КК-01-02:

- вихідна потужність радіомодуля – +17Дб;
- частота радіомодуля – 2,4 ГГц;
- номінальна напруга живлення – 220 В;
- потужність споживання – 5 Вт;

Контролер збору даних КС-02-06 (рис. 3) призначений для дистанційного збору, накопичення, і передачі на сервер інформації про спожиту електричну енергію з однофазних і трифазних лічильників електроенергії, обладнаних відповідними інтерфейсами.

Основні технічні характеристики КС-02-06:

- максимальна кількість лічильників, що можуть одночасно з'єднуватися з контролером, – 1000 шт.;
- обсяг енергонезалежної пам'яті контролера – 300 МБ;
- обсяг оперативної пам'яті – 60 МБ;
- частота радіомодуля – 2,4 ГГц;

- вихідна потужність радіомодуля – +19 Дб;
- робочі діапазони GSM/GPRS модема – 900/1800/1900 МГц;
- клас GPRS зв'язку – В;
- номінальна напруга живлення – 220 В;
- потужність споживання – 10 Вт;



Рис. 3. Контролер збору даних КС-02-06

Аналіз зростання цін на енергоресурси

Середня оптова ринкова ціна (ОРЦ) електроенергії, яка склалася на Оптовому ринку електроенергії (ОРЕ) України в 2016 році, збільшилася на 19% (на 209,95 грн за 1 МВт-год) в порівнянні з 2015 роком - з 1105,08 грн до 1315,03 грн за 1 МВт-год. Ціна до кінця 2017 склала 1354,98 грн за МВт / год (без ПДВ).

Поступово триває ліквідація механізму стимулювання цін на електроенергію для населення за рахунок завищення тарифів для промислових підприємств. 26 лютого 2015 року НКРЕКП було прийнято постанову про запровадження поетапного підвищення тарифів на електроенергію, що відпускається населенню.

За даними Дніпрообленерго можна побачити (табл.1, рис. 4.), що подорожчання вартості електроенергії на кожному новому етапі становить приблизно 25% в порівнянні з попереднім.

Таблиця 1

Тарифи на електроенергію для населення

	з 1.04.2015	з 1.09.2015	з 1.03.2016	з 1.09.2016	з 1.03.2017
До 100 кВт*год	0,366	0,456	0,57	0,714	0,9
100-600 кВт*год	0,63	0,789	0,99	1,29	1,68
Понад 600 кВт*год	1,407	1,479	1,56	1,638	

© Мартиненко В. І., Босий Д. О., 2018

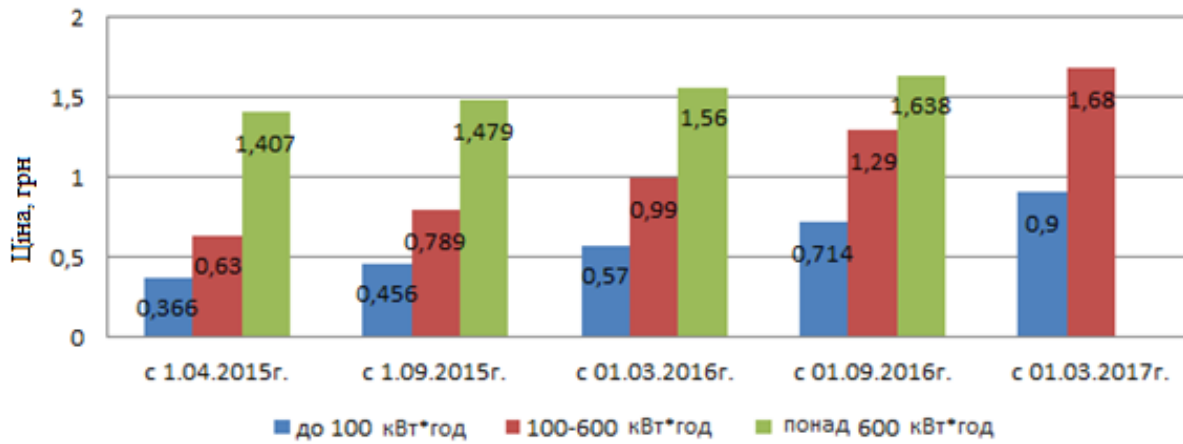


Рис. 4. Тарифи на електроенергію для населення

Згідно з постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики і комунальних послуг, розмір тарифу для населення варіюється в залежності від обсягу споживання електроенергії: до 100 кВт-год і понад 100 кВт-год.

Ліквідація перехресного субсидіювання та зростання вартості електричної енергії суттєво збільшує доходність від її реалізації в побутовому секторі. У той же час зростає кількість неплатежів та частка комерційних витрат у структурі балансу електричної енергії. За цих обставин є закономірним розвиток систем взаєморозрахунків енергозбутових кампаній із побутовими споживачами, який неможливий без сучасної системи моніторингу за споживання електричної енергії.

Елімінація рутинної складової робочого процесу та впливу людського фактора під час зняття, передачі та обробки отриманих даних покликана не допускати конфліктів між абонентами та постачальником електроенергії. За рахунок впровадження дистанційного опитування лічильників вирішується проблема доступу до засобів обліку в закритих приміщеннях; зникає ймовірність внесення помилкових показань лічильника споживачем або представником енергопостачальника, відсутня можливість перенесення обсягу спожитої електроенергії на поточний або наступний розрахунковий період у результаті розрахунку споживання білінговою системою, У той же час щоденне опитування та практично одночасне зняття показань лічильників дає можливість складати баланс потужності та індивідуальний графік навантаження.

Упровадження АСКОЕ дозволяє досягти підвищення комфортності та ефективності об-

слуговування побутових абонентів, перейти на якісно новий (повністю автоматизований) білінг в електроенергетиці, а також дозволяє проводити планування електроспоживання в умовах зонного обліку електроенергії. Проведення модернізації комерційного обліку в побутовому секторі потребує виваженого плану дій та механізму його здійснення.

Ефективність переходу до різних тарифних систем

Для 83 тисяч сімей в Дніпропетровській області підрахунок вартості електроенергії розумно ведуть інтелектуальні лічильники. Вони економлять своїм «господарям» до 40% електроенергії. Всі ці лічильники підключені в єдину автоматизовану систему комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) ДТЕК Дніпрообленерго.

АСКОЕ вигідно клієнтам компанії - побутовим споживачам. «Розумний» лічильник сам враховує споживання електроенергії за декількома тарифними зонами, що дозволяє значно заощадити кошти на оплату послуг.

Якщо лічильник двозонний, то заощадити можна до 30%.

Таблиця 2

Коефіцієнт до тарифу, при переході на розрахунки за спожиту електроенергію за двома тарифами

Найменування тарифної зони	Період дії зони	Коефіцієнт до тарифу
День	07:00 – 23:00	1,0
Ніч	23:00 – 07:00	0,5

Тобто, в період дії зони «День» - вартість електричної енергії не зміниться, але в період дії зони «Ніч» вартість спожитої електричної енергії буде в 2 рази нижче.

Якщо лічильник тризонний, то заощадити можна до 40%, продумавши, коли дешевше користуватися енергоємними приладами. А «розумний» лічильник автоматично зафіксує споживання в три періоди доби.

Таблиця 3

Коефіцієнт до тарифу, при переході на розрахунки за спожиту електроенергію за трьома тарифами

Найменування тарифної зони	Період дії зони	Коефіцієнт до тарифу
Пік	08:00 – 11:00 20:00 – 22:00	1,5
Напівпік	07:00 – 08:00 11:00 – 20:00 22:00 – 23:00	1,0
Ніч	23:00 – 07:00	0,4

Тобто, в період дії зони «Пік» - вартість електроенергії буде в 1,5 рази вище, в зоні «напівпіку» - залишиться без змін, в зоні «Ніч» - на 60% дешевше [8].

Багатотарифний лічильник електроенергії на сьогоднішній день є найбільш затребуваним в порівнянні зі звичайним однотарифним, так як забезпечує можливість економії електроенергії. Його вартість вище, ніж у однотарифного лічильника. Проте, він окупає себе досить швидко за рахунок того, що він оснащений спеціальним пристроєм для програмування роботи за умовами кількох тарифів.

Аналіз режимів електроспоживання

Добовий графік електроспоживання такої нерегульованої групи споживачів, як побутових є нерівномірним і характеризується піком навантаження в години вечірнього максимуму ОЕС України, провалом навантаження в години нічного періоду доби та майже рівномірним споживанням електричної енергії протягом годин ранкового та денного періоду доби.

При запровадженні в електроенергетиці ринкових взаємовідносин, регулювання споживачами добового графіка навантаження, з метою його вирівнювання, можливе лише за умов застосування економічних стимулів.

Основним із таких стимулів є система тарифів, диференційованих за періодами часу, яка повинна стимулювати споживачів до збільшення споживання електричної енергії, більш дешевої в години нічної зони та, відповідно, зменшувати її споживання в піковий період, коли вартість її майже вдвічі перевищує тариф для відповідного класу споживачів і, таким чином, сприяти вирівнюванню добового графіка навантаження.

У табл. 4 наведені дані по споживанню електроенергії побутовим споживачем який не використовує систему АСКОЕ. По даним споживання електроенергії будується добовий графік навантаження рис. 5.

Таблиця 4

Споживання електроенергії

Споживач	Споживана потужність, Вт	Кількість, шт	Початок часу роботи впродовж доби, год	Кінець часу роботи впродовж доби, год	Час роботи впродовж доби, год	Витрата енергії, Вт-год	Витрата енергії 23:00 — 7:00, кВт-год
Комп'ютер-моноблок	100	1	18	24	6	600	100
Зовнішній мережевий накопичувач	4	1	17	23,2	6,2	24,8	0,8
Ноутбук	100	2	20	22	2	400	0
Wi-Fi рамка	4	2	6	24	18	72	8
НВЧ-піч	800	1	6	7	1	800	0
Індукційна плита	2000	1	10	11,3	1,3	2600	0

© Мартиненко В. І., Босий Д. О., 2018

Продовження табл. 4.

Холодильник	360	1	1	24	24	8640	2880
Пральна м.	1600	1	14	15	1	1600	0
Освітлення будинку	243	1	19	24	5	1215	243
Сумарне добове споживання						15,9518	3,2318
Сумарне місячне споживання						478,554	96,954

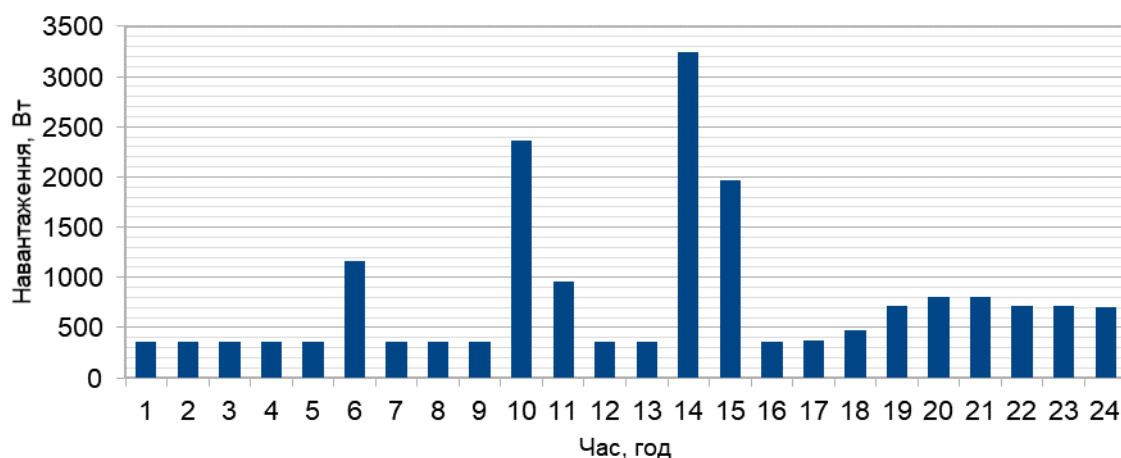


Рис. 5. Добовий графік навантаження

Розрахункова сума за місяць (без АСКОЕ) буде становити:

$$\sum K = \sum P \cdot 1,68 = 478,554 \cdot 1,68 = 803,97 \text{ грн} \quad (1)$$

Де $\sum K$ - сума коштів за місяць, $\sum P$ - сумарне навантаження за місяць, 1,68 – тариф на електроенергію при споживанні понад 100 кВт.

