



ISSN 2307-4221

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

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТА  
ELECTRIFICATION OF TRANSPORT

# ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 12 / 2016

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

12 / 2016

Індекс 68641

ДНІПРО



**Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»  
Дніпропетровського національного університету  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
сердечно поздоровляє кандидата технічних наук**

**Бондаря Ігоря Лазаровича  
з 80-річчям!**



Відомий український науковець, досвідчений спеціаліст у галузях електротехніки та електропостачання Бондар Ігор Лазарович у 1958 році вступив до Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту (ДІІТ), де навчався на вечірньому факультеті за фахом «Електрифікація залізничного транспорту».

Почав працювати в ДІІТі з 1960 року старшим лаборантом кафедри «Деталі машин», згодом перейшов на посаду асистента кафедри «Електротехніка».

У період з 1971 по 1974 рр. навчався в аспірантурі Інституту електродинаміки Академії наук України. У 1976 році захистив дисертацію за спеціальністю «Теоретичні основи електротехніки».

Протягом 1975 – 1977 рр. працював інженером, потім старшим науковим співробітником науково-дослідницького сектору ДІІТу. З вересня 1977 року обійняв посаду доцента кафедри «Теоретичних основ електротехніки».

У 2006 році зайняв посаду доцента на кафедрі «Електропостачання залізниць», де працював до виходу на пенсію. За час роботи викладав дисципліни «Електричні системи та мережі», «Системи електропостачання рухомого складу». Став співавтором навчальних посібників «Електричні системи та мережі нетягових споживачів електричного транспорту» та «Електропостачання промислових підприємств залізничного транспорту».

**Бажаємо щастя, здоров'я, творчих успіхів і процвітання.**

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

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

# ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

**№ 12 / 2016**

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

*Передплатний індекс 68641*

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

ДНІПРО

**№ 12, 2016**

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 № 5 від 26.12.2016 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 Казахстанеміржоли,  
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. к.т.н., доцент, ДНУЗТ, Україна

*Видання виходить 2 рази на рік з червня 2011 р.*

**Гайденко О.С.**

Математичні методи комп'ютерної адаптації графіка руху потягів до оплати спожитої електроенергії на тягу за комерційним тарифом .....8

**Гайденко О.С.****Haidenko O. S.**

Математические методы компьютерной адаптации графика движения поездов к оплате потребленной электроэнергии на тягу по коммерческому тарифу ..... 8

Mathematical methods of computer adaptation train schedule for electricity payment consumed of traction in accordance with commercial tariff .....8

**Денисюк С. П., Горенко Д. С., Соколовський П. В., Степовий О. В.**

Перспективи використання технологій передачі електричної енергії на номінальний напругі 20 кВ у розподільних електричних мережах України.....12

**Денисюк С. П., Горенко Д. С.,****Denysiuk S. P., Horenko D. S.,****Соколовський П. В., Степовой А. В.****Sokolovskyi P. V., Stepovyi O. V.**

Перспективы использования технологии передачи электрической энергии на номинальном напряжении 20 кВ в распределительных электрических сетях Украины ... 12

Electric energy transmission at nominal voltage 20 kV in Ukrainian distribution networks technology perspective .....12

**Костін М. О., Шейкіна О. Г.**

Баланс за концепцією Фризе фідерних потужностей тягових підстанцій постійного струму .....20

**Костин Н. А., Шейкина О. Г.****Kostin M. O., Sheykina O. G.**

Баланс по концепции Фризе фидерных мощностей тяговых подстанций постоянного тока ..... 20

Balance of feeder powers of DC traction substations based on Fryze's conception.....20

**Міщенко Т. М.**

Ідентифікаційна модель швидкісного електрорухомого складу змінного струму .....29

**Мищенко Т. Н.****Mishchenko T. N.**

Идентификационная модель скоростного электроподвижного состава переменного тока ..... 29

Identification model of the high-traffic AC electric rolling stock .....29

**Храбоншч І., Гудим В., Адамс Я., Прусак Я., Шимчак К.**

Моделювання змін навантаження для обраної тягової підстанції постійного струму .....35

**Храбоншч И., Гудим В., Адамс Я.,****Chrabąszcz I., Hudym W., Adams J.,****Прусак Я., Шымчак К.****Prusak J., Szymczak K.**

Моделирование изменений нагрузки для выбранной тяговой подстанции постоянного тока ..... 35

Symulacja zmian obciążenia dla wybranej kolejowej podstacji trakcyjnej prądu stałego.....35

**Дудзик М., Храбоншч І., Ягелло А., Прусак Я., Гудим В.**

Аналіз помилок вимірювання у визначенні параметрів схеми заміщення тягового трансформатора .....41

**Дудзик М., Храбоншч И., Ягелло А.,****Dudzik M., Chrabąszcz I., Jagiello A.,****Прусак Я., Гудим В.****Prusak J., Hudym V.**

Анализ ошибок измерения в определении параметров схемы замещения тягового трансформатора ..... 41

Analiza błędów pomiarowych przy określaniu parametrów wielowrotnikowego schematu zastępczego transformatora trakcyjnego .....41

<b>Гудим В., Ягелло А., Храбоншч І., Прусак Я., Тренбач П.</b>	
Електричні і теплові умови ліквідації обмерзання на проводах тягової мережі.....	49
<b>Гудим В., Ягелло А., Храбоншч І., Прусак Я., Тренбач П.</b>	<b>Hudym V., Jagiello A., Chrabaszcz I., Prusak J., Trębacz P.</b>
Електрические и тепловые условия ликвидации обледенения на проводах тяговой сети.....	49
<b>Саенко Ю. Л., Любарцев В. В.</b>	<b>Sayenko Yu. L., Liubartsev V. V.</b>
Применение нейронных сетей при оптимизации режима реактивной мощности в разветвлённых электрических сетях.....	53
<b>Саенко Ю. Л., Любарцев В. В.</b>	<b>Sayenko Yu. L., Liubartsev V. V.</b>
Застосування нейронних мереж при оптимізації режиму реактивної потужності у розгалужених електричних мережах..	53
<b>Сиченко В. Г., Косарев Є. М., Губський П. В., Рогоза А. В.</b>	<b>Sychenko V.G., Kosarev E. M., Gubskiy P. V., Rogoza A. V.</b>
Оцінка додаткових втрат потужності у системах електропостачання швидкісного руху ...	59
<b>Сыченко В. Г., Косарев Е. Н., Губский П. В., Рогоза А. В.</b>	<b>Sychenko V.G., Kosarev E. M., Gubskiy P. V., Rogoza A. V.</b>
Оценка дополнительных потерь мощности в системах электроснабжения скоростного движения.....	59
<b>Дьяков В. О., Антонов А. В., Малинка С. Ю.</b>	<b>Dyakov V. O., Antonov A. V., Malinka S. Y.</b>
Захист нейтральних вставок контактної мережі від перепалів.....	64
<b>Дьяков В. А., Антонов А. В., Малинка С. Ю.</b>	<b>Dyakov V. O., Antonov A. V., Malinka S. Y.</b>
Защита нейтральных вставок контактной сети от перегорев.....	64
<b>Устименко Д. В.</b>	<b>Ustymenko D. V.</b>
Сучасний стан проблеми струмознімання на електрифікованих залізницях.....	71
<b>Устименко Д. В.</b>	<b>Ustymenko D. V.</b>
Современное состояние проблемы тока-съемы на электрифицированных железных дорогах.....	71
<b>Босий Д. О., Земський Д. Р.</b>	<b>Bosiy D. O., Zemskiy D. R.</b>
Підвищення якості електроенергії у лініях «два проводи-рейка».....	76
<b>Босий Д. А., Земский Д. Р.</b>	<b>Bosiy D. O., Zemskiy D. R.</b>
Повышение качества электроэнергии в линиях «два провода-рельс».....	76
<b>електрорухоми́й склад / electric rolling stock</b>	
<b>Буряковский С.Г. , Маслий А.С. , Помазан Д.П., Денис І.В.</b>	<b>Buryakovskyy S. H., Masliy A. S., Pomazan D. P., Denys I.V.</b>
Обґрунтування необхідності модернізації тепловозу ЧМЕЗ із використанням гібридної силової установки.....	82
<b>Буряковский С. Г., Маслий А.С., Помазан Д. П., Денис И.В.</b>	<b>Buryakovskyy S. H., Masliy A. S., Pomazan D. P., Denys I.V.</b>
Обоснование необходимости модернизации тепловоза ЧМЭЗ с использованием гибридной силовой установкой.....	82

---

**Петренко О. М., Любарський Б. Г., Рябов Є. С.**

Дослідження впливу температури обмоток асинхронного тягового двигуна на режими роботи автономного інвертора напруги .....87

**Петренко А. Н., Любарский Б. Г.,  
Рябов Е. С.**

**Petrenko O.M., Liubarskyi B.G.,  
Ryabov Y.S.**

Исследование влияния температуры обмоток асинхронного тягового двигателя на режим работы автономного инвертор напряжения..... 87

The research of temperature effects windings of the induction traction motors on operation autonomous voltage inverters.....87

---

**Шидловський Р. М., Баб'як М.О., Артемчук В. В.**

Сучасний стан надійності елементів механічної частини вантажних електровозів .....92

**Шидловский Р. М., Бабяк Н.А.,  
Артемчук В.В.**

**Shydlovskiy R. M., Babyak M. O.,  
Artemchuk V. V.**

Современное состояние надежности элементов механической части грузовых электровозов..... 92

Current state reliability of the elements of mechanical parts freight locomotives.....92

---

**автоматизація і діагностика / automation and diagnose**

---

**Гончарова Л. Л.**

Мікропроцесорні системи і методи визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів тягових мереж.....98

**Гончарова Л. Л.**

**Goncharova L. L.**

Микропроцессорные системы и методы определения коммутационного ресурса высоковольтных выключателей тяговых сетей ..... 98

Microprocessor systems and methods for determining switching resources HV circuit breaker of traction networks.....98

---

**енергозбереження / energy saving**

---

**Инсепов Д. Г.**

Високочастотний індукційний підігрів нафтопроводу ..... 103

**Инсепов Д. Г.**

**Insepov D. G.**

Высокочастотный индукционный нагрев нефтепровода ..... 103

High frequency induction heated of the of oil pipeline ..... 103

**Кузнецов В. Г., Саблін О. І.**

Визначення потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту в задачах підвищення ефективності споживання енергії рекуперації..... 107

**Кузнецов В. Г., Саблин О. И.**

**Kuznetsov V. G., Sablin O. I.**

Определение потенциала энергосбережения в системах электротранспорта в задачах повышения эффективности потребления энергии рекуперации ..... 107

Determination of potential energy savings in systems of electric transport in the task of improving the efficiency of energy consumption recovery.....107

---

**Босов А. А., Коптовець О. М., Ширін Л. Н., Бесараб Д. А.**

Особливості експлуатації залізничної колії електрифікованих залізниць при впровадженні швидкісного руху ..... 115

**Босов А. А., Коптовец А. Н., Ширин Л. Н.,  
Бесараб Д. А.**

**Bosov A. A., Koptovets O. N., Shirin L. N.,  
Besarab D. A.**

Особенности эксплуатации железнодорожного пути электрифицированных железных дорог при внедрения скоростного движения ..... 115

Features of operation of electrified railway track when implementing high-speed traffic ..... 115

---

Кафедра «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології транспорту», Державний економіко-технологічний університет транспорту, вул. М. Лукашевича, 19, Київ, Україна, 03049, тел.: +38(093)2696316, ел. пошта: [haidenko121@gmail.com](mailto:haidenko121@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-8308-3910](https://orcid.org/0000-0001-8308-3910)

## МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ КОМП'ЮТЕРНОЇ АДАПТАЦІЇ ГРАФІКА РУХУ ПОТЯГІВ ДО ОПЛАТИ СПОЖИТОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ТЯГУ ЗА КОМЕРЦІЙНИМ ТАРИФОМ

### Постановка проблеми

Зміна графіка руху потягів незалежно від мети несе за собою великі труднощі, через необхідність урахування великої кількості факторів, які впливають на допустимість перенесення графіка кожного потяга. У випадку оптимізації графіка руху потягів до використання диференційованого тарифу (ДТ) оплати за електроенергію додатково висувуються вимоги до раціональності зміщення графіка, з'являються додаткові фактори, які необхідно враховувати не лише для конкретного потяга, а й для всіх потягів, що рухаються електрифікованою залізницею. Оптимальний графік руху для всіх потягів у одному напрямку не завжди збігається з таким для кожного потяга зокрема [1]. Тому для вирішення завдання адаптації графіка руху потягів до використання комерційних тарифів за електроенергію недостатньо розробити метод оптимізації графіка окремого потяга. Таке завдання є комбінованим та потребує спільного рішення для всіх потягів за напрямком на електрифікованій ділянці залізниці.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зміна графіка руху потягів – ефективний інструмент мінімізації оплати електроенергії за тарифами диференційованими по часу доби [2]. Питанню налаштування графіка потягів до використання комерційних тарифів на електроене-

ргію присвячено роботи [2-6], що доводить актуальність проблеми.

### Формування мети

Метою роботи є розробка математичних моделей і методів оптимізації графіка руху потягів до використання тризонного диференційованого тарифу оплати спожитої електроенергії та вдосконалення алгоритму його комп'ютерної адаптації.

### Основний матеріал дослідження

Розроблений у роботі [3] алгоритм базується на формулі (1), яка описує тривалість руху потяга через періоди дії тарифних зон, під час яких він здійснює рух:

$$T = \alpha_1 \cdot T_n + \alpha_2 \cdot T_{nn1} + \alpha_3 \cdot T_{n1} + \alpha_4 \cdot T_{nn2} + \alpha_5 \cdot T_{n2} + \alpha_6 \cdot T_{nn3}, \quad (1)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$  – коефіцієнти співпадиння часу руху потяга з часом дії відповідної їм тарифної зони.

Потяги рухаються за розкладом із точністю до 1 хв., тому всі обчислення будуть проводитися у хвилинах. Нічну тарифну зону  $T_n$  для зручності розіб'ємо на два періоди – після півночі  $T_{n1}$  і до півночі  $T_{n2}$ . Для визначення меж періодів дії тарифних зон (табл. 1.) як точку відліку обрано початок доби.

Таблиця 1

Межі періодів тарифних зон тризонного ДТ та їхня тривалість (хв.)

січень, лютий, листопад, грудень	Тривалість періоду	березень, квітень, вересень, жовтень	Тривалість періоду	травень, червень, липень, серпень	Тривалість періоду
$T_{n1} \in [0; 360]$	$T_{n1} = 360$	$T_{n1} \in [0; 360]$	$T_{n1} = 360$	$T_{n1} \in [0; 420]$	$T_{n1} = 420$
$T_{nn1} \in [360; 480]$	$T_{nn1} = 120$	$T_{nn1} \in [360; 480]$	$T_{nn1} = 120$	$T_{nn1} \in [420; 480]$	$T_{nn1} = 60$
$T_{n1} \in [480; 600]$	$T_{n1} = 120$	$T_{n1} \in [480; 600]$	$T_{n1} = 120$	$T_{n1} \in [480; 660]$	$T_{n1} = 180$
$T_{nn2} \in [600; 1020]$	$T_{nn2} = 420$	$T_{nn2} \in [600; 1080]$	$T_{nn2} = 480$	$T_{nn2} \in [660; 1140]$	$T_{nn2} = 540$
$T_{n2} \in [1020; 1260]$	$T_{n2} = 240$	$T_{n2} \in [1080; 1320]$	$T_{n2} = 240$	$T_{n2} \in [1140; 1320]$	$T_{n2} = 180$
$T_{nn3} \in [1260; 1380]$	$T_{nn3} = 120$	$T_{nn3} \in [1320; 1380]$	$T_{nn3} = 60$	$T_{nn3} \in [1320; 1380]$	$T_{nn3} = 60$
$T_{n2} \in [1380; 1440]$	$T_{n2} = 60$	$T_{n2} \in [1380; 1440]$	$T_{n2} = 60$	$T_{n2} \in [1380; 1440]$	$T_{n2} = 0$

Для практичного використання алгоритму необхідно здійснити опис часу через коефіцієнти  $\alpha$ :

для періоду, під час дії якого потяг розпочинає рух

$$\alpha_n = \frac{t_*'' - t_{\epsilon}}{T_*}; \quad (2)$$

для періоду, під час дії якого потяг прибуває на кінцеву станцію

$$\alpha_n = \frac{t_{np}' - t_*'}{T_*}; \quad (3)$$

для періоду, лише під час дії якого потяг здійснює рух

$$\alpha_n = \frac{t_{np} - t_{\epsilon}}{T_*}; \quad (4)$$

для періоду, під час дії якого потяг відправляється та прибуває, при цьому рухається під час дії усіх інших періодів

$$\alpha_n = \frac{t_*'' - t_*' + t_{np} - t_{\epsilon}}{T_*}, \quad (5)$$

де  $t_*'$  і  $t_*''$  – межі початку і закінчення періоду тарифної зони  $T_*$  (табл. 1.);

$t_{\epsilon}$  і  $t_{np}$  – час відправлення та прибуття потяга, переведені у хвилини наступним чином:

$$t_{\epsilon} = h_{\epsilon} \cdot 60 + m_{\epsilon};$$

$$t_{np} = h_{np} \cdot 60 + m_{np},$$

де  $h_{\epsilon}$ ,  $m_{\epsilon}$  та  $h_{np}$ ,  $m_{np}$  – години і хвилини відправлення та прибуття потяга.

Алгоритм здатний надати пропозицію раціональної з точки зору застосування тризонного ДТ зміни графіка руху потяга, тривалість руху якого не перевищує однієї доби. Для такого потяга значення коефіцієнтів  $\alpha$  лежать у межах від 0 до 1. Якщо тривалість руху потяга перевищує добу, то відповідно коефіцієнти можуть отримувати значення, яке перевищує 1.

У розробці програмного забезпечення важливо, щоб створений продукт працював безвідмовно при будь-яких допустимих вхідних даних, тому для того, аби запропонований у роботі [3] алгоритм працював для випадків  $\alpha_{\max} > 1$ , перед виконанням алгоритму для всіх змінних, якими позначено коефіцієнти  $\alpha$  слід використати формулу:

$$\alpha_n = \alpha_n - \lceil \alpha_{\max} \rceil + 1,$$

а перед виведенням результату його роботи необхідно зробити зворотнє перетворення

$$\alpha_n = \alpha_n + \lceil \alpha_{\max} \rceil - 1,$$

де  $n$  – порядковий номер коефіцієнта,  $\alpha_{\max}$  – найбільше значення, серед коефіцієнтів  $\alpha$  за існуючим (старим) графіком. Ці операції додано в алгоритм у вигляді відповідних блоків.

Розглянемо випадок, коли  $N$  потягів рухаються від станції відправлення до станції прибуття, між якими немає проміжних станцій, де можуть розпочинати або закінчувати рух інші потяги. Для такого випадку вищезгаданий алгоритм буде справедливим, якщо до його рішень додати міжпоїзний інтервал  $M \cdot (p-1)$ , де  $p$  – порядковий номер потяга за послідовністю відправлення згідно існуючого графіка руху.

При перенесенні часу відправлення потяга, необхідно щоб виконувалася умова

$$N \leq \frac{\sum (T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum (\alpha' \cdot T')}{M} - N_*, \quad \text{де}$$

$\sum (\alpha' \cdot T')$  – частина графіка, яку необхідно змістити;  $\sum (T_* - \alpha_* \cdot T_*)$  – доступна частина тарифної зони, до якої буде перенесено графік руху;  $N_*$  – кількість поїздів, які здійснюють рух у тарифній зоні  $T_*$ . Тоді для кожного потяга  $N_p$  час відправлення буде перенесено на  $M \cdot (p-1)$ .

$$\text{У випадку } N > \frac{\sum (T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum (\alpha' \cdot T')}{M} - N_*$$

$$\text{для } \left\lfloor \frac{\sum (T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum (\alpha' \cdot T')}{M} \right\rfloor - N_* \text{ потягів}$$

справедливим буде попереднє рішення, а для кожного потяга

$$p > \left\lfloor \frac{\sum (T_* - \alpha_* \cdot T_*) - \sum (\alpha' \cdot T')}{M} \right\rfloor - N_* \text{ графік}$$

руху змінювати не потрібно.

### Висновки

1. У результаті досліджень запропоновано математичну модель для опису тривалості руху потяга через періоди дії тарифних зон диференційованого тарифу, під час яких він здійснює рух.

2. Розроблено математичні методи, які дозволяють застосовувати алгоритм комп'ютерної адаптації графіка руху потяга [3] для  $N$  потягів на одній ділянці без обмежень по часу в дорозі кожного з них.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

## REFERENCES

1. Притула М.Г. Алгоритм побудови графіка руху потягів / М.Г. Притула, Р.Р. Шпакович // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, № 629, 2008. – С.146-152.
2. Гайдено О.С. Комп'ютерно-орієнтована математична модель оцінки ефективності тарифної системи оплати за спожиту електроенергію залізницею / О.С. Гайдено // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал, № 4, 2016 – С. 10-14.
3. Гайдено О.С. Оптимізація графіка руху потяга для використання тризонного диференційованого тарифу оплати спожитої електроенергії / О.С. Гайдено // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал, № 5, 2016 – С. 46-50.
4. Щербакова И.А. Математические модели компьютерного анализа и оптимизации стоимости электроэнергии по коммерческим тарифам с учетом затрат для изменения графика движения поездов / И.А. Щербакова, А.И. Стасюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал, № 4, 2014 – С.7-12.
5. Бурдюк Т.А. Определение затрат изменения графика движения поездов на основе дифференцированных коммерческих тарифов на электроэнергию./ Т.А. Бурдюк, И.А. Щербакова // Электронное моделирование – 2004. - 26, №6 – С. 101-111.
6. Бурдюк Т.А. Математические модели и методы минимизации коммерческой стоимости потребляемой электроэнергии на основе тарифов, дифференцированных по зонам суток / Т.А. Бурдюк, И.А. Щербакова // Электрон. моделирование – 2004. - 26, №2. – С. 79-88.

Надійшла до друку 01.12.2016.

1. M. Prytula, R. Shpakovych *Algorithm pobudovi grafika ruhu potyagiv* [Algorithm of a train schedule development]. Bulletin Nat. Univ "Lviv Polytechnic". Computer science and information technology. – Lviv, № 629, 2008. – P. 146-152.
2. . Haidenko *Komp'yuterno-orientovana matematichna model otsinki effektivnosti tarifnoi sistemy oplaty za spozhиту elektroenergiyu zaliznitseyu* [Mathematical model assess the effectiveness of the payment tariff system for electricity consumed by railways for use on a computer]. Information management systems for rail transport, scientific and technical magazine, № 4, 2016 – P. 10-14.
3. O. Haidenko *Optimizatsiya grafika ruhu potyaga dlya vikoristannya trizonnogo diferentsiyovanogo taryfu oplaty spozhitoy elektroenergiyi* [Optimization of the train's schedule to use three-zone differentiated tariff for consumed electricity payment]. Information management systems for rail transport, scientific and technical magazine, № 5, 2016 – P.46-50.
4. I. Shcherbakova, A. Stasiuk *Matematycheskye modeli komp'yuternoho analiza i optimizatsii stoimosti elektroenergiyi po kommercheskim tarifam s uchetom zatrat dlya izmeneniya grafika dvizheniya poezdov* [Mathematical models of computer analysis and optimization of electricity cost according to commercial tariffs, taking into account the costs for changing train schedules]. Information management systems for rail transport, scientific and technical magazine, № 4, 2014 – P. 7-12.
5. T. Burdyuk, I. Shcherbakova *Opreделение zatrat izmeneniya grafika dvizheniya poezdov na osnove differentsirovannykh kommercheskikh tarifov na elektroenergiyu* [Definition of train schedule changes based on cost differentiated commercial electricity tariffs]. Electronic modeling– 2004. - 26, №6 – P. 101-111.
6. T. Burdyuk, I. Shcherbakova *Matematycheskye modeli i metody minimizatsii kommercheskoy stoimosti potrebyaemoy na osnovetarifov, differentsirovannykh po zonam sutok* [Mathematical models and methods of minimizing the commercial cost of consumed electricity based on tariffs, differentiated by time zones]. Electronic modeling– 2004. - 26, №2 – P. 79-88.

Внутрішній рецензент Кузнецов В.Г.

Зовнішній рецензент Мараховський Л.Ф.

Розглянуто алгоритм комерційної оптимізації графіка руху потяга для економії коштів при сплаті за спожиту електричну енергію згідно тризонного диференційованого тарифу. Знайдено та реалізовано шляхи його вдосконалення. Внаслідок проведених досліджень запропоновано математичну модель для опису часу руху потяга зі станції відправлення до станції прибуття через періоди дії тарифних зон диференційованого за часом доби комерційного тарифу, під час яких він здійснює рух. Розроблено математичні методи, які дають змогу використовувати алгоритм комп'ютерної адаптації графіка руху потяга для усіх потягів за напрямком на одній електрифікованій ділянці без обмежень по тривалості руху кожного з них, за умови що між кінцевою станцією та станцією відправлення немає проміжних станцій, де можуть здійснювати відправлення чи зупинку інші потяги. Як результат вдосконалений алгоритм при зміні графіка потягів здатен враховувати наступні фактори: періоди дії тарифних коефіцієнтів тризонного диференційованого тарифу, міжпоїзні інтервали, тривалість руху кожного потяга та мінімальне зміщення існуючого графіка.

**Ключові слова:** мінімізація; електроспоживання; алгоритм; диференційований тариф; тарифні зони; модель.

УДК 681.325

О.С. ГАЙДЕНКО (ГЭТУТ)

Кафедра «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии транспорта», Государственный экономико-технологический университет транспорта, ул. Н. Лукашевича, 19, Киев, Украина, 03049, тел.: +38(093)2696316, эл. почта: [haidenko121@gmail.com](mailto:haidenko121@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-8308-3910](https://orcid.org/0000-0001-8308-3910)

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ АДАПТАЦИИ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ К ОПЛАТЕ ПОТРЕБЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ТЯГУ ПО КОММЕРЧЕСКОМУ ТАРИФУ

Рассмотрено алгоритм оптимизации графика движения поезда для экономии средств при оплате за электрическую энергию согласно трехзонного дифференцированного тарифа. Найдено и реализовано пути его совершенствования. Вследствие проведенных исследований предложена математическая модель описания времени движения поезда со станции отправления до прибытия через периоды действия дифференцированного по времени суток тарифа, при которых он осуществляет движение. Разработаны математические методы, которые позволяют использовать алгоритм компьютерной адаптации графика движения поезда для всех поездов по направлению на одном электрифицированном участке без ограничений по времени движения каждого из них, если между конечной станцией и станцией отправления нет промежуточных станций, где могут осуществлять отправления или остановку другие поезда. Как результат усовершенствованный алгоритм при изменении графика поездов способен учитывать следующие факторы: периоды действия тарифных коэффициентов, межпоездные интервалы, продолжительность движения каждого поезда и минимальное смещение существующего графика.

**Ключевые слова:** минимизация; электропотребления; алгоритм; дифференцированный тариф; тарифные зоны; модель.

Внутренний рецензент *Кузнецов В.Г.*

Внешний рецензент *Мараховский Л.Ф.*

UDC 681.325

O.S. HAIDENKO (SUTET)

Department «Automation and Computer-Integrated Technologies of Transport department», State University for Transport Economy and Technologies, Lukashevych Str., 19, 03049, Kyiv, Ukraine, tel.: +38(093)2696316, e-mail: [haidenko121@gmail.com](mailto:haidenko121@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-8308-3910](https://orcid.org/0000-0001-8308-3910)

## MATHEMATICAL METHODS OF COMPUTER ADAPTATION TRAIN SCHEDULE FOR ELECTRICITY PAYMENT CONSUMED OF TRACTION IN ACCORDANCE WITH COMMERCIAL TARIFF

The algorithm of the commercial optimization train schedule to save costs for the consumed electricity payment by three-zone differentiated tariffs is reviewed. Ways to improve it are found and implemented. As a result of researches the mathematical model to describe the time of the train from the station of departure to the station arrival by periods of tariff zones differentiated by time of day commercial tariff, in which it performs the movement is offered. The mathematical methods that allow the use of a computer algorithm adaptation train schedule for all trains on electrified direction without limits of time on the road each provided between the end station and the station of departure no intermediate stations, which can carry departure or stop other trains, are developed. As a result, an improved algorithm by changing the schedule of trains able to consider the following factors: the periods of the tariff coefficients of three-zone differential tariff, intervals between trains, the duration of each train movement and minimal displacement of current schedule.

**Keywords:** minimization; electric power consumption; algorithm; differentiated tariff; tariff zones; model.

Internal reviewer *Kuznetsov V.G.*

External reviewer *Marahovskyy L.F.*

С.П. ДЕНИСЮК (ІЕЕ КП), Д.С. ГОРЕНКО (ІЕЕ КП), П.В. СОКОЛОВСЬКИЙ (ІЕЕ КП),  
О.В. СТЕПОВИЙ (ІЕЕ КП)

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», вул. Борщагівська 115, Київ, Україна, 03056, тел.: 0938315500, ел. пошта: [spdens@ukr.net](mailto:spdens@ukr.net), [gorenko.darya@yandex.ua](mailto:gorenko.darya@yandex.ua), [sokolovskyi.pavlo@ukr.net](mailto:sokolovskyi.pavlo@ukr.net), [stepovoyas@gmail.com](mailto:stepovoyas@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0002-6299-3680](https://orcid.org/0000-0002-6299-3680), [orcid.org/0000-0002-7879-780](https://orcid.org/0000-0002-7879-780), [orcid.org/0000-0002-0113-4479](https://orcid.org/0000-0002-0113-4479), [orcid.org/0000-0002-7151-0900](https://orcid.org/0000-0002-7151-0900).

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА НОМІНАЛЬНІЙ НАПРУЗІ 20 кВ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ УКРАЇНИ

### Вступ

Провідні країни ще в другій половині ХХ ст. здійснили перехід на клас напруги 20 кВ, в той час як міста України основна увага приділяється розподільним мережам середнього і низького рівня напруги, для яких основні технологічні та технічні рішення були спроектовані в середині ХХ ст. Сьогодні стало неефективним та неконкурентоспроможним розвивати інфраструктуру мереж (6-10 кВ), у зв'язку з низькою ефективністю та збільшенням попиту на електроенергію у великих містах. Це обумовлено складною архітектурною топологією будівель і споруд, що зумовлює необхідність пошуку нових рішень в розвитку енергозабезпечення [1].

Для функціонування віртуальних електричних станцій (Virtual Power Plant – VPP) до складу яких можуть входити Microgrid необхідна «розумна» інфраструктура на етапах генерації, передачі, трансформації та кінцевого споживання електричної енергії, яка б гарантувала збереження надійності та поділу на категорії електрозабезпечення споживачів. При цьому необхідно розглянути різну варіативність організації роботи мереж на класі напруги 20 кВ з точки зору підключення до них VPP [2].

Концепція локальних електричних систем Microgrid набирає все більшої популярності на ринку електроенергетики, однак доцільно дослідити особливості адаптування роботи вітчизняних систем електропостачання як з точки зору таких систем і варіативність організації роботи мереж на класі напруги 20 кВ, так і з точки зору підключення до них віртуальних електричних систем. Існуюче обладнання в розподільних мережах не дозволяє використовувати моделі згідно концепції Smart Grid (Microgrid), локальних мереж та VPP, за рахунок морально і фізично застарі-

лого обладнання, яке не дозволяє використовувати «хмарні» віддалені системи контролю за станом обладнання та управління автоматикою, які вже використовують розвинені країни (США, Німеччина, Франція, Австрія, Італія, Фінляндія)[3, 4].

Концепція локальних електричних систем VPP та Microgrid набирає все більшої популярності на ринку електроенергетики, проте доцільно дослідити особливості адаптування роботи вітчизняного електропостачання щодо переходу до таких систем.

### Мета

Аналіз можливості впровадження технологій Smart Grid для підвищення рівня надійності, гнучкості та контрольованості електричних мереж, за рахунок змін структури розподільних мереж 110 – 35 – 10(6) – 0,4 кВ на системи 110 – 20 – 0,4 кВ.

### Результати

Система електрозабезпечення відповідальних споживачів, зокрема об'єктів Укрзалізниці характеризується проблемами, які виникають з живленням на постійному та змінному струмі та тісно пов'язана з розосередженістю джерел живлення на різних територіях протяжності ліній. Режим роботи мережі обумовлені нерівномірністю створених навантажень і роботи рухомого складу залізниць [5].

На українських залізницях застосовуються дві системи тягового електропостачання (СТЕ) постійного та змінного струму. На вітчизняних магістралях склалась тенденція просування СТЕ змінного струму через її переваги, проте вона має низку суттєвих недоліків. До основних та найбільш проблематичних можна віднести такі як: несиметричне навантаження фаз трансформаторів та небез-

печний електромагнітний вплив на суміжні пристрої і прилеглі ділянки [6].

Важливим є дослідження для рекупераційних режимів, несиметрії, проблем електромагнітної сумісності пов'язаних з вищими гармоніками струмів та напруг проводяться з точки зору обмінних процесів [8 – 9].

Виникає необхідність розроблення оптимізаційних задач для електроенергетичних систем різного ієрархічного рівня [5].

Так, для систем з несинусоїдальними сигналами, поряд з реактивною потужністю Фризе  $Q_F$  (міра квадратичної нев'язки між повною та активною потужностями), використовують реактивну потужність Кваде (реактивна потужність визначається як квадратична нев'язка між реактивною потужністю Фризе та основною гармонічною складовою реактивної потужності), що є нев'язкою між неактивною потужністю Фризе та першою гармонічною складовою реактивної потужності [5,7]:  $Q_{KB} = \sqrt{Q_F^2 - Q_1^2}$ , де  $Q_1$  – реактивна потужність першої гармоніки.

Прикладом реактивної потужності, визначеної за допомогою обмінних процесів, є реактивна потужність на основі визначення обмінної потужності  $Q_{OB}$  за умови постійної інтенсивності перетворення електроенергії в інші види протягом періоду  $T$  [7].

З виразу обмінної потужності можна отримати.

$$Q_{OB} = U_{m(1)} I_{m(1)} \cdot \left[ \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{3T}{2}} \sin \omega t \sin \left( \frac{3\omega t}{2} \right) dt + \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{3T}{2}} \sin \omega t \sin \left( \frac{3\omega t}{2} \right) dt \right] \approx 0,221 U_{m(1)} I_{m(1)}.$$

Реактивна потужність  $Q$  дорівнює  $Q = \pi Q_{OB} \approx 0,692 U_{m(1)} I_{m(1)}$ .

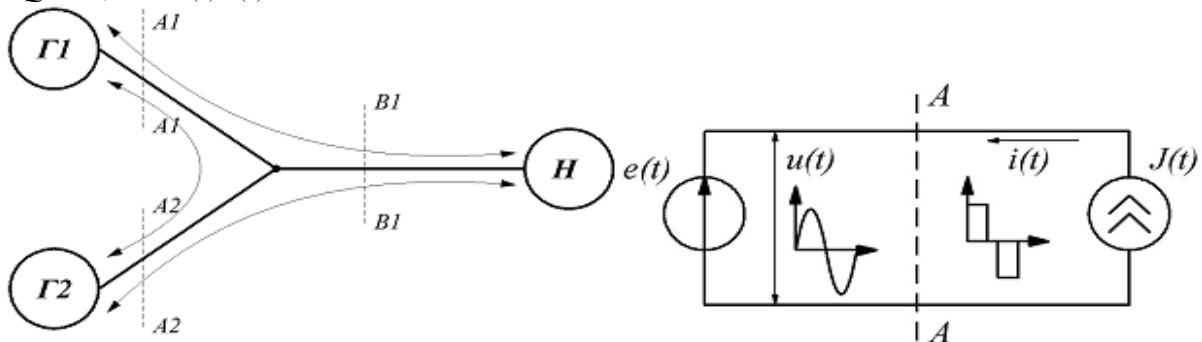


Рис. 1. Взаємний вплив різнотипних генераторів та вплив зовнішніх завад на них

Для визначення реактивної обмінної потужності можна використати розкладання струму  $i(t)$  на дві складові: активну  $i_a(t)$  та реактивну  $i_p(t)$ . Тоді з врахуванням виразів  $i_a(t) = u(t)P/U_D^2$ ,  $i_p(t) = i(t) - i_a(t)$  обмінна реактивна потужність визначається таким чином:

$$Q_{OB,p} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} |u(t) i_p(t)| dt. \quad (1)$$

При роботі автономних систем електроживлення як в острівному режимі, так і паралельно з мережею виникає низка проблем, а саме:

- взаємний вплив різнотипних генераторів та їх вплив на навантаження як на лінійне та нелінійне представлено на рис. 1,а;
- вплив зовнішніх завад різного характеру, форми та тривалості на генератор електроенергії, варіант якого показано на рис. 1,б;
- вплив різних гармонічних складових частоти сигналів та різних завад на обмінні процеси наведено на рис. 2,а;
- можливість виявлення рекуперації електроенергії в мережу залежно від періоду показано на рис. 2,б.

З рис. 2,б видно, що на певних інтервалах потужність, яка проходить через контур, додатна, а в інші інтервали – від'ємна. Саме знак обмінної потужності визначає режим споживання чи генерації (рекуперації) з боку навантаження сигналів. У випадку несинусоїдальних сигналів існує можливість виявляти та компенсувати завади, що здійснюють шкідливий вплив на генератор як з боку навантаження, так і з боку інших генераторів системи. Такі процеси проаналізовані в однофазних мережах і не викликають питань. Проте при аналізі трифазних мереж такої однозначності немає, і це потребує більш поглибленого аналізу.

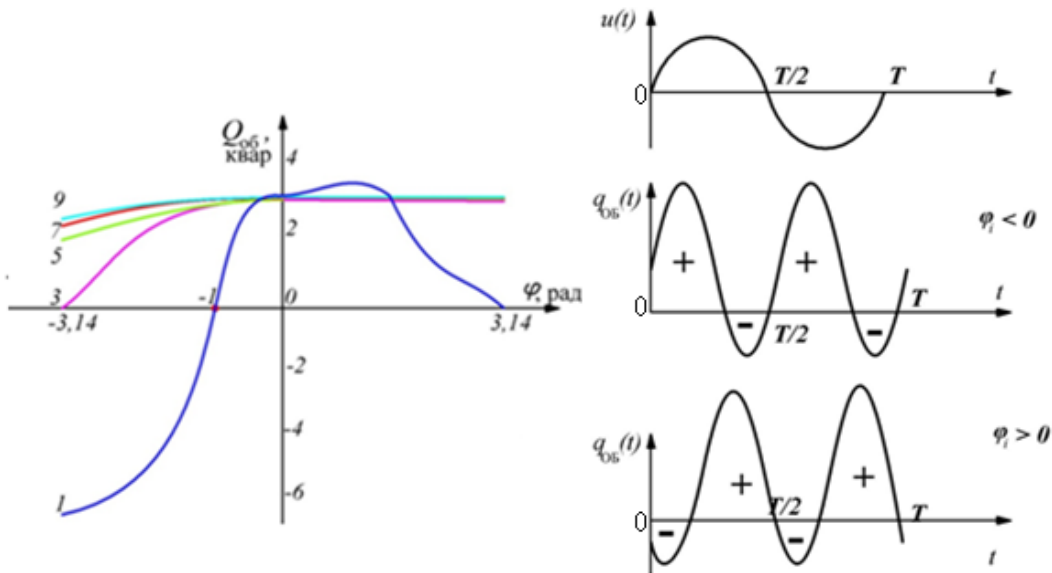


Рис. 2. Обмінні потужності залежно від рівня гармонічних складових та рекуперації

Обмінні процеси в однофазних системах розглянуто з різних боків, визначено фактори, які впливають на обмінну потужність, зумовлюючи її наявність або рівність нулю. Проаналізовано вплив різнотипних сигналів та вищих гармонічних складових на однофазні системи з урахуванням обмінних процесів.

Для більш наочного представлення особливостей оцінки обмінних процесів проведемо аналітичний розрахунок та побудуємо графік зміни відхилення  $\Delta Q_{об}$  від параметрів навантаження у відносних одиницях згідно співвідношення:

$$\Delta Q_{об} = (\sum Q_{об} - Q_{об\Sigma}) / \sum Q_{об}$$

Відповідно до розрахункових даних побудуємо графічну залежність відхилення обмінної потужності  $\Delta Q_{об}$  від навантаження (рис. 3). Крива 1 відображає залежність величини  $\Delta Q_{об}$  при зміні активної складової активно-індуктивного навантаження, а крива 2 – залежність величини  $\Delta Q_{об}$  при зміні індуктивної складової активно-індуктивного навантаження.

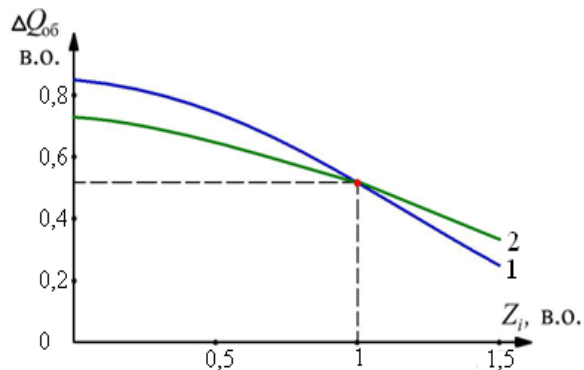


Рис. 3. Відхилення обмінної потужності при аналізі трифазних мереж

Важливо проаналізувати особливості переходу на номінал напруги промислових об'єктів рекомендовано використовувати рівень напруг, на яких енергосистема має вільну потужність, якщо це дозволяє уникнути додаткових етапів трансформації. Напруга 110 кВ є ефективним рішенням, як з економічних, так і з монтажних, експлуатаційних, архітектурно-планувальних і природо-захисних

міркувань, але напругу 20 кВ, як і напругу 35 і 10 кВ недоцільно застосовувати в якості основної напруги для перших ступенів електропостачання потужніших підприємств. Тут виникає потреба в більш високих напругах [7] – як прикладу на рис. 5 зображено частину мережі 20 кВ з трансформаторною підстанцією 110/20 кВ у місті Гельсінкі.

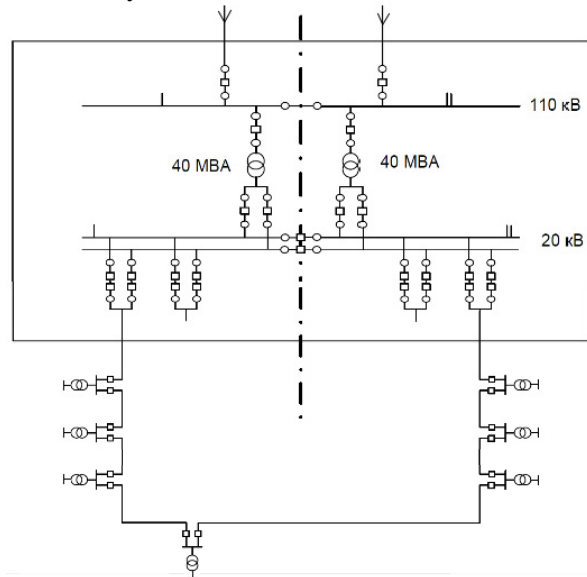


Рис. 4. Схема трансформаторної підстанції 110/20 кВ

Зниження нижньої межі потужності трансформаторів, що випускаються напругою 110 кВ до 2,5 МВА, а також розширення використання трансформаторів 110 кВ для електротермічних установок обмежує подальше використання напруги 35 кВ. При незначній різниці згідно приведених затрат, в межах 10 – 20%, перевагу при виборі слід надавати більш високій напрузі.

На основі проведених розрахунків проведено порівняльний аналіз втрат в мережах на різних значеннях напруг (6, 10, 20 кВ) [8]. Визначено, що розподільне обладнання 20 кВ і 6-10 кВ відносяться до одного класу мереж, але за рахунок зниження рівня струмів короткого замикання можливе послаблення вимог до апаратів релейного захисту та автоматики.

Проаналізовано переваги використання напруги 20 кВ на II та III рівнях:

- у порівнянні з класом напруг 35 кВ, мережі 20 кВ мають простіший з технічної точки зору склад мережі та дешевих апаратів релейного захисту і автоматики;
- у порівнянні з напругою 10 кВ, мережа 20 кВ характеризується значно нижчим рівнем втрат електричної енергії в елементах системи електропостачання і струмів КЗ в мережах;
- усунення проміжних етапів перетворення напруги (35, 10, 6 кВ), дозволить зменшити загальну протяжність ЛЕП та зменшити втрати в мережі 0,4 кВ (які станом на 2016 рік складають 70% втрат в національній енергосистемі), шляхом використання щоглових КТП 20/0,4 кВ [1];
- виходячи з умови того, якщо площа поперечного перерізу проводів однакова  $F_6 = F_{10} = F_{20}$ , то збільшення пропускної здатності ЛЕП напругою 20 кВ в порівнянні з мережею 10 кВ збільшується в 2 рази, а в порівнянні з мережею 6 кВ в 3 рази;
- покращення якості напруги, за рахунок зменшення падіння напруги та втрат потужності в лініях на 75%, за умови, якщо навантаження в мережах 10 кВ і 20 кВ однакові; покращення показників SAIDI та SAIFI[9];
- перспективність для підключення джерел розподіленої генерації та можливість побудови розумної мережі Smart Grid;
- цілодобовий моніторинг стану мережі та зниження затрат на обслуговування електромереж за рахунок модернізації обладнання.

Напруга 10 кВ є більш економічною в порівнянні з напругою 6 кВ. Напругу 6 кВ можна застосовувати тільки в тих випадках, коли на підприємстві переважають приймачі з номінальною напругою 6 кВ чи коли значна частина

навантаження підприємства живиться від заводської ТЕЦ, де встановлені генератори напругою 6 кВ. Тому необхідно в першу чергу виконати план, щодо переведення розподільних мереж зі значення 6 кВ, на напругу 20 кВ [12].

Визначено проблеми переведення розподільних мереж з номінальної напруги 6 – 10 кВ на напругу 20 кВ:

- відсутність широкої лінійки електрообладнання на номінал напруги 20 кВ;
- відсутність досконалої нормативно-правової бази використання в ОЕС України напруги 20 кВ, як одного з ключових аспектів переходу до моделей ВЕС;
- відсутність партнерської програми з країнами, які вже використовують технологію використання напруги 20 кВ;
- відсутність проекту сценарного типу, який враховував би особливості переведення частин мереж з напруги 6 (10) кВ на напругу 20 кВ з паралельною роботою основної кількості цих мереж.

Несиметричність та несинусоїдальність безпосередньо викликають збільшення втрат активної потужності, скорочення терміну служби обладнання, порушення технологічних роботи, додатковий нагрів устаткування від впливу вищих гармонічних складових. Виникнення вищих гармонічних складових на залізничному транспорті зумовлені роботою трансформаторів, випрямлячів, інверторів та несиметричністю напруги живлення.

Наявний стан обладнання, виробіток ресурсу вимагає застосування нової схемотехніки тягових мереж, перетворювальної техніки, обладнання для підсилення тягових мереж, що подолують проблеми недостатнього рівня напруги і питомої потужності в тяговій мережі.

Важливим завданням є дотримання напруги в заданих межах, так як рівень напруги загалом визначає енергетичні показники функціонування енергосистеми. Під час передачі потужності додаються несинусоїдальність, несиметрія та нерівномірність навантаження.

Регулювання напруги в тягових мережах здійснюється за допомогою технічних засобів [5]:

- повздовжня компенсація, яка компенсує опір в тяговій мережі внаслідок чого зменшуються втрати напруги;
- поперечна компенсація виконує компенсацію реактивної потужності від навантаження таким чином зменшуючи втрати потужності в мережі
- симетрування навантажень і напруг.

Такі недоліки стали причиною для постійних модернізацій системи постачання на змінному струмі та пристроїв для їх усунення і захисту від них. В умовах необхідності дотримання якості електропостачання є актуальним питанням перехід системи тягового електропостачання виключно на постійний струм, що дозволить позбутися основних недоліків від використання змінного струму, а також дасть можливість використовувати рекуперативне гальмування. Рекуперація електроенергії – дозволяє повернути частку спожитої електроенергії на-

зад у мережу або на суміжні Microgrid від електрорухомого складу (ЕРС).

На рис. 5 зображено структурну схему обмінних процесів, що представляє напрями перетоків потужностей і негативних впливів внаслідок погіршення якості електроенергії. Складові схеми показують основні ланки, що беруть участь у обміні енергією та їх можливий вплив на суміжні елементи як в середині системи електропостачання залізничного транспорту так і до системи зовнішнього електропостачання.

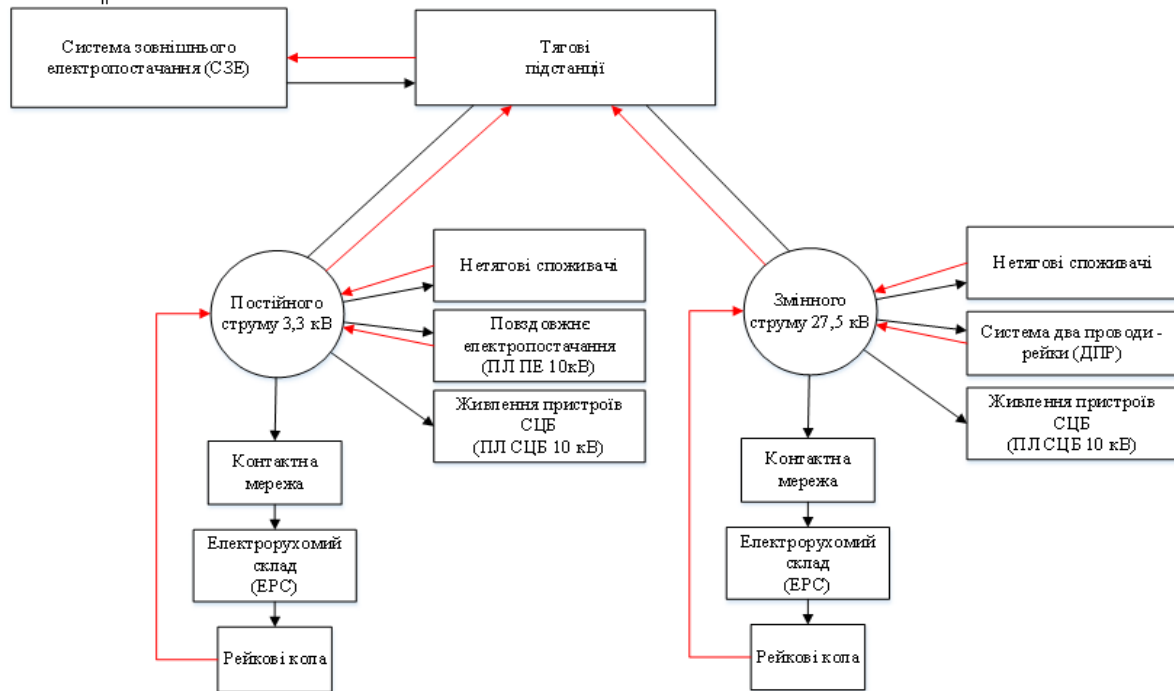


Рис. 5. Структурна схема обмінних процесів

Система зовнішнього електропостачання впливає на якість електропостачання шляхом передачі потужності до тягових підстанцій по лініям електропередачі, від яких також отримують живлення інші різноманітні навантаження (СЗЕ виступає генеруючим елементом по відношенню до системи електропостачання залізниці). Потужність, що надходить від системи до введів тягової підстанції, впливає на обладнання і на енергетичні показники.

Наслідком чого є негативний вплив на устаткування і його режими роботи.

Зі сторони системи зовнішнього електропостачання безпосередньо на рівень напруги на шинах високої сторони тягових підстанцій впливають такі чинники як:

- габарити та параметри ліній електропередачі;
- характер навантажень, які приєднанні до однієї лінії електропередач разом з тяговими підстанціями;

– потужність енергосистеми, яка живить тягові підстанції.

Елементи системи тягового електропостачання генерують реактивну потужність та власні завади, внаслідок чого спотворюють енергетичні показники, які впливають на роботу всіх суміжних пристроїв.

Важливо усунути цей негативний вплив, так як від однієї лінії чи до однієї шини підстанції можуть бути підключені інші споживачі, які є особливо чутливими до якості електроенергії. Частину негативного впливу позбуваються шляхом використання технічних засобів для дотримання необхідного рівня напруги, зменшення активних втрат потужності та організаційні заходи.

Внаслідок чого залишається певна частка енергії, яка шляхом обмінних процесів впливає на споживачів, що отримують живлення від тягових підстанцій залізниць або від ліній ПЕ/ДПР.

## Висновки

Переведення мереж на напругу 20 кВ особливо актуально проводити в містах з високою густиною електричних навантажень [13, 14], а також потребують наявності у центрах живлення 110 кВ резервів потужності на рівні 20 кВ. Мультиагентне або оптимальне керування необхідно з одного боку для модернізування електричних мереж, шляхом перегляду можливості переведення мереж на напругу 20 кВ, а з іншого боку для оптимального керування додатковою генерацією електричної енергії.

Використання цієї технології необхідно ретельніше дослідити, у вигляді пілотних проєктів

для конкретних міст з подальшим виконанням техніко-економічним обґрунтування. Таке переведення дозволить розширити можливості проєктування нових та реконструкції вже існуючих підстанцій, за рахунок збільшення пропускної спроможності електричних мереж зменшення «транзитних» пунктів передачі та розподілу електричної енергії, а також дозволить розглядати їх в якості складових VPP. Відкривається перспектива для побудови інтелектуальних локальних електричних мереж Microgrid, з їх подальшою роботою у складі VPP.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Циганенко Б.В. Перспективи переведення розподільних мереж України на номінальну напругу 20 кВ / Наукові праці ВНТУ. – 2016 – № 1. – С. 1 – 4.
2. Кириленко О.В. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж / О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 9. – Спец. вып. Т.2: Силовая электроника и энергоэффективность. – С. 82-94.
3. Borscevskis O. 20kV Voltage Adaptation Problems in Urban Electrical Networks [Електронний ресурс]. URL: <http://egdk.ttu.ee> (дата звернення 05.12.2016).
4. Асташев Д.С. Применение напряжения 20 кВ для распределительных электрических сетей России / Д.С. Асташев, Р.Ш. Бедретдинов, Д.А. Кисель, Е.Н. Соснина // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 4. – С. 6 – 9.
5. Саблін О.І. Оптимізація режимів тягового електроспоживання та рекуперації енергії в системах електричного транспорту / О.І. Саблін / Науковий журнал «Електрифікація транспорту» 2016. – № 11. – С. 53 – 60.
6. Ягуп В.Г. Компенсация реактивной мощности в тяговой системе переменного тока / В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп / Науковий журнал «Електрифікація транспорту» 2014. – № 6 – С. 60 – 66.
7. Денисюк С.П. Аналіз проблем впровадження віртуальних електростанцій / С.П. Денисюк, Д.С. Горенко // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – № 2. – С. 25 – 33.
8. Денисюк С.П. Аналіз обмінних процесів при паралельній роботі вітроелектричних установок / С.П. Денисюк, Д.С. Горенко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 4/8 (82). – С. 26-32.
9. Денисюк С.П. Обмінні процеси в трифазних автономних системах електроживлення / С.П. Денисюк, Д.С. Горенко // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2016. – № 45. – С. 9-15.
10. Вибір раціональної напруги розподільчої мережі підприємства [Електронний ресурс]. URL

## REFERENCES

1. Tsyganenko B.V. Perspektivy perevedennya rozpodilnih merezh Ukrainu na nominalnu napругu 20 kV [Outlook conversion of distribution grids for nominal voltage 20 kV]. Science works VNTU. – 2016 – № 1 – pp. 1 – 4.
2. Kyrylenko O.V. Suchasni tendentsii pobudovu ta keruvannya rezshimamu elektroenergetichnih merezh / O.V. Kyrylenko, S.P. Denysuk // Energy saving. Power engineering. Energy audit. – 2014. – № 9. – Spec. issue P. 2 : Power electronics and energy efficiency. – pp. 82 – 94.
3. Borscevskis O. 20kV Voltage Adaptation Problems in Urban Electrical Networks [Web resource]. URL: <http://egdk.ttu.ee> (appeal date 05.12.2016).
4. Astashev D.S., Bedretdinov R. Sh., Kisel D.A. Primenenie napryazhenia 20 kV dlya raspredelitel'nykh setei Rossii [Application of voltage 20 kV for distribution grids of Russia]. Messenger NGIEI. – 2015. – № 4. – pp. 6 – 9.
5. Sablin O.I. Optimizaciya rezshimiv tyagovogo electrosposzhivannya ta recuperacii energii v sistemah electrichnogo transportu [Optitmisation of operating modes traction power and recuperation energy in systems of electrical transport]. Science magazine «Electrification of transport». 2016. – № 11. – pp. 53 – 60.
6. Yagup V.G., Yagup E.V. Kompensaciya reaktivnoy moschnosti v tyagovoi sisteme peremennogo toka [Reactive power compensation in traction system of alternative current]. Science magazine «Electrification of transport». 2014. – № 6 – pp. 60 – 66.
7. Denysiuk S.P., Horenko D.S. Analis problem vprovadzshennya virtualnih electrostanciy [Problem analysis of realization virtual power plants]. Energy: economy, technology, ecology. – 2016. – № 2. – pp. 25 – 33.
8. Denysiuk S.P., Horenko D.S. Analis obminnih procesiv pru paralelniy roboti vitroelectichnih ustanovok [Power exchange processes analysis in parallel work of wind power installations]. East Europe magazine of modern technologies. – 2016. – № 4/8 (82). – pp. 26 – 32.
9. Denysiuk S.P., Horenko D.S. Obminni procesu v trifaznih autonomnuh sistemah electrozshivlennya

<http://elib.lutsk-ntu.com.ua>

(дата звернення

05.12.2016).

11. Кірик В.В. Міжнародний досвід використання мереж 20 кВ / В.В. Кирик А.Е. Наливайська / Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики. – 2015 – С. 95 – 97.

12. Гончар М.І. Деякі аспекти вибору напруги 20 кВ для сільських розподільних мереж. // М.І. Гончар, С.А. Попадченко / Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Випуск 130 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України" - Харків: ХНТУСГ, 2012. - с.6-8.

13. Соснина Е.Н., Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А. Топология городских распределительных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ // Промышленная энергетика. 2012. № 5. С. 11–17.

14. Маслов А.Н. Проблемы и особенности построения распределительных сетей крупных городов и мегаполисов // Тр. XII Всемирного электротехнического конгресса. 2011. [Электронный ресурс]. URL: <http://wetc.ru> (дата звернення 05.12.2016).

Надійшла до друку 21.11.2016.

[Power exchange processes in triphase self-dependent power supply systems]. Works of Institute of electrodynamics Ukrainian NAS. – 2016. – № 45. – pp. 9–15

10. Vubyr racionalnoi napругu rozpodilchoi merezshi pidpriemstva [The choice of a rational voltage of company's distribution grids]. [Web resource]. URL: <http://elib.lutsk-ntu.com.ua> (appeal date 05.12.2016).

11. Kyrk V.V., Naluvayska A.E. Mizsharodnyi dosvid vukorystannya merezsh 20 kV [International experience of using 20 kV grids] International science and technology magazine «Modern problems of power engineering and automatics». – 2015 – pp. 95 – 97.

12. Gonchar M.I., Popadchenko S.A. Deyaki aspektu viboru napругu 20 kV dlya silskih rozpodilchih merezsh [Some aspects of choice voltage 20 kV for village grids]. Messenger HNTUVA n.a. Petro Vasylenko. Issue 130 «Energy supply and energy saving in Ukrainian AFC». Kharkiv, HNTUVA – 2012. – pp.6 – 8.

13. Sosnina E.N., Loskutov A.B., Loskutov A.A. Topologiya gorodskih raspredelitelnih intelektualnih elektricheskikh setei 20 kv [Urban topology of 20 kv distribution smart grids]. Industrial power engineering. – 2012. № 5. pp. 11–17.

14. Maslov A.N. Problemi I osobennosti postroyeniya raspredelitelnih setei krupnih gorodov i megapolisov. [Problems and specialties construction of big cities and metropolis distribution grids]. [Web source]. URL: <http://wetc.ru> (appeal date 05.12.2016).

Внутрішній рецензент *Сиченко В.Г.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П.Д.*

Виконано аналіз та оцінено потенціал переведення систем розподілу електричної енергії з триступеневої на двоступеневу для подальшої адаптації їх роботи в структурі VPP.

Розглянуто та виділено ряд техніко-організаційних завдань і рішень на початковому етапі, щодо провадження таких систем в умовах електрозабезпечення міста України.

Описано вплив обмінних процесів з різнотипними сигналами. Систематизовано взаємний зв'язок між елементами електропостачання залізничного транспорту та їх можливість функціонування з локальними електроенергетичними системами.

Наведено структурну схему обмінних процесів в системі електрифікованого транспорту, яка включає можливість приєднання та паралельної роботи з VPP.