Розрахункова сума за місяць (з АСКОЕ):

$$\begin{aligned} \sum K_A &= (\sum P - \sum P_{\text{ніч}}) \cdot 1,68 + \\ &+ (\sum P_{\text{ніч}} \cdot 1,68) \cdot 0,5 = \\ &= (478,554 - 96,954) \cdot 1,68 + \\ &+ (96,954 \cdot 1,68) \cdot 0,5 = 722,53 \text{ грн} \end{aligned} \quad (2)$$

Де $\sum K_A$ - сума коштів за місяць при використанні системи АСКОЕ, $\sum P_{\text{ніч}}$ – сумарне навантаження при споживанні електроенергії вночі

(з 23:00 до 7:00).

Різниця між сумами за місяць складає:

$$\begin{aligned} \sum K - \sum K_A &= \\ &= 803,97 - 722,53 = 81,44 \text{ грн} \end{aligned} \quad (3)$$

Тобто провівши розрахунки та проаналізувавши отримані дані можна зробити підсумок, що економія коштів при використанні системи АСКОЕ складає 10,1% на місяць.

Застосування тарифів, диференційованих за періодами часу, передусім вигідно тим побутовим споживачам, які використовують енергоємні побутові електроприлади (електроопалення, електроплити, посудомийні та пральні машини, насосне обладнання, тощо) в години нічної зони доби.

В Україні використання споживачами двозонних тарифів, диференційованих за періодами часу, поширено більше ніж тризонних, а

саме на 01.01.2016 року кількість таких споживачів становила понад 157 тис., найбільша частина яких це населення - понад 153 тис., комунально-побутові - 1,3 тис., непромислові споживачі - понад 1,2 тис., сільгоспспоживачі - понад 1,0 тис.

При цьому в 2015 році споживання електричної енергії зазначеними групами споживачів від загального обсягу електроспоживання споживачів, що розраховуються за двозонними тарифами, диференційованими за періодами часу, склало:

- населенням 770,2 млн кВт·год або 74,8%;
- комунально-побутовими споживачами 183,4 млн кВт·год або 17,8%;

У 2015 році споживачами, що розраховуються за тризонними диференційними тарифами, спожито 26,8% електричної енергії від загального обсягу електроспоживання по Україні. За цей же період споживачами, які розраховуються за двозонними диференційними тарифами, спожито тільки 0,9% від загального обсягу електроспоживання по Україні.

Найбільше застосовують розрахунки за тризонними диференційними тарифами промислові споживачі. Обсяг електроспоживання споживачів, що розраховуються за тризонними диференційними тарифами в 2015 році від загального електроспоживання промислових споживачів склав 56,3%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Наказ від 17.04.2000 року N 32/28/28/276/75/54 Про затвердження Концепції побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку.
2. Офіційний сайт державного підприємства «Енергоринок» [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <http://www.er.gov.ua>.
3. Шестеренко А.В. Компенсация погрешности в электронных счетчиках электроэнергии / А.В. Шестеренко // Электрические сети и системы. – 2004. – № 1—2. – С. 85-88.
4. Шестеренко А.В. АСКУЭ: использование радиоканала для передачи данных электроизмерения [Електронний ресурс] / А.В. Шестеренко // сайт Электрические сети и системы. – Режим доступу до сайту: <http://leg.co.ua>.
5. Шляхи поліпшення метрологічних характеристик вимірювальних комплексів, що містять трансформатори струму та напруги / А.О. Квицинський, М.В. Керницький, В.В. Назаров, П.Д. Нагорний, О.В. Рубан, А.М. Зализецький // Энергетика и электрификация. – 2003. – №6. – С. 13-20.

Висновки

Впровадження АСКОЕ має на меті спрощення процедури розрахунку між абонентом та енергозбутовою компанією, зменшення дебіторської заборгованості за спожиту електроенергію побутовими споживачами, зниження величини комерційних і технічних втрат за рахунок підвищення точності, достовірності вимірів та оперативності надходження вимірювальної інформації від первинних приладів. АСКОЕ дає реальний інструмент, що дозволяє розробити заходи для раціоналізації використання електричної енергії, тому є невід'ємною складовою в політиці енергозбереження на державному рівні.

Відповідно до проведеного аналізу можна зробити висновок, що застосування системи АСКОЕ дає побутовим споживачам можливість економії власних коштів за рахунок переходу до тарифів диференційованих за періодами часу. Однак в Україні використання населенням цих тарифів поки що не набуло значного поширення. Затримка у запровадженні зазначеної прогресивної технології регулювання добового графіка навантаження насамперед пов'язана з тим, що більшість населення не поінформована про можливість зниження розміру оплати за спожиту електроенергію за рахунок застосування диференційних тарифів.

Однак, необхідно відмітити, що з кожним роком спостерігається позитивна тенденція щодо збільшення кількості населення, яке розраховується за двозонними диференційними тарифами.

REFERENCES

1. Order of 17.04.2000 N 32/28/28/276/75/54 On Approval of the Concept of Construction of Automated Electricity Accounting Systems in the Energy Market.
2. Official site of the state enterprise "Energorynok" [Electronic resource]. - Site access mode: <http://www.er.gov.ua>.
3. Shesterenko A.V. Compensation of error in electronic electricity meters / A.V. Shesterenko // Electrical networks and systems. - 2004. - № 1-2. - P. 85-88.
4. Shesterenko A.V. ASKUE: use of a radio channel for transmission of electrical measurement data [Electronic resource] / A.V. Shesterenko // site Electrical networks and systems. - Site access mode: <http://leg.co.ua>.
5. Ways of improvement of metrological characteristics of measuring complexes containing current and voltage transformers / A.O. Kviatsynsky, M.V. Kernschik, V.V. Nazarov, P.D. Nagorny, O.V. Ruban, A.M. Zalizetsky // Power engineering and electrification. - 2003. - №6. - P. 13-20.
6. Law of Ukraine on Electricity with amendments

6. Закон України про електроенергетику із змінами і доповненнями, внесеними Законами України.

7. Тарифи на електроенергію [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <https://index.minfin.com.ua/tarif/electric/>

8. Тарифи для споживачів, диференційовані за періодами часу [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <http://doe.com.ua/node/1795>

9. Державна інспекція енергетичного нагляду України [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: <https://den.energy.gov.ua/77-aktualni-pitannya/533-shchodo-nerivnomirnosti-dobovoho-hrafika-navantazhennia-oes-ukrainy-ta-rehuliuвання-rezhymiv-elektrospozhyvannia>

10. Аналіз та впровадження АСКОЕ на підприємствах / Ю.С. Олійник / Стаття / [Електронний ресурс]. – Режим доступу до сайту: http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/16482/soi_2016_3_50.pdf.

and supplements introduced by the Laws of Ukraine.

7. Electricity tariffs [Electronic resource]. - Site access mode: <https://index.minfin.com.ua/tarif/electric/>

8. Tariffs for consumers, differentiated by periods of time [Electronic resource]. - Site access mode: <http://doe.com.ua/node/1795>

9. State Inspectorate of Energy Supervision of Ukraine [Electronic resource]. - Site access mode: <https://den.energy.gov.ua/77-aktualni-pitannya/533-shchodo-nerivnomirnosti-dobovoho-hrafika-navantazhennia-oes-ukrainy-ta-rehuliuвання-rezhymiv-elektrospozhyvannia>

10. Analysis and implementation of AES in enterprises / Yu.S. Oliynyk / Article / [Electronic resource]. - Mode of access to the site: http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/16482/soi_2016_3_50.pdf.

В даний час для забезпечення сталого розвитку та надійного функціонування галузі електроенергетики, перш за все, необхідні нові енергоефективні рішення. Одним з таких рішень є автоматизація системи контролю та обліку електричної енергії, яке дозволяє істотно підвищити ефективність використання енергоресурсів.

З метою вирішення проблеми енергетичної ефективності було розглянуто принцип роботи сучасних автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) на базі багатofункціональних високоточних мікропроцесорних електрорічильників. Проаналізовано, які саме цілі та техніко-економічні задачі пред'являються до АСКОЕ. Наведено стислу характеристику впровадження даних систем у країнах з різним рівнем розвитку економіки. Також розглянуто, з яких елементів складається система. Показана ефективність використання АСКОЕ під час впровадження енергозберігаючих заходів та керування режимами електроспоживання. Обґрунтована економічна доцільність впровадження запропонованої системи.

Ключові слова: автоматизація обліку, електрична енергія, тариф, побутові споживачі.

УДК 621.331.3

В. И. МАРТЫНЕНКО (ДНУЖТ)

Кафедра «Интеллектуальные системы электроснабжения», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепр, 49010, Украина, тел. : +380679491246, эл. почта: leraposta@gmail.com, dake@i.ua; ORCID: orcid.org/0000-0003-1818-2490

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В настоящее время для обеспечения устойчивого развития и надежного функционирования отрасли электроэнергетики, прежде всего, необходимы новые энергоэффективные решения. Одним из таких решений является автоматизация системы контроля и учета электрической энергии, позволяет существенно повысить эффективность использования энергоресурсов.

С целью решения проблемы энергетической эффективности были рассмотрены принцип работы современных автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) на базе многофункциональных высокоточных микропроцессорных электросчетчиков. Проанализировано, какие именно цели и технико-экономические задачи пред'являемые к АСКУЭ. Приведено краткую характеристику внедрения данных систем в странах с разным уровнем развития экономики. Также рассмотрено, из каких элементов состоит система. Показана эффективность использования АСКУЭ при внедрении энергосберегающих мероприятий и управления режимами электропотребления. Обоснована экономическая целесообразность внедрения предлагаемой системы.

Ключевые слова: автоматизация учета, электрическая энергия, тариф, бытовые потребители.

UDC 621.331.3

V.I. MARTYNENKO (DNURT)

Department of Intelligent power supply systems, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan 2 st., Dnepr, 49010, Ukraine, phone: +380679491246, e-mail: leraposta@gmail.com, dake@i.ua; ORCID: orcid.org/0000-0003-1818-2490

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF THE AUTOMATED SYSTEM OF COMMERCIAL ELECTRICITY CONSUMPTION CALCULATION FOR HOUSEHOLD CONSUMERS

At present, to ensure sustainable development and reliable operation of the electric power industry, first of all, new energy-efficient solutions are needed. One such solution is the automation of the system for controlling and accounting for electrical energy, which makes it possible to substantially improve the efficiency of the use of energy resources.

In order to solve the problem of energy efficiency, the principle of operation of modern automated commercial electricity metering systems (ASCAE) based on multifunctional high-precision microprocessor-based electricity meters was considered. It was analyzed what exactly the goals and technical and economic tasks are for ASCAE. A brief description of the implementation of these systems in countries with different levels of economic development is given. Also considered from which elements the system consists. The effectiveness of the use of AMR in the implementation of energy-saving measures and control of power consumption modes is shown. The economic feasibility of introducing the proposed system

Keywords: accounting automation, electric energy, tariff, household consumers.

Received 22.01.2018; accepted in revised form 10.04.2018.

Е. Д. КИМ (УИПА), К. Л. ЧРЗАН (ВРОЦЛАВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Кафедра электромеханических систем, Украинская инженерно – педагогическая академия, Харьков (Бахмут), тел.: (050) 371 19 41, эл. почта: ykim@meta.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-0042-7974
Вроцлавский технологический университет, тел.: (71) 320 26 88, эл. почта: krystian.chrzan@pwr.wroc.pl

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ В КОМБИНАЦИИ СО СТЕКЛЯННЫМИ

Введение

Накопленные за более чем 30 летний период применения полимерных изоляторов (ПИ) с кремнийорганической защитной оболочкой данные свидетельствуют о высоких эксплуатационных характеристиках этих изоляторов в районах подверженных сильным загрязнениям, что объясняется гидрофобными свойствами материалов защитной оболочки и эффектом переноса гидрофобности на загрязненный слой [1-4]. В настоящее время композиционные изоляторы воспринимаются как альтернативные традиционным изоляторам практических для всех классов напряжения воздушной линии электропередачи переменного и постоянного тока по всему миру [5]. Изоляторы могут быть выполнены в виде одной детали длиной до 10 м, обеспечивающей номинальную механическую прочность до 1000 кН и более. Отмечается экспоненциально нарастающая тенденция применения некерамических изоляторов и поданным [5, 6] на конец 2010 г. их количество на ВЛ 66 кВ и выше превышало 20 млн. шт. Наиболее впечатляющее применение композитных изоляторов имеет место в Китае. Число композитных изоляторов на вновь строящихся линиях ультравысокого напряжения переменного и постоянного тока (1000 кВ, 750 кВ, ±800 кВ и ±500 кВ) составляет более чем 55% всех изоляторов, находящихся в обслуживании. Более высокая устойчивость к загрязнениям позволяет заметно уменьшить высоту порталов, та-

ким образом удается существенно снизить капитальные затраты на строительство таких линий.

Как отмечается в работе [5], надежность сегодняшнего поколения композитных изоляторов, изготовленных в соответствии с новейших технологий, включая жесткий контроль качества, сравнима, как иллюстрирует данные обследования (табл. 1), с керамическими изоляторами. При этом подчеркивается, что для достижения желаемого уровня надежности большое значение имеет обоснованность выбора конструкции изоляторов. Выбранные изоляторы по своим электрическим и механическим параметрам должны координироваться с реальными эксплуатационными нагрузками, сопровождаемыми в течение всего прогнозируемого срока службы. Большое внимание уделяется на технические решения по выравниванию потенциала вдоль длины изолятора и снижению максимальной напряженности электрического поля применением градировочной арматуры.

Однако на сегодня еще остается нерешенной проблема оценки остаточного срока службы изоляторов в режиме реального времени, что позволило бы своевременно выполнять ремонтные работы или провести замену критически поврежденных изоляторов. Несмотря на то, что в настоящее время апробированы различные способы и инструментарий по диагностике композитных изоляторов, все еще методы оценки остаточного срока безопасной работы изоляции не формализованы в виде рекомендации международного комитета по стандартизации.

Таблица 1

Данные эксплуатации линейных изоляторов в сетях 66 кВ и выше в Китае

Изолятор	Суммарно по 2012 г.		От 2007 по 2012 г.г.	
	Установлено	Повреждено	Установлено	Повреждено
Фарфоровый	37,7 %	0,059 %	26,4 %	0,04 %
Полимерный	37,0 %	0,068 %	43,7 %	0,04 %
Стекланный	25,0 %	0,020 %	29,5 %	0,01 %
Фарфоровый длинно-стержневой	0,30 %	0,044 %	0,40 %	0,02 %

© Ким Е. Д., Чрзан К. Л., 2018

Методы диагностики

На практике обслуживания высоковольтной линий электропередачи [7] нашли следующие способы диагностики состояния кремнийорганических изоляторов:

- визуальный осмотр и оценка гидрофобности;
- инфракрасная (ИК) термография;
- ультрафиолетовое (УФ) детектирование;
- измерение электрического поля.

Первый способ контроля проводится с подъемом на опору и устанавливают наличие грубых повреждений на поверхности конструкции, однако не выявляет так называемые скрытые дефекты под защитной оболочкой, например, науглероженные дорожки на стеклопластиковом стержне. Отмечаются [5] о высокой эффективности ИК/УФ контролей, но вместе с тем интерпретация данных наблюдений не является однозначной, поскольку причины вызывающие регистрируемые излучения могут быть не связаны с отыскиваемым видом повреждения. Так фиксируемые сигналы могут быть обусловлены электрическими разрядами на поверхности загрязненного изолятора, поэтому ИК/УФ диагностики условно следует отнести к косвенным методам.

К прямому методу можно отнести измерение электрического поля вдоль изолятора, методика, которая заимствована из технологии диагностики керамических изоляторов и приспособлена для исследования композитных изоляторов [8]. Путем сравнения картины распределения электрического поля контролируемого изолятора с эталонной устанавливается место расположения и оценивается величина поврежденного участка изоляции, скрытого под резиновой оболочкой. Вследствие значительной трудоемкости такого вида измерения выполняются выборочно на тех изоляторах, которые по данным визуальных и ИК/УФ наблюдений идентифицированы как проблемные.

Следует отметить о постоянном совершенствовании как инструментариев диагностики, так и методов интерпретации регистрируемых параметров в части повышения чувствительности приборов и наполнения программных средств по идентификации характера и уровня повреждения. Обследование изоляции в различных энергокомпаниях осуществляется по собственной программе, но на основе выше перечисленных способов. На рис. 1 представлена схема инспекции композитных изоляторов, принятая в Италии и рекомендованная для воздушных линий (ВЛ) класса 420 кВ и выше.



Рис. 1. Схема контроля ПИ, используемая в Италии

Эффект последовательного присоединения тарельчатых изоляторов

Снижение электрического поля. Задача минимизации максимальной напряженности электрического поля некерамических изоляторов осуществляется путем оптимизации конфигурации металлических наконечников и применения экранной арматуры уже на этапе разработки первых поколений полимерных изоляторов. В те ранние годы создания некерамических изоляторов было предложено [9] в качестве последующих способов разгрузки электрической напряженности использование изоляторов тарельчатого типа, присоединяемых последовательно полимерному изолятору с потенциальной и заземленной стороны. Впоследствии выполненные численные исследования электрического поля изолирующих подвесок [10, 11] показали состоятельность комбинирования изоляторов длинностержневых и тарельчатых конструкций.

Пример расчета [10], выполненного для моделей изоляции для линий 110 кВ с одинаковой общей строительной высоты, равной стандартному полимерному изолятору FXBW3-110/70 приведено в табл. 2. В качестве оригинала модели тарельчатого изолятора был взят также стандартный стеклянный изолятор FC-100/70, n – количество этих изоляторов.

Как можно видеть из табл. 2, при равенстве общей высоты изоляции, наличие одного стеклянного изолятора со стороны провода приводит к снижению максимальной напряженности поля в два раза. Так же проведением сравнительных испытаний методом предварительных загрязнений было установлено, что дополнение тарельчатыми изоляторами практически не сказывается на удельные влагоразрядные

© Ким Е. Д., Чрзан К. Л., 2018

напряжения комбинированной изоляции. Сообщается в [10], что, основываясь на результатах исследований, в 2008 году изоляция линий 110кВ Shabao протяженностью 14,115 км была дополнительно усилена стеклянными изоляторами и экранной арматурой (рис. 2). Таким образом удалось заметно повысить грозоупорность линии и стабилизировать процессы электрического старения полимерной изоляций.



Рис. 2. ВЛ 110кВ, Shabao (Китай), полимерный изолятор с экраном и стеклянным изолятором

Таблица 2

Результаты расчетов поля изоляции 110 кВ с равной строительной высотой

n- число FC-100/70	0	1	2	0+экр	1+экр
Разность потенциалов на полимерном изоляторе, %	100	71,3	56	100	71,3
Максимальная напряженность поля, кВ/мм	1,2	0,54	0,34	0,39	0,23
Разность потенциалов на 20% длине ПИ от высоковольтного электрода, %	58,2	40,0	43,7	45,8	0,38

По данным исследований авторов [11] для сверхвысокой ВЛ 1000 кВ оптимальное количество тарельчатых изоляторов в изолирующей подвеске может составлять до 9 шт., при котором достигается проектные требования по критическим напряженностям и для полимерной изоляции, и для выравнивающей арматуры по короне, оставаясь по конструктивным параметрам в приемлемых параметрах. При этом наибольшее напряжение на тарельчатом изоляторе не будет превышать допустимого значения.

Индикация электрического старения. Теперь более подробно рассмотрим роль последовательно присоединяемых тарельчатых изоляторов в качестве индикатора электрического старения основной изоляции, полимерного изолятора. Такая возможность вытекает из следующих общих соображений: при образовании электрических разрядов в полимерном изоляторе, в том числе, под защитной оболочкой, согласно уравнению непрерывности тока

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (1)$$

где \mathbf{j} – вектор плотности тока; ρ – удельная плотность заряда,

следует ожидать разряды на поверхности тарельчатых изоляторов с интенсивностью, пропорциональной интенсивности внутренних

разрядов. Т.е. внутренние электрические процессы должны отобразиться в форме разрядов на тарельчатых изоляторах.

В рамках общего подхода численного интегрирования уравнения Лапласа методом конечных элементов, путем замены тонкослойных протяженных подобластей, что собой представляет поврежденная и увлажненная поверхность стержня, бестолщинными поверхностями, были выполнены расчеты электрических полей линейных изоляционных конструкции на класс напряжения 35 кВ и выше [12, 13].

В работе [13] были рассмотрены три модели подвески, основу которой составлял полимерный изолятор класса 330 кВ типа ЛК70/330 со строительной длиной $L=2880$ мм:

- полимерный изолятор ЛК70/330;
- полимерный изолятор ЛК70/330 с последовательно соединенным к нему со стороны траверсы стандартным изолятором из закаленного стекла ПС120Б (ПС120Б+ЛК70/330);
- полимерный изолятор ЛК70/330 с последовательно соединенным со стороны провода изолятором ПС120Б (ЛК70/330+ПС120Б) (рис. 3).

Для определенности принимались следующие гипотезы потери электрической прочности полимерного изолятора вдоль границы стержень - оболочка:

- разгерметизация со стороны оконцевателя, увлажнение, искажение электрического поля в сторону усиления, образование частичных разрядов и прорастание проводящих дорожек. Последующее увлажнение, увеличение напряженности поля E_m на острие поврежденного участка, увеличение E_m до критических величин, пробой или перекрытие неповрежденного участка, что в конечном итоге, приведет к полной потере изоляционных свойств изолятора;

- нарушение адгезионного слоя, как следствие теплового старения (например, в результате воздействия силовой дуги), конденсация влаги в пограничной области и снижение поверхностного сопротивления вдоль границы, в том числе, образование проводящих следов от частичных разрядов. Такой процесс может протекать более - менее равномерно по всей длине изолятора и со временем привести к электрическому отказу.