**Ключові слова:** електричні мережі; розподільні мережі; Virtual Power Plant; Smart Grid; Microgrid; обмінні процеси.

**УДК 621.31**

С.П. ДЕНИСЮК (ІЭЭ КПИ), Д.С. ГОРЕНКО (ІЭЭ КПИ), П.В. СОКОЛОВСКИЙ (ІЭЭ КПИ), А.В. СТЕПОВОЙ (ІЭЭ КПИ)

Институт энергосбережения и энергоменеджмента, Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», ул. Борщаговская 115, Киев, Украина, 03056, тел.: 0938315500, эл. почта: [spdens@ukr.net](mailto:spdens@ukr.net), [gorenko.darya@yandex.ua](mailto:gorenko.darya@yandex.ua), [sokolovskyi.pavlo@ukr.net](mailto:sokolovskyi.pavlo@ukr.net), [stepovoyas@gmail.com](mailto:stepovoyas@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0002-6299-3680](http://orcid.org/0000-0002-6299-3680), [orcid.org/0000-0002-7879-780](http://orcid.org/0000-0002-7879-780), [orcid.org/0000-0002-0113-4479](http://orcid.org/0000-0002-0113-4479), [orcid.org/0000-0002-7151-0900](http://orcid.org/0000-0002-7151-0900).

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА НОМИНАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ 20 КВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ УКРАИНЫ

Выполнен анализ и оценен потенциал перевода систем распределения электрической энергии с трехступенчатой на двухступенчатую для дальнейшей адаптации их работы в структуре VPP.

© Денисюк С. П., Горенко Д. С. та ін., 2016

Рассмотрены и выделен ряд технико-организационных задач и решений на начальном этапе, по осуществлению таких систем в условиях электроснабжения города Украины.

Описано влияние обменных процессов с разнотипными сигналами. Систематизированы взаимное влияние между элементами электроснабжения железнодорожного транспорта и их возможность функционирования с локальными электроэнергетическими системами.

Приведена структурная схема обменных процессов в системе электрифицированного транспорта, которая включает возможность присоединения и параллельной работы с VPP.

**Ключевые слова:** электрические сети; распределительные сети; Virtual Power Plant; Smart Grid; Microgrid; обменные процессы.

Внутренний рецензент *Сыченко В.Г.*

Внешний рецензент *Лежнюк П.Д.*

UDC 621.31

S.P. DENYSIUK (IEE KPI), D.S. HORENKO (IEE KPI), P.V. SOKOLOVSKYI (IEE KPI), O.V. STEP OVYI (IEE KPI)

Institute of Energy Saving and Energy Management National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 03056, Kyiv, Borschagivska st., 115, tel.: 0938315500, e-mail: [spdens@ukr.net](mailto:spdens@ukr.net), [gorenko.darya@yandex.ua](mailto:gorenko.darya@yandex.ua), [sokolovskyi.pavlo@ukr.net](mailto:sokolovskyi.pavlo@ukr.net), [stepovoyas@gmail.com](mailto:stepovoyas@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0002-6299-3680](https://orcid.org/0000-0002-6299-3680), [orcid.org/0000-0002-7879-780](https://orcid.org/0000-0002-7879-780), [orcid.org/0000-0002-0113-4479](https://orcid.org/0000-0002-0113-4479), [orcid.org/0000-0002-7151-0900](https://orcid.org/0000-0002-7151-0900).

## ELECTRIC ENERGY TRANSMISSION AT NOMINAL VOLTAGE 20 KV IN UKRAINIAN DISTRIBUTION NETWORKS TECHNOLOGY PERSPECTIVE

Analysed and evaluated potential changing system of distribution electrical power from three step to two step for next work adaptation in structure VPP.

Reviewed and separated a number technical & economical tasks and solutions on initial phase about realization this systems in power supply town conditions of Ukraine.

Described effect exchange processes with different types signals. Systematized a interconnection between power supply elements of railway transport and their ability of functioning with local power engineering systems.

Shows a block diagram of metabolic processes in the system of electrified transport, which involves joining and parallel operation of VPP.

**Keywords:** electrical grids; distribution grids; Virtual Power Plant; Smart Grid; Microgrid; exchange processes.

Internal reviewer *Sychenko V.G.*

External reviewer *Lezhniuk P.D.*

М.О. КОСТІН (ДНУЗТ), О.Г. ШЕЙКІНА (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 3731537, ел. пошта: [nkosten@ukr.net](mailto:nkosten@ukr.net), [shog73@mail.ru](mailto:shog73@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-0856-6397](http://orcid.org/0000-0002-0856-6397), [orcid.org/0000-0002-5367-2674](http://orcid.org/0000-0002-5367-2674).

## БАЛАНС ЗА КОНЦЕПЦІЄЮ ФРИЗЕ ФІДЕРНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### Постановка задачі

Необхідність оцінки енергоефективності системи тягового електропостачання (СТЕ) постійного струму вимагає в процесі її експлуатації здійснювати баланс енергії (потужностей, в тому числі і фідерних), на основі якого виробляються закони і алгоритми керування потоком електроенергії від тягової підстанції (ТП) до електрорухомого складу (ЕРС). Існуючі методи складання балансу не відповідають фізичній суті протікаючих в СТЕ процесів, оскільки останні є несинусоїдними, а методи орієнтовані на електроенергетичні системи, в яких діють синусоїдні електричні величини [1-5]. Ці методи тим більше не застосовні до СТЕ, оскільки фідерні напруги і струми являють собою стохастичні, до того ж різкозмінні, процеси (рис.1). Тому баланс фідерних потужностей в реально діючих СТЕ необхідно розглядати на основі нових поглядів (концепцій) реактивної потужності.

Виходячи із історії появи концепцій реактивної потужності [1,3-5], треба було б розглядати, як одну із перших, концепцію Будеану [6], яка базується на частотному представленні напруг і струмів і згідно з якою реактивна потужність визначається як сума реактивних потужностей різних гармонік, отриманих шляхом класичного Фур'є-розкладання напруг і струмів:

$$Q_B = \sum_{k=1}^n U_k \cdot I_k \cdot \sin(\psi_{uk} - \psi_{ik}). \quad (1)$$

Однак такий підхід до визначення реактивної потужності, по-перше, не відображає реально протікаючі електроенергетичні процеси і, по-друге, не забезпечує істинності балансу складових повної потужності  $S$ , так як

$$S^2 \neq P^2 + Q_B^2. \quad (2)$$

Більшість дослідників [1] вважають більш перспективною концепцію Фризе [7], яка, по-перше, направлена на збереження

функціонального характеру викладення енергетичних властивостей електричних кіл при синусоїдних і несинусоїдних процесах і, по-друге, забезпечує складання балансу:

$$S^2 = P^2 + Q_F^2 \quad (3)$$

Для підтвердження функціональної переваги концепції Фризе над поглядами Будеану в таблиці приведені результати визначення реактивної потужності по Фризе і по Будеану для десяти дослідів, виконаних на одній із фідерних ділянок Придніпровської залізниці.

Як впливає із виразу (3), для оцінки балансу складових повної фідерної потужності  $S$  за концепцією Фризе потрібно визначати активну  $P$  і реактивну по Фризе  $Q_F$  потужності.

Таблиця 1

Складові балансу потужностей

№№ дослідів	Реактивна потужність		Активна і повна потужності	
	по Фризе $Q_F, \cdot 10^6$ , вар	по Будеану $Q_B, \cdot 10^6$ , вар	$P, \cdot 10^6$ , Вт	$S, \cdot 10^6$ , ВА
1	2,628	-0,0237	3,723	4,565
2	2,274	-0,0045	3,478	4,166
3	2,487	-0,0028	3,696	4,465
4	2,297,	-0,0170	3,640	4,316
5	2,694	0,0417	3,804	4,670
6	2,161	0,0483	2,956	3,673
7	2,224	-0,063	2,814	3,603
8	1,230	0,0154	1,666	2,096
9	2,162	0,0413	3,124	3,810
10	1,436	-0,0384	1,802	2,330

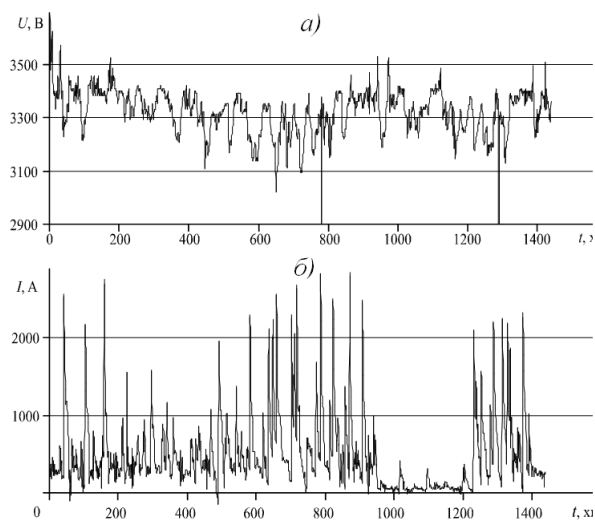


Рис. 1. Реєстрограми напруги (а) і струму (б) фідера ТП постійного струму

### Методика та прилади експериментальних досліджень

На ТП постійного струму відсутні методи і прилади вимірювання складових повної потужності, здійснюється лише реєстрація витрат електроенергії: на вході ТП – електронними лічильниками типу «Альфа» класом точності 0,5, а в колі фідерів – лічильниками індукційної системи. Ці лічильники можливо було б використати для непрямого визначення потужностей. Однак, розроблені відносно недавно електронні лічильники з високою точністю, практично без помилок, працюють тільки в усталених режимах, тільки при синусоїдних напругах і струмах, і тільки в симетричних системах. В інших випадках, тобто в інших системах, якими і є СЕТ постійного струму, існуючі лічильники можуть вимірювати адекватно лише активну потужність, всі інші енергетичні характеристики оцінюються з істотними похибками [8-11]. Особливо ці похибки зростають, якщо напруги й струми є різкозмінними величинами й, більше того, являють собою випадкові процеси, що є характерним для електричних кіл фідерів.

Що ж стосується індукційних лічильників, які розташовані в тягових колах випрямних напруг і струмів, то ситуація з вимірюванням електроенергії ще в більш некоректному і тому невизначеному стані. Це обумовлено тим, що індукційні лічильники являються приладами застарілої конструкції, володіють низьким класом точності 2,0 і тому мають високу помилку. Згідно з дослідженнями [12], математичне очікування помилки  $m_\gamma$  складає

не менше 5%, а її середньоквадратичне відхилення  $\sigma_\gamma = 2,57\%$ . При цьому автори [12] стверджують, що фактичне значення максимальної помилки індукційних лічильників в колах фідерів ТП постійного струму треба визначати як  $\gamma_{\max} = m_\gamma + 2 \cdot \sigma_\gamma$  і тоді вона складе 10,4%. В результаті цього показання цих лічильників є малодостовірними.

У зв'язку з викладеним вище, найбільш правильних шлях оцінки складових повної потужності розрахунковий, точніше, експериментально-розрахунковий, бо він базується на експериментально отриманих у реальних експлуатаційних умовах реєстрограмах зміни в часі фідерних напруг  $U(t)$  і струмів  $I(t)$ . Цей метод позитивно відрізняється ще й тим, що розрахунки виконують на основі сучасних уявлень і формул потужностей в електричних колах зі стохастичними електричними процесами, в той же час як існуючі вимірювальні прилади і системи базуються на поняттях і методиках, які були прийняті ще в 40-ві роки ХХ століття.

В роботі реєстрацію часових залежностей фідерних напруг  $U(t)$  і струмів  $I(t)$ , необхідних для визначення потужностей  $P$ ,  $S$ ,  $Q_F$ , здійснювали на виході реально діючих тягових підстанцій А, В, С електрифікованих ділянок Придніпровської залізниці відповідно до спеціально розроблених програм [13]. Для запису  $U(t)$  застосовували ампервольтметр самописний переносний типу Н339, який вмикали паралельно до вихідних затисків дільника напруги (40/1), увімкненого до шин «+» і «-» тягової підстанції. Прилад Н339 відноситься до приладів магнітоелектричної системи з випрямлячем, має клас точності 1,5 і швидкість запису 100...300 мм/год.

Синхронно з  $U(t)$  реєстрували і криву струму  $I(t)$ , для чого використовували прилад того ж типу Н399, який вмикали паралельно до шунта (3000 А/75 мВ) досліджуваного фідера.

### Метод визначення потужностей

За останнє десятиріччя розроблено чотири розрахункових методи визначення складових повної потужності в колах зі стохастичними процесами. Зокрема, в [14] запропоновано, так званий, метод «дискретної електротехніки» і метод дискретного перетворення Фур'є, а в [15, 16] – метод кореляційних функцій і

відповідно кореляційно-дисперсійний метод. Із порівняння цих методів, яке виконано в роботах [13, 17], випливає, що всі методи дають адекватні результати з різницею, що не перевищує 2%. Однак, за нашою думкою, найпростішим є метод «дискретної електротехніки», розвинутий варіант якого використано в цій роботі; його сутність полягає в наступному.

Кожну реалізацію тривалістю  $T$  (найчастіше добу) заданих випадкових функцій напруги  $U(t)$  й відповідну їй реалізацію струму  $I(t)$  або миттєвої потужності  $p(t)$  дискретизують на певному інтервалі часу  $[0, \tau]$  з інтервалом  $\Delta t$ , обраним відповідно до теореми Котельникова [18] (рис. 2):

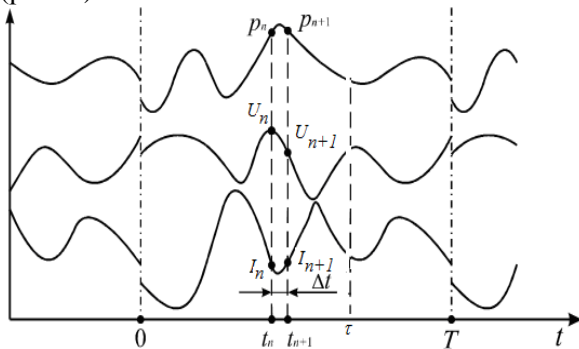


Рис.2. Реалізації часових залежностей миттєвих величин напруги  $U(t)$ , струму  $I(t)$  та потужності  $p(t)$

$$t_1, t_2, \dots, t_n, \dots, t_N$$

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t$$

$$N = \frac{\tau}{\Delta t}$$

де  $N$  – загальна кількість точок часового квантування за термін часу  $[0, \tau]$ .

В результаті маємо дискретні значення напруги  $U(t)$  й струму  $I(t)$ :

$$\begin{aligned} U(t_1) &= U_1, U(t_2) = U_2, \dots, \\ U(t_n) &= U_n, \dots, U(t_N) = U_N, \\ I(t_1) &= I_1, I(t_2) = I_2, \dots, \\ I(t_n) &= I_n, \dots, I(t_N) = I_N. \end{aligned}$$

Тоді миттєва потужність у довільний момент часу  $t_n$  дорівнює:

$$p(t_n) = p_n = U(t_n) \cdot I(t_n) = U_n \cdot I_n, \quad (4)$$

а активну потужність знаходять як середнє арифметичне значення від  $p_n$  за інтервал часу  $[0, \tau]$  [14]:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n \cdot I_n \quad (5)$$

На перший погляд активну потужність  $P$  для розглядуваних режимів можна визначити і як добуток середніх значень за час споживання енергії системою напруги  $U_{\text{ср}}$  та струму  $I_{\text{ср}}$ :

$$P_{\text{ср}} = U_{\text{ср}} I_{\text{ср}} \quad (6)$$

де

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n, \quad (7)$$

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n.$$

Однак значення потужності  $P$  в цьому разі будуть менш точні, бо тоді активна потужність визначається лише потужністю нульової гармоніки (якщо припустити можливість розкладення  $U(t)$  та  $I(t)$  у ряд Фур'є), оскільки  $U_{\text{ср}} = U^0$ ,  $I_{\text{ср}} = I^0$ .

Повну потужність  $S$  визначають за відомою із теорії кіл несинусоїдного струму формулою

$$S = U_{\text{д}} \cdot I_{\text{д}} \quad (8)$$

де діючі значення реалізації випадкових процесів напруги  $U_{\text{д}}$  та струму  $I_{\text{д}}$  знаходять як середні квадратичні значення за термін часу  $[0, \tau]$  від дискретних значень відповідних величин (рис. 2):

$$\begin{aligned} U_{\text{д}} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n^2}, \\ I_{\text{д}} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Реактивну потужність (по Фризе) визначають як:

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (10)$$

Значення потужностей  $P$ ,  $S$ ,  $Q_F$ , що визначаються за виразами (5), (8), (10), в залежності від прийнятого інтервалу часу  $[0, \tau]$  будуть різними і до того ж випадковими. У свою чергу, у подальшому у цій роботі інтервал  $[0, \tau]$  приймався в залежності від тривалості  $[0, T]$  реалізацій випадкових  $U(t)$  і  $I(t)$ , отриманих експериментально в реальних умовах експлуатації. В результаті оцінювали такі значення  $P$ ,  $S$ ,  $Q_F$ : так звані «миттєві», коли одне значення потужності (одну точку на графіку потужності) розраховували як середньоарифметичне за 10 хвилин, тобто, при цьому  $[0, \tau] = 10$  хв;

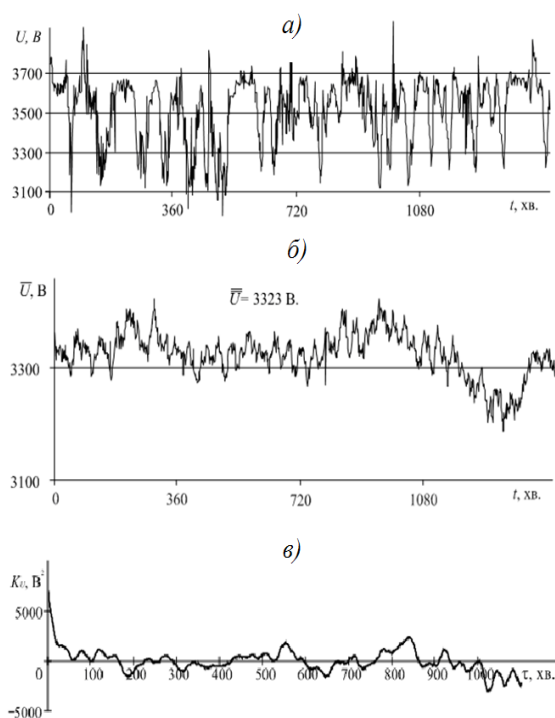


Рис. 3. Реалізація випадкового процесу фідерної напруги ТП «А» (а), її функція математичного очікування (б) та кореляційна функція (в)

Як впливає із рис. 3, а і рис. 4, а, випадкові процеси  $U(t)$  і  $I(t)$  протікають в часі приблизно однорідно і мають вигляд неперервних випадкових коливань навколо деякого середнього значення. При цьому ні характер цих коливань, ні середня їх амплітуда не виявляють суттєвих змін в часі. Зазначене, як відомо [19, 20], є властивим, але недостатнім, для стаціонарних випадкових процесів. Суворо кажучи, існує три умови стаціонарності стохастичного процесу: постійність функції математичного очікування

«погодинні», коли  $[0, \tau] = 1$  год; «добові», коли  $[0, \tau] = 1$  доби.

### Характер зміни фідерних процесів

Викладений вище метод «дискретної електротехніки» застосовний у випадку якщо досліджувані випадкові процеси являються стаціонарними ергодичними. Тому далі проаналізуємо, чи відповідають цим умовам фідерні напруга  $U(t)$  і струм  $I(t)$ .

На рис. 3 і 4 приведені реалізації фідерної напруги  $U(t)$  і струму  $I(t)$  тягової підстанції А (а), функція математичного очікування напруги (рис. 3, б) та кореляційні функції напруги (рис. 3, в) і струму (рис. 4, б, в).

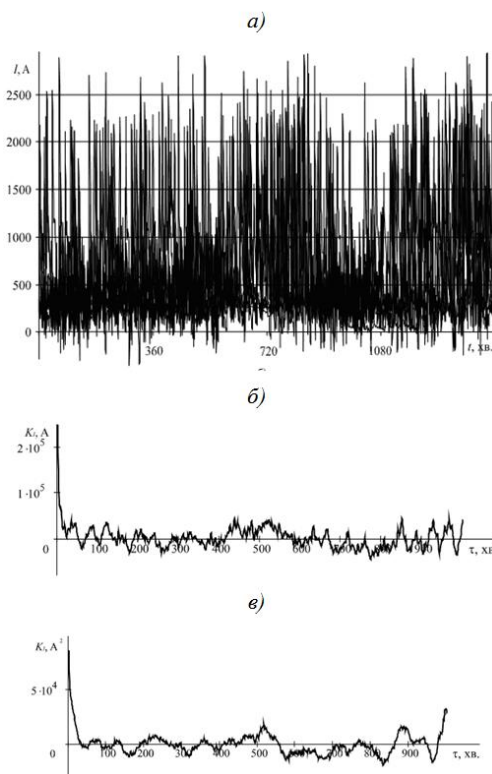


Рис. 4. Десять реалізацій випадкового процесу фідерного струму ТП «А» (а) та кореляційні функції фідерних струмів тягових підстанцій «А» (б) і «С» (в)

( $m_X = \text{const}$ ) і дисперсії ( $D_X = \text{const}$ ), а також щоб кореляційна функція процесу  $X(t)$  була функцією одного аргумента. Однак, умова стаціонарності будь-якого процесу, а отже і  $U(t)$ , і  $I(t)$ , що  $m_U(t) = \text{const}$  і  $m_I(t) = \text{const}$  не є суттєвою [19], оскільки від випадкових функцій  $U(t)$  і  $I(t)$  можна перейти до центрованих випадкових функцій  $\tilde{U}(t) = U(t) - m_U(t)$ ,  $\tilde{I}(t) = I(t) - m_I(t)$ , для яких математичні

очікування дорівнюють нулю й тим самим ця умова виконується.

Друга умова відносно стаціонарності дисперсій ( $D_U(t) = \text{const}$ ,  $D_I(t) = \text{const}$ ) є частковим випадком третьої умови, згідно з якою кореляційні функції напруги і струму повинні бути функціями одного аргумента, тобто

$$K_U(t, t') = K_U(t, t + \tau) = K_U(\tau)$$

$$K_I(t, t') = K_I(t, t + \tau) = K_I(\tau)$$

Як показує аналіз кореляційних функцій  $K_U(\tau)$  і  $K_I(\tau)$ , представлених на рис. 3 і 4, ця умова виконується у повній мірі і тоді виконується друга умова відносно стаціонарності дисперсій напруги і струму. Отже, випадкові процеси фідерних напруги і струму можна вважати стаціонарними процесами.

Окрім зазначеного, згідно з рис. 3 і 4, кореляційні функції  $K_U(\tau)$ ,  $K_I(\tau)$  загасають до нуля, а потім починають здійснювати

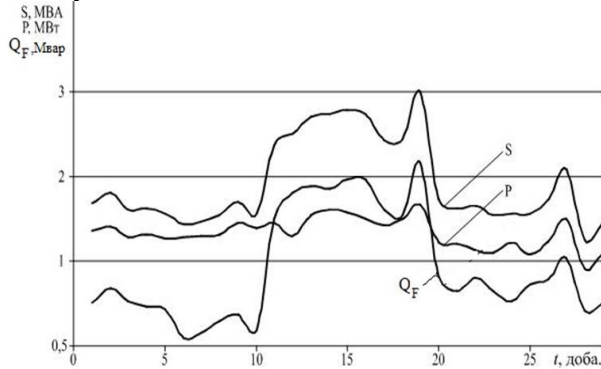


Рис. 5. «Добові» значення фідерних повної  $S$ , активної  $P$  та реактивної (по Фризе)  $Q_F$  потужностей ТП «А»

Закономірним і систематичним в цих графіках є те, що часова залежність повної фідерної потужності  $S(t)$  знаходиться вище залежностей її складових  $P(t)$  і  $Q_F(t)$ . Що ж стосується графіків останніх потужностей, то подібна закономірність (що  $S$  більше  $P$  і  $Q_F$ ) відсутня: лінії кривих  $P(t)$  і  $Q_F(t)$  час від часу перетинаються. Останнє свідчить про те, що часто в певний інтервал часу роботи того чи іншого фідера ТП має місце нерівність  $P(t) < Q_F(t)$ , тобто, перетоки реактивної потужності перевищують потужність споживання.

Це впливає також із діаграм балансу складових фідерних потужностей

невеликі нерегулярні коливання навколо вісі абсцис (а не якоїсь постійної величини), що є основною ознакою ергодичності випадкових процесів [19, 20].

Отже, стохастичні процеси фідерних напруг і струмів являються стаціонарними ергодичними процесами, що дозволяє у подальших імовірнісно-статистичних аналізах користуватись не ансамблем реалізацій, а однією реалізацією достатньої тривалості.

### Результати та аналіз чисельних розрахунків

Різкозмінний характер «поведінки» стохастичних процесів фідерних напруг і струмів (рис. 1, 3 і 4), істотно, обумовлює також випадковий характер зміни часових залежностей потужності  $S(t)$  та її складових  $P(t)$ ,  $Q_F(t)$ , по одній реалізації яких представлено на рис. 5 і 6.

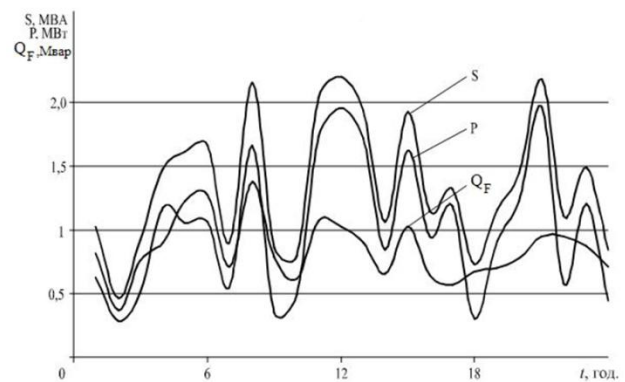


Рис. 6. «Погодинні» значення фідерних потужностей ТП «С»

(рис. 7): для фідерів тягової підстанції А величина квадрату реактивної потужності по Фризе  $Q_F^2$  складає 61,11%, а активної потужності – 38,89%, хоча в значно більшості випадків  $P(t) > Q(t)$ . Імовірно, такий стан в балансі потужностей обумовлений технологічним характером навантаження фідерної ділянки: кількістю, масою та швидкістю руху поїздів.

Статистичні закони розподілення повної потужності і її складових не відповідають закону Гуасса, вони мають значний (до 1,5) додатний коефіцієнт асиметрії, а також значний (до 1,7) додатний ексцес (рис. 8), що свідчить про чітке скошення розподілення

вліво, в бік більшої імовірності попадання потужностей на ділянки їх менших значень.

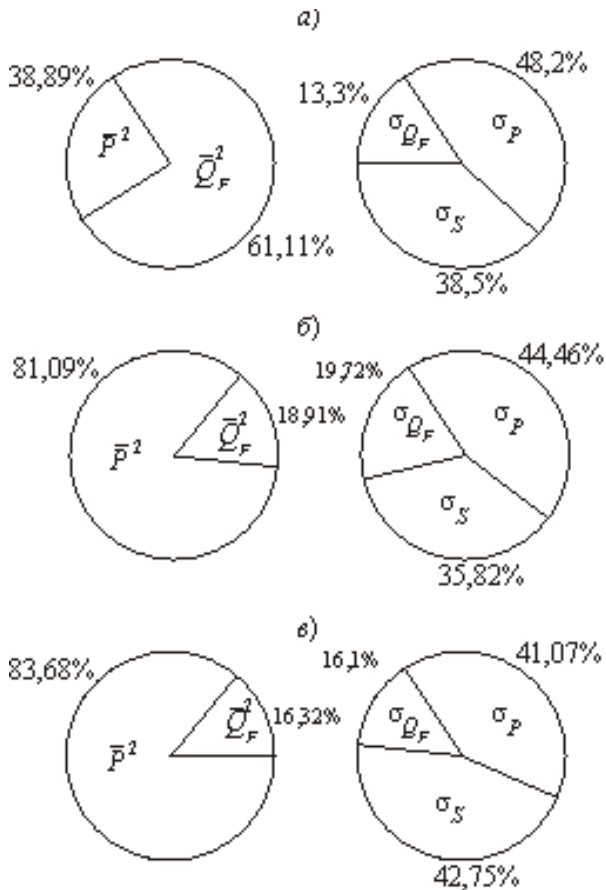


Рис. 7. Діаграми балансу «добових» (а) і «миттєвих» (б, в) значень складових фідерної потужності (квадратів математичних очікувань і середньоквадратичних відхилень) на ТП А» (а, б) і на ТП В» (в)

## Висновки

1. Стохастичний характер часової зміни фідерних напруг і струмів обумовлює необхідність складання балансу потужностей на основі нових концепцій, однією з яких є перспективна концепція реактивної потужності по Фризе.
2. Індукційні лічильники електроенергії, що увімкнені в електричні кола фідерів, володіють значною помилкою, тому найбільш правильний шлях оцінки складових повної потужності – експериментально-розрахунковий, що базується на отриманих в реальних умовах експлуатації часових залежностях фідерних напруг і струмів.
3. Запропонований метод «дискретної електротехніки» являється найпростішим і в той же час достатньо точним способом

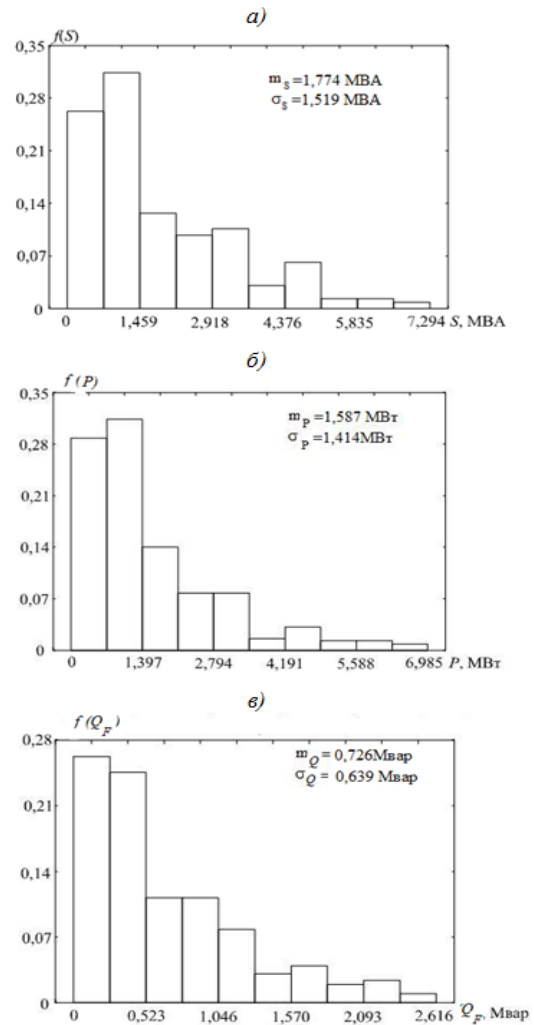


Рис. 8. Статистичні розподілення «миттєвих» значень фідерних повної  $S$  (а), активної  $P$  (б) та реактивної  $Q_F$  (в) потужностей тягової підстанції «В»

визначення повної, активної і реактивної потужностей.