Первую гипотезу ухудшения изоляции условно можно отнести к динамически развивающемуся процессу, вторую - к квазистатическому старению, и для решаемой задачи второй случай можно рассматривать как возможный установившийся этап развития первого случая.

Были рассмотрены два направления прорастания поврежденной области: со стороны высоковольтного потенциала и со стороны низковольтного потенциала. Основные результаты расчетов приведены на рис. 4 и 5.

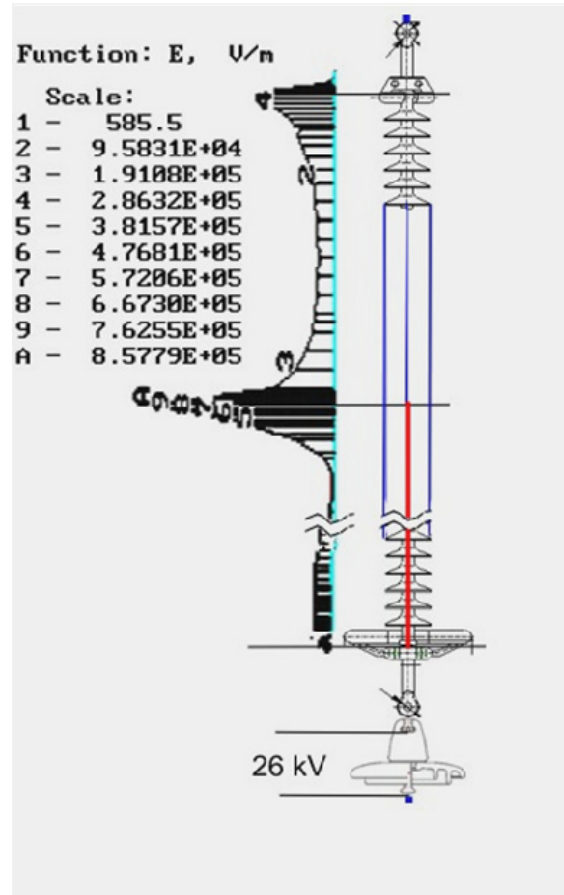


Рис. 3. Схема и пример расчета электрического поля комбинированной изоляционной подвески 330 кВ

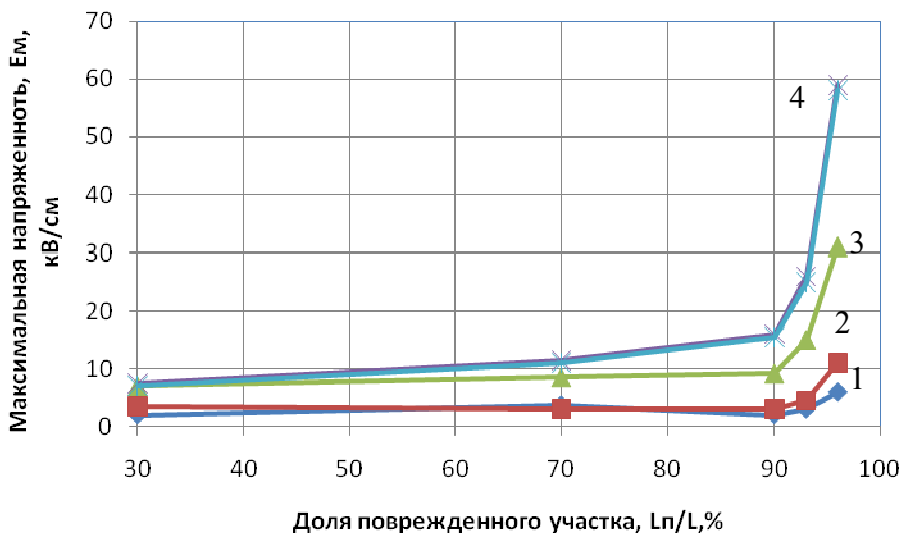


Рис. 4. Зависимость E_m в полимерном изоляторе от длины поврежденного участка при поверхностной проводимости, $lg \chi$ (См): 1- (-9); 2- (-8); 3- (-7); 4- (-6)

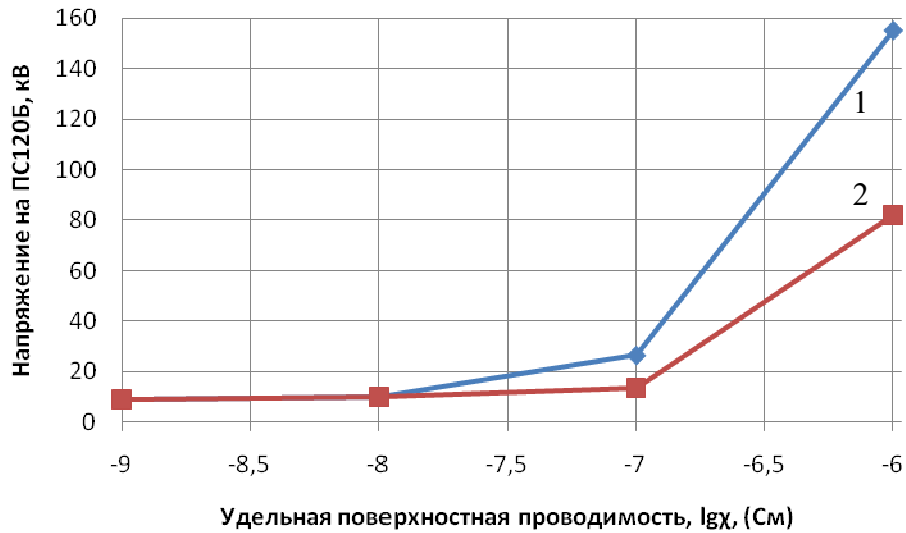


Рис. 5. Расчетное напряжение на тарельчатом изоляторе подвески: 1- ЛК70/330+ПС120Б; 2- ПС120Б+ЛК70/330

Из рис. 4 хорошо видно, что эффект вытеснения электрического поля становится наглядным, если удельная поверхностная проводимость вдоль границы стержень – оболочка превысит $(10^{-8} \div 10^{-7})$ См, особенно, когда длина поврежденного участка L_n приближается к некоторой критической величине, примерно равной 80-90 % всей изоляционной длины изолятора L . Характерно, что максимальная напряженность E_m при проводимости $\chi \geq 10^{-6}$ См изменяется очень слабо, при этом отмечается нарастание поля по всей длине изолятора.

Как показывают расчеты, напряженность поля на внешней стороне защитной оболочки в 1,5-1,6 крат больше чем на ее внутренней стороне. Так как внутренняя прочность изоляции выше прочности воздуха, то при некоторой глубине повреждения стержня на внешней стороне защитной оболочки может иметь место поверхностные разряды. Очевидно, интенсивность как внешних, так и внутренних частичных разрядов можно оценивать по величине максимально возможными низкочастотными активными составляющими токами утечки по поврежденной поверхности изолятора

$$I_{ут.м} = \pi d \chi E_m, \quad (2)$$

где d - диаметр стеклопластикового стержня;

χ – удельная поверхностная проводимость.

Можно убедиться, что при величине $\chi \cong 10^{-7}$ См, при которой заметно увеличение максимальной напряженности поля E_m (см. рис. 4), токи утечки не превышают единиц миллиампер, поэтому частичное шунтирование

поверхностными разрядами неповрежденного отрезка изолятора еще не может инициировать перекрытие всего изолятора. Полная потеря электрической прочности полимерного изолятора, скорее всего, возможно при последующем увеличении проводимости на два порядка, при которой, согласно (2), токи в искровых каналах могут достигать сотни миллиампер.

Было установлено, что для рассматриваемых изолирующих подвесок в исходном состоянии последовательно присоединенные тарельчатые изоляторы не вносят значительных изменений в картину напряженности электрического поля вдоль полимерного изолятора. Вместе с тем по мере ухудшения изоляции и приближения поврежденного участка к противоположному электроду увеличивается разность потенциалов между электродами тарельчатого изолятора. Величина перераспределяемого напряжения на тарельчатом изоляторе зависит от места расположения этого изолятора и от принятого направления прорастания поврежденной области. Очевидно, если принять, что процесс старения идет одновременно по всей длине стержня, $L_n \rightarrow L$, тогда разность потенциалов на тарельчатом изоляторе определится только от места его расположения и усредненной величины проводимости (рис. 5).

При $L_n \rightarrow L$ (см. рис. 5), напряжение на стеклянном изоляторе, если он установлен со стороны провода, то может возрасти до уровня интенсивного коронирования при $\chi > 10^{-7}$ См. При последующем ухудшении изолирующих свойств полимерного изолятора напряжение на тарельчатом изоляторе может приблизиться практически до разрядных напряжений для тарельчатого изолятора, соответственно усилится

интенсивность коронирования изолятора. Очевидно, частичные электрические разряды по поверхности тарелки изолятора продолжится до тех пор, пока не наступит условие перехода от локального перекрытия к полному перекрытию или пробую изолирующей подвески.

Эффект свечения тарельчатого изолятора при рабочем напряжении иллюстрирует фотография макета подвески ЛК70-330+ПС120Б (рис. 6). Фотография выполнена в затемненном зале, но без каких то ни было светоусиливающих устройств. Приведенном здесь опыте внутреннее повреждение полимерного изолятора имитировалось нанесением на поверхность стеклопластикового стержня по всей длине водного раствора соли КСl, измеренная удельная поверхностная проводимость колебалась в пределах $(10^{-7} \div 10^{-6})$ См. В ходе опыта с моделями изоляторов с внутренними повреждениями, при которых относительно просто было заметить на расстоянии около (30 – 40)м коронирование тарельчатого изолятора, выраженных признаков разрядов на поверхности полимерного изолятора заметить не удавалось ни в случае с тарельчатым изолятором, ни без него.

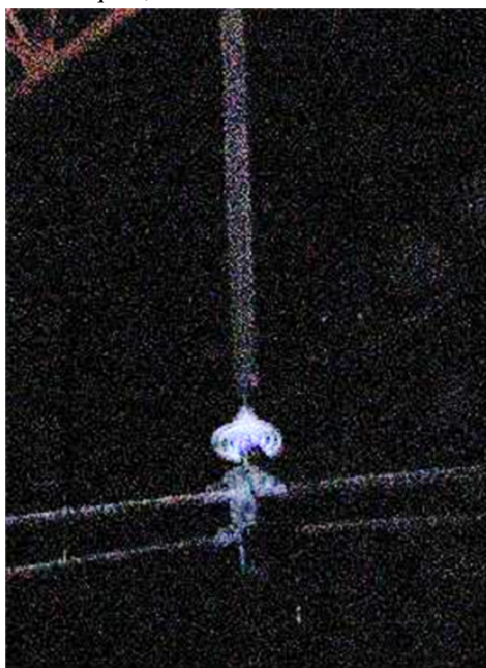


Рис. 6. Фотография коронирующего изолятора ПС120Б

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. EPRI Survey of Application of Overhead Transmission Line Polymer Insulators in North America & Summary of EPRI Polymer Insulator Failure Database. Wold Conference & Exhibition on Insulations, Arresters & Bushings. Marbellu, Spain. 2003. P. 147-157.
2. Jim H. Duxbury. A Conservative Approach To-

Представляется очевидным, что наличие в изолирующей подвеске тарельчатого изолятора также существенно упрощает диагностику полимерного изолятора посредством анализа электрического поля. В этом случае окажется достаточным измерить падение напряжения на тарельчатом изоляторе и сопоставлять с заранее нормированными критическими значениями.

Выводы и рекомендации

Последовательно присоединенные изоляторы тарельчатого типа служит не только в качестве дополнительного элемента для снижения напряженности поля полимерного изолятора, но и индикатором электрического старения изолирующей подвески.

Ухудшение электрической изоляции полимерного изолятора отображается в виде:

- увеличения напряжения на изоляторе тарельчатого типа;
 - коронного излучения,
- что значительно облегчает диагностику существующими средствами.

Рекомендуется с целью упрощения индикации полимерных изоляторов с пониженной внутренней электрической прочностью применять последовательно присоединяемые к ним тарельчатые изоляторы из закаленного стекла. В районах с сильными загрязнениями желательно использовать тарельчатые изоляторы с гидрофобным покрытием из кремнийорганических эластомеров холодного отверждения, нашедших широкое применение.

Предпочтительнее тарельчатый изолятор устанавливать со стороны токопровода, при этом ожидается более высокая чувствительность контроля полимерных изоляторов, повышение импульсной прочности подвески [13].

REFERENCES

1. EPRI Survey of Application of Overhead Transmission Line Polymer Insulators in North America & Summary of EPRI Polymer Insulator Failure Database. Wold Conference & Exhibition on Insulations, Arresters & Bushings. Marbellu, Spain. 2003. P. 147-157.
2. Jim H. Duxbury. A Conservative Approach To-

© Ким Е. Д., Чрзан К. Л., 2018

ward Composite Insulators at BC Hydro: Current Factors and Future Considerations. Wolds Insulator Congress & Exhibition. Shanghai, China. 2001. pp. 79-83.

3. Кравченко В. А., Соломоник Е. А. Разработка, изготовление, опыт эксплуатации и производство полимерных изоляторов для ВЛ и подстанций напряжением 35-500 кВ в России. // Международная научно-техническая конференция, Санкт-Петербург. – 2006.

4. EPRI. Development of a Tool to Assess the Electrical Condition of Composite Insulators Prior to Live Work. www.epri.com, Product ID 1014572, 11/1/2006

5. F. Schmuck, J. Seifert, I. Gutman, A. Pignini: "Assessment of the condition of overhead line composite insulators", Paris, CIGRE-2012, b2-214.

6. A. Pignini: "HV Composite Insulators Today: Market Size & Reliability." INMR Issue 91, Quarter One, 2011, Volume 19, Number 1.

7. CIGRE WG 22.03: "Review of "In service diagnostic testing" of composite insulators", ELECTRA, No. 169, December 1996, p.p. 105-119.

8. G. H. Vaillancourt, S. Carignan, and C. Jean, "Experience with the detection of faulty composite insulators on high voltage power lines by the electric field measurement method," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 661-666, Apr. 1998.

9. А.с., СССР. Гирлянда изоляторов для крепления и изоляции проводов / Е.Д. Ким, В.Н. Соломатов, Ю.Н. Яшин, Н.Ф. Тарасова, В.А. Аксенов. - SU1607628 А-1 Н01 В17/04 от 05.12. 1988.

10. Qing Yang, Rui Wang, Wenxia Sima, Tao Yuan and Lei Liao: "Improvement of the Electric Field Distribution around the Ends of Composite Insulator with Series Connection of Glass Insulator" Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 248-252.

11. Jialong Wang*, Yannan Chen, Jintao Liao, Zongren Peng: "Voltage and E-field Distribution of UHV Composite Insulator with Connection of Porcelain Insulators" ISBN: 978-1-4799-8903-4 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM) pp. 628-631.

12. Ким Ен Дар, Г. В. Сиченко, В. Л. Калмыков. Исследование электрического поля полимерных изоляторов с внутренним электрическим дефектом. // Залізничний транспорт України – 2007 - №5 – С. 61 – 63.

13. Ким Е.Д., Калмыков В.Л., Розов В.А., Демидов О.А. Стекланный изолятор как индикатор внутреннего электрического состояния полимерного изолятора. / Энергетика та електрифікація. – 2009. - №4. - С. 29-33.

ward Composite Insulators at BC Hydro: Current Factors and Future Considerations. Wolds Insulator Congress & Exhibition. Shanghai, China. 2001. pp. 79-83.

3. Kravchenko V.A., Solomonik E.A.. Razrabotka, izgotovlenie, opit ekspluatatii i izgotovlenie polimernix izolatorov dlya VL i podstantii napryazheniem 35-500 kV v Rossii. // Mezhdunarodnaya nauchno-texnicheskaya konferentia. Sankt-Peterburg. 2006.

4. EPRI. Development of a Tool to Assess the Electrical Condition of Composite Insulators Prior to Live Work. www.epri.com, Product ID 1014572, 11/1/2006

5. F. Schmuck, J. Seifert, I. Gutman, A. Pignini: "Assessment of the condition of overhead line composite insulators", Paris, CIGRE-2012, b2-214.

6. A. Pignini: "HV Composite Insulators Today: Market Size & Reliability." INMR Issue 91, Quarter One, 2011, Volume 19, Number 1.

7. CIGRE WG 22.03: "Review of "In service diagnostic testing" of composite insulators", ELECTRA, No. 169, December 1996, p.p. 105-119.

8. G. H. Vaillancourt, S. Carignan, and C. Jean, "Experience with the detection of faulty composite insulators on high voltage power lines by the electric field measurement method," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 661-666, Apr. 1998.

9. А.с., СССР. Гирлянда изоляторов для крепления и изоляции проводов / Е.Д. Ким, В.Н. Соломатов, Ю.Н. Яшин, Н.Ф. Тарасова, В.А. Аксенов. - SU1607628 А-1 Н01 В17/04 от 05.12. 1988.

10. Qing Yang, Rui Wang, Wenxia Sima, Tao Yuan and Lei Liao: "Improvement of the Electric Field Distribution around the Ends of Composite Insulator with Series Connection of Glass Insulator" Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 1b/2013, pp. 248-252.

11. Jialong Wang*, Yannan Chen, Jintao Liao, Zongren Peng: "Voltage and E-field Distribution of UHV Composite Insulator with Connection of Porcelain Insulators" ISBN: 978-1-4799-8903-4 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM) pp. 628-631.

12. Kim En Dar, G.V. Sichenko, V.L. Kalmikov. Isledovanie elektricheskogo polya polimernix izolatorov s vnutrennim elektricheskim defektom/Zaleznichnii transport Ukraini-2007-№5-С.61-63

13. Kim E.D., Kalmikov V.L., Rozov V.A., Demidov O.A. Steklyannii izolator kak indikator vnutrennego sostoyania polimernogo izolatora./Energetika ta elektrifikatia/-2009.-№4.-С. 29-33.

В настоящее время линейные полимерные изоляторы с кремнийорганической защитной оболочкой воспринимаются как альтернативные традиционным изоляторам практических для всех классов напряжения воздушной линии электропередачи переменного и постоянного тока по всему миру. Однако на сегодня еще остается нерешенной проблема оценки остаточного срока службы изоляторов в режиме реального времени, что позволило бы своевременно выполнять ремонтные работы или провести замену критически поврежденных изоляторов. Несмотря на то, что в настоящее время апробированы различные способы и инструментарий по диагностике композитных изоляторов, все еще методы оценки остаточного срока безопасной работы изоляции не формализованы в виде рекомендации международного комитета по стандартизации.

В работе рассматривается изолирующая подвеска для высоковольтной линии электропередачи из полимерного изолятора, дополненного изоляторами тарельчатого типа. Последовательно присоединенные тарельчатые изоляторы не только выравнивают потенциалы вдоль всей подвески, соответственно, уменьшают максимальную напряженность поля полимерного изолятора, но и могут служить индикатором скрытых электрических процессов в полимерном изоляторе.

Ключевые слова: полимерный изолятор, изолятор тарельчатого типа, напряженность электрического поля, электрическое старение, диагностика.

УДК 621.315

Є. Д. КИМ (УПА), К. Л. ЧРЗАН (ВРОЦЛАВСЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ)

Кафедра електромеханічних систем, Українська інженерно - педагогічна академія, Харків (Бахмут), тел.: (050) 3711941, ел. пошта: ykim@meta.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-0042-7974
Вроцлавський технологічний університет, тел.: (71) 320 26 88, ел. пошта: krystian.chrzan@pwr.wroc.pl

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЛІНІЙНИХ ПОЛІМЕРНИХ ІЗОЛЯТОРІВ В КОМБІНАЦІЇ З СКЛЯНИМИ

Нині лінійні полімерні ізолятори з кремнійорганічною захисною оболонкою сприймаються як альтернативні традиційним ізоляторам практичних для усіх класів напруги повітряної лінії електропередачі змінного і постійного струму по всьому світу. Проте на сьогодні ще залишається невирішеною проблема оцінки залишкового терміну служби ізоляторів в режимі реального часу, що дозволило б своєчасно виконувати ремонтні роботи або провести заміну критично пошкоджених ізоляторів. Не дивлячись на те, що нині апробовані різні способи і інструментарій по діагностиці композитних ізоляторів, все ще методи оцінки залишкового терміну безпечної роботи ізоляції не формалізовані у вигляді рекомендації міжнародного комітету із стандартизації.

У роботі розглядається ізолююча підвеска для високовольтної лінії електропередачі з полімерного ізолятора, доповненого ізоляторами тарільчастого типу. Послідовно приєднані тарільчасті ізолятори не лише вирівнюють потенціали уздовж усієї підвіски, відповідно, зменшують максимальну напруженість поля полімерного ізолятора, але і можуть служити індикатором прихованих електричних процесів в полімерному ізоляторі.

Ключові слова: полімерний ізолятор, ізолятор тарільчастого типу, напруженість електричного поля, електричне старіння, діагностика.

UDC 621.315

K. E. DAR (UIPA), K. L. CHRZAN (WROCLAW TECHNOLOGICAL UNIVERSITY)

Department of the electromechanics systems, Ukrainian engineer - pedagogical academy, Kharkiv (Baxmut), tel.: (050) 3711941, e-mail: ykim@meta.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-0042-7974
Wroclaw technological university, tel.: (71) 320 26 88, mail: krystian.chrzan@pwr.wroc.pl

EFFICIENCY OF THE USE OF LINEAR POLYMER INSULATORS IN THE COMBINATION WITH GLASSES

At present, linear polymeric insulators with an silicone protective shell are perceived as alternative to traditional insulators practical for all classes of AC and AC voltage lines around the world. However, today, the problem of estimating the remaining life of insulators in real time is still unsolved, which would allow timely repair work or replacement of critically damaged insulators. Despite the fact that various methods and tools for diagnosing composite insulators are currently being tested, the methods for estimating the remaining term of safe isolation work are still not formalized in the form of recommendations of the International Committee for Standardization.

The paper deals with an insulating suspension for a high-voltage power transmission line from a polymer insulator supplemented with a plate-type insulator. Sequentially joined disk insulators not only equalize the potentials along the entire suspension, respectively, reduce the maximum field strength of the polymer insulator, but also serve as an indicator of hidden electrical processes in the polymer insulator.

Keywords: polymer insulator, plate type insulator, electric field strength, electric aging, diagnostics.

Received 13.04.2018; accepted in revised form 10.05.2018.