4. Випадкові процеси фідерних напруг і струмів можна вважати в першому наближенні стаціонарними ергодичними процесами.

5. Складові балансу фідерних потужностей являються різкозмінними часовими залежностями, в яких середньодобові значення реактивної потужності по Фризе на протязі деяких діб перевищують активну потужність.

6. Статистичні розподілення усіх складових балансу потужностей не підкоряються закону Гаусса, однак середньоквадратичні відхилення активної потужності в 2...2,5 рази перевищують цей показник для реактивної потужності по Фризе.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

## REFERENCES

1. Баланс энергий в электрических цепях/ В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк, В. Я. Жуйков, В. Т. Стрелков, Ю. А. Яценко. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.
2. Костін, М. О. Неоднозначність визначення поняття «реактивної потужності» в колах несинусоїдних електричних величин/ М. О. Костін, О. Г. Шейкіна // Гірничя електромеханіка та автоматика, 2002, вип. 69, С. 3-8.
3. Akagi H. et al.: Instantaneous power theory and applications to power conditioning, Wiley-IEEE Press, 2007, 379 p, ISBN: 978-0-470-10761-4.
4. Czarnecki L.: On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory. IEEE Trans. Power Electron, 2004, Vol. 19, Iss. 3, pp. 828–836.
5. Herrera R. et al.: Present point of view about the instantaneous reactive power theory. IET Power Electron., 2009, Vol. 2, Iss. 5, pp. 484-495.
6. Budeany C. Problem de la presence der puissance's reactive dans les installation de production et distribution d'energie // Rap. Et discuss. Ssr la puissance reactive, 1929. – Pt. 3- P. 117-218.
7. Fryses S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nigchtsinsformigen Verlaf von Strom und Spannung / S. Fryse // Elektrotechn. Z. – 1932 – № 25 – S. 596-599; № 26 – S. 625-627; № 29 – S. 700-702.
8. Киселев, В. В. Влияние несинусоидальности напряжения и тока на показания электронных счетчиков электроенергии / В. В. Киселев, И. С. Пономаренко // Пром. Энергетика. – 2004. – № 2. – С. 40-45.
9. Гуртовцев, А. Л. О суммарных предельных и реальных погрешностях электронных электросчетчиков / А. Л. Гуртовцев // Электрика. – 2007. – № 7. – С.16-23.
10. Денисюк, С. П. Оцінка точності вимірювання складових електроенергії в системах з перетворювачами електроенергії / С. П. Денисюк, В. О. Кравцов // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «ПСЕ-2008». – 2008. – Ч. 1. – С. 61-66.
11. Босий Д. О. Облік електроенергії сучасними електронними лічильниками в умовах гармонійних спотворень / Д. О. Босий, О. М. Синьогіна // Електрифікація транспорту, №7. – 2014. – С. 98-105.
12. Скрыбинский, В. С. Особенности учета энергии на тяговых железнодорожных подстанциях / В. С. Скрыбинский, Д. В. Сотников, Ю. Б. Манусов. – К. : ИЭД, 1978. – 28 с. – (Препринт – 170 ИЭД,АН УССР)
13. Петров, А. В. Непродуктивные втраты электроенергии в системе электропостачання електричної тяги постійного струму: дис....канд. техн. наук: 05.22.09/ Петров Андрій Володимирович; Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2011. – 226 с. – Бібліогр.: С. 195-210.
14. Костін, М. О. Методи визначення потужностей в системах зі стохастичними

1. Tonkal V. E., Novoseltsev A. V., Denisiuk S. P., Zhuikov V. Ia., Strelkov V. T., Iatsenko Iu. A. *Balans energii v elektricheskikh tsepiakh* [The balance of energy in electrical circuits]. Kyiv, Nauk. dumka, 1992. 312 p.
2. Kostin M. O., Sheikina O. G. Neodnoznachnist vyznachennia poniattia «reaktyvnoi potuzhnosti» v kolakh nesynusoidnykh elektrychnykh velychyn [The ambiguity of the definition of "reactive power" in the chain of non-sinusoidal electrical quantities ]. *Girnycha elektromekhanika ta avtomatyka* [Mining Electrical and Automation], 2002, issue 69, pp. 3-8.
3. Akagi H. et al.: Instantaneous power theory and applications to power conditioning, Wiley-IEEE Press, 2007, 379 p, ISBN: 978-0-470-10761-4.
4. Czarnecki L.: On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory. IEEE Trans. Power Electron, 2004, vol. 19, iss. 3, pp. 828–836.
5. Herrera R. et al.: Present point of view about the instantaneous reactive power theory. IET Power Electron., 2009, vol. 2, iss. 5, pp. 484-495.
6. Budeany C. Problem de la presence der puissance's reactive dans les installation de production et distribution d'energie // Rap. Et discuss. Ssr la puissance reactive, 1929. Pt. 3, pp. 117-218.
7. Fryses S. Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nigchtsinsformigen Verlaf von Strom und Spannung / S. Fryse // Elektrotechn. Z. – 1932 – № 25 – S. 596-599; № 26 – S. 625-627; № 29 – S. 700-702.
8. Kiselev V. V., Ponomarenko I. S. Vliianie nesinusoidalnosti napriazheniia i toka na pokazaniia elektronnykh schetchikov elektroenergii [Influence of non-sinusoidal voltage and current readings of electronic meters of electric energy ]. *Prom. Energetika* [Prom. Energetics.], 2004, no. 2, pp. 40-45.
9. Gurtovtsev A. L. O summarnykh predelnykh i realnykh pogreshnostiakh elektronnykh elektroschetchikov [On the aggregate limit and the actual errors of electronic meters]. *Elektrika* [Electrics], 2007, no. 7, pp. 16-23.
10. Denisiuk S. P., Kravtsov V. O. Otsinka tochnosti vimiriuvannia skladovykh elektroenergii v sistemakh z peretvoriuvachami elektroenergii [Evaluation of the accuracy of measurement of electric energy components in the inverter power systems ]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodynamics], 2008, Ch. 1, pp. 61-66.
11. Bosii D. O., Sinogina O. M. Oblik elektroenergii suchasnymy elektronnyy lychilnykamy v umovakh harmoniinykh spotvoren [Metering modern electronic counters in terms of harmonic distortion]. *Elektryfikatsiia transportu* [Electrification of transport], 2014, no. 7, pp. 98-105.
12. Skriabinskii V. S., Sotnikov D. V., Manusov Iu. B. Osobennosti ucheta energii na tiagovykh zheleznodorozhnykh podstantsiakh [Features energy metering rail traction substations] . K. : IED, 1978, 28 p. – (Preprint – 170 IED,AN USSR).
13. Petrov A. V. *Neproduktivni vtraty elektroenergii v systemi elektropostachannia elektrychnoi tiagi postiinogo strumu* Kand, Diss. [Unproductive losses of

електроенергетичними процесами / М. О. Костін // Технічна електродинаміка. Тем. вип. ПСЕ-2006. Част. 6. Київ, 2006 – С. 3-8.

15. Костин, Н. А. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги / Н. А. Костин, А. В. Петров // Технічна електродинаміка. Вип. 2, 2010. – С. 14-17.

16. Нікітенко, А. В. Кореляційно-дисперсійний метод визначення складових повної потужності в пристроях електричного транспорту / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. Наука та прогрес транспорту. – Дніпропетровськ, 2014. Вип. 3 (51). – С. 51-64.

17. Костин, Н. А. Реактивная мощность в системах электрического транспорта постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Вісник приазовського державного технічного університету. – 2005. – Вип. 15. – С. 75-80.

18. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М.: Сов. радио, 1977. – 608 с.

19. Вентцель Е. С. Теория вероятностей [для студ. вузов] / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1965. – 576 с.

20. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций / А. А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 463 с.

Надійшла до друку 15.11.2016.

electricity in sistete power electric traction DC. Kand, Diss]. Dnipropetrovsk, 2011.

14. Kostin M. O. Metody vyznachennia potuzhnosti v sistemakh zi stokhastychnymi elektroenergetychnymy protsesamy [Methods for determining the capacity in electric power systems with stochastic processes]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodynamicity]. Tem. vip. PSE-2006. Chast. 6. Kyiv, 2006, pp. 3-8.

15. Kostin N. A. Metody opredeleniia sostavliaiushchikh polnoi moshchnosti v sistemakh elektricheskoi tiagi [Methods of determining the components of the total power in the electric traction systems]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodynamicity], 2010, issue 2, pp. 14-17.

16. Nikitenko A. V., Kostin M. O. Koreliatsiino-dispersiini metod vyznachennia skladovykh povnoi potuzhnosti v prystroiakh elektrychnoho transportu [The correlation AV-variance method of determining the components of the total power in the electric transportation devices]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana. Nauka ta progres transportu* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Science and Progress transport], 2014, issue 3 (51), pp. 51-64.

17. Kostin N. A., Sablin O. I. Reaktivnaia moshchnost' v sistemakh elektricheskogo transporta postoiannogo toka [Reactive power systems in electric vehicles DC]. *Visnyk priazovskoho derzhavnoho tehnicnoho universytetu* [Bulletin of Azov State Technical University], 2005, issue 15, pp. 75-80.

18. Gonorovskii I. S. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly [Radio Circuits and Signals]. Moskva, Sov. radio, 1977. 608 p.

19. Venttsel' E. S. Teoriia veroiatnostei [Probability theory]. Moskva, Nauka, 1965. 576 p.

20. Sveshnikov A. A. Prikladnye metody teorii sluchainykh funktsii [Applied methods of the theory of random functions]. Moskva, Nauka, 1968. 463 p.

Внутрішній рецензент Муха А.М.

Зовнішній рецензент Шкрабець Ф. П.

Запропоновано і теоретично обґрунтовано метод складання та виконано чисельні розрахунки складових балансу фідерних потужностей на основі нової концепції, концепції реактивної потужності по Фризе. Використано методики і прилади часової реєстрації фідерних напруг і струмів на діючих тягових підстанціях, методи «дискретної електротехніки», теорії випадкових процесів та способи імовірнісно-статистичної обробки осцилограм і реєстрограм. Виконано чисельну оцінку складових балансу фідерних потужностей. Показано, що середньодобові значення реактивної потужності по Фризе на протязі ряду діб роботи фідера перевищують активну потужність, а дисперсія останньої у 2...2,5 рази перевищує цей показник для реактивної потужності. Доведено, що у першому наближенні стохастичні процеси фідерних напруг і струмів являються стаціонарними ергодичними процесами. Запропоновано нову концепцію електроенергетичного балансу фідерних електричних кіл тягових підстанцій постійного струму на основі реактивної потужності по Фризе. Знайшов подальший розвиток метод «дискретної електротехніки» визначення складових балансу потужностей фідерних кіл зі стохастичними напругами і струмами. Встановлено закономірності часової зміни повної, активної та реактивної потужностей. Отримані аналітичні співвідношення складових повної потужності дають можливість виконувати електроенергетичний аналіз-баланс як фідерів, так і всієї тягової підстанції з урахуванням випадкових технологічних змін фідерних і підстанційних напруг і струмів. Чисельно-графічні залежності складових фідерних потужностей рекомендуються для прогнозування і оцінки електроенергетичної ефективності роботи тягових підстанцій з наступною розробкою алгоритмів керування потоком електроенергії від тягової підстанції до електроорухомого складу.

**Ключові слова:** потужність; фідер; випадковий процес; струм; баланс; Фризе; напруга; тягова підстанція; дискретна електротехніка.

УДК 621.331:621.311

Н.А. КОСТИН (ДНУЖТ), О.Г. ШЕЙКИНА (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 3731537, эл. почта: [nkostin@ukr.net](mailto:nkostin@ukr.net), [shog73@mail.ru](mailto:shog73@mail.ru), ORCID: [orcid.org/000-0002-0856-6397](http://orcid.org/000-0002-0856-6397), [orcid.org/0000-0002-5367-2674](http://orcid.org/0000-0002-5367-2674)

## БАЛАНС ПО КОНЦЕПЦИИ ФРИЗЕ ФИДЕРНЫХ МОЩНОСТЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Предложен и теоретически обоснован метод составления и выполнены численные расчеты составляющих баланса фидерных мощностей на основе новой концепции, концепции реактивной мощности по Фризе. Использованы методики и приборы временной регистрации фидерных напряжений и токов на действующих тяговых подстанциях, методы «дискретной электротехники», теории случайных процессов и способы вероятностно-статистической обработки осциллограмм и регистрограмм. Выполнена численная оценка составляющих баланса фидерных мощностей. Показано, что среднеквадратические значения реактивной мощности по Фризе на протяжении ряда суток работы фидера превышают активную мощность, а дисперсия последней в 2...2,5 раза превышает этот показатель для реактивной мощности. Доказано, что в первом приближении стохастические процессы фидерных напряжений и токов являются эргодическими процессами. Предложена новая концепция электроэнергетического баланса фидерных электрических цепей тяговых подстанций постоянного тока на основе реактивной мощности по Фризе. Нашел дальнейшее развитие метод «дискретной электротехники» определения составляющих баланса мощностей фидерных цепей со стохастическими напряжениями и токами. Установлены закономерности временного изменения полной, активной и реактивной мощностей. Полученные аналитические соотношения составляющих полной мощности дают возможность выполнить электроэнергетический анализ-баланс как фидеров, так и всей тяговой подстанции с учетом случайных технологических изменений фидерных и подстанционных напряжений и токов. Численно-графические зависимости составляющих фидерных мощностей рекомендуются для прогнозирования и оценки электроэнергетической эффективности работы тяговых подстанций с последующей разработкой алгоритмов управления потоком электроэнергии от тяговых подстанций к электроподвижному составу.

**Ключевые слова:** фидер; случайный процесс; ток; баланс; Фризе; напряжение; тяговая подстанция; дискретная электротехника.

Внутренний рецензент *Муха А.М.*

Внешний рецензент *Шкрабец Ф. П.*

UDC 621.331:621.311

M.O. KOSTIN (DNURT), O.G. SHEYKINA (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, st. Lazaryan, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 3731537, e-mail: [nkostin@ukr.net](mailto:nkostin@ukr.net), [shog73@mail.ru](mailto:shog73@mail.ru), ORCID: [orcid.org/000-0002-0856-6397](http://orcid.org/000-0002-0856-6397), [orcid.org/0000-0002-5367-2674](http://orcid.org/0000-0002-5367-2674)

## BALANCE OF FEEDER POWERS OF DC TRACTION SUBSTATIONS BASED ON FRYZE'S CONCEPTION

The main aim of the paper is theoretical definition of the method and numerical calculation of the components of power balance in the feeders using the new conception based on Fryze's power theory. The methodology uses the approaches of the "discrete electrical engineering", theory of random processes and the time records of voltage and current in feeder lines of the DC traction substation. In addition, the probabilistic-spectral method is applied for the recorded data processing. The estimation of components of balance of feeder powers is performed using proposed method. It is show, that the average daily values of Fryze's reactive power exceeds the values of active power over a whole number of days. Therefore, the variance of reactive power exceeds its rate for the active power in 2...2,5 times. It was proved, that the stochastic voltages and currents are the stationary ergodic processes in the first approximation. The novelty consists in the new conception of electric power balance for feeder electric circuits of the DC traction substations using Fryze's conception. The method of "discrete electrical engineering" for estimation the components of power balance of feeder circuits with stochastic voltages and currents is investigated. The laws of time variations are determined for the total, active and reactive powers. The obtained analytical expressions of the total power components allow to perform the analysis of electric power balance for feeder lines and, in addition, for all traction substation taking into account the random technological changes of voltages and currents in the feeder lines and substation. It is recommended to predict and estimate the effectiveness of the traction substation operation using the numerical and graphical dependences of the components of feeder powers with the next developing of control algorithms for the energy flow from traction substation to electric rolling stock.

**Keywords:** power; feeder line; stochastic process; current; balance; Fryze; voltage; traction substation; discrete electrical engineering.

Internal reviewer *Mukha A.M.*

External reviewer *Shkrabets F.P.*

© Костін М. О., Шейкіна О. Г., 2016

## ІДЕНТИФІКАЦІЙНА МОДЕЛЬ ШВИДКІСНОГО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ЗМІННОГО СТРУМУ

### ВСТУП

Ця робота є продовженням і розвитком досліджень [1,2] по обґрунтуванню ідентифікаційних моделей пристроїв і підсистем систем електричної тяги швидкісного руху поїздів.

Однією із складних задач дослідження шляхом математичного моделювання електромагнітних процесів в системах електричного транспорту, що обслуговують швидкісний рух поїздів, є побудова схем заміщення електрорухомого складу (ЕРС). Це обумовлено складною схемотехнікою навіть одиниці ЕРС [3,4], не говорячи навіть про те, що ця проблема істотно ускладнюється у випадку швидкісного руху, коли на фідерній зоні рухається пакет з 5...7 поїздів. В цьому випадку неможливо побудувати точну класичну модель такої нелінійної динамічної підсистеми як ЕРС на основі законів теоретичної електротехніки. За нашою думкою, розв'язати цю задачу можливо, й тим самим доцільно, методами ідентифікації систем. Така задача вирішена в [1] для ЕРС постійного струму шляхом розв'язання інтегрального рівняння Вінера-Хопфа чи Фредгольма першого роду з ядром типу згортки. В цій роботі знаходиться модель для швидкісного ЕРС.

### Схемотехніка та напруги і струми швидкісного ЕРС

Згідно [5], для забезпечення руху поїздів на залізницях України зі швидкістю до 160 км/год створено і розпочато виробництво електровозів змінного струму типу ДСЗ. Для забезпечення перевезень зі швидкістю до 200км/год передбачається, по-перше, створення двосистемного (3кВ постійної та 25кВ, 50Гц змінної напруг) електровозу типу ЕД4 і, по-друге, глибока модернізація електровозу ДСЗ у електровоз ДСЗМ. Подальше збільшення швидкостей перевезень пасажирів у міжобласному сполученні до 200...220км/год передбачається за рахунок використання двосистемних електропоїздів типу ЕП1 100.

При цьому всі спеціалісти вважають, що для виконання вищезазначеного потрібно щоб тяговий привод перспективних електровозів і електропоїздів для швидкісного і високошвидкісного руху будувався на базі безколекторних тягових двигунів (ТЕД) і найчастіше – на основі асинхронних короткозамкнених ТЕД. При цьому ці ТЕД повинні живитись через певні тягові перетворювачі, зокрема через вхідний випрямляч 4q-s, який суттєво покращує якість вхідної до ЕРС електроенергії, обумовлюючи майже синусоїдний характер вхідних напруги і струму.

### Передатна та імпульсна перехідна функції як моделі ЕРС

Багатьма дослідженнями, зокрема в [6,7], встановлено, що в якості характеристик, тобто ідентифікаційних моделей, лінійних (чи лінеаризованих) динамічних систем можуть виступати передатна функція (ПФ) чи імпульсна перехідна функція (ІПФ). Після заміни в класичному визначенні передатної функції [8] оператора  $j\omega$  на оператор  $p$  передатна функція лінійної (чи лінеаризованої) динамічної системи може бути визначена як відношення прямого перетворення Лапласа  $Y(\vec{p})$  вихідної (з системи) функції (процесу)  $y(t)$  до такого ж перетворення Лапласа  $X(\vec{p})$  вхідної до системи функції (процесу)  $x(t)$  (при нульових початкових умовах). Оскільки в нашій задачі системою є швидкісний ЕРС, вхідним процесом є напруга на струмоприймачі  $u(t)$ , а вихідним процесом – струм  $i(t)$  ЕРС, тоді передатна функція ЕРС являє собою вираз:

$$G(\vec{p}) = \frac{I(\vec{p})}{U(\vec{p})}, \quad (1)$$

де

$$I(\vec{p}) = \int_0^{\infty} i(t) \exp^{-pt} dt; \quad (2)$$

$$U(\bar{p}) = \int_0^{\infty} u(t) \exp^{-pt} dt. \quad (3)$$

Як відомо [8], імпульсна перехідна функція  $g(t)$  являє собою реакцію лінійної (чи лінеаризованої) системи на прикладену в момент часу  $t=0$  дію, яка представляє собою одиничну імпульсну  $\delta$ -функцію. Оскільки ПФ та ІПФ являються перетворенням Лапласу одна до іншої, тоді імпульсна перехідна функція  $g(t)$  може бути знайдена за відомою  $G(\bar{p})$  згідно теорії лишок як [9]:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi j} \oint G(p) \exp^{-pt} dt, \text{ при } t \geq 0 \quad (4)$$

де інтегрування здійснюється по замкнутому контуру, що складається із уявної вісі та напівкола нескінченно великого радіуса, розташованого в лівій напівплощині комплексної площини.

Згідно теорії лишок, значення інтегралу (4) дорівнює сумі лишок підінтегрального виразу у всіх полюсах, що знаходяться усередині контуру, помножених на  $2\pi j$ .

Для визначення лишок припустимо, що всі полюси прості, тоді дріб (1) можна розкласти на прості за методом невизначених коефіцієнтів так [8]:

$$\begin{aligned} \frac{I(\bar{p})}{U(\bar{p})} &= \frac{A_1}{p - p_1} + \frac{A_2}{p - p_2} + \dots \\ &+ \frac{A_k}{p - p_k} + \dots + \frac{A_n}{p - p_n} = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{p - p_k} \end{aligned} \quad (5)$$

де  $p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_n$  – прості корені (полюси) рівняння  $U(\bar{p})$  виразу (1).

Для визначення коефіцієнтів  $A_k$  помножимо обидві частини рівняння (5) на  $p - p_k$  і візьмемо межу ( $\lim$ ) при  $p \rightarrow p_k$ , тоді отримаємо, що

$$A_k = \frac{I(p_k)}{U'_p(p_k)} \quad (6)$$

Таким чином, згідно з (5) та (6), маємо

$$G(\bar{p}) = \frac{I(\bar{p})}{U(\bar{p})} = \sum_{k=1}^n \frac{I(p_k)}{U'_p(p_k)} \cdot \frac{1}{p - p_k} \quad (7)$$

Підставивши (7) в (4), отримаємо шукану функцію  $g(t)$

$$\begin{aligned} g(t) &= \sum_{k=1}^n \frac{I(p_k)}{U'_p(p_k)} \cdot \frac{1}{2\pi j} \oint \frac{\exp^{pt}}{p - p_k} dp = \\ &= \sum_{k=1}^n \frac{I(p_k)}{U'_p(p_k)} \cdot \exp^{p_k t}, \quad t \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

### Ідентифікаційна модель швидкісного електровоза ДСЗМ

Як зазначено вище, електровоз ДСЗМ розроблено на основі модернізації існуючого електровоза ДСЗ, тому у подальшому в цій роботі будуть використовуватись деякі параметри і характеристики цього локомотива.

В електровозі ДСЗМ, як і в ДСЗ, в якості вхідного перетворювача використовується чотирьохквандрантний випрямляч  $4q-s$ , важливою особливістю якого є можливість забезпечення на струмоприймачі коефіцієнта потужності  $\lambda$ , близького до одиниці [10]. Це підтверджується даними  $\lambda$ , отриманими при тягово-енергетичних випробуваннях електровоза при навантаженні від 25 до 100% потужності тривалого режиму і швидкостях до 160 і далі до 200 км/год:  $\lambda = 0,93 \dots 0,98$ .

Тим самим перетворювач  $4q-s$  обумовлює близькі до синусоїдних вхідні змінні напругу (на струмоприймачі)  $u(t)$  і струму  $i(t)$  електровоза. Про це свідчать результати часового моніторингу цих  $u(t)$  та  $i(t)$  в реальних умовах експлуатації електровоза ДСЗ при різних значеннях струму навантаження  $I$ , рівного 10; 20; 50 та 100А [11, 12]. Результати осцилографування  $u(t)$  та  $i(t)$  показують (рис 1), що, внаслідок того, що тягові підстанції, які живлять фідерні зони із зазначеними електровозами, є достатньо потужними джерелами електроенергії, тому синусоїдна форма вхідної напруги не спотворюється. Причому це спостерігається при різному навантаженні: в межах діючого значення струму від 10 до 100А.

Інша річ, що відбувається з формою тягового електровозного струму: вона помітно спотворюється внаслідок того, що силові кола електровозів містять потужні нелінійні реактивні елементи. Тому у подальшому проаналізуємо гармонійний склад та інші величини лише тягового струму. Це не зовсім відповідає нормам діючого в Україні ГОСТ13109-97, в якому нормуються показники якості електроенергії, виходячи із форми і значень лише напруги, а струму цей стандарт не торкається. Однак міжнародні стандарти якості електроенергії (наприклад, IEEE 519-1992) обмежують не лише

гармонійний склад напруги живлення, але й струму, що споживається. При цьому, згідно з зазначеним стандартом IEEE 519-1992, основним фактором оцінки струму є інтегральний показник гармонійного складу струму  $I_{THD}(\%)$  [13]. Який впливає з таблиці, основний внесок в спотворення кривої струму електровозу роблять непарні гармоніки, особливо 3-тя, амплітуди яких різні для різного електротягового навантаження. Зокрема, струм електровоза містить в основному гармоніки 1, 3, 5, 7 і 9, значення коефіцієнта  $n$ -ї гармоніки  $K_{i(k)}$  яких, визначено згідно з ГОСТ 13109-97 (табл.1).

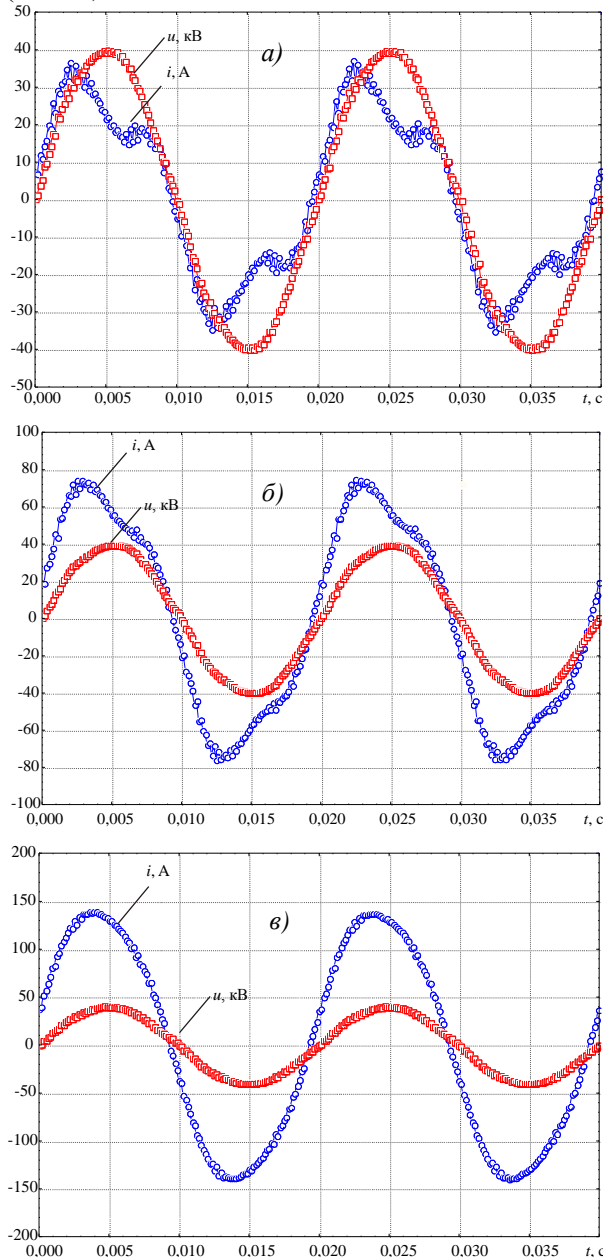


Рис. 1. Осцилограми напруги та струму електровоза ДСЗ при діючому значенні струму навантаження (А): а) 20; б) 50; в) 100

Значення струму $I$ , А	Коефіцієнт $K_{i(k)}$ гармонік, %				$I_{THD}, \%$
	3	5	7	9	
10,44	57,07	9,0	5,79	2,86	58,9
21,79	26,55	2,79	2,69	1,28	27,2
50,7	14,28	2,02	1,17	0,79	14,2
100,2	4,72	0,31	0,48	0,4	5,0

До цього треба додати, що дещо спотворений при малих навантаженнях (тобто, несинусоїдний) тяговий струм може бути заміщений еквівалентним синусоїдним за методом еквівалентних синусоїд [8]. Отже, можна вважати, що вхідні (до електровозу) напруга  $u(t)$  та струм  $i(t)$  являються синусоїдними функціями з випадковими амплітудами.

Враховуючи зазначене вище, отримаємо вираз імпульсної перехідної функції, як ідентифікаційної моделі електровоза ДСЗМ, для таких, згідно рис.1, значень:  $I = 100$  А,  $U = 28368$  В,  $f = 50$  Гц,  $\psi_u = 15,3^\circ$ ,  $\psi_i = 0^\circ$ . Тобто, згідно теоретичних положень ідентифікації систем, вважаємо, що вхідним процесом для електровоза є напруга

$$u(t) = 28368 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t + 15,3) =$$

$= 4 \cdot 10^4 \cdot \sin(314t + 15,3)$  В, а вихідним – струм  $i(t) = 100 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin 314t = 141 \cdot \sin 314t$  А. Зображення за Лапасом цих функцій мають вигляди [8]:

$$L[u(t)] = U \bar{p} = \frac{U_m(p \sin \phi_u + \omega \cos \phi_u)}{p^2 + \omega^2} = \frac{4 \cdot 10^4 (p \sin 15,3 + 314 \cos 15,3)}{p^2 + 314^2} \quad (9)$$

$$L[i(t)] = I(\bar{p}) = \frac{I_m(p \sin 0 + \omega \cos 0)}{p^2 + \omega^2} = \frac{141 \cdot 314}{p^2 + 314^2} \quad (10)$$

Тоді маємо передатну функцію електровоза:

$$G(\bar{p}) = \frac{I(\bar{p})}{U(\bar{p})} = \frac{44274}{10554,9p + 12,1 \cdot 10,6} \quad (11)$$

Вираз шуканої імпульсної перехідної функції  $g(t)$  визначаємо за формулою розкладання (8) і вона має вигляд:

$$g(t) = 4,19e^{-1148 \cdot t} \text{ См} \quad (12)$$

Цей вираз, як модель електровоза, дозволяє визначати струм електровоза в його усталеному чи перехідному режимі роботи при будь-якому імовірнісному значенні напруги на струмоприймачі. Наприклад, визначимо математичне очікування струму  $M_I$  в установленому режимі при номінальній напрузі  $U_{ном} = M_U = 25000\text{В}$ . Здійснимо це за формулою [14]:

$$m_I(t) = \int_0^t g(t \cdot \tau) \cdot M_U \cdot d\tau \quad (13)$$

Підставивши (12) в (13), отримаємо математичне очікування перехідного струму електровозу

$$m_I(t) = \int_0^t 25000 \cdot 4,19 \cdot e^{-1148 \cdot (t \cdot \tau)} = \quad (14)$$

$$= 91,25 - 91,25e^{-1148 \cdot t} \text{ А}$$

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міщенко, Т.М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв систем електричної тяги. Метод вагової функції/ Т.М. Міщенко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2014, № 5 (53). – С. 74-82.
2. Міщенко, Т.М. Метод ідентифікації параметрів пристроїв системи електротяги при проектуванні швидкісного руху поїздів / Т.М. Міщенко // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції Електрифікація залізничного транспорту ТРАНСЕЛЕКТРО-2015. – 2015. – С. 47-48.
3. Хворост, Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития. / Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Электротехника і Електромеханіка. – 2003. – №4. – С.104-114.
4. Міщенко, Т.М. Перспективи схмотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів/ Т.М. Міщенко// Науковий журнал Електротехніка та Електроенергетика, Запорізький національний технічний університет 2014. – № 1. – С. 19-28.
5. Лашко, А.Д. Технічні вимоги до тягового рухомого складу нового покоління. / А.Д. Лашко, С.Г. Грищенко // Залізничний транспорт України. – 2008. – №3. – С.11-14.
6. Eijkhoff P., Trends and Progress in System Identification. / Pergamon Press. Oxford., 1981-400 p.
7. Ljung L. System Identification. Sweden/ By Prentice-Hall., 1987 – 432 p.
8. Костін, М.О. Теоретичні основи електротех-

#### Висновки

1. Складність схмотехнічних рішень перспективного, особливо швидкісного, електро рухомого складу (ЕРС), обумовлює необхідність розробки нових методів математичного моделювання електромагнітних і електроенергетичних процесів в системах електричної тяги.
2. Імпульсна перехідна функція будь-якого типу ЕРС являється вичерпною його характеристикою і тому може слугувати в повній мірі ідентифікаційною моделлю цього типу ЕРС.
3. Враховуючи тісну функціональну взаємозв'язаність імпульсної перехідної і передатної функцій, існує практична можливість визначати першу функцію через другу.
4. Швидкісні типи ЕРС, маючи, як правило, на вході перетворювачі типу  $4q-s$  й тим самим забезпечуючи входні напругу і струм синусоїдними, дозволяють отримати передатні функції в якості їх ідентифікаційних моделей.

#### REFERENCES

1. Mishchenko, T.M. Teoretychni aspekty ta metody identyfikatsiyi parametriv prystroyiv system elektrychnoy tyahy. Metod vahovoyi funktsiyi/ T.M. Mishchenko // Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu, 2014, # 5 (53). – S. 74-82.
2. Mishchenko, T.M. Metod identyfikatsiyi parametriv prystroyiv systemy elektrotiahly pry proektuvanni shvydkisnoho rukhu poyizdiv / T.M. Mishchenko // Materyaly VIII Mezhdunarodnoy nauchno-praktycheskoy konferentsyyi Elektrifykatsyya zaliznychnoho transportu TRANS-ELEKTRO-2015. – 2015. – S. 47-48.
3. Khvorost, N.V. Elektricheskiye zheleznyye dorohy: etapy y perspektivy razvytyya. / N.V. Khvorost, N.V. Panasenka // Elektrotehnika i Elektromekhanika. – 2003. – #4. – S.104-114
4. Mishchenko, T.M. Perspektivy skhemotekhnichnykh rishen' i modelyuvannya pidsystem elektrychnoy tyahy pry vysokoshvydkisnomu rusi poyizdiv/ T.M. Mishchenko// Naukovyy zhurnal Elektrotehnika ta Elektroenerhetyka, Zaporiz'kyy natsional'nyy tekhnichnyy universytet 2014. – # 1. – S. 19-28.
5. Lashko, A.D. Tekhnichni vymohy do tyahovoho rukhomoho skladu novoho pokolinnya. / A.D. Lashko, S.H. Hryshchenko // Zaliznychnyy transport Ukrayiny. – 2008. – #3. – S.11-14.
6. Eijkhoff P., Trends and Progress in System Identification. / Pergamon Press. Oxford., 1981-400 p.
7. Ljung L. System Identification. Sweden/ By Prentice-Hall., 1987 – 432 p.

ніки. / М.О. Костін, О.Г. Шейкіна / Дніпропетровськ, ДНУЗТ, -2006, т.1. – 336 с.; -2007, т.2. – 276 с.

9. Kozn G. Mathematical: Hadbook for scientists and Engineers / T. Kozn: Mgraw Hill Book Company. London, 1961.-720p.

10. Гетьман Г.К., Теория электрической тяги.- Днепропетровск: изд-во «Маковецкий», 2011. – 456с.

11. Міщенко, Т.М. Гармонійний аналіз первинних напруги та струму нових типів електровозів змінного струму. / Т.М. Міщенко, А.А. Босий // Гірничі електромеханіка та автоматика: Наук. – техн.зб. – 2012. – Вп. 89 – С. 16-20.

12. Міщенко, Т.М. Геометричне трактування реактивної потужності та його зв'язок зі спектральним складом тягових напруги та струму швидкісних електровозів. / Т.М. Міщенко. // Науковий журнал Електротехніка та Електроенергетика, Запорізький національний технічний університет 2015. – № 2. – С. 81-86.

13. Разанов, Ю.К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) / Ю.К. Разанов, М.В. Рябчинский. // Электротехника. –1998. –№3. С.10-17.

14. Лившиц, Н.А. Вероятностный анализ систем автоматического управления // Н.А. Лившиц, В.Н. Пугачев // –М.: Советское радио, 1963. –896с

8. Kostin, M.O. Teoretychni osnovy elektrotekhniky. / M.O. Kostin, O.H. Sheykina / Dnipropetrovs'k, DNUZT, -2006, t.1. – 336 s.; -2007, t.2. – 276 s.

9. Kozn G. Mathematical: Hadbook for scientists and Engineers / T. Kozn: Mgraw Hill Book Company. London, 1961.-720p.

10. Het'man H.K., Teoryya elektrycheskoy tyahy.- Dnepropetrovsk: yzd-vo «Makovetsky», 2011. – 456s

11. Mishchenko, T.M. Harmoniynyy analiz pervynnykh napruhy ta strumu novykh typiv elektrovoziv zminnoho strumu. / T.M. Mishchenko, A.A. Bosyy // Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka: Nauk. – tekhn.zb. – 2012. – Vp. 89 – S. 16-20.

12. Mishchenko, T.M. Heometrychne traktuvannya reaktivnoyi potuzhnosti ta yoho zv'yazok zi spektral'nyim skladom tyahovykh napruhy ta strumu shvydkisnykh elektrovoziv. / T.M. Mishchenko. // Naukovyy zhurnal Elektrotekhnika ta Elektroenerhetyka, Zaporiz'kyy natsional'nyy tekhnichnyy universytet 2015. – # 2. – S. 81-86.

13. Razanov, Yu.K. Sovremennyye metody uluchsheniya kachestva elektroenerhiy (analytycheskyy obzor) / Yu.K. Rozanov, M.V. Ryabchynskyy. // Elektrotekhnika. –1998. –#3. S.10-17.

14. Lyvshyts, N.A. Veroyatnostnyy analiz system avtomaticheskoho upravleniya // N.A. Lyvshyts, V.N. Puhachev // –M.: Sovet-skoe radyo, 1963. –896s.

Надійшла до друку 07.12.2016.

Внутрішній рецензент *Костін М.О.*

Зовнішній рецензент *Хворост М.В.*

Розробка і чисельні розрахунки ідентифікаційної моделі швидкісного електрорухомого складу (ЕРС) змінного струму. Використано методики і прилади часової реєстрації випадкових процесів тягових напруг і струмів електровозу змінного струму на діючих ділянках, методи оцінки якості електроенергії згідно ГОСТ 13109-97, методи операційного числення, теорія лишків і випадкових процесів, а також способи імовірно-статистичної обробки і реєстрограм. Здійснено оцінку гармонійного складу тягових напруг і струмів швидкісного електровозу ДСЗМ, що дало можливість побудувати і використати передатну функцію як його ідентифікаційну модель. Показано, що імпульсна перехідна функція знаходиться як зворотне перетворення Лапласа передатної функції. Виконано чисельні розрахунки математичного очікування тягового струму електровоза ДСЗМ у перехідному режимі. Показано, що швидкісні типи ЕРС, які мають на виході перетворювачі типу  $4q-s$ , забезпечуються вхідними гармонійними напругою і (в першому наближенні) струмом. Одержано аналітичний вираз імпульсної перехідної функції через зворотне перетворення Лапласа передатної функції. Запропоновано в якості ідентифікаційної моделі ЕРС використовувати імпульсну перехідну функцію. Отримано аналітичну закономірність зміни математичного очікування тягового струму швидкісного електровозу.

Проведений гармонічний аналіз тягових напруг і струмів швидкісних ЕРС з перетворювачами  $4q-s$  дає можливість при побудові ідентифікаційних моделей використовувати метод передатних функцій. Отримане аналітичне співвідношення імпульсної перехідної функції дозволяє використовувати її як ідентифікаційну модель для аналізу електромагнітного процесу в швидкісних ЕРС в перехідному режимі. Виконані чисельні розрахунки дозволяють встановити закономірності тісної функціональної взаємопов'язаності імпульсної перехідної і передатної функцій для кожного типу швидкісного ЕРС.

**Ключові слова:** швидкісний електрорухомий склад; якість електричної енергії; перетворювач  $4q-s$ .

**УДК 621.335.04:621.333**

**Т.Н. МИЩЕНКО (ДНУЗТ)**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, моб.тел.: (099)136-96-25, ел. пошта [mishchenko\\_tn@ukr.net](mailto:mishchenko_tn@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0001-6336-7350](http://orcid.org/0000-0001-6336-7350)

# ИДЕНТИФИКАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Разработка и численные расчеты идентификационной модели скоростного электроподвижного состава (ЭПС) переменного тока. Методика. Используются методики и приборы временной регистрации случайных процессов тяговых напряжений и токов электровоза переменного тока на действующих участках, методы оценки качества электроэнергии согласно ГОСТ 13109-97, методы операционного исчисления, теория вычетов и случайных процессов, а также способы вероятностно-статистической обработки осциллограмм и регистрограмм. Осуществлена оценка гармонического состава тяговых напряжений и токов скоростного электровоза ДСЗМ, что позволило построить и использовать передаточную функцию как его идентификационную модель. Показано, что импульсная переходная функция находится как обратное преобразование Лапласа передаточной функции. Выполнены численные расчеты математического ожидания тягового тока электровоза ДСЗМ в переходном режиме. Показано, что скоростные типы ЭПС, которые имеют на выходе преобразователи типа 4q-s, обеспечиваются входящими гармоническими напряжением и (в первом приближении) током. Получено аналитическое выражение импульсной переходной функции через обратное преобразование Лапласа передаточной функции. Предложено в качестве идентификационной модели ЭПС использовать импульсную переходную функцию. Получена аналитическая закономерность изменения математического ожидания тягового тока скоростного электровоза. Проведенный гармонический анализ тяговых напряжений и токов скоростных ЭПС преобразователями 4q-s дает возможность при построении идентификационных моделей использовать метод передаточных функций. Полученное аналитическое соотношение импульсной переходной функции позволяет использовать ее как идентификационную модель для анализа электромагнитных процессов в скоростных ЭПС в переходном режиме. Выполнены численные расчеты, позволяющие установить закономерности тесной функциональной взаимосвязанности импульсной переходной и передаточной функции для каждого типа скоростного ЭПС.

**Ключевые слова:** скоростной электроподвижной состав; качество электрической энергии; преобразователь 4q-s.

Внутренний рецензент *Костин Н.А.*

Внешний рецензент *Хворост Н.В.*

UDC 621.335.04:621.333

T.M. MISHCHENKO (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan Street, 2 Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: (099)136-96-25, e-mail: [mishchenko\\_tn@ukr.net](mailto:mishchenko_tn@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0001-6336-7350](http://orcid.org/0000-0001-6336-7350)

## IDENTIFICATION MODEL SPEED ELECTRIC ROLLING STOCK AC

Design and numerical calculations of the identification model of high-speed electric rolling stock (EPS) AC. Methods. The procedure and equipment time registration of random processes traction voltages and electric currents on AC operating areas, methods of power quality assessment in accordance with GOST 13109-97, methods of operational calculus, the theory of random processes and deductions, as well as methods of probabilistic and statistical obrabotki oscillogramm and corded. The estimation of the harmonic content of the traction voltage and current high-speed electric DS3M that allowed to build and use a transfer function model as his identity. It is shown that the impulse response function is as the inverse Laplace transform of the transfer function. Numerical calculations matematicheskogotiiya electric traction current DS3M in transition mode. It is shown that high-speed types of EPS, which have output the adjustable type pre-4q-s, members are provided, and the harmonic voltage (in first approximation) current. An analytical expression of the impulse response function by the inverse Laplace transform of the transfer function. It is proposed as an identification model EPS to use the impulse response function. The analytical pattern of change of the expectation of a high-speed electric traction current. Held fast Fourier analysis of EPS converters 4q-s traction voltage and current allows the construction of models of identification to use the method of transfer functions. The resulting analytical relation impulse response function allows you to use it as an identification model for the analysis of electromagnetic processes in high-speed EPS in transition mode. Numerical calculations allow us to establish patterns of close functional interrelatedness of the impulse response and transfer function for each type of high-speed EPS.

**Keywords:** high-speed electric rolling stock; quality of electrical energy; converter 4q-s.

Internal reviewer *Kostin M.O.*

External reviewer *Khvorost M.V.*

I. CHRABĄSZCZ<sup>1</sup> (PK), W. HUDYM<sup>1</sup> (PK), J. ADAMS<sup>1</sup> (PK), J. PRUSAK<sup>1</sup> (PK), K. SZYMCZAK

<sup>1</sup>Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, e-mail: [pejajael@cyf-kr.edu.pl](mailto:pejajael@cyf-kr.edu.pl), [jprusak@usk.pk.edu.pl](mailto:jprusak@usk.pk.edu.pl), [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net)

## SYMULACJA ZMIAN OBCIĄŻENIA DLA WYBRANEJ KOLEJOWEJ PODSTACJI TRAKCYJNEJ PRĄDU STAŁEGO

### Wstęp

Obciążenia trakcyjne charakteryzują się dużą zmiennością. Przyczyny tej zmienności są w środowisku specjalistów powszechnie znane [1-5]. Natomiast, dla projektantów problemem są trudności z jednoznacznym określeniem wartości chwilowych obciążeń trakcyjnych, a w szczególności przeciążeń mogących się pojawiać w trakcie eksploatacji podstacji. Bezpośrednim dowodem na powyższe stwierdzenie są wyniki pomiarów wskazujące na istnienie znacznych rezerw mocy w zainstalowanych na podstacjach zespołach prostownikowych [6-8].

W artykule przedstawiono wyniki będące efektem symulacji aktualnego obciążenia wybranej kolejowej podstacji trakcyjnej prądu stałego 3000 V (DC), zasilającej linię kolejową o łagodnym profilu, który dominuje w znacznej części Polski. Dzięki tym badaniom uzyskano wyniki pozwalające na ocenę adekwatności doboru zespołów prostownikowych dla rzeczywistego obciążenia analizowanej podstacji trakcyjnej.

### Charakterystyka linii kolejowej

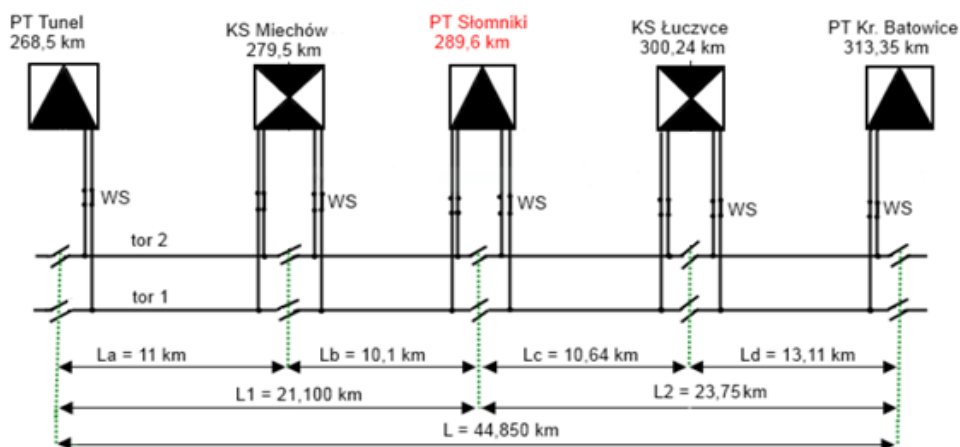
Wybrany do analizy odcinek linii kolejowej zasilany jest z podstacji trakcyjnej (PT) „Słomniki”, która znajduje się pomiędzy PT „Tunel”, a PT „Kraków Batowice”. Jest to linia dwutorowa.

Długość odcinka, dla którego przeprowadzono symulację obciążeń wynosi 44 km 850 metrów. Prowadzony jest na niej zarówno ruch pasażerski jak i towarowy. Linia ta została zelektryfikowana w 1968 roku.

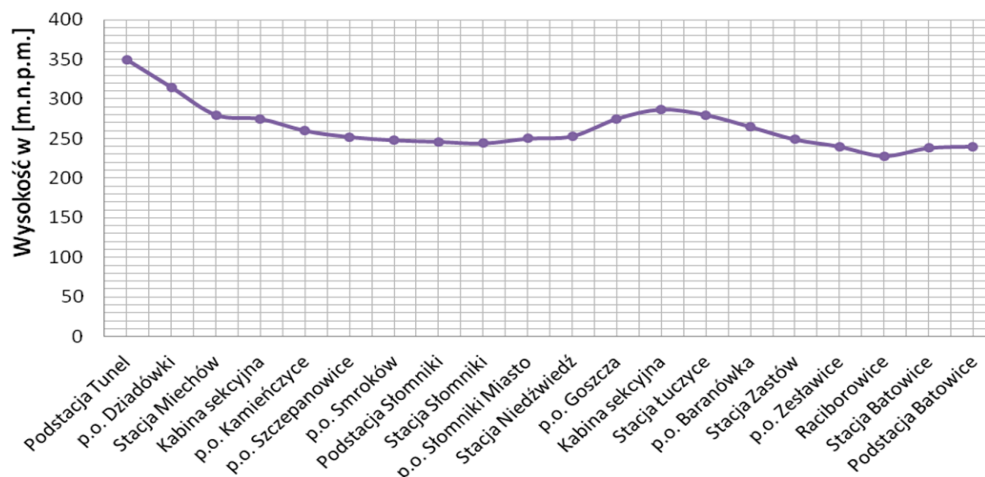
Na rys. 1 przedstawiono schemat wybranego obszaru zasilania, uwzględniający położenie podstacji trakcyjnych (PT), kabin sekcyjnych (KS) oraz wzajemne odległości pomiędzy nimi. Natomiast na rys. 2 zaprezentowano w formie graficznej profil pionowy analizowanego odcinka linii kolejowej. Jak widać (rys. 2.) linia ta nie posiada znacznych wzniesień ani spadków. Maksymalna różnica wysokości wynosi około 140 metrów, co nie jest wartością dużą w porównaniu np. do linii górskiej.

### Obciążenie trakcyjne

Na analizowanym fragmencie trasy występuje zarówno ruch towarowy jak i pasażerski. W celu analizy obciążenia podstacji, wzięto pod uwagę pojazdy, które stanowią większość taboru występującego na tej linii i kursują na niej niezmiennie od wielu lat. Są to głównie 3 wagonowe elektryczne zespoły trakcyjne typu EN57, pasażerskie pociągi pociągów prowadzone przez lokomotywę EU07 oraz pociągi towarowe z lokomotywą ET22.

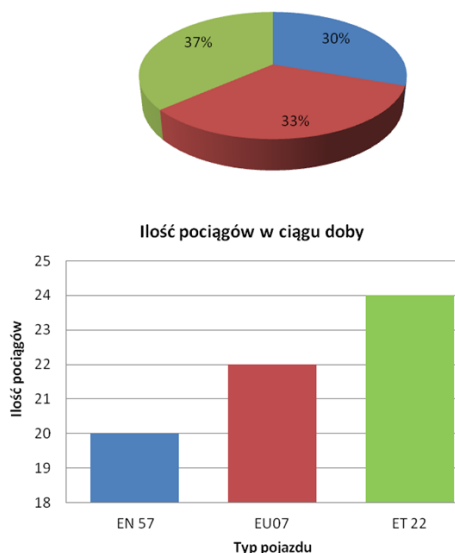


Rys.. 1. Schemat zasilania sieci trakcyjnej analizowanego odcinka



Rys. 2. Profil pionowy analizowanego odcinka linii kolejowej

Na rys. 3 zaprezentowano w sposób graficzny ilość i rodzaj pociągów na badanym odcinku zasilania w ciągu doby. Podane wartości dotyczą pojazdów poruszających się w obu kierunkach jazdy.



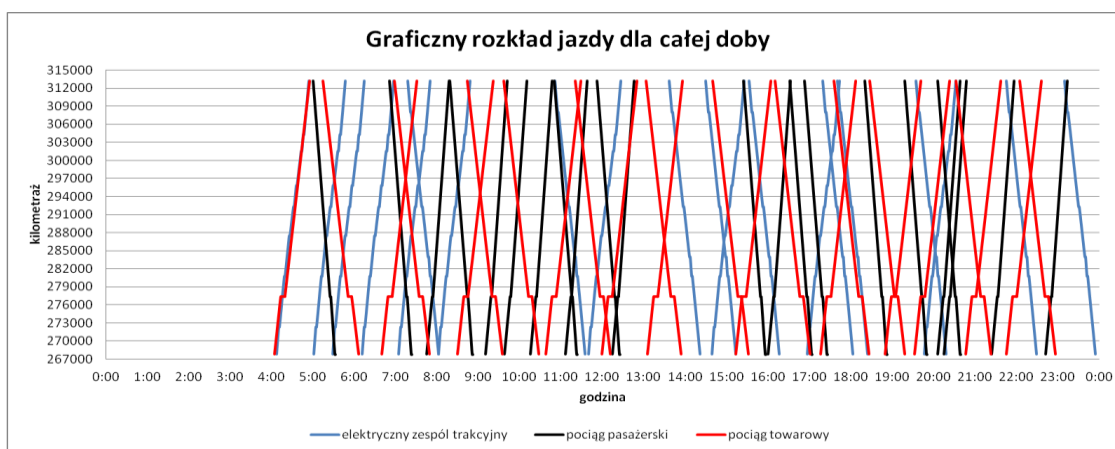
Rys. 3. Ilość pociągów w okresie doby na badanym odcinku

W okresie jednej doby przez analizowany odcinek przemieszcza się 68 pociągów przy czym 24 spośród nich (37%) to pociągi towarowe, pozostałe pojazdy w ilości 44 sztuk (63%) to pociągi osobowe i elektryczne zespoły trakcyjne. Na rozpatrywanej trasie dominuje ruch pasażerski, jednakże ruch towarowy jest również znaczny.

#### Dobowe obciążenie dla analizowanej podstacji trakcyjnej

Pierwszym etapem badań specyfiki przeciążeń zespołów prostownikowych analizowanej podstacji trakcyjnej, było określenie przebiegu jej obciążenia w okresie jednej doby.

Dla realizacji tego etapu wykonano badania symulacyjne bazujące na przejazdach teoretycznych pojazdów na badanej trasie [9, 10]. Na rys. 4 przedstawiono graficzny rozkład jazdy w trakcie jednej wybranej doby, dla której przeprowadzono analizę obciążenia podstacji.

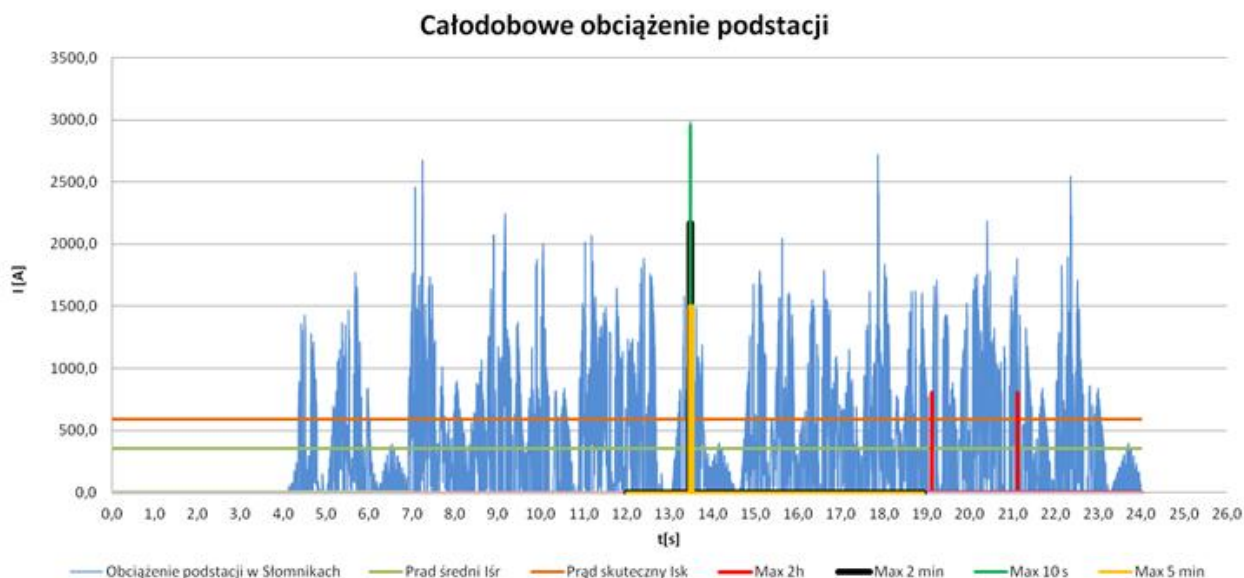


Rys. 4. Graficzny rozkład jazdy dla 24 godzin [9]

Na rys. 4. godziny przejazdów pojazdów trakcyjnych oznaczono następująco: kolorem niebieskim elektrycznych zespołów trakcyjnych, kolorem czarnym pociągów pasażerskich i kolorem czerwonym pociągów towarowych. Z wykresu można odczytać kiedy poszczególne pojazdy zatrzymują się na przystankach oraz kiedy występuje największe nasilenie ruchu, uwzględniony został ruch pojazdów w obu kierunkach. Jak widać (rys. 4) najczęściej zatrzymują się elektryczne zespoły trakcyjne a

znacznie rzadziej pociągi towarowe i pasażerskie. W niektórych przypadkach czas postoju (dotyczy to głównie zespołów trakcyjnych) jest na tyle krótki, że przy pomocy graficznej metody przedstawienia rozkładu jazdy jest on trudny do dobrego zobrazowania.

Uzyskane wyniki pomocne przy analizie specyfiki przeciążeń przedstawiono na rys. 5., są to przebiegi obciążenia zespołów prostownikowych w skali jednej doby dla rozważanej w niniejszym artykule podstawy trakcyjnej.



Rys. 5. Przebieg dobowego obciążenia zespołów prostownikowych badanej PT

Przebieg obciążenia na rys. 5. prezentuje wszystkie istotne wartości prądów, które obciążają podstawę trakcyjną w Słownikach. Kolorem niebieskim oznaczono prądy pobierane przez wszystkie pojazdy jadące odcinkiem zasilania w ciągu doby. Dwie poziome linie oznaczają kolejno od góry: wartość skuteczną prądu Isk wynoszącą 589,38 [A] – kolor pomarańczowy oraz wartość średnią prądu dobowego wynoszącą 353,9 [A] – kolor zielony. Ani jeden ani drugi parametr nie stanowią zagrożenia z uwagi na przeciążalności zespołów prostownikowych zarówno typu PK-17/3,3 jak i PD-16/3,3 występujących na podstacji. Wyliczony na podstawie wartości średniej i skutecznej prądu dobowego obc. podstawę współczynnik kształtu wynosi 1,67. Jego wartość została wyznaczona, jako iloraz:

$$\frac{I_{sk}}{I_{s'k}} = \frac{589,381}{353,9} = 1,67$$

Dla przykładu współczynnik kształtu prądu wyprostowanego jedno-połówkowo wynosi 1,41. Z uwagi na wysoką wartość tego współczynnika należy zmienność obciążenia określić jako znaczną.

### Ocena prądów maksymalnych

Uzyskany symulacyjnie przebieg prądu obciążenia (rys. 5.) i graficzny rozkład jazdy (rys. 4.) pozwalają na określenie maksymalnych wartości prądu oraz czasu i okoliczności ich wystąpienia. Maksymalna wartość prądu obciążenia występuje ok. godziny 13:29 i wynosi

2988,2 [A] przez 2 sekundy. Tak duża wartość prądu jest wynikiem nałożenia się przejazdów 2 ciężkich pociągów towarowych jadących w przeciwnych kierunkach (linia 2 torowa). Kolejna wysoka wartość prądu obciążenia ma miejsce o godzinie 17:51 w trakcie szczytu popołudniowego i wynosi 2720,6 [A] również przez 2 sekundy. Prąd ten jest wynikiem nałożenia się przejazdów:

- 2 elektrycznych zespołów trakcyjnych jadących z Krakowa,
- 1 pociągu towarowego jadącego z Krakowa,
- 1 pociągu towarowego jadącego do Krakowa.

Trzecia z kolei wartość prądu w ciągu doby występuje o godzinie 07:14 w czasie szczytu porannego i wynosi 2676,4 [A] oraz trwa przez 9 sekund. Spowodowana jest przejazdem:

- 1 elektrycznego zespołu trakcyjnego jadącego do Krakowa,
- 1 pociągu pasażerskiego jadącego z Krakowa,
- 2 pociągów towarowych, z których jeden jedzie w stronę Warszawy a drugi w stronę Krakowa.

Czwarta wartość skoku prądowego ma miejsce o godzinie 22:21 i wynosi 2544,1 [A] przez 1 sekundę. Taki pobór prądu jest wynikiem nałożenia się przejazdów:

- 1 elektrycznego zespołu trakcyjnego jadącego z Krakowa,
- 2 pociągów towarowych, gdzie jeden jedzie z Krakowa w stronę Warszawy a drugi jedzie w stronę stacji Kraków. Powyższe wyniki wskazują, że największy wpływ na prądy obciążenia podstacji mają ciężkie pociągi towarowe.

### Przeciążenia okresowe i ich ocena

Przebieg prądu obciążenia podstacji trakcyjnej (PT) rys. 5. pozwala ocenić występujące przeciążenia zgodnie z podanymi przez normę [12-13], standardowymi klasami przeciążalności. Na badanej PT był eksploatowany zespół prostownikowy typu PK-17/3,3, który jest znamionowany w klasie VI b. Dla tej klasy prąd znamionowy przy obciążeniu ciągłym wynosi 750 [A], natomiast przeciążenie długotrwałe to 150% prądu znamionowego przez okres 2 godzin i ma wartość 1125 [A], przeciążenie krótkotrwałe to 300% prądu znamionowego przez czas 5 minut i wynosi 2250 [A].