І. О. КОСТЕНКО, В. Ф. ХАРЧЕНКО, М. В. ХВОРОСТ (ХНУМГ)

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, кафедра «Електротранспорт», кафедра «Системи електропостачання та електроспоживання міст», вул. Маршала Бажанова, 17, м. Харків, Україна, 61002, тел.: +38(068)-584-65-66, ел. пошта: ks170685@ukr.net, kharchenko1054@gmail.com, bqd@kname.edu.ua;
ORCID: orcid.org/0000-0002-8170-7432, orcid.org/0000-0003-1209-609X, orcid.org/0000-0002-2606-8228

РОЗРАХУНОК МАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З КОМБІНОВАНИМ ЗБУДЖЕННЯМ ДЛЯ ТРОЛЕЙБУСІВ

Вступ та постановка проблеми

Сучасна інфраструктура європейських міст нерозривно пов'язана з енергоефективним міським електротранспортом. На завантажених транспортних артеріях міст з обмеженою можливістю розташування окремо виділених полос для електротранспорту показують свою перевагу тролейбуси, які об'єднують переваги контактного електротранспорту з можливістю маневрів на вузьких та завантажених магістралях.

Енергоефективність тролейбуса обумовлюється, в першу чергу, тяговим електроприводом [1], системою, що перетворює електричну енергію в механічну силу тяги. В останні часи наряду зі створенням безконтактних тягових приводів на основі асинхронних тягових двигунів, які відрізняються підвищеною надійністю, в Україні проходить постійну модернізацію широко розповсюджений тяговий привод на основі тягових двигунів постійного струму з комбінованим збудженням [2].

Літературний огляд

Одним з напрямків підвищення ефективності тягового приводу є використання DC-DC перетворювача для живлення обмотки незалежного збудження. Однак існуючі зараз методики не дають можливості у повному обсязі визначити магнітні характеристики роботи тягового двигуна при одночасному включенні у різних режимах його обмоток збудження [3].

Недоліком підходу, що запропонована у роботі [4] є дуже обмежена галузь застосування, особливо при переході до магнітних систем восьмигранної форми які характерні для тягових двигунів вітчизняного виробництва. Для створення більш універсального підходу розглянемо методику що заснована на розрахунку магнітного поля двигуна.

Визначення електромагнітних характеристик двигуна з комбінованим збудженням необхідно

врахувати особливості магнітної системи, потоки розсіяння та взаємодію потоків збудження обох обмоток, а також потоку реакції якоря та потоку додаткових полюсів [5]. Для рішення подібних задач знайшов широкого поширення метод кінцевих елементів [5-10]. Для задач розрахунку двигунів постійного струму адекватне використання двомірної постановки задачі, з урахуванням повздовжених елементів станини двигуна [5].

Мета статті

Метою роботи є створення методики розрахунку магнітних характеристик тягового двигуна з комбінованим збудженням на основі методу кінцевих елементів.

Матеріал досліджень

Основні положення методу кінцевих елементів. Для стаціонарного магнітного поля метод кінцевих елементів в двомірній розрахунковій моделі і прямокутній системі координат полягає в мінімізації нелінійного енергетичного функціонала [5, 6, 10]:

$$F = \int_S \left(\int_0^{B_x} \frac{1}{\mu} B_x dB_x + \int_0^{B_y} \frac{1}{\mu} B_y dB_y \right) dS - \int_S \vec{A} \cdot \vec{\delta} dS$$

де S — область розрахунку магнітного поля, B_x, B_y — складові вектора магнітної індукції за напрямками прямокутної системи координат x та y , μ — магнітна проникність, $\vec{\delta}$ — щільність струму, \vec{A} — векторний магнітний потенціал, який визначається співвідношенням

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}.$$

Для прямокутної системи координат прийнятої для розрахунків, що становлять вектора магнітної індукції визначаються за формулами, виведеним з рішення рівняння:

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A}{\partial x}.$$

Розрахунок магнітного поля двигуна. Для подальших досліджень у якості базової конструкції обрано тяговий двигун ЕД 139А, виробництва ДП завод «Електроважмаш».

Для вирішення поставленого завдання використовувався програмний комплекс FEMM, що включає в себе:

– предпроцесор дозволяє задавати граничні умови, властивості матеріалів розрахункових областей і програму триангуляції;

– програму розрахунку магнітного поля, яка становить і вирішує систему нелінійних рівнянь методом Ньютона-Рафсона.

– постпроцесор дозволяє відображати розрахункову картину магнітного поля, проводити розрахунок поверхневих інтегралів різного виду, розраховувати інтеграли по заданому контуру, визначати магнітний потік проходить через заданий контур, визначати значення напруженостей, індукції магнітного поля в заданих точках, магнітні проникності в заданих точках.

На рис. 1. показана область розрахунку, розбита на кінцеві трикутні елементи.

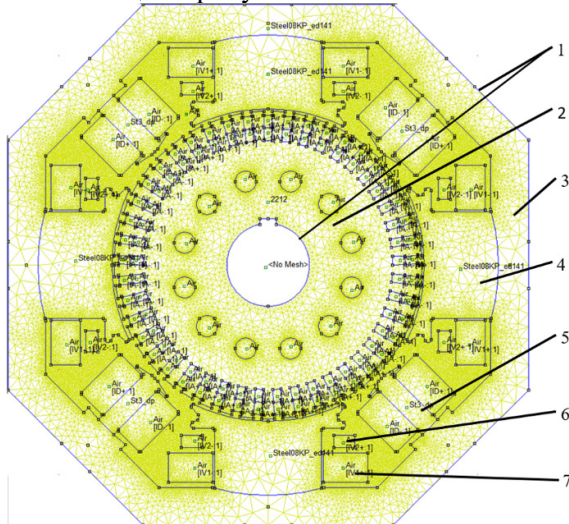


Рис. 1. Розрахункова область у поперечному перетині тягового двигуна ЕД 139 А: 1– Границі встановлення граничних умов 1-го роду, 2 – якор, 3 – станина, 4 – головний полюс, 5 – додатковий полюс, 6 – послідовна обмотка збудження, 7 – незалежна обмотка збудження

З огляду на те, що комбінована система збудження у режимі навантаження має лише центральну симетрію, то розрахунок буде проводитися на всьому поперечному перерізі машини.

На границя 1 (рис. 1) приймаємо гранична умова $A = 0$. З огляду на прийнятих припущень про те, що магнітний потік поза розглянутої області дорівнює нулю.

Для нелінійних ділянок розрахункових області, які виконані зі сталей введені криві намагнічення, які апроксимовані кусочно лінійними функціями.

Згідно методу кінцевих елементів розрахункова область розбита на кінцеві елементи. Щільність сітки більша для повітряних зазорів та між полюсних зон в яких зосереджено основне напруження магнітного поля та поля розсіяння обмоток збудження.

Для встановлення струмів якоря в області зі струмами (обмоток збудження, додаткових полюсів та якоря) встановлюються МРС цих областей з урахуванням кількостей витків [5,6,10].

Для зручності ідентифікації режимів роботи двигуна введемо відносні коефіцієнти, що ідентифікують режими роботи двигуна:

– коефіцієнт струму якоря

$$k_a = \frac{I_a}{I_{an}},$$

де I_a , I_{an} – струми якоря у розрахунковому та номінальному режимах;

– коефіцієнт струму основної (послідовної) обмотки збудження

$$k_{v1} = \frac{I_{v1}}{I_{an}},$$

де I_{v1} – струми послідовної обмотки у розрахунковому режимі, цей коефіцієнт дорівнює коефіцієнту ослаблення струму;

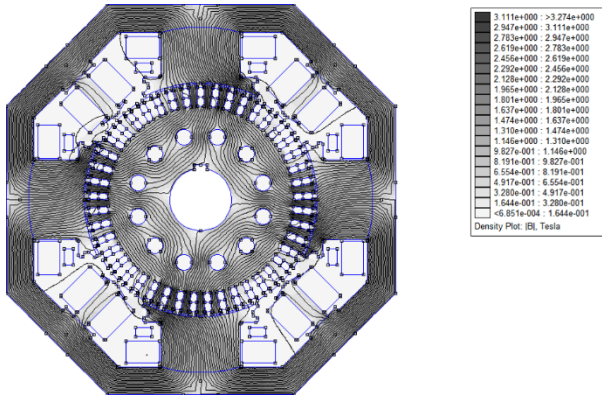
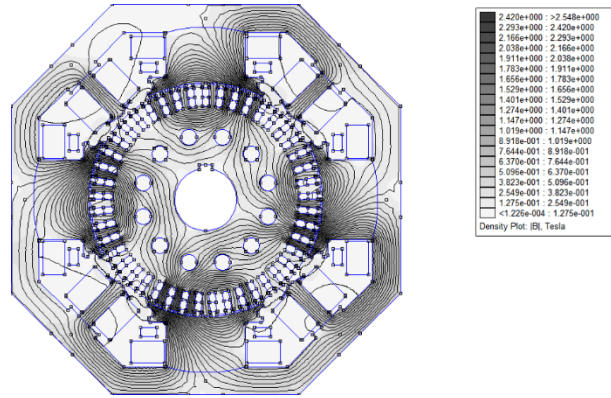
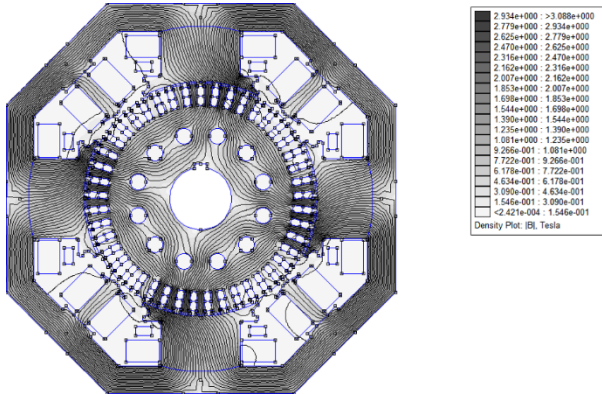
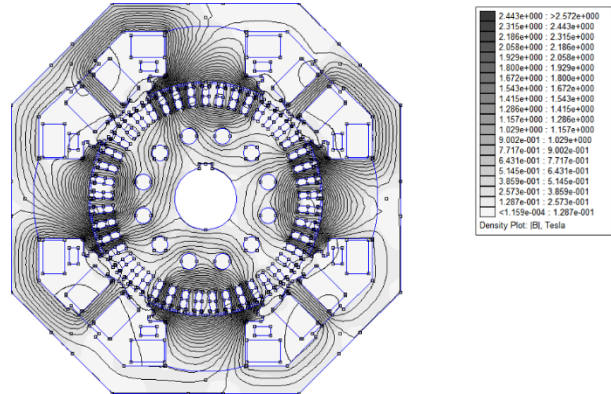
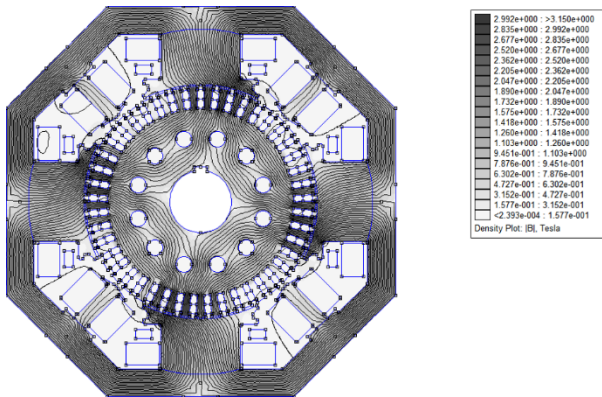
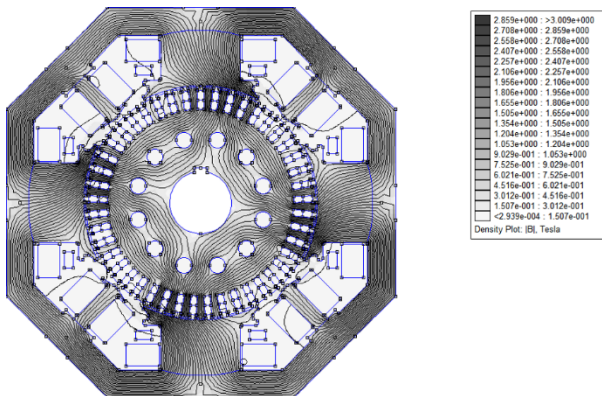
– коефіцієнт струму незалежної обмотки збудження

$$k_{v2} = \frac{I_{v2}}{I_{v2n}},$$

де I_{v2} , I_{v2n} – струми незалежної обмотки збудження у розрахунковому та номінальному режимах.