Przy przeprowadzanych modernizacjach lub w nowobudowanych podstacjach trakcyjnych znajduje zastosowanie zespół prostownikowy typu PD-16/33, który jest znamionowany w III klasie przeciążalności. Prąd znamionowy długotrwałego obciążenia dla tego zespołu wynosi 1600 [A], prąd przeciążenia długotrwałego wynosi 150% prądu znamionowego przez 2 minuty i ma wartość 2400 [A], prąd przeciążenia krótkotrwałego wynosi 200% prądu znamionowego przez okres 10 sekund i wynosi 3200 [A].

Na rys. 5 zaznaczono odcinki czasowe w których występują maksymalne obciążenia wynikające z przedstawionych wyżej sposobów znamionowania zespołów prostownikowych. Tak więc zaznaczono maksymalne obciążenie dla: 2 godzin, 5 minut, 2 minut i 10 sekund. Maksymalne obciążenie 2 godzinne (rys. 5.) występuje w przedziale czasowym 19:07 do 21:07 w tym czasie (rys. 4) przez analizowany odcinek linii kolejowej, zgodnie z rozkładem jazdy przejeżdża 5 pociągów towarowych, 4 pociągi pasażerskie oraz 2 elektryczne zespoły trakcyjne. Dla tego przedziału czasowego średnia wartość prądu obciążenia

wynosi 587,6 [A] a wartość skuteczna wynosi 800,5 [A]. Jak wyżej podano, dla zespołu prostownikowego typu PK-17/3.3, wartość dopuszczalna prądu dla takiego przedziału czasu (2h) wynosi 1125 A. Można więc stwierdzić, że nie została przekroczona wartość dopuszczalna prądu wynikająca z jego danych znamionowych dla długotrwałego przeciążenia. Rzeczywista wartość prądu jest mniejsza o 324,5 A od dopuszczalnej, co oznacza, że zespół prostownikowy ma jeszcze około 29% zapasu.

W taki sam sposób, mając uzyskany symulacyjnie przebieg obciążenia (rys. 5), można dokonać oceny dla innych odcinków czasowych, każdego zespołu prostownikowego, który byłby rozważany do zainstalowania w danej podstacji trakcyjnej.

Dla analizowanej PT „Słomniki” dokonano obliczeń projektowych, wg znanych metod [1-5], celem określenia liczby niezbędnych zespołów prostownikowych dla występującego aktualnie ruchu pociągów. Uwzględniono również, że musi być zainstalowany o jeden zespół prostownikowy więcej, niż to wynika z obliczeń projektowych. Jest to zespół, który jest traktowany jako rezerwowany na wypadek awarii lub prac remontowych. Zespół ten jest przeważnie włączony do pracy razem z zespołami podstawowymi. W przypadku zespołu typu PK-17/3.3, należałoby zainstalować ich trzy sztuki, natomiast w przypadku zespołu typu PD-16/3.3 wystarczą dwie sztuki.

Jeśli na PT „Słomniki” byłyby przykładowo zainstalowane trzy zespoły prostownikowe typu PK-17/3.3, to wypadkowy prąd przeciążenia dwugodzinnego wyniesie:  $3 \times 1125 \text{ [A]} = 3375 \text{ [A]}$ . Łatwo policzyć, że wtedy zdolność przeciążeniowa jest ponad cztery razy większa niż to wynika z obliczeń (800,5 [A]) przeprowadzonych dla występującego aktualnie ruchu pociągów.

Inne obliczenia [8], których wyników tu nie przytoczono, pozwoliły zorientować się, że zdolności obciążeniowe i przeciążeniowe zespołów prostownikowych w PT „Słomniki” są wykorzystywane wyraźniej poniżej ich możliwości.

### Uwagi końcowe

Najbardziej wartościowe do badań charakteru zmienności obciążeń trakcyjnych są wyniki pomiarowe. Jednakże na liniach kolejowych występujący ruch pociągów wynika z realizowanych zadań przewozowych i nie ma możliwości kształtować go wg innych kryteriów – np. badawczych.

Posiadając wystarczającą liczbę danych można określić symulacyjnie przebieg obciążenia zespołów

prostownikowych podstacji trakcyjnej w funkcji czasu. Można to wykonać dla aktualnego rozkładu jazdy, lub dla innych warunków. Dzięki temu uzyskamy wartościowy materiał badawczy np. dla oceny występujących przeciążeń istotnych, ze względu na bardziej właściwy dobór zespołów prostownikowych.

Można również, w oparciu o posiadane przebiegi obciążeń i znany ruch pojazdów trakcyjnych, podjąć próbę opracowania wzorów lub metod obliczeniowych przydatnych dla projektantów podstacji trakcyjnych i konstruktorów zespołów prostownikowych pozwalających w miarę wygodny i dokładny sposób wyliczać przeciążenia trakcyjne dla różnych obciążeń i różnych odcinków czasowych.

Prowadzone przez zespół autorów badania charakteru zmienności obciążeń trakcyjnych stały się inspiracją do zaproponowania nowych rozwiązań w zakresie rozwiązań obwodu głównego podstacji trakcyjnych kolejowych prądu stałego [14, 15]. Rozwiązania te powinny się przyczynić do ograniczenia zakresu zmienności prądów obciążających poszczególne zespoły trakcyjne. Dzięki temu powinny być ograniczone straty energii w podstacjach trakcyjnych, a więc również wzrosnąć konkurencyjność trakcji elektrycznej w stosunku do innych przewoźników.

## LITERATURA

1. Chrabąszcz I., Prusak J., Drapik S.: Trakcja elektryczna prądu stałego. Układy zasilania. Podręcznik INPE dla elektryków, Zeszyt nr 27, Kraków – Bełchatów 2009.
2. Kałuża E., Bartodziej G., Ginalski Z.: Układy zasilania i podstacje trakcyjne. Skrypty uczelniane Politechniki Śląskiej nr 1220, Gliwice 1985.
3. Mierzejewski L., Szela A., Gałuszewski M.: Systemy zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.
4. Sychenko, V. G. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // The archives of transport. — 2015. — Vol. 35, Iss. 3. — P. 63—70.

Received 15.06.2016.

Internal reviewer *Sychenko V.G.*

5. Kuznetsov V., Sablin O., Chornaya A.: Improvement of the regenerating energy accounting system on the direct current railways. The archives of transport 4/2015 (str. 35 – 42).

6. Drapik S., Kuznetsov V., Markowski P., Prusak J., Woszczyna B.: Badanie skali zmienności obciążeń wybranej tramwajowej podstacji trakcyjnej na podstawie rzeczywistych wyników pomiarowych dla spójnego okresu czasowego obejmującego szesnaście tygodni. Logistyka 6/2015 (str. 1026 – 1035).

7. Drapik S., Markowski P., Prusak J., Woszczyna B.: Tramwajowe podstacje trakcyjne – wybrane problemy bezpieczeństwa ekologicznego w świetle oceny ich obciążeń. Logistyka 4/2015 (str. 3017 – 3027).

8. Drapik S., Markowski P., Prusak J., Woszczyna B.: Tramwajowe podstacje trakcyjne – wybrane problemy bezpieczeństwa ekologicznego w świetle oceny ich obciążeń. Logistyka 4/2015 (str. 3017 – 3027).

9. Podolski J., Kacprzak J., Myslek J.: Zasady trakcji elektrycznej. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.

10. Kałuża E.: Zbiór zadań i ćwiczeń projektowych z trakcji elektrycznej. Skrypty uczelniane Politechniki Śląskiej nr 1848, Gliwice 1994.

11. Internetowy rozkład jazdy PKP (<http://rozklad-pkp.pl>).

12. Polska Norma PN-IEC 146-1-1+AC: Przekształtniki półprzewodnikowe. Wymagania ogólne i przekształtniki o komutacji sieciowej. Wymagania podstawowe, (październik 1996).

13. Polska Norma PN-EN 60146-1-1: Przekształtniki półprzewodnikowe - Wymagania ogólne i przekształtniki o komutacji sieciowej - Wymagania podstawowe, (sierpień 2002).

14. Jagiełło A.S., Chrabąszcz I., Drapik S., Dudzik M., Kobielski A., Prusak J.: System do aktywnej regulacji obciążenia zespołów prostownikowych kolejowej podstacji trakcyjnej i sposób aktywnej regulacji obciążenia zespołów prostownikowych kolejowej podstacji trakcyjnej. Zgłoszenie patentowe nr P.411511, 2015.

15. Chrabąszcz I., Drapik S., Dudzik M., Kaczmarczyk A., Prusak J.: Analiza obciążeń zespołów prostownikowych, dla „inteligentnych” kolejowych podstacji trakcyjnych DC – wstępne badania symulacyjne wybranych przypadków. Logistyka nr 6/2015 (str. 990 – 999).

The traction load is highly variable. The causes of this variability are well known among specialists. However, the problem of determining an instantaneous traction load, and in particular overloads that may occur during operation at traction substations is not solved. There are a large number of experimental data indicating the presence of significant reserves of power rectifiers. The article presents the results of simulation of the actual load of the selected railway traction substation DC. The results of the study were used to assess the adequacy of the choice of rectifier units to analyze actual load of the traction substation.

**Keywords:** modeling; traction load; substation DC; rectifier.

УДК 621.331.3

І. ХРАБОНШЧ<sup>1</sup> (КП), В. ГУДИМ<sup>1</sup> (КП), Я. АДАМС<sup>1</sup> (КП), Я. ПРУСАК<sup>1</sup> (КП),  
К. ШИМЧАККраківська політехніка, факультет електротехніки та обчислювальної техніки e-mail: [pejagiell@cyf-kr.edu.pl](mailto:pejagiell@cyf-kr.edu.pl), [jprusak@usk.pk.edu.pl](mailto:jprusak@usk.pk.edu.pl), [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net).**МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ОБРАНОЇ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Тягове навантаження дуже мінливе. Причини цієї мінливості добре відомі серед фахівців. Проте, залишається не вирішена проблема визначення миттєвого тягового навантаження, і зокрема перевантажень, які можуть виникнути під час роботи на тяговій підстанції. Існує велика кількість експериментальних даних, що вказують на наявність значних запасів потужності випрямлячів. У статті представлені результати моделювання фактичного навантаження обраної залізничної тягової підстанції постійного струму. Результати дослідження були використані для оцінки його вибору випрямних агрегатів для фактичного навантаження аналізованої тягової підстанції.

**Ключові слова:** моделювання; тягове навантаження; підстанція постійного струму; випрямляч.Внутрішній рецензент *Сиченко В.Г.*Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

УДК 621.331.3

І. ХРАБОНШЧ<sup>1</sup> (КП), В. ГУДИМ<sup>1</sup> (КП), Я. АДАМС<sup>1</sup> (КП), Я. ПРУСАК<sup>1</sup> (КП),  
К. ШИМЧАККраковская политехника, факультет электротехники и вычислительной техники e-mail: [pejagiell@cyf-kr.edu.pl](mailto:pejagiell@cyf-kr.edu.pl), [jprusak@usk.pk.edu.pl](mailto:jprusak@usk.pk.edu.pl), [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net).**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ВЫБРАННОЙ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Тяговая нагрузка сильно изменчива. Причины этой изменчивости хорошо известны среди специалистов. Тем не менее, остаётся не разрешённой проблема определения мгновенной тяговой нагрузки, и в частности перегрузок, которые могут возникнуть во время работы на тяговой подстанции. Существует большое количество экспериментальных данных, указывающих на наличие значительных запасов мощности выпрямителей. В статье представлены результаты моделирования фактической нагрузки выбранной железнодорожной тяговой подстанции постоянного тока. Результаты исследования были использованы для оценки адекватности выбора выпрямительных агрегатов для фактической нагрузки анализируемой тяговой подстанции.

**Ключевые слова:** моделирование; тяговая нагрузка; подстанция постоянного тока; выпрямитель.Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

M. DUDZIK (PK), I. CHRABĄSZCZ (PK), A. JAGIEŁŁO (PK), J. PRUSAK (PK), V. HUDYM (PK)

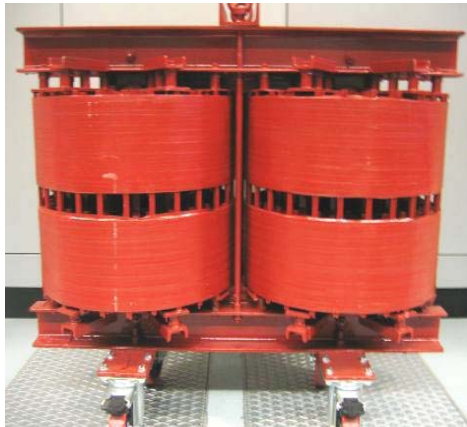
Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej e-mail: [pejagiel@cyf-kr.edu.pl](mailto:pejagiel@cyf-kr.edu.pl), [jprusak@usk.pk.edu.pl](mailto:jprusak@usk.pk.edu.pl), [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net)

## ANALIZA BŁĘDÓW POMIAROWYCH PRZY OKREŚLANIU PARAMETRÓW WIELOWROTNIKOWEGO SCHEMATU ZASTĘPCZEGO TRANSFORMATORA TRAKCYJNEGO

### 1. Wstęp

Transformatory wielouzwojeniowe stanowią istotną gałąź w zastosowaniach przemysłowych. Wykorzystywane są np. w branżach związanych z transportem elektrycznym, jak również w energetyce przy przesyłaniu i rozdziale energii elektrycznej.

W transporcie elektrycznym w krajach takich jak Niemcy, Szwajcaria, Francja a także Hiszpania, gdzie występuje system zasilania trakcji elektrycznej prądu przemiennego, transformatory te znajdują zastosowanie w układach napędowych pojazdów trakcyjnych [10][12]. Najczęściej dla wymienionych zastosowań są to jednostki jednofazowe, projektowane w taki sposób aby umożliwiały pracę układów napędowych pojazdów trakcyjnych dla różnych typów systemów zasilania (25kV/50Hz, 15kV/16,7Hz, 3000V/DC). Przykładowy transformator tego typu przedstawia poniższa ilustracja (Rys 1.1) [2].



Rys. 1.1. Wielouzwojeniowy, jednofazowy transformator trakcyjny [2]

Zazwyczaj transformatory trakcyjne posiadają kilka rodzajów uzwojeń [5][2], które (każde spośród danego rodzaju) są umiejscowione w cylindrycznej zewnętrznej przestrzeni, tworzącej kontur zamknięty na kolumnie pionowej transformatora (uzwojenia współśrodkowe [5]). Najczęściej spotykanymi uzwojeniami są:

- Uzwojenia wysokiego napięcia (High-voltage windings). Są one przedstawicielami uzwojeń strony pierwotnej transformatora. Zazwyczaj uzwojenia te projektowane są w taki sposób aby mogły pracować dla co najmniej dwóch różnych systemów zasilania prądu przemiennego. Przykładowo w Europie 15kV/16,7Hz, 25kV/50Hz, natomiast w USA ze względu na występujące systemy można spotkać się z projektami uzwojeń 11kV/25Hz i 20kV/60Hz [13].
- Uzwojenia trakcyjne (Traction windings). Należą do grupy uzwojeń strony wtórnej transformatora. Stanowią one źródło zasilania dla przekształtników statycznych w lokomotywie.
- Uzwojenia pomocnicze (Auxiliary windings). Są to również uzwojenia strony wtórnej transformatora, które znajdują zastosowanie głównie w celach zasilania obwodów oświetlenia, ogrzewania itp.

Często spotykanym rodzajem uzwojeń są także uzwojenia Filtru (Filter winding). Przy czym należy zaznaczyć, że najczęściej wszystkie uzwojenia strony wtórnej (za wyjątkiem wspomnianych wyżej uzwojeń Filtru) przedstawianego typu transformatorów, z uwagi na wielosystemową możliwość pracy obiektu, są dzielone na części w związku z koniecznością otrzymania zbliżonego poziomu napięć wyjściowych transformatora.

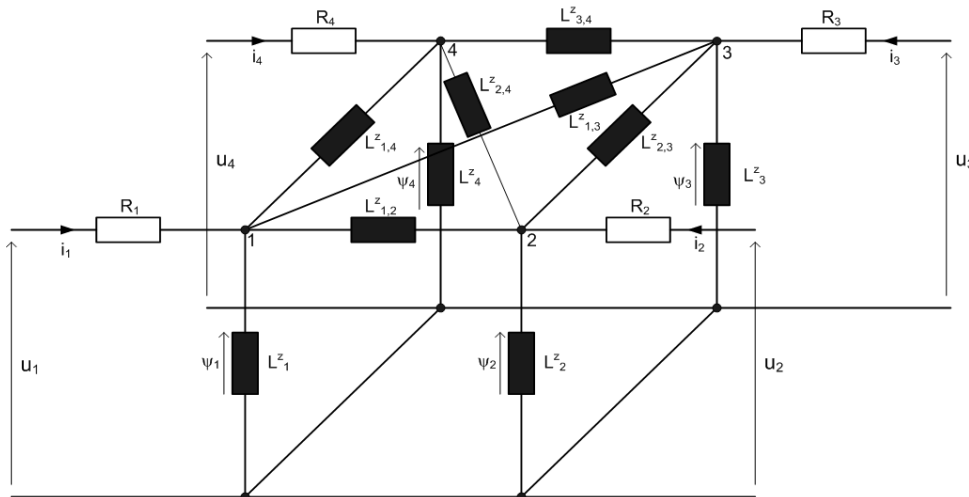
### 2. Schemat zastępczy transformatora wielouzwojeniowego

Gdy liczba uzwojeń transformatora jest mniejsza od czterech można go przedstawić schematem zastępczym, który posiada jedną wspólną gałąź poprzeczną. Wówczas identyfikacja elementów schematu zastępczego opisywanego obiektu, z punktu widzenia teorii obwodów elektrycznych jest obwodową reprezentacją dwóch magnetycznie sprzężonych cewek [12]. W przypadku, gdy liczba uzwojeń transformatora jest większa niż trzy, tego typu reprezentacja w schemacie zastępczym jest

niemożliwa. W związku z tym identyfikacja elementów macierzy badanego transformatora wielouzwojeniowego staje się trochę bardziej złożona. Wtedy narzędziem umożliwiającym inżynierom zamodelowanie takiego urządzenia zazwyczaj jest metoda elementów skończonych MES (FEM) lub idea polegająca na wykorzystaniu indukcyjno - rezystancyjnego wielowrotnikowego schematu zastępczego, dzięki

któremu istnieje możliwość jednoznacznej reprezentacji układu magnetycznie sprzężonych cewek.

Wspomniany wyżej schemat wielowrotnikowy przez wzgląd na jego zastosowanie został nazwany wielowrotnikowym schematem zastępczym transformatora. Przykładowy schemat zastępczy dla transformatora czterouzwojeniowego przedstawia rysunek 2.1.



Rys. 2.1. Wielowrotnikowy schemat zastępczy transformatora czterouzwojeniowego

Elementy powyższego schematu można podzielić na trzy grupy.

- 1) Rezystancje poszczególnych uzwojeń („ $R_i$ ”) znajdujące się w gałęziach podłużnych, do których przypisane są poszczególne węzły (Rys 2.1 cyfry 1,2,3,4).
- 2) Indukcyjności gałęzi podłużnych („ $L^z_{ij}$ ”).
- 3) Indukcyjności gałęzi poprzecznych („ $L^z_i$ ”).

W niniejszej pracy zostało opisane znaczenie miar wielkości elementów grupy drugiej prezentowanego wielowrotnikowego schematu zastępczego transformatora. Zaprezentowany również został ich wpływ na miarę błędu względnego procentowego, związanego ze stosowanym uproszczeniem pominięcia elementów znajdujących się w gałęziach podłużnych, nie sąsiadujących z węzłem do którego zostało przyłożone napięcie zasilania, przy zwartych pozostałych portach schematu. Jednocześnie założono, że przez pominięte elementy płynie prąd elektryczny.

### 3. Metody identyfikacji elementów znajdujących się w gałęziach podłużnych wielowrotnikowego schematu zastępczego transformatora wielouzwojeniowego

Dotychczasowa identyfikacja elementów grupy drugiej wielowrotnikowego schematu zastępczego przy wykorzystaniu wyników pomiarów transformatora w stanie zwarcia, oparta jest o

założenia, dzięki którym można zaniedbać elementy gałęzi poprzecznej, jak również elementy znajdujące się w gałęzi podłużnej nie sąsiadujące bezpośrednio z węzłem, do którego zostało przyłączone napięcie zasilania. Zaniedbanie elementów grupy trzeciej w stanie zwarcia w rzeczywistości nie powinno wpłynąć znacząco na dokładność pomiarów. Ponieważ jak wiadomo w tym stanie prądy płynące w gałęziach podłużnych są wielokrotnie większe od prądów płynących w gałęziach poprzecznych. W dodatku moc pobierana przez transformator w stanie zwarcia, przy zasilaniu napięciem zwarcia, jest praktycznie równa mocy strat w miedzi w warunkach znamionowych, co implikuje pomijalne straty w rdzeniu [1].

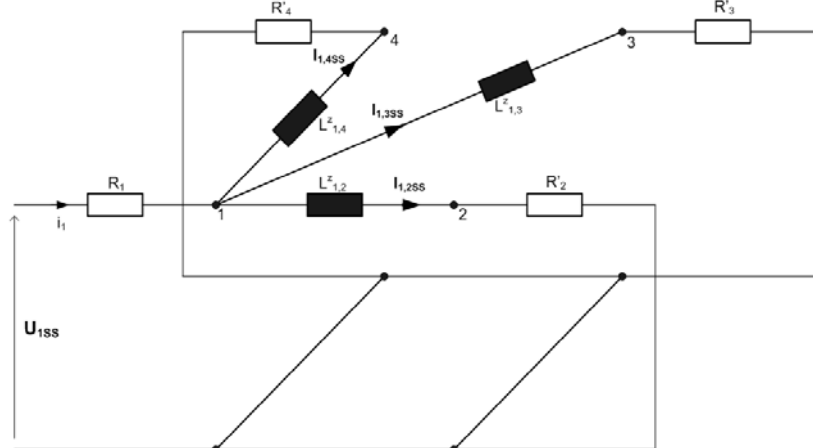
Jednak założenie dotyczące zaniedbania powyżej wspomnianych elementów znajdujących się w gałęziach podłużnych niesie za sobą szereg konsekwencji, które jak się okazuje mogą wpłynąć znacząco na dokładność obliczenia wszystkich elementów grupy drugiej schematu wielowrotnikowego. Co za tym idzie oddalenie modelu matematycznego transformatora od jego rzeczywistego odpowiednika. Jednak pominięcie właśnie tych elementów wpływa zdecydowanie na prostotę identyfikacji poszczególnych wielkości elementów  $L^z_{ij}$  (Rys. 1.1), co w znacznym stopniu przyczynia się do powszechnego jej stosowania w praktyce inżynierskiej.

Schemat dotychczas stosowanego wielowrotnikowego schematu zastępczego transformatora w stanie zwarcia budowano przy powszechnie przyjmowanych założeniach:

1. Prądy płynące wewnątrz gałęzi podłużnych są wielokrotnie większe od prądów płynących w gałęziach poprzecznych, w konsekwencji czego wpływ ich na wartości otrzymanych wyników jest pomijalny.

2. Różnica pomiędzy potencjałami zwartych portów transformatora jest wystarczająco nieduża by można było ją pominąć (Rys. 3.2 numery 2, 3, 4). Skutkiem czego jest identyczność stosunku wartości energii do ładunku wspomnianych węzłów, w wielowrotnikowym schemacie zastępczym transformowana.

ilustruje poniższy rysunek (Rys. 3.2).



Rys. 3.1. Schemat wielowrotnikowy transformatora czterouzwojeniowego w stanie zwarcia, zasilonego napięciem zwarcia, przy pominięciu wpływu elementów gałęzi poprzecznych i elementów gałęzi podłużnych nie sąsiadujących z węzłem zasilania

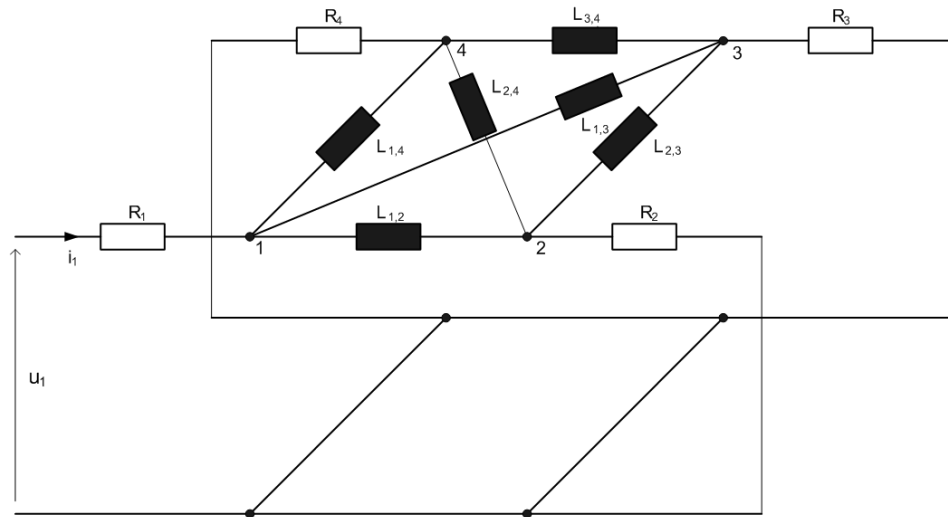
#### 4. Miary błędów wynikające z założenia identyczności potencjałów węzłów nie sąsiadujących bezpośrednio z węzłem, do którego zostało przyłączone napięcie zasilania w stanie zwarcia.

Zaniedbania wpływu jak również pominięcie określonych elementów w schematach zastępczych, zwiększają różnice pomiędzy modelami układów badanych a ich odpowiednikami rzeczywistymi. Zazwyczaj takie operacje są celowe, gdyż upraszczają modele zastępcze oraz schematy do tego stopnia, że identyfikacja wszystkich ich elementów nie stanowi większego kłopotu. Dzięki tym uproszczeniom wszelkie zadania dotyczące obliczeń inżynierskich mogą być wykonywane sprawniej, jednak każda tego typu operacja upraszczająca niesie za sobą swoistego rodzaju miarę błędu.

W przypadku gdy miara wspomnianego błędu jest wielkością na tyle dużą, że istota pomijanego poprzez zastosowane uproszczenie zjawiska zmienia się w sposób znaczący względem wybranego kryterium porównawczego, wtedy stosowanie założeń związanych z danym uproszczeniem ze względu na małą dokładność otrzymanego rozwiązania nie ma sensu. Powyższe stwierdzenie implikuje tezę, że pominięcie jakichkolwiek elementów schematów,

modeli fizycznych i matematycznych, czy też zmniejszenie znaczenia odpowiadających im wielkości w obliczeniach inżynierskich, może doprowadzić do zbyt dużych odstępstw fizycznych i analitycznych modeli obiektów od modelowanego obiektu rzeczywistego. W związku z tym wszelkie przyjmowane założenia powinny mieć podstawę fizyczną potwierdzoną następnie w praktyce.

Porównując schematy z rys. 2.1 i rys. 3.1., łatwo zauważyć, że różnica między nimi zachodzi w braku elementów gałęzi poprzecznej, których uzasadnienie pominięcia zostało już wcześniej wyjaśnione. Schematy różnią się również ilością gałęzi podłużnych. Związane jest to z założeniem dotyczącym pominięcia indukcyjności znajdujących się w tych gałęziach, które nie sąsiadują bezpośrednio z węzłem, do którego zostało przyłączone napięcie zasilania. Nasuwa się pytanie, czy powyżej wspomniane ostatnie z założeń w stanie zwarcia, nie stanowi zbyt wielkiego uproszczenia dla niektórych przypadków? Aby się o tym przekonać należy dokonać oceny konsekwencji pominięcia wpływu tych elementów. Schemat zastępczy przy braku badanego przez nas założenia drugiego, przykładowego transformatora czterouzwojeniowego został przedstawiony poniżej.



Rys. 4.1. Schemat wielowrotnikowy transformatora czterouzwojeniowego w stanie zwarcia, zasilonego napięciem zwarcia przy pominięciu wpływu elementów gałęzi poprzecznych [2]

Sprowadzając indukcyjności znajdujące się w gałęziach podłużnych powyższego schematu do ich odpowiedników zastępczych [6] związanych kolejno z węzłami 1,2; 1,3; 1,4 (równania 4.1, 4.2, 4.3). Następnie obliczając zgodnie ze wzorem 4.4 błąd

względny procentowy [4], możemy ocenić miarę procentową oddalenia się od siebie wielkości elementów porównywanych w zależności od wartości indukcyjności pominiętych w schemacie zastępczym z rysunku 2.2.

$$L_{1,2Z} = \frac{L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4})]}{(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2[L_{1,2}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{2,3}L_{2,4}] + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,2}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3}] + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2} + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2 + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4})} \quad (4.1)$$

$$L_{1,3Z} = \frac{L_{1,3}[L_{3,4}L_{2,3}(L_{1,4} + L_{1,2} + L_{2,4})^2 + (L_{1,4} + L_{1,2} + L_{2,4})[L_{1,4}L_{1,2}(L_{3,4} + L_{2,3})]}{(L_{1,4} + L_{1,2} + L_{2,4})^2[L_{1,3}(L_{3,4} + L_{2,3}) + L_{3,4}L_{2,3}] + (L_{1,4} + L_{1,2} + L_{2,4})[L_{1,3}L_{2,4}(L_{1,4} + L_{1,2}) + L_{1,4}L_{2,4}L_{2,3} + L_{1,2}L_{2,4}L_{3,4}] + L_{1,4}L_{1,2}L_{2,4}(L_{1,4} + L_{1,2}) + L_{1,4}L_{1,2}L_{2,4}^2} + L_{1,4}L_{2,4}L_{2,3} + L_{1,2}L_{2,4}L_{3,4} + L_{1,4}L_{1,2}(L_{3,4} + L_{2,3}) + L_{1,4}L_{1,2}L_{2,4}(L_{1,4} + L_{1,2}) + L_{1,4}L_{1,2}L_{2,4}^2} \quad (4.2)$$

$$L_{1,4Z} = \frac{L_{1,4}[L_{3,4}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,2} + L_{2,3})^2 + (L_{1,3} + L_{1,2} + L_{2,3})[L_{1,3}L_{1,2}(L_{3,4} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{2,3}L_{2,4}]}{(L_{1,3} + L_{1,2} + L_{2,3})^2[L_{1,4}(L_{3,4} + L_{2,4}) + L_{3,4}L_{2,4}] + (L_{1,3} + L_{1,2} + L_{2,3})[L_{1,4}L_{2,3}(L_{1,3} + L_{1,2}) + L_{1,2}L_{2,3}L_{3,4}] + L_{1,3}L_{1,2}L_{2,3}(L_{1,3} + L_{1,2}) + L_{1,3}L_{1,2}L_{2,3}^2} + L_{1,3}L_{2,3}L_{2,4} + L_{1,2}L_{2,3}L_{3,4} + L_{1,3}L_{1,2}(L_{3,4} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{1,2}L_{2,3}(L_{1,3} + L_{1,2}) + L_{1,3}L_{1,2}L_{2,3}^2} \quad (4.3)$$

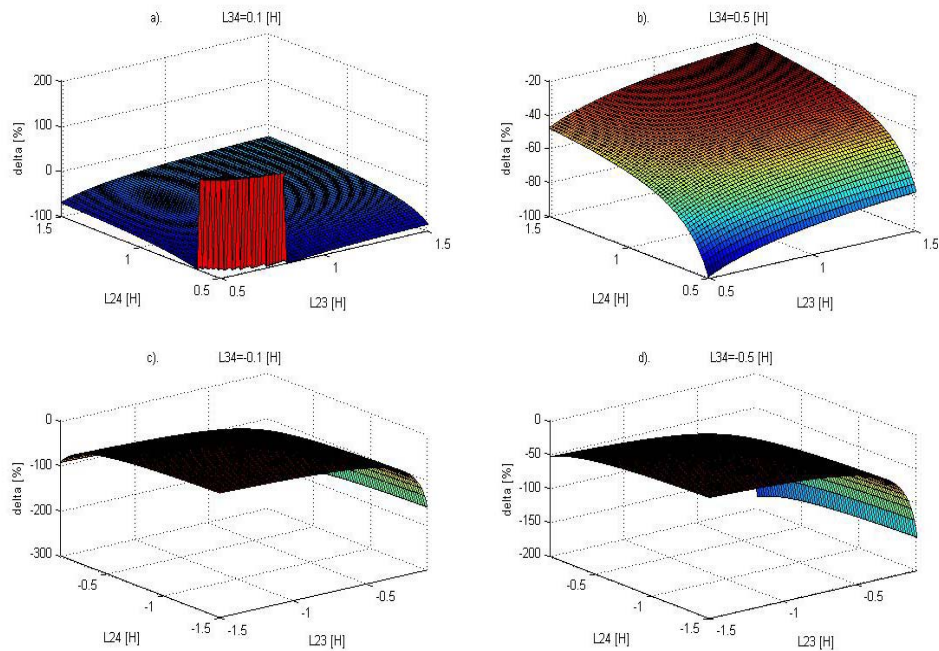
Błąd względny [4]

$$\delta[\%] = \frac{|L_{i,jZ} - L_{i,j}^Z|}{L_{i,jZ}} \cdot 100\%,$$

gdzie:  $i \neq j \quad i, j = 1, 2, 3, 4$  . (4.5)

Rezultaty porównania wyników w postaci wspomnianego wyżej błędu procentowego względnego, jednej z indukcyjności znajdującej się w gałęzi podłużnej  $L_{1,2}$  schematu zastępczego

transformatora z rys. 4.1, z jej odpowiednikiem związanym ze schematem zastępczym transformatora, który uwzględnia badany wpływ drugiego z założeń upraszczających  $L_{1,2}^Z$  (rys. 3.1); dla przykładowych wartości indukcyjności:  $L_{1,2} = 0.1013$  [H];  $L_{1,3} = 0.0215$  [H];  $L_{1,4} = -0.3037$  [H], zaczerpniętych z pozycji literatury [9], [11], w zależności od miary indukcyjności pominiętych w schemacie zostały zaprezentowane poniżej:



Rys. 4.2. Błąd względny procentowy dotyczący miary wielkości indukcyjności  $L_{1,2}$  związany z uproszczeniem schematu z rys. 4.1 do schematu z rys. 3.1, w stanie zwarcia. Błąd wynikający z braku założenia równości potencjałów 2, 3, 4 przy zasilaniu napięciem gałęzi związanej z węzłem 1

Zwróćmy uwagę na zakres rysunków 4.2 c). d). Otóż wykresy tam przedstawione dla wartości indukcyjności ujemnych zostały wykonane celowo. Gdyż jak zazwyczaj wykazują pomiary, miary obliczonych wartości indukcyjności  $L_{ij}^Z$  w stanie zwarcia wszystkich zacisków transformatora z pominięciem portu do którego zostało podłączone napięcie zasilania często przyjmują wartości o ujemnych znakach [1]. W związku z powyższym zjawiskiem, również wśród przykładowych wielkości indukcyjności  $L_{12}$ ,  $L_{13}$ ,  $L_{14}$  dla których zostały wykonane obliczenia miary błędu względnego procentowego, znalazły się wartości tych wielkości o przeciwnych znakach.

Porównując schematy z rys. 3.1, rys. 4.1 nie trudno zauważyć brak trzech elementów indukcyjności ( $L_{2,3}$ ,  $L_{2,4}$ ,  $L_{3,4}$ ), implikuje to przedstawienie obliczanego błędu jako trójparametrową funkcję zmienności  $y=f(x_1, x_2, x_3)$ . Przedstawienie wspomnianej funkcji wymagałoby wykonanie wykresów 4D i jednocześnie mogłoby utrudnić analizę porównawczą, jak również zaciemnić szereg wniosków z niej wypływających. Wobec tego rys. 4.2 przedstawiony został jako zbiór wykresów trójwymiarowych, obliczonych dla zakresu miary zmienności wartości dwóch indukcyjności ( $L_{2,3}$ ,  $L_{2,4}$  patrz rys. 4.1) i celowo dobranych wartości ostatniej ze zmiennych wcześniej wspomnianej funkcji ( $L_{3,4}$ ). Dzięki powyżej zastosowanemu zabiegowi jesteśmy w stanie określić z wielkim uproszczeniem, miarę wpływu wartości pominiętych elementów na wyniki końcowe. W

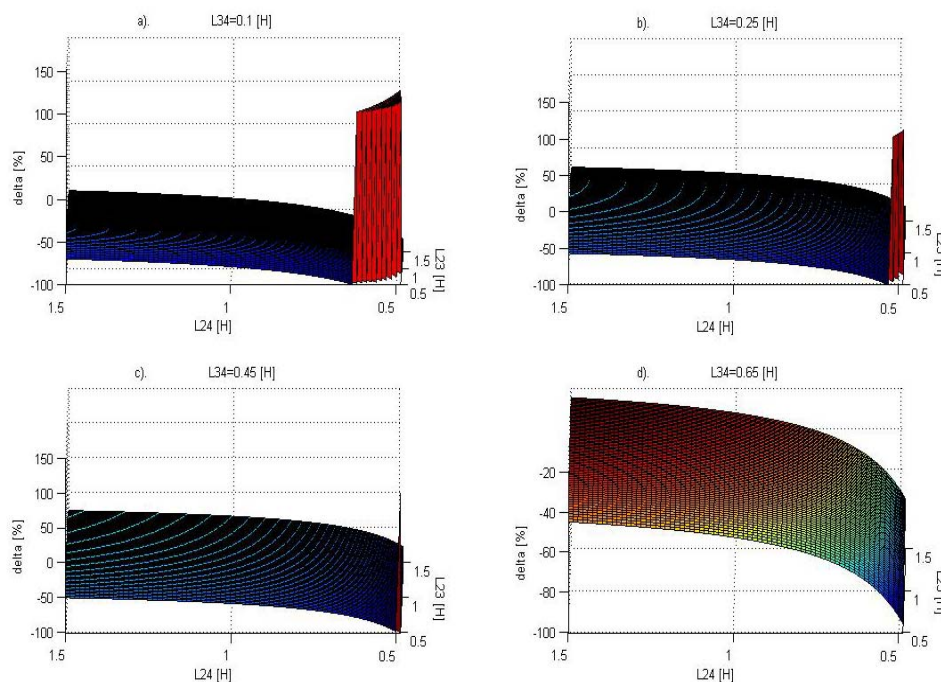
ostatecznej formie wspomnianej metody pomiarowej, będzie to mogło mieć znaczący wpływ na ocenę wartości błędu tej metody związanej z opisywanym uproszczeniem.

Zauważmy również, że łączne zakresy wykresów związanych z miarą wartości indukcyjności  $L_{2,3}$ ,  $L_{2,4}$  prezentowanych przez ilustrację 4.2, zostały ograniczone od góry co do ich modułu poprzez wartości tych elementów nie przekraczające fizycznych możliwości zaistnienia ich miary w schemacie zastępczym badanego obiektu. Przy czym jednocześnie zakres ten dobrany został w taki sposób, ażeby możliwe było uwidocznienie najistotniejszych wniosków wynikających z przeprowadzonej analizy. Zobaczymy również, że łączny zbiór argumentów wykresów miary błędu procentowego ograniczony pomiędzy wartościami indukcyjności  $<-1,5; 1,5>$  [H] nie jest zbiorem pełnym (Rys 4.2). Związane jest to z występowaniem podzbioru punktów osobliwych zawartych w zakresie rozpatrywanego błędu procentowego. Część tego podzbioru celowo została zilustrowana na rys. 4.2 a). W otoczeniu wspomnianych punktów, dla przykładowo podanych w artykule wartości indukcyjności  $L_{1,i}$  ( $i=2,3,4$ ) [9][11] w dodatnim zakresie parametrów funkcyjnych, miara błędu zazwyczaj zmienia znak na przeciwny; jednocześnie osiągając bardzo duże wartości. Natomiast miara błędu w położeniach punktów osobliwych dąży do nieskończoności. Przy czym należy dodać, że w całym zakresie zmienności parametrów funkcyjnych występują również takie położenia

punktów osobliwych, dla których miara opisywanego błędu dąży do minus nieskończoności.

Zauważyć należy także występowanie wartości miar błędu względnego procentowego ze znakiem ujemnym. Są one całkowicie uzasadnione. Okazuje się bowiem, że dla przykładowych wartości indukcyjności  $L_{1,2}$ ,  $L_{1,3}$ ,  $L_{1,4}$  stanowiących podstawę wykonania opisywanych wykresów w rozpatrywanym zakresie wartości miar pozostałych parametrów; wartość indukcyjności opisanej wzorem 4.1 ma charakter ujemny. Na dodatek dyskretnie podane wartości trzeciej ze zmiennych funkcji badanej ( $L_{3,4}$ ) decydują o mierze wklęsłości, jak

również promieniu krzywizny łuku stanowiącego podzbiór wartości związanej ze zmianą tylko jednego parametru funkcji, przy pozostałych stałych założonych miarach wartości indukcyjności. Jak wynika z rys. 4.2 a). i 4.2 b). opisywana funkcja staje się coraz to bardziej wklęsła dla rosnącej wartości indukcyjności  $L_{3,4}$ . W następstwie tego obserwuje się, że dla niewielkich wartości wspomnianego parametru funkcyjnego, zmiany miary błędu procentowego są znacznie mniejsze w porównaniu, do zmian błędów dla większej wartości tej indukcyjności. Powyższy wniosek prezentuje również ilustracja 4.3.



Rys. 4.3. Prezentacja wpływu miary wartości indukcyjności  $L_{3,4}$  na wartości błędów procentowych względnego związanego z uproszczeniem schematu z rys. 4.1 do schematu z rys. 3.1

Spoglądając na kolejne przebiegi funkcyjne z rys. 4.3 prawie natychmiast dostrzec można związek pomiędzy wcześniej wspomnianym promieniem krzywizny, a wartością indukcyjności  $L_{3,4}$ . Otóż, im indukcyjność  $L_{3,4}$  posiada większą wartość tym promień krzywizny łuku w określonych podobszarach funkcji jest większy. Okazuje się także, iż w przedziałach zmienności parametrów  $L_{2,3}$  i  $L_{2,4}$ , których wartości dążą do nieskończoności, opisywany promień krzywizny dąży do nieskończoności. Oznacza to, że w tych zakresach nie będą występować wartości miary zmiany opisywanego błędu.

Obserwując uważnie wykresy z rys. 4.3 można zauważyć, że gradient funkcji błędów procentowych wrasta w otoczeniu punktów odpowiadających mniejszym wartościom indukcyjności, natomiast maleje w stronę wartości rosnących. Powyższe stwierdzenie implikuje wniosek: im mniejsze miary wartości indukcyjności znajdujących się w gałęziach

podłużnych wielowrotnikowego schematu zastępczego transformatora, tym błąd względny procentowy (związany z założeniem upraszczającym, dotyczącym pominięcia elementów indukcyjnych w tych, że gałęziach które nie sąsiadują bezpośrednio z węzłem do którego zostało przyłączone napięcie zasilania) jest większy. Kolejny wniosek związany z przedstawionym stwierdzeniem, dotyczy wielkości zmian miary opisywanego błędu w zależności od rozpatrywanego zakresu wartości indukcyjności podłużnych. Zauważmy, że niewielkie zmiany w zakresie odpowiadającym mniejszym wartościom indukcyjności, powodują znacznie większą zmianę miary błędów procentowych. Co za tym idzie w stadium projektowania transformatora możemy uwzględnić ten wniosek w taki sposób, aby dokonując późniejszych pomiarów miary rozpatrywanego błędu (pod względem opisywanego kryterium związanego z błędem uproszczenia) była najmniejsza z możliwych. Zauważmy również, że w

miarę wzrostu wartości opisywanych indukcyjności, miara błędu ulega zmniejszeniu. Można stwierdzić nawet więcej, mianowicie wykonując elementarne kalkulacje (jednoczesne obliczanie wielokrotnie parametrycznej granicy dążącej do nieskończoności, funkcji wielu zmiennych błędu względnego procentowego, związanego z pomijanymi

indukcyjnościami w schemacie zastępczym [3], [8]), można udowodnić, że w przypadku gdy pominięte wartości indukcyjności (Rys. 3.1) dążą w granicy do nieskończoności, wówczas zawsze granica miary błędu względnego procentowego badanego przez nas uproszczenia dąży do zera. Przykładową wspomnianą granicę prezentuje równanie (4.5).

$$L_{1,2Z} = \lim_{\substack{L_{2,3} \rightarrow \infty \\ L_{2,4} \rightarrow \infty \\ L_{3,4} \rightarrow \infty}} \frac{\left\{ (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 [L_{1,2}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{2,3}L_{2,4}] + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,2}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4})] + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2 + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) \right\}}{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}} \cdot \quad (4.5)$$

$$\frac{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}}{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}} \cdot$$

$$\frac{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}}{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}} \cdot$$

$$\frac{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}}{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}} \cdot$$

$$\frac{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}}{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}} \cdot$$

$$\frac{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}}{\left\{ L_{1,2}[L_{2,3}L_{2,4}(L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})^2 + (L_{1,3} + L_{1,4} + L_{3,4})[L_{1,3}L_{1,4}(L_{2,3} + L_{2,4}) + L_{1,3}L_{3,4}L_{2,4} + L_{1,4}L_{3,4}L_{2,3} + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}(L_{1,3} + L_{1,4}) + L_{1,3}L_{1,4}L_{3,4}^2] \right\}} \cdot$$

Interpretacja powyższego zabiegu matematycznego ma sens fizyczny w przypadku gdy pomijane indukcyjności nie istnieją w schemacie zastępczym [7]. Patrząc z tej strony na przedstawiony zabieg matematyczny, wiedząc jednocześnie, że aby zidentyfikować wszystkie indukcyjności należy dokonać pomiarów związanych z poszczególnym zasilaniem każdego z węzłów, przy zwarciu pozostałych [2]. Miara błędu uproszczenia wyniesie 0% tylko i wyłącznie wtedy, gdy wszystkie z wartości miar opisywanych indukcyjności dążyć będą do nieskończoności. Nie mniej jednak, w związku z powyżej przytoczoną fizyczną interpretacją, indukcyjności te wtedy nie miałyby prawa istnieć. Skutkiem tego byłby brak możliwości utworzenia zaprezentowanego w tym artykule schematu zastępczego transformatora. Powyższy wniosek implikuje uzasadnione stwierdzenie, że w przypadku gdy występuje jakakolwiek różnica potencjałów, pomiędzy węzłami odpowiadającymi zwartym podczas pomiarów portom transformatora wielowrotnikowego schematu zastępczego, opisywany błąd uproszczenia związany w wykonywaniu pomiarów na rzeczywistym obiekcie jest nieunikniony. Należy jednocześnie dodać, że błąd ten nie powinien wystąpić w przypadku wykonania pomiarów w stanie zwarcia transformatora, w zakresie uwzględniającym tylko i wyłącznie uzwojenia tego samego rodzaju. Jest to

związane z zazwyczaj występującą wtedy równością powyżej wspomnianych potencjałów międzywęzłowych dla uzwojeń zwartych.

## LITERATURA

1. Bajorek Z.: *Teoria maszyn elektrycznych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1982
2. Dudzik M.: *Modeling a multi-winding transformer at arbitrary winding connections*, Praca magisterska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej, 2009.
3. Fichtenholz G.: *Rachunek różniczkowy i całkowy*, T. 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007r.
4. Jakubiec W.: *Malinowski J.: Metrologia wielkości geometrycznych*, WNT, 2007
5. Jezierski E.: *Transformatory*, T. 1,2, PWN, Warszawa, 1965
6. Krakowski M.: *Elektrotechnika Teoretyczna*, T.1, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999
7. Kurdziel R.: *PODSTAWY ELEKTROTECHNIKI*, WNT 1965
8. Mostowski A.: *Stark M.: ELEMENTY ALGEBRY WYŻSZEJ*, PWN, 1963
9. Oszust P.: *Analiza pracy transformatorów energetycznych przy użyciu wielowrotnikowych schematów zastępczych*, Praca magisterska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej, 2007.
10. Sobczyk T.: *O pewnej obwodowej reprezentacji magnetycznie sprzężonych cewek*, Materiały Międzynarodowej Konferencji "Seminarium Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów", IC- SPETO 2003, T.2, str. 493-496.
11. Sobczyk T.J.: *MULTI-PORT EQUIVALENT SCHEME OF THREE-PHASE POWER*

TRANSFORMERS, Materiały Międzynarodowej Konferencji Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów IC- SPETO 2007.

12. Sobczyk T.J.: *Schematy zastępcze wielo-uzwojeniowych transformatorów jednofazowych*, Warsaw

University of Technology, Proc of Int. Conf. SME, 2004, pp. 452-456.

13. Wawrzyniak A.: Bogucki M.: *Systemy zasilania linii dużych prędkości*, Biuro Analiz Prawno-Ekonomicznych, Łódź 2010

External reviewer *Denisyuk S. P.*

Received 15.06.2016.

Internal reviewer *Getman G. K.*

Transformers are an important element in industrial applications. They are used, for example, in industries related to electricity transportation. The electric systems in countries such as Germany, Switzerland, France and Spain, where there is a traction power supply system AC power transformers are part of the transformation of electricity on the rolling stock. The most common application for these single-phase units are designed in such a way as to be able to work for the rolling stock traction vehicles for the various types of power supply systems (25kV / 50Hz, 15kV / 16,7Hz, 3000V / DC). This article describes methods for the identification of elements of equivalent circuits of transformers, as well as the analysis carried out measurement errors in determining the parameters of equivalent circuits of transformers.

**Keywords:** transformer; measurement error; equivalent circuit; electric transport.

### УДК 621.331.3

М. ДУДЗИК (КП), І. ХРАБОНШЧ (КП), А. ЯГЕЛЛО (КП), Я. ПРУСАК (КП), В. ГУДИМ (КП)

Краківська політехніка, факультет електротехніки та обчислювальної техніки, e-mail: [pejagiel@cyf-kr.edu.pl](mailto:pejagiel@cyf-kr.edu.pl), [jprusak@usk.pk.edu.pl](mailto:jprusak@usk.pk.edu.pl), [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net)

## АНАЛІЗ ПОМИЛОК ВИМІРЮВАННЯ У ВИЗНАЧЕННІ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатори є важливим елементом в промислових додатках. Вони використовуються, наприклад, в галузях, пов'язаних з транспортом електроенергії. У системах електротранспорту в таких країнах, як Німеччина, Швейцарія, Франція та Іспанія, де існує система електропостачання тяги змінного струму, силові трансформатори є елементом перетворення електроенергії на рухомому складі. Найбільш поширеними для цих додатків є однофазні блоки, розроблені таким чином, щоб мати можливість роботи рухомого складу для тягових транспортних засобів для різних типів систем живлення (25кВ / 50Hz, 15кВ / 16,7Hz, 3000V / DC). У даній статті наводяться методи ідентифікації елементів схем заміщення трансформаторів, а також проведено аналіз помилок вимірювання при визначенні параметрів схем заміщення трансформаторів.

**Ключові слова:** трансформатор; помилка вимірювання; схема заміщення; електротранспорт.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

### УДК 621.331.3

М. ДУДЗИК (КП), І. ХРАБОНШЧ (КП), А. ЯГЕЛЛО (КП), Я. ПРУСАК (КП), В. ГУДИМ (КП)

Краковская политехника, факультет электротехники и вычислительной техники, e-mail: [pejagiel@cyf-kr.edu.pl](mailto:pejagiel@cyf-kr.edu.pl), [jprusak@usk.pk.edu.pl](mailto:jprusak@usk.pk.edu.pl), [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net)

## АНАЛИЗ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформаторы являются важным элементом в промышленных приложениях. Они используются, например, в отраслях, связанных с транспортом электроэнергии. В системах электротранспорта в таких странах, как Германия, Швейцария, Франция и Испания, где существует система электроснабжения тяги переменного тока, силовые трансформаторы являются элементом преобразования электроэнергии на подвижном составе. Наиболее распространенными для этих приложений являются однофазные блоки, разработанные таким образом, чтобы иметь возможность работы подвижного состава для тяговых транспортных средств для различных типов систем питания (25кВ / 50Hz, 15кВ / 16,7Hz, 3000V / DC). В данной статье приводятся методы идентификации элементов схем замещения трансформаторов, а также проведен анализ ошибок измерения при определении параметров схем замещения трансформаторов.

**Ключевые слова:** трансформатор; ошибка измерения; схема замещения; электротранспорт.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

М. Dudzik, I. Chrabaszcz i inny, 2016

V. HUDYM (PK), A. JAGIEŁŁO (PK), I. CHRABĄSZCZ (PK), J. PRUSAK (PK), P. TRĘBACZ (PK)

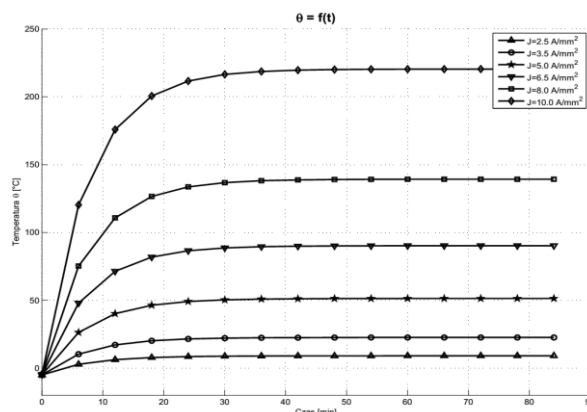
Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, e-mail: [pejagiel@cyf-kr.edu.pl](mailto:pejagiel@cyf-kr.edu.pl), [jprusak@usk.pk.edu.pl](mailto:jprusak@usk.pk.edu.pl), [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net)

## UWARUNKOWANIA ELEKTRYCZNE I CIEPLNE LIKWIDACJI OBLODZENIA NA PRZEWODACH SIECI TRAKCYJNEJ

W okresie zimowym aktualnym problemem staje się zapobieganie oblodzeniu przewodów sieci trakcyjnej, które może utrudniać normalną pracę elektrowozów. W Polsce wystąpił przypadek, gdzie powstawanie osadów na przewodach zasilających doprowadziło do opóźnień pociągów o kilka godzin, a w niektórych sytuacjach doszło do uszkodzenia elementów układu zasilania. W efekcie przełożyło się to na straty finansowe, wynikłe również z tego powodu, że duża część pasażerów przesiadła się na inny środek transportowy.

W okresie zimowym aktualnym problemem staje się zapobieganie oblodzeniu przewodów sieci trakcyjnej, które może utrudniać normalną pracę elektrowozów. W Polsce wystąpił przypadek, gdzie powstawanie osadów na przewodach zasilających doprowadziło do opóźnień pociągów o kilka godzin, a w niektórych sytuacjach doszło do uszkodzenia elementów układu zasilania. W efekcie przełożyło się to na straty finansowe, wynikłe również z tego powodu, że duża część pasażerów przesiadła się na inny środek transportowy. Autorzy artykułu uważają, że likwidacja oblodzenia na przewodach sieci trakcyjnej jest zagadnieniem aktualnym i ważnym. Zapewnienie niezawodności transportu zbiorowego, kolejowego bądź tramwajowego, pozwala ograniczyć ruch samochodowy wewnątrz dużych aglomeracji, a to z kolei może prowadzić do rozładowania zatorów na drogach.

Spośród wykorzystywanych sposobów usuwania oblodzenia z przewodów stosuje się m.in. mechaniczną metodę likwidacji osadu, którą przeprowadza się przy odłączonym od zasilania odcinku sieci. Konieczność wyłączenia zasilania jest wadą tej metody, ponieważ przy usuwaniu lodu trzeba korzystać z lokomotywy spalinowej. Ta operacja wymaga dużych nakładów czasowych co powoduje, że dana linia jest przez dłuższy okres wyłączona z użytkowania. Dobrą alternatywę dla usuwania lodu stanowi metoda nagrzewania przewodów jezdnych prądem o odpowiedniej gęstości, który byłby pobierany z podstacji trakcyjnych.



Rys. 1. Wykres zależności temperatury przewodu od czasu nagrzewania

Wcześniej przeprowadzone przez autorów badania [1], obejmowały proces ogrzewania samego przewodu narażonego na działanie warunków atmosferycznych. W wyniku symulacji otrzymano wykresy, jak na rysunku 1. W symulacji nagrzewania przewodu założono początkową temperaturę otoczenia równą  $-5^{\circ}\text{C}$ . Przyjęto również, że na przewodzie nie tworzy się lód. Jak wiadomo, w rzeczywistości jest zupełnie inaczej i należy uwzględnić fakt powstawania oblodzenia zwłaszcza podczas opadów deszczu ze śniegiem bądź śniegu, którym towarzyszy niska temperatura. Proces ogrzewania przewodu pokrytego lodem będzie się różnił od nagrzewania samego przewodu. Po załączeniu zasilania, w początkowej fazie ogrzewania, ciepło z przewodu będzie przekazywane do lodu w celu ogrzania go do temperatury  $0^{\circ}\text{C}$  lub nieznacznie wyższej. Kolejno nastąpi przemiana fizyczna lodu w wodę, a dalej proces topienia lodu. Przedstawiony model zakłada równomierne rozłożenie pokrywy lodowej wokół przewodu. W normalnych warunkach większa narośl na przewodzie będzie występować od dołu, ponieważ jest ona skutkiem działania siły grawitacji. Można zatem przyjąć, że założona przez nas grubość pokrywy lodowej występuje od góry przewodu. Wystarczy ją stopić, a dolna część odpadnie pod własnym ciężarem. Pozwala to zmniejszyć ilość energii potrzebnej do usunięcia oblodzenia.

W celu realizacji sposobu nagrzewania oblodzonego przewodu prądem, konieczna jest zmiana układu sieci zasilającej poprzez dodanie odpowiednio dobranych łączników wysokonapięciowych. Natomiast problemem jest dobór miejsca instalacji tych łączników, co jednocześnie wiąże się z gęstością przepływającego prądu i czasem likwidacji oblodzenia. Uzyskanie informacji dotyczących w/w wielkości jest możliwe poprzez symulację procesu nagrzewania układu przewód – lód z uwzględnieniem najważniejszych jego parametrów, zjawisk i struktury sieci. W tym celu opracowano model matematyczny w oparciu o prawa elektrotechniki i termodynamiki, który pozwala na analizę zależności zmian temperatury oblodzonego przewodu od gęstości przepływającego prądu.

Model został opisany równaniami różniczkowymi. Jednym z problemów wynikłych w trakcie symulacji była potrzeba aproksymacji współczynnika ciepła właściwego układu, którego wartość zależy od grubości pokrywy lodowej oraz parametrów przewodu sieci trakcyjnej. Celem określenia tego współczynnika przeprowadzono serię obliczeń, w wyniku których otrzymano analityczną zależność, równoważnego współczynnika ciepła właściwego układu przewód – lód od jego temperatury. Zastosowano następujący wzór [1]:

$$C_r = 962,5 - 637,5 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \tan^{-1} 0,35 \cdot (\theta(t) - 10)$$

w którym:

$$\theta(t) = \frac{\rho \cdot J^2 \cdot r}{2 \cdot \alpha} + \theta_s - \frac{\rho \cdot J^2 \cdot r}{2 \cdot \alpha} \cdot e^{-\frac{2 \cdot \alpha}{\gamma \cdot r \cdot C} \cdot t}$$

gdzie:

$\rho$  - rezystywność miedzi;

$J$  - gęstość prądu;

$r$  - promień przewodu;

$\alpha$  - współczynnik wiatru;

$\theta_s$  - temperatura otoczenia;

$\gamma$  - gęstość miedzi;

$C$  - wartość współczynnika ciepła właściwego dla układu przewód-lód.

Wartości współczynników zostały obliczone i oszacowane na podstawie wyników uzyskiwanych w trakcie testów. Obliczenia współczynników wykonano w oparciu o własności funkcji *arctg*. Współczynnik 962,5 obliczono w następujący sposób:

$$C_r = 1535, C_m = 390,$$

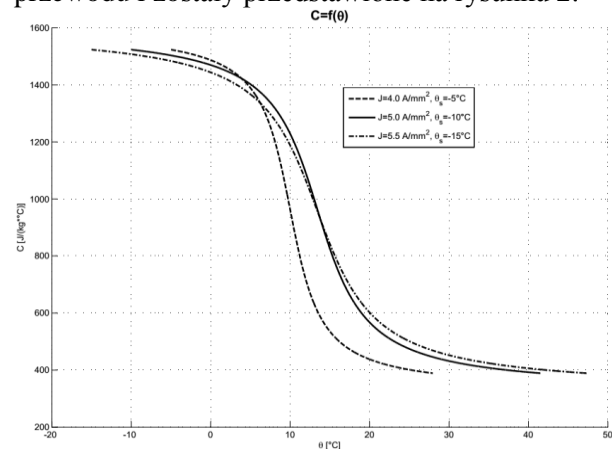
$$1535 - 390 = 1145,$$

$$1145 \div 2 = 572,5,$$

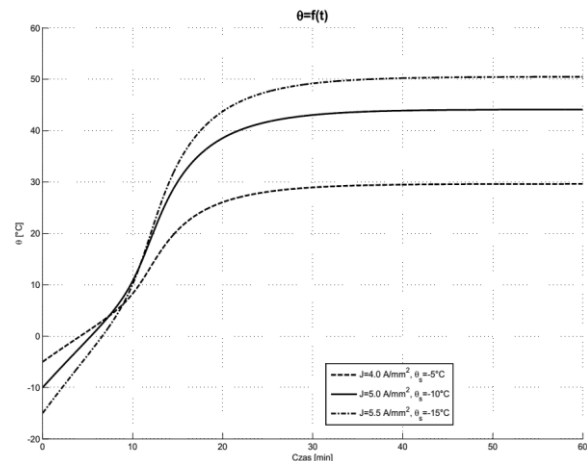
$$572,5 + 390 = 962,5$$

Wartość 637,5 została dobrana empirycznie rozpoczynając od wartości 572,5. Pozostałe wartości 0,35 oraz 10 również zostały dobrane w trakcie doświadczeń. Celem było uzyskanie rozpiętości wykresu od wartości około 1535 do wartości około 390 na osi Y.