Струм обмотки додаткових полюсів встановлюється пропорційно струму якоря в усіх розрахункових режимах.

За результатами розрахунків магнітного поля отримані картини магнітного поля у різних режимах: номінальний режим ($k_a=1$, $k_{v1}=1$, $k_{v2}=0$) наведено на рис. 2, режим навантаження без ослаблення поля ($k_a=1$, $k_{v1}=0,5$, $k_{v2}=0$) наведено на рис. 3, режим навантаження при підмагнічення основної обмотки збудження ($k_a=1$, $k_{v1}=0,5$, $k_{v2}=1$) наведено на рис. 4, режим навантаження при розмагнічення основної обмотки збудження ($k_a=1$, $k_{v1}=0,5$, $k_{v2}=-1$) наведено на рис. 5 обмоткою незалежного збудження, режим тяги при номінальному струмі якоря при відключеній послідовній обмотці ($k_a=1$, $k_{v1}=0$, $k_{v2}=0$) наведено на рис. 6, режим гальмування при номінальному струмі якоря при відключеній послідовній обмотці ($k_a=1$, $k_{v1}=0$, $k_{v2}=-1$) наведено на рис. 7 та інші.

Рис. 2. Магнітне поле у режимі: $k_a=1, k_{v1}=1, k_{v2}=0$ Рис. 6. Магнітне поле у режимі: $k_a=1, k_{v1}=0, k_{v2}=1$ Рис. 3. Магнітне поле у режимі: $k_a=1, k_{v1}=0,5, k_{v2}=0$ Рис. 7. Магнітне поле у режимі: $k_a=1, k_{v1}=0, k_{v2}=-1$ Рис. 4. Магнітне поле у режимі: $k_a=1, k_{v1}=0,5, k_{v2}=1$ Рис. 5. Магнітне поле у режимі: $k_a=1, k_{v1}=0,5, k_{v2}=-1$

Як видно з рис. 2-5 характер магнітного поля близький один до одного. Спостерігається незначне розмагнічення магнітної системи двигуна, що обумовлено дією поперечного потоку реакції якоря. Однак у режимах роботи з відключеною послідовною обмоткою виникає значне розмагнічення магнітної системи двигуна при дії потоку реакції якоря. Це явище виникає внаслідок меншого значення МРС незалежної обмотки.

Картини магнітного поля показують досить значне і нерівномірне насичення елементів магнітопроводу. Такі процеси обумовлюють не лінійність магнітних характеристик двигуна та їх залежність від обох струмів збудження.

За результатами розрахунку магнітного поля методом кінцевих елементів можливо визначити поточкозчеплення обмоток. Розглянемо величину поточкозчеплення з провідниками обмотки фази статора:

$$\Psi = \int_s B dS = I_\delta \cdot \int_l B dl,$$

де S — циліндрична поверхня, обмежена секціями фази обмотки статора, I_δ — довжина статора, l — дуга окружності якоря між провідниками секції обмотки статора. Величина магнітної індукції визначається виразом. Провівши ряд перетворень, представлених в [5] отриманий вираз для індукції має такий вигляд:

$$B = B_r = \frac{\partial A}{\partial a},$$

де B_r – радіальна складова індукції, a – вісь спрямована по дотичній до окружності статора.

З огляду на прийнятої при розрахунку лінійної апроксимації потокозчеплення визначається рівнянням:

$$\Psi_{i,i+1} = (A_{i+1} - A_i) l_\delta$$

де A_{i+1} , A_i – потенціали на ділянці дуги одного з полюсів.

Інтегруючи потокозчеплення по усім котушкам обмотки і врахувавши число витків кожної секції отримаємо:

$$\Psi = l_\delta \sum_{i=1}^{n-1} (A_{i+1} - A_i) = l_\delta \sum_K w_K (A_n - A_1),$$

де A_n , A_1 – потенціали в провідниках обмотки, K – кількість секцій обмотки, w – число витків секції, а потік:

$$\Phi = l_\delta \sum_K (A_n - A_1).$$

Аналогічно можливо отримати значення потокозчеплень інших обмоток. Цей процес у середовищі FEMM [10] автоматизований, що дозволяє визначати потокозчеплення та потоки обмоток двигуна у різних режимах.

Для ідентифікації залежностей електромагнітного моменту проведемо комплекс цифрових експериментів по їх розрахунку за результатами розрахунку магнітного поля двигуна у середовищі FEMM [10]. Для автоматизації процесів розроблено макрос на мові LUA [10].

Аналогічно з струмами для зручності ідентифікації режимів роботи двигуна введемо відносні значення потоків :

При цьому апроксимація потоку якоря у відносних величинах має вигляд:

$$\Phi_a^* = \sum_{i=0}^{I_{fa}} \sum_{j=0}^{J_{fa}} \sum_{k=0}^{K_{fa}} \left(\varphi_{aijk} \cdot (M_a \cdot k_a + Z_a)^i (M_{v1} \cdot k_{v1} + Z_{v1})^j \cdot (M_{v2} \cdot k_{v2} + Z_{v2})^k \right), \quad (1)$$

де φ_{aijk} – коефіцієнт регресії полінома, апроксимуючого потік;

M_a , M_{v1} , M_{v2} – масштабні коефіцієнти по коефіцієнтам струмів якоря та збуджень – відповідно; Z_a , Z_{v1} , Z_{v2} – зсуви по коефіцієнтам струмів якоря та збуджень – відповідно;

I_{fa} , J_{fa} , K_{fa} – степені апроксимуючого полінома по коефіцієнтам струмів якоря та збуджень – відповідно.

Потік обмотки послідовного збудження у відносних величинах має вигляд:

$$\Phi_{v1}^* = \sum_{i=0}^{I_{fv1}} \sum_{j=0}^{J_{fv1}} \sum_{k=0}^{K_{fv1}} \left(\varphi_{v1ijk} \cdot (M_a \cdot k_a + Z_a)^i (M_{v1} \cdot k_{v1} + Z_{v1})^j \cdot (M_{v2} \cdot k_{v2} + Z_{v2})^k \right), \quad (2)$$

де φ_{v1ijk} – коефіцієнт регресії полінома, апроксимуючого обмотки послідовного потік;

– потік якоря у відносних одиницях

$$\Phi_{v1}^* = \frac{\Phi_{v1}}{\Phi_{v1n}},$$

де Φ_{v1} , Φ_{v1n} – послідовної обмотки збудження у розрахунковому та номінальному режимах;

– потік незалежної обмотки збудження у відносних одиницях

$$\Phi_{v2}^* = \frac{\Phi_{v2}}{\Phi_{v2n}},$$

де Φ_{v2} , Φ_{v2n} – незалежної обмотки збудження у розрахунковому та номінальному режимах;

– потік обмотки додаткових полюсів у відносних одиницях

$$\Phi_d^* = \frac{\Phi_d}{\Phi_{dn}},$$

де Φ_d , Φ_{dn} – обмотки додаткових полюсів у розрахунковому та номінальному режимах.

Результати цифрових експериментів представляють дискретний простір, що не дає можливості використання цієї моделі для досліджень робочих властивостей тягового приводу взагалі.

Регресійний аналіз залежності потоків від коефіцієнтів струмів двигуна. Для створення неперервної математичної моделі магнітних характеристик тягового двигуна ЕД 139 А проведемо регресійний аналіз за методиками наведеними та апробованими в [1,6,8] на основі методу поліномів Чебишева на множині рівновіддалених точок.

I_{fa} , J_{fa} , K_{fa} – степені апроксимуючого полінома обмотки послідовного збудження по коефіцієнтам струмів якоря та збуджень – відповідно.

Потік обмотки незалежного збудження у відносних величинах має вигляд:

$$\Phi_{v2}^* = \sum_{i=0}^{I_{fv2}} \sum_{j=0}^{J_{fv2}} \sum_{k=0}^{K_{fv2}} \left(\varphi_{v2ijk} \cdot (M_a \cdot k_a + Z_a)^i (M_{v1} \cdot k_{v1} + Z_{v1})^j \cdot (M_{v2} \cdot k_{v2} + Z_{v2})^k \right), \quad (3)$$

де φ_{v2ijk} – коефіцієнт регресії полінома, апроксимуючого обмотки незалежного потік;

I_{fv2} , J_{fv2} , K_{fv2} – степені апроксимуючого полінома обмотки незалежного збудження по коефіцієнтам струмів якоря та збуджень – відповідно.

Потік обмотки додаткового полюсу у відносних величинах має вигляд:

$$\Phi_d^* = \sum_{i=0}^{I_{fd}} \sum_{j=0}^{J_{fd}} \sum_{k=0}^{K_{fd}} \left(\varphi_{dijk} \cdot (M_a \cdot k_a + Z_a)^i (M_{v1} \cdot k_{v1} + Z_{v1})^j \cdot (M_{v2} \cdot k_{v2} + Z_{v2})^k \right), \quad (4)$$

де φ_{dijk} – коефіцієнт регресії полінома, апроксимуючого потік обмотки додаткового полюсу; I_{fd} , J_{fd} , K_{fd} – степені апроксимуючого полінома потоку обмотки додаткового полюсу по коефіцієнтам струмів якоря та збуджень – відповідно.

За результатами регресійного аналізу максимальне відхилення розрахованих залежностей не перевищує 0,052, а середньоквадратичне відхилення не більш 0,041.

На рис. 8 представлено залежності потоків збудження послідовної обмотки в залежності від коефіцієнтів струмів обмоток збудження.

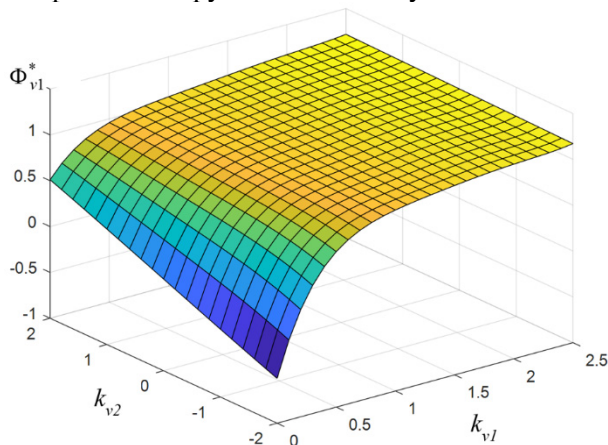


Рис. 8. Залежність потоку $\Phi_{v1}^* = f(k_{v2}, k_{v1})$ у режимі холостого ходу

Як видно з графіку залежність має нелінійний монотонно зростаючий характер, що обумовлено характером кривих намагнічення сталей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Любарський Б. Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу. – Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. – «Електротранспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, - 2014. – 368 с.

Аналогічний вигляд мають криві потоків якоря та іншої обмотки збудження.

Таким чином вирази (1)-(4) представляє математичну модель магнітних характеристик двигуна у неперервному вигляді.