Uzyskane wyniki pozwoliły na prostszą symulację procesu nagrzewania oblodzonego przewodu i zostały przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Wykres zależności współczynnika ciepła właściwego od temperatury układu przewód-lód



Rys. 3. Wykres zależności temperatury układu przewód-lód od czasu nagrzewania

Uwzględnienie otrzymanej zależności w obliczeniach dało możliwość uzyskania wykresu zależności temperatury przewodu od czasu nagrzewania lodu do temperatury bliskiej zeru bądź nieznacznie wyższej, po częściowym roztopieniu lodu wartość współczynnika ulega

zmniejszeniu do wartości jak dla miedzi. Tej zmianie współczynnika towarzyszy nagły wzrost temperatury przewodu i szybka likwidacja oblodzenia. Rysunek 3 przedstawia otrzymane wyniki.

Представленная методика нагревания проводов не требует отключения сети тяговой от источника питания, однако необходима смена в самой схеме питания в целях проведения процесса нагревания. Методика существенно сокращает время ликвидации осадка на проводах без необходимости использования локомотивов с тепловыми двигателями.

#### LITERATURA

1. Hudym V., Jagiełło A., Prusak J., Chrabaszcz I., Trębacz P., Kaczmarczyk A., *Metodyka usuwania oblodzenia z sieci trakcyjnej*, Kraków, 2015, Logistyka nr 6.

2. Г. И. Денисеикуб, Г. А. Генрих, Л. А. Никоненко, *Повышение надежности работы воздушных линий электропередачи за счет плавления льда на их проводах и тросах*, Доклад ГК СМ

СССР по науке и технике, Львов, 1969. (G. I. Denysenko, G.A. Henrich, L. A. Nikoniec, *Podwyższenie niezawodności pracy linii przesyłowych napowietrznych poprzez topienie oblodzenia na ich przewodach roboczych i odgromowych*, Referat Komitetu Państwowego Rady Ministrów ZSRR z nauki i techniki, Lwów, 1969).

3. Г. А. Генрих, М. А. Евшин, *Структурная математическая модель для исследования режимов работы УПГ на проводах ВЛ пульсирующим током с отключением линии*, Параграф 2.5 (G.A. Henrich, M. A. Jelszyn, *Model matematyczny strukturalny do badania stanu pracy Instalacji do Topienia Lodu na przewodach linii napowietrznych prądem pulsującym z odłączoną linią*, Paragraf 2.5)

4. Г. А. Генрих, В. Н. Стряпан, *Моделирование на ЭСВМ режимов работы преобразователя УПГ пульсирующим током*, Параграф 2.21 (G.A. Henrich, W. N. Striapan, *Modelowanie na elektronicznych obliczeniowych maszynach warunków pracy przekształtnika Instalacji do Topienia Lodu prądem pulsującym*, Paragraf 2.21)

Received 15.06.2016.

Internal reviewer Kuznetsov V.G.

External reviewer Andriienko P.D.

In winter, there is currently a problem in that the contact wires on ice can be formed, which may interfere with the normal operation of the rolling stock. In Poland, there was a case when the formation of deposits on the contact wires led to a long delay trains. When icing contact network operators bear the financial loss, the passengers have to change vehicles. The article presents a model of a contact network of heating, presented method significantly reduces the icing on the Elimination of contact network without the need for locomotives

**Keywords:** contact wire; power train; icing; model.

#### УДК 621.331.3

В. ГУДИМ (КП), А. ЯГЕЛЛО (КП), І. ХРАБОНІШЧ (КП), Я. ПРУСАК (КП), П. ТРЕНБАЧ (КП)

Краківська політехніка, факультет електротехніки та обчислювальної техніки, e-mail: [pejagiel@cyf-kr.edu.pl](mailto:pejagiel@cyf-kr.edu.pl), [jprusak@usk.pk.edu.pl](mailto:jprusak@usk.pk.edu.pl), [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net)

### ЕЛЕКТРИЧНІ І ТЕПЛОВІ УМОВИ ЛІКВІДАЦІЇ ОБМЕРЗАННЯ НА ПРОВОДАХ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ

У зимовий період в даний час існує проблема, яка полягає в тому, що на контактних проводах може утворюватися обмерзання, яке може перешкодити нормальній роботі рухомого складу. У Польщі, був випадок, коли утворення відкладень на контактних проводах призвело до тривалої затримки поїздів. При обмерзаннях контактної мережі оператори несуть фінансові втрати, пасажери змушені пересідати на інші транспортні засоби. У статті представлена модель нагрівання контактної мережі, Представлений метод значно скорочує час ліквідації обледеніння на контактній мережі без необхідності використання тепловозів.

**Ключові слова:** контактний провід; тягова мережа; обмерзання; модель.

Внутрішній рецензент Кузнецов В.Г.

Зовнішній рецензент Андрієнко П.Д.

УДК 621.331.3

В. ГУДИМ (КП) А. ЯГЕЛЛО (КП), И. ХРАБОНШЧ (КП), Я. ПРУСАК (КП), П. ТРЕНБАЧ (КП)

Краковская политехника, факультет электротехники и вычислительной техники, e-mail: [pejagiel@cyf-kr.edu.pl](mailto:pejagiel@cyf-kr.edu.pl), [jprusak@usk.pk.edu.pl](mailto:jprusak@usk.pk.edu.pl), [gudymvi@ukr.net](mailto:gudymvi@ukr.net)

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ УСЛОВИЯ ЛИКВИДАЦИИ ОБЛЕДЕНЕНИЯ НА ПРОВОДАХ ТЯГОВОЙ СЕТИ

В зимний период в настоящее время существует проблема, заключающаяся в том, что на контактных проводах может образовываться обледенение, которое может помешать нормальной работе подвижного состава. В Польше, был случай, когда образование отложений на контактных проводах привело к длительной задержке поездов. При обледенениях контактной сети операторы несут финансовые потери, пассажиры вынуждены пересаживаться на другие транспортные средства. В статье представлена модель нагревания контактной сети, Представленный метод значительно сокращает время ликвидации обледенения на контактной сети без необходимости использования тепловозов.

**Ключевые слова:** контактный провод; тяговая сеть; обледенение; модель.

Внутренний рецензент *Кузнецов В.Г.*

Внешний рецензент *Андрієнко П.Д.*

Ю. Л. САЕНКО (ПГТУ), В. В. ЛЮБАРЦЕВ (ПГТУ)

Приазовский государственный технический университет, кафедра электрификации промышленных предприятий, Украина, 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7, тел.: (0629) 44-65-51, тел.: +38(097)778-30-18, эл. почта: [ysayenko@gmail.com](mailto:ysayenko@gmail.com), [lubartsevvadim@gmail.com](mailto:lubartsevvadim@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](https://orcid.org/0000-0001-9729-4700), [orcid.org/0000-0003-1243-9101](https://orcid.org/0000-0003-1243-9101)

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАЗВЕТВЛЁННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

### Постановка проблемы

Вопрос эффективного использования электроэнергии на фоне резкого роста ее стоимости становится как никогда актуальным. Немаловажным фактором, требующим снижения потребления электроэнергии, являются выработавшие свой ресурс электрические сети, которые с трудом переносят возросшие нагрузки и требующие модернизации. Оптимизация режима потребления электроэнергии повлечет за собой снижение себестоимости продукции, сохранение конкурентоспособности предприятий.

Одним из вариантов выхода из сложившейся ситуации является уменьшение потерь и увеличение пропускной способности электрических сетей. Решение этой задачи связано, прежде всего, с оптимизацией производственного процесса:

- разнесение во времени нагрузок наиболее мощных электроприёмников для снижения пиковых нагрузок, и как следствие, снижение тока и потерь мощности в сети;
- ограничение холостой работы электроприёмников;
- снижение потребления электроэнергии на собственные нужды;
- работа в ночные смены, когда снижается суммарная нагрузка на электросети и т.д.

В результате выполнения вышеперечисленных мероприятий происходит выравнивание графика нагрузки, снижение потерь мощности в электрических сетях.

### Анализ последних исследований и публикаций

Потери активной мощности, возникающие в элементе электрической сети (кабельной или воздушной линии, трансформаторе и т.д.), зависят не только от величины протекающей активной мощности  $P$ , но и от реактивной  $Q$ :

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_H^2} r. \quad (1)$$

Поэтому важным направлением снижения потерь активной мощности и энергии является компенсация реактивной мощности.

Для решения задачи оптимизации режима электрической сети и уменьшения потерь необходимо знать распределение потоков мощности в ветвях сети. В связи с работой большого числа электроприемников, изменениями конфигурации электрической сети потоки мощности представляют собой случайные процессы, и, как следствие, определение потокораспределения представляет собой достаточно сложную задачу особенно в случае разветвлённых, кольцевых сетей.

Одним из наиболее распространённых методов, позволяющим рассчитать потери в электрической сети является метод эквивалентных сопротивлений [1]. В соответствии с этим методом необходимо найти эквивалентное сопротивление некоторой условной неразветвленной цепи, ток в которой равен току на головном участке сети, и потери равны потерям в сети. При этом принимается допущение, что при изменении тока на головном участке величины токов и на всех остальных участках сети изменяются пропорционально. Однако стоит отметить, что данный метод оценки потерь является весьма приблизительным, и не позволяет с высокой точностью определять потокораспределение в электрической сети современных промышленных предприятий, особенно при наличии резкопеременных нагрузок, различных факторов, влияющих на технологический процесс.

### Цель исследования

Разработка методов оптимизации режима реактивной мощности в сложной разветвлённой

ной сети (на примере ГПП) с экономической точки зрения.

### Основные материалы исследования

В настоящее время появилось довольно большое количество современных средств, позволяющих решить представленную выше проблему. Их появление в первую очередь связано с развитием вычислительной цифровой техники, большим количеством специализированных программных средств, исследованиями в области искусственного интеллекта. Одним из наиболее прогрессивных и точных методов решения поставленной задачи являются нейронные сети[2].

Рассмотрим применение нейронных сетей для решения задачи расчета и снижения потерь на примере участка электрической сети, приведенной на рис. 1.

Рассматриваемая электрическая сеть содержит как радиальные ветви, так и кольцевой участок с шестью подстанциями, получающий питание от двух секций шин ГПП 10 кВ.

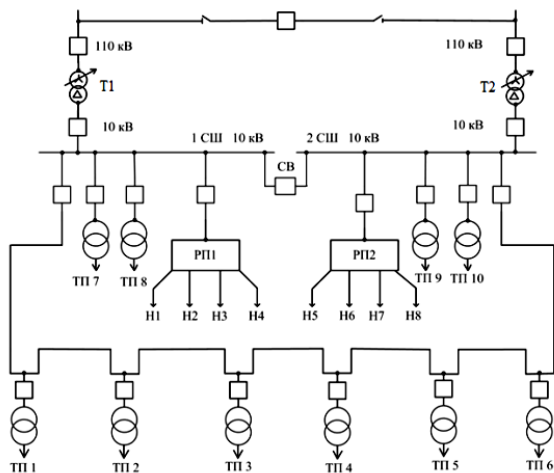


Рис. 1. Электрическая схема моделируемой сети

В качестве средства моделирования предлагается использовать программный комплекс Simulink пакета MATLAB.

При моделировании режима работы электрической сети активные и реактивные нагрузки потребителей задаются независимыми случайными процессами с нормальным законом распределения и экспоненциально-косинусными корреляционными функциями [3].

Параметры случайных процессов изменения нагрузок потребителей задавались максимально приближенными к параметрам работы внутризаводских электрических сетей. Результат моделирования электрических нагрузок приведен на рис.2.

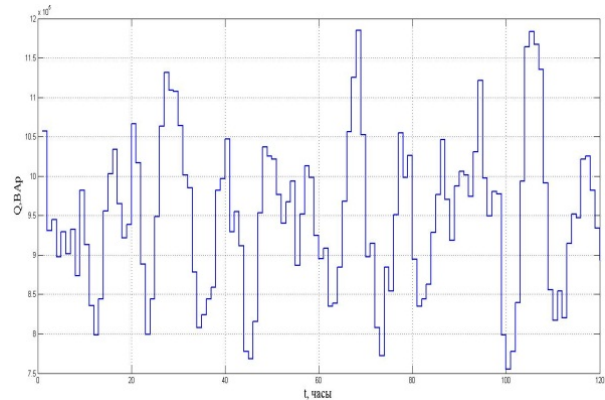


Рис. 2. Пример моделирования графиков реактивной мощности

Одним из наиболее точных и экономически эффективных методов прогнозирования электрических нагрузок являются нейронные сети. Несмотря на некоторые недостатки (сложность настройки, большая выборка данных для тренировки сети) нейронные сети обладают неоспоримым преимуществом – при тренировке они «учатся» воссоздавать очень сложные зависимости с учётом многих факторов, что в итоге даёт преимущество по сравнению с традиционными методами прогнозирования [4,5]. Схема нейронной сети с обратным распространением ошибки, изображенная на рис.3, является одной из наиболее эффективных.

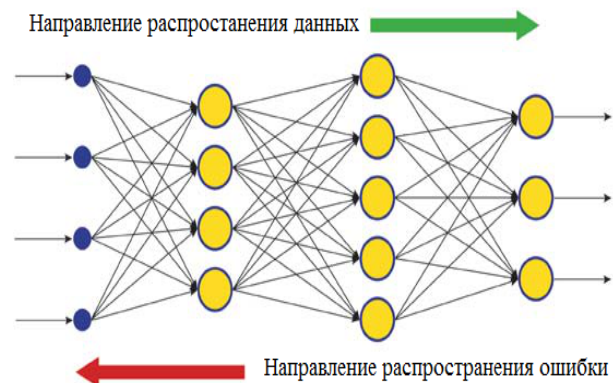


Рис. 3. Обобщенная схема нейронной сети с обратным распространением ошибки

Оптимизация режима реактивной мощности в моделируемой сети осуществляется при помощи компенсирующих устройств, режим работы которых определяется по результатам прогнозирования реактивных нагрузок.

Для прогнозирования была разработана нейронная сеть с обратным распространением ошибки. Нейронная сеть содержит 7 нейронов, функция обучения осуществляется при помощи алгоритма Levenberg-Marquardt back-propagation. Упрощенная схема созданной сети представлена на рис.4.

Рассматриваемая нейронная сеть показывает достаточную эффективность только при достаточном количестве исходных данных об электрических нагрузках отходящих присоединений, которые можно получить только на ГПП. Процессы изменения нагрузки на каждом из ответвлений кольцевого участка сети, как правило, неизвестны. Для решения поставленной задачи в этих условиях возникла необходимость создания нейронной сети, позволяющей произвести прогноз электрических нагрузок, при дефиците исходной информации. Одним из вариантов получения данных для тренировки нейронной сети является измерение нагрузок на рассматриваемых присоединениях с дискретностью в 1 час в течение нескольких дней, с одновременным занесением данных о средних нагрузках. Далее для прогнозирования в нейронную сеть заносятся только данные по средним нагрузкам за предыдущий период.

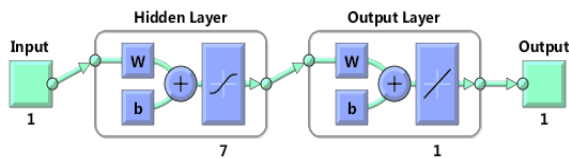


Рис. 4. Структура сети для прогнозирования электрических нагрузок

На рис. 5 представлен результат прогнозирования, полученный с помощью данной нейронной сети.

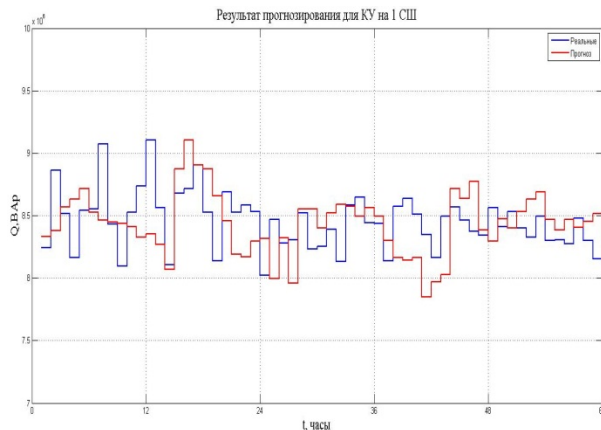


Рис. 5. Прогнозирование реактивной мощности при помощи нейронной сети

В результате была создана нейронная сеть с обратным распространением ошибки, имеющая два входа, два нейрона в скрытом слое и один выход. Метод тренировки сети – алгоритм, Bayesian regulation backpropagation (рис. 6).

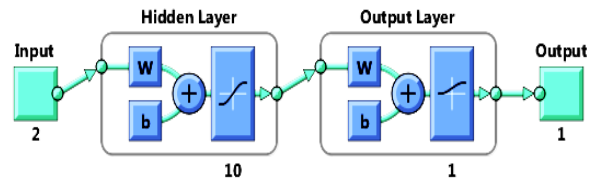


Рис. 6. Структура сети для прогнозирования нагрузок кольцевых распределительных сетей

Для достижения цели снижения затрат, вызванных протеканием реактивной мощности по сети, нельзя определить оптимальные мощности КУ, рассматривая каждый узел отдельно. Установка КУ в одном узле изменяет показатели эффективности установки КУ в других узлах. Особенно это касается сложных сетей, где увеличение мощности КУ в одной точке может привести к увеличению перетоков мощности по другим участкам до такой величины, что увеличившиеся потери могут свести к минимуму экономический эффект от установки КУ.

Приведенные затраты, связанные с передачей, компенсацией и платой за реактивную мощность рассчитываются следующим образом:

$$Z_{\Pi} = Z_{\Pi} + Z_{\text{КУ}} + Z_{\text{опл}}, \quad (2)$$

где  $Z_{\Pi}$  – затраты связанные с передачей реактивной мощности;

$Z_{\text{КУ}}$  – затраты на компенсацию;

$Z_{\text{опл}}$  – затраты связанные с оплатой за перетоки реактивной мощности.

Для решения такой задачи используются градиентные методы оптимизации, использующие итерационные алгоритмы постепенного приближения к оптимальному решению [6].

Суть применения данного метода к решаемой задаче заключается в следующем. При получении прогноза потребления реактивной нагрузки на следующий интервал времени производится моделирование работы сети с прогнозными значениями мощностей компенсирующих устройств. Затем мощность компенсации каждого из КУ меняется в некотором диапазоне значений (от 0,8 до 1,3 прогнозируемой необходимой мощности КУ) и при этом производится оценка затрат, связанных с реактивной мощностью. Значение оптимальной мощности КУ соответствует минимальным затратам в моделируемой сети. Данный подход позволяет учесть при помощи средств Simulink все составляющие приведенных затрат, приведенных в выражении (2), и создать в электрической сети оптимальный режим реактивной мощности с экономической точки зрения.

Для сравнения экономического эффекта при внедрении современных методов оптимизации режима реактивной мощности произведено моделирование работы электрической сети в трех случаях:

1) Работа без КУ. Моделирование данной сети необходимо в первую очередь как основа для сравнения эффективности разработанных методов оптимизации. Помимо этого данная ситуация возможна для городских подстанций, многие из которых не имеют компенсирующих устройств.

2) Моделирование сети с КУ, установленными на ГПП. При установке КУ на шинах 10 кВ ГПП прогнозирование мощностей КУ происходит по алгоритму, предполагающему полные данные для прогноза и дальнейшей компенсации реактивной мощности.

3) Моделирование сети с КУ, установленными на ГПП и подстанциях, подключенных к кольцевой распределительной сети. Установка КУ только на головных участках позволяет улучшить режим реактивной мощности в сети, при этом снизив финансовые затраты, обусловленные перетоками реактивной мощности. Но во многих случаях этого может оказаться недостаточно, т.к. даже при достижении приемлемого коэффициента мощности в точке разграничения балансовой принадлежности перетоки реактивной мощности на кольцевом участке сети могут вызвать увеличение затрат из-за потерь электроэнергии. По этой причине целесообразно устанавливать КУ в различных точках кольцевого участка сети.

Для решения этой проблемы была разработана и создана нейронная сеть, способная прогнозировать электрические нагрузки при неполных данных.

Также возникает необходимость выбора точки установки КУ в оптимальных с экономической точки зрения местах. Для этого были проработаны все возможные варианты и выбран оптимальный для снижения затрат.

Для оценки эффективности разработанных методов оптимизации режимов реактивной мощности в таблице 1 приведены затраты при

различном размещении компенсирующих устройств.

Таблица 1

**Сравнение эффективности применения разработанных методов оптимизации за 12 часов**

Место установки КУ	Стоимость потерь активной энергии, грн	Стоимость реактивной энергии, грн	Сумма, грн
БЕЗ КУ	11075	16902	27977
ГПП	11513	189	11702
ГПП и в кольце	9639	263	9902

Следует отметить, что при установке КУ на кольцевом участке сети необходимо учитывать следующие факторы:

- более сложный и иногда неосуществимый с технической точки зрения постоянный учёт потребления электроэнергии для каждого из потребителей;
- влияние на величину затрат места расположения КУ в кольце.

## Выводы

1. Разработаны методы оптимизации режима реактивной мощности промышленных предприятий с точки зрения снижения затрат, основанные на современных методах машинного обучения и применения нейронных сетей.

2. Эффективность предложенных методов проверена на модели электрической сети с радиальными и кольцевыми участками. Внедрение данных методов оптимизации режима реактивной мощности позволяет получить экономический эффект 1,3 млн. грн. в год для моделируемой сети.

3. Разработанные методы прогнозирования и оптимизации наиболее эффективны при прогнозировании динамично изменяющихся нагрузок, что характерно для современных подстанций. Предложенный подход позволяет значительно уменьшить ошибку прогнозирования в сравнении с традиционными методами.

## REFERENCES

1. Федоров А.А., Основы электроснабжения промышленных предприятий / А.А. Федоров, В.В. Каменева// Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.  
2. Медведев В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. – 630 с.  
3. Жежеленко И.В. Методы вероятностного

1. Fedorov A.A., Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Fundamentals of power industry]. Moscow, Energiya, 1979. 408p.  
2. Medvedev V.S. Neyronnye seti MATLAB 6 [Neural networks MATLAB 6]. Moscow, DIALOG-MIFI, 2001. 630 p.  
3. Zhezhelanko I.V. Metody veroyatnostnogo modelirovaniya v raschetakh kharakteristik elektrich-

моделирования в расчётах характеристик электрических нагрузок потребителей / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, В.П. Степанов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 128 с.

4. Саенко Ю.Л. Анализ методов прогнозирования реактивных нагрузок промышленных предприятий / Ю.Л. Саенко, В.В. Любарцев // Вестник Приазовского государственного технического университета: сб. науч. трудов. Вып. 30. Т. 2. – Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ». – (Технические науки). – 2015г. – с.129 – 137.

5. Саенко Ю.Л., Любарцев В.В. Прогнозирование электрических нагрузок с помощью нейронных сетей/ Ю.Л. Саенко, В.В. Любарцев // Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО – 2015»: Материалы VIII Научно – практической конференции (Одесса, 29.09 – 2.10.2015 г.) – Д.:ДНУЖТ, 2015. – с. 80 – 81.

6. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

eskih nagruzok potrebiteley [ Probabilistic simulation methods in the calculation of the characteristics of electrical loads consumer] . – М.: Energoatomizdat, 1990. 128 p.

4. Sayenko Yu.L., Lyubartsev V.V. Analiz metodov prognozirovaniya reaktivnykh nagruzok promyshlennykh predpriyatiy [An analysis of forecasting methods of reactive loads of industrial enterprises] Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: sb. nauk. trudov. Vyp. 30. T. 2. Mariupol': «PSTU». (Tekhnicheskie nauki). 2015. pp.129 – 137.

5. Sayenko Yu.L., Lyubartsev V.V. Prognozirovaniye elektricheskikh nagruzok s pomoshch'yu neyronnykh setey [Prediction of electrical loads using neural networks] Elektrifikatsiya transporta «TRANSELEKTRO – 2015»: Materialy VIII Nauchno – prakticheskoy konferentsii (Odessa, 29.09 – 2.10.2015 .) – D.:DNUZhT, 2015. pp. 80 – 81.

6. Zhelezko Yu.S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Electricity losses. Reactive power. Power Quality: Guidelines for practical calculations]. – М.: ENAS, 2009. 456 p.

Поступила в печать 13.12.2016.

Внутренний рецензент *Сыченко В.Г.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

Повышение цен на электроэнергию, а также плохое состояние электрических сетей вынуждает разрабатывать и внедрять современные методы, позволяющие снизить потребление электроэнергии, а также снизить потери в электросети. Решение этой задачи связано, прежде всего, с оптимизацией производственного процесса: разнесение во времени нагрузок наиболее мощных электроприёмников, ограничение их холостой работы, снижение потребления на собственные нужды, использование оборудования с более высоким КПД а также оптимизация режима реактивной мощности. В настоящее время на многих предприятиях установлены компенсирующие устройства, которые используются с целью снижения коэффициента реактивной мощности в точке балансовой принадлежности до экономического уровня, установленного энергосистемой. Однако при этом не учитывается, что в сложной сети перетоки мощности при неоптимальном размещении компенсирующих устройств и неправильном выборе их мощности могут достигать больших величин, что вызывает увеличение потерь в сети. Разработана программа, реализующая алгоритмы прогнозирования с помощью нейронных сетей на основе как полных, так и не полных данных о величинах электрических нагрузок, а также дальнейшей оптимизации режима реактивной мощности. Также проанализировано влияние места размещения КУ в распределительной сети потребителей на величину затрат. В итоге было достигнуто существенное снижение величины оплаты за реактивную мощность, а также за потери активной энергии в элементах электрической сети.

**Ключевые слова:** оптимизация; нейронные сети; моделирование; реактивная мощность.

УДК 621.31

Ю. Л. САЕНКО (ПГТУ), В.В. ЛЮБАРЦЕВ (ПГТУ)

Приазовський державний технічний університет, кафедра електрифікації промислових підприємств, Україна, 87500, г. Маріуполь, вул. Університетська, 7, тел.: (0629) 44-65-51, тел.: +38(097)778-30-18, ел. пошта: [ysayenko@gmail.com](mailto:ysayenko@gmail.com), [lyubartsevadim@gmail.com](mailto:lyubartsevadim@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](https://orcid.org/0000-0001-9729-4700), [orcid.org/0000-0003-1243-9101](https://orcid.org/0000-0003-1243-9101)

## ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМУ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У РОЗГАЛУЖЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Підвищення цін на електроенергію, а також поганий стан електричних мереж змушує розробляти і впроваджувати сучасні методи, що дозволяють знизити споживання електроенергії, а також знизити втрати в електромережі. Вирішення цього завдання пов'язане, перш за все, з оптимізацією виробничого процесу: рознесення в часі навантажень найбільш потужних електроприймачів, обмеження їх холостий роботи, зниження споживання на власні потреби, використання обладнання з більш високим ККД а також оптимізація режиму реактивної потужності. В даний час на багатьох підприємствах встановлені пристрої, що

компенсують, які використовуються з метою зниження коефіцієнта реактивної потужності в точці балансової належності до економічного рівня, встановленого енергосистемою. Однак при цьому не враховується, що в складній мережі перетоки потужності при неоптимальному розміщенні пристроїв, що компенсують і неправильному виборі їх потужності можуть досягати великих величин, що викликає збільшення втрат в мережі. Розроблено програму, що реалізує алгоритми прогнозування за допомогою нейронних мереж на основі як повних, так і не повних даних про величини електричних навантажень, а також подальшої оптимізації режиму реактивної потужності. Також проаналізовано вплив місця розміщення КУ в розподільній мережі споживачів на величину витрат. В результаті було досягнуто суттєве зниження величини оплати за реактивну потужність, а також за втрати активної енергії в елементах електричної мережі

**Ключові слова:** оптимізація; нейронні мережі; моделювання; реактивна потужність.

Внутрішній рецензент *Сиченко В.Г.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

**UDC 621.31**

**Yu.SAYENKO (PSTU), V. LIUBARTSEV (PSTU)**

Pryazovskyi State Technical University, Department of Industrial Electrical Power Supply, Ukraine, 87500, Mariupol, 7 Universytets'ka, tel.: (0629)-44-65-51, tel.: (0629)-44-65-51, e-mail: [ysayenko@gmail.ru](mailto:ysayenko@gmail.ru), [liubartsevvadim@gmail.com](mailto:liubartsevvadim@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9729-4700](http://orcid.org/0000-0001-9729-4700), [orcid.org/0000-0003-1243-9101](http://orcid.org/0000-0003-1243-9101)

## **APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR OPTIMIZATION MODE REACTIVE POWER IN AN EXTENSIVE ELECTRIC NETWORK**

Increase prices for electricity as well as the poor state of electrical networks force to develop and implement modern methods to reduce power consumption, as well as reduce losses in the power supply. The solution of this problem is primarily due to the optimization of the production process: separation of the most powerful power consumers, limiting their idling, reducing consumption for its own needs, using equipment with higher efficiency and optimization of reactive power mode. Compensating devices are installed today at many enterprises, which are used to reduce reactive power factor to the economic level in the point of common couple. However, it is not considered that the power flows in the complex network with non-optimal placement of the compensating devices and incorrect installation of the power compensation can reach high values, which causes an increase of losses in the network. Program implementing the prediction algorithms has been created with the help of neural networks based on both full and uncomplete data on the values of the electrical loads, as well as further optimization of reactive power mode. The influence of placement of compensating devices in the distributive network on the cost also analyzed. It was finally achieved a significant reduction in the amount of payment for reactive power flows, as well as the loss of active energy in the elements of electrical network.

**Keywords:** optimization; neural network modeling; reactive power.

Internal reviewer *Sychenko V.G.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

В.Г. СИЧЕНКО, Є.М. КОСАРЕВ, П.В. ГУБСЬКИЙ, А.В. РОГОЗА (ДНУЗТ)

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, 49010 м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: [elpostz@i.ua](mailto:elpostz@i.ua), [kosarev@e.diiit.edu.ua](mailto:kosarev@e.diiit.edu.ua), [peter.qybskiy@gmail.com](mailto:peter.qybskiy@gmail.com), [redyfox@yandex