Висновок

Створено універсальну методику визначення магнітних характеристик тягового двигуна комбінованого збудження. Особливістю методики є наступне:

- розрахунок магнітного поля методом кінцевих елементів в плоско-паралельній постановці задачі;
- обчислення потоків за результатами розрахунку магнітного поля;
- проведення регресійного аналізу результатів цифрових експериментів за допомогою поліномів Чебишева на множині рівновіддалених точок;
- представлення результатів у відносних величинах.

REFERENCES

1. Liubarskyi, B. H. (2014). *Teoretychni osnovy dlia vyboru ta otsinky perspektyvnykh system elektromekhanichnoho peretvorennia enerhii elektrorukhomoho skladu*. – Dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia doktora tekhnichnykh nauk za spetsialnistiu 05.22.09. – «Elektrotransport». Natsionalnyi tekhnichnyi universytet «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Kharkiv, 368 p.

2. Pavlenko T. Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport / T.Pavlenko, V. Shavkun, A. Petrenko // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2017. – № 5/8 (89) – С. 22-30.

3. Патент №60109 Україна, МПК (2006.01) H02P 7/06 Спосіб ослаблення поля тягового електродвигуна змішаного збудження [Текст] / В. Ф. Харченко, В. Х. Далека, В. П. Андрійченко, І. О. Костенко; заявник та правовласник ХНАМГ. – №60109; заявл. 23.11.10; опубл. 10.06.2011, Бюл. №11.

4. Андрійченко В.П. Усовершенствование способа регулирования возбуждения тяговых двигателей постоянного тока / В.П. Андрійченко, С.О. Закурдай, І.О. Костенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків, 2014. – № 1/8 (67) – С. 32-35.

5. Любарский Б. Г. Моделирование и разработка комбинированного возбуждения сварочных генераторов постоянного тока с целью улучшения их технико-экономических показателей. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 - электрические машины и аппараты. - Харьковский государственный политехнический университет, Харьков, 2000. 170с.

6. Рябов Е.С. Безредукторный тяговый привод на основе реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного электроподвижного состава: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.09./ Рябов Евгений Сергеевич – Харьков, 2011 – 162с.

7. Рябов Е.С. Моделирование тягового безредукторного привода на основе индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком / Е.С. Рябов, Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин, Д.Ю. Зюзин. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2010. – № 57. – С. 243–251.

8. Любарский Б.Г. Имитационное моделирование механизма наклона кузова с линейным электро-механическим преобразователем. / Б.Г. Любарский, Д.И. Якунин // MATLAB: материалы V Международной научной конференции (г. Харьков, 11 – 13 мая 2011г.) / сост. В.В. Замаруев. – Харьков: «БЭТ», 2011. – С. 425–436.

9. Якунин Д.И. Электромеханическая система привода с линейным двигателем для наклона кузовов скоростного подвижного состава: Дис...к-та техн. наук: 05.22.09 / НТУ «ХПИ». – Харків, 2010. – 202 с.

10. Finite Element Method Magnetics: HomePage. [Електрон. ресурс]. Режим доступа: <http://femm.berlios.de>.

2. Pavlenko, T., Shavkun, V., Petrenko A. (2017). Ways to improve operation reliability of traction electric motors of the rolling stock of electric transport. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. Kharkiv, 5/8 (89), 22-30.

3. Kharchenko, V. F., Daleka, V. Kh., Andriichenko, V. P., Kostenko I. O. (2011). Patent №60109 Ukraine, MPK (2006.01) N02R 7/06 *Sposib oslablennia polia tiahovoho elektrodvyhuna zmishanoho zbudzhennia* [Tekst] zaiavnyk ta pravovlasnyk KhNAMH. – №60109; zaiavl. 23.11.10; opubl. 10.06.2011, Biul. №11.

4. Andriichenko, V.P., Zakurdai, S.O., Kostenko I.O. (2014). Usovershenstvovanye sposoba rehulyrovanyia возбуждения тяговyx dvyhatelyi postoiannoho toka. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. Kharkiv, 1/8 (67), 32-35.

5. Liubarskyi, B. H. (2000). *Modelyrovanye y razrobotka kombynyrovannoho возбуждения svarochnykh heneratorov postoiannoho toka s tseliu uluchsheniya ykh tekhniko-ekonomycheskykh pokazatelyi*. Dyssertatsiya na soyskanye nauchnoi stepeny kandydata tekhnicheskyykh nauk po spetsyalnosti 05.09.01 - elektrycheskye mashyny y apparaty. - Kharkovskyyi hosudarstvennyi polytekhnicheskyyi unyversytet, Kharkov, 170 p.

6. Riabov, E.S. (2011). *Bezreduktorny tiahovyy pryvod na osnove reaktivnoho ynduktornoho dvyhatelya s aksyalnym mahnytnym potokom dlia skorostnoho elektropodvyzhnogo sostava*: dyss. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.09. Kharkov, 162 p.

7. Riabov, E.S., Liubarskyi, B.H., Yakunyn, D.Y., Ziuzyn, D.Iu. Modelyrovanye tiahovoho bezreduktornoho pryvoda na osnove ynduktornoho dvyhatelya s aksyalnym mahnytnym potokom. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskyyi polytekhnichnyi instytut"*, 57, 243–251.

8. Liubarskyi, B.G., Iakunyn D.Y. (2011, 11 – 13 may). *Ymytatsyonnoe modelyrovanye mekhanyzma naklona kuzova s lyneynym elektromekhanicheskyim preobrazovatelem*. MATLAB: materyaly V Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsyyi. sost. V.V. Zamaruev. – Kharkov: «BET», 425–436.

9. Iakunyn, D.Y. (2010). *Elektromekhanicheskaia sistema pryvoda s lyneynym dvyhatelem dlia naklona kuzovov skorostnoho podvyzhnogo sostava*: Dys...k-ta tekhn. nauk: 05.22.09. NTU «KhPY». Kharkiv, 202 p.

10. Finite Element Method Magnetics: HomePage. [Elektron. resurs]. Rezhym dostupu: <http://femm.berlios.de>

Метою роботи є створення методики розрахунку магнітних характеристик тягового двигуна з комбінованим збудженням на основі методу кінцевих елементів.

Методика оснований на проведенні комплексу цифрових експериментів по розрахунку магнітних полів тягового двигуна та їх регресійного аналізу.

Результати роботи: отримані залежності потоків якоря послідовного та незалежного збудження, а також додаткових полюсів у відносних одиницях в вигляді поліноміальних залежностей.

Наукова новизна: створено новий підхід до визначення магнітних характеристик тягових двигунів постійного струму комбінованого збудження, якій враховує насичення елементів магнітної системи двигуна у всіх режимах роботи.

Висновки. Створено універсальну методику визначення магнітних характеристик тягового двигуна комбінованого збудження. Особливістю методики є наступне: розрахунок магнітного поля методом кінцевих

© Костенко І. О. та ін., 2018

елементів в плоско-паралельній постановці задачі; обчислення потоків за результатами розрахунку магнітного поля; проведення регресійного аналізу результатів цифрових експериментів за допомогою поліномів Чебишева на множині рівновіддалених точок; представлення результатів у відносних величинах.

Ключові слова: магнітні характеристики, троллейбус, комбіноване збудження, метод кінцевих елементів.

УДК 629.429.3:621.313

И. А. КОСТЕНКО, В. Ф. ХАРЧЕНКО, Н. В. ХВОРОСТ (ХНУГХ)

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, кафедра «Электротранспорт», кафедра «Системы электроснабжения и электропотребления городов», ул. Маршала Бажанова, 17, г. Харьков, Украина, 61002, тел.: +38(068)-584-65-66, эл. почта: ks170685@ukr.net, kharchenko1054@gmail.com, bgd@kname.edu.ua;
ORCID: orcid.org/0000-0002-8170-7432, orcid.org/0000-0003-1209-609X, orcid.org/0000-0002-2606-8228

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДЛЯ ТРОЛЛЕЙБУСОВ

Целью работы является создание методики расчета магнитных характеристик тягового двигателя с комбинированным возбуждением на основе метода конечных элементов.

Методика основана на проведении комплекса цифровых экспериментов по расчету магнитных полей тягового двигателя и их регрессионного анализа.

Результаты работы: полученные зависимости потоков якоря последовательного и независимого возбуждения, а также дополнительных полюсов в относительных единицах виде полиномиальных зависимостей.

Научная новизна: создан новый подход к определению магнитных характеристик тяговых двигателей постоянного тока комбинированного возбуждения, которой учитывает насыщения элементов магнитной системы двигателя во всех режимах работы.

Выводы. Создана универсальная методика определения магнитных характеристик тягового двигателя комбинированного возбуждения. Особенностью методики является следующее: расчет магнитного поля методом конечных элементов в плоско-параллельной постановке задачи; вычисления потоков по результатам расчета магнитного поля; проведения регрессионного анализа результатов цифровых экспериментов с помощью полиномов Чебышева на множестве равноудаленных точек; представление результатов в относительных величинах.

Ключевые слова: магнитные характеристики, троллейбус, комбинированное возбуждение, метод конечных элементов.

UDC 629.429.3:621.313

I. O. KOSTENKO, V. F. KHARCHENKO, M. V. KHVOROST (KNUME)

Kharkiv National University of Municipal Economy named after O. M. Beketov, Department of Electrotransport, Department of Power Supply and Electricity Consumption, Marshal Bazhanov Street, 17, Kharkov, Ukraine, 61002 tel.: +38(068)-584-65-66, e-mail: ks170685@ukr.net, kharchenko1054@gmail.com, bgd@kname.edu.ua;
ORCID: orcid.org/0000-0002-8170-7432, orcid.org/0000-0003-1209-609X, orcid.org/0000-0002-2606-8228

CALCULATION OF THE MAGNETIC CHARACTERISTICS OF THE TRACTION DC MOTOR WITH COMBINED EXCITATION FOR TROLLEY BUSES

The purpose of the work is to create a method for calculating the magnetic characteristics of a traction motor with combined excitation based on the finite element method.

The methodology is based on conducting a set of digital experiments on the calculation of magnetic fields of a traction motor and their regression analysis.

Results: The dependences of successive and independent excitation anchor flows, as well as additional poles in relative units in the form of polynomial dependences, were obtained.

Scientific novelty: a new approach to determining the magnetic characteristics of the traction motors of DC of combined excitation is created, which takes into account the saturation of the elements of the magnetic system of the engine in all modes of operation.

Conclusions. A universal method for determining the magnetic characteristics of a traction motor of combined excitation has been developed. The feature of the technique is the following: the calculation of the magnetic field by the finite element method in the plane-parallel formulation of the problem; calculation of flows on the basis of the calculation of the magnetic field; Regression analysis of the results of digital experiments with the help of Chebyshev polynomials on a set of equidistant points; presentation of results in relative values.

Keywords: magnet characteristics, trolleybus, combined excitation, finite element method.

Received 18.01.2018; accepted in revised form 03.04.2018.

© Костенко І. О. та ін., 2018

**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
I N T E R N A T I O N A L


Uran
Ukrainian Research and Academic Network



Відповідальний за випуск – В. Г. Сиченко

Комп'ютерне верстання – Д. О. Босий

Формат 60×84 ¹/₈ Ум. др. арк. 13,2. Тираж 150 пр. Зам. №

**Дніпропетровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна**

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №1315 від 31.03.2003

Адреса редакції:

вул. Лазаряна, 2, кім. 1301, м. Дніпро, 49010, Україна
кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»

тел.: +38 (056) 373-19-11, e-mail: elpostz@i.ua, URL: <http://etr.diiit.edu.ua/>

Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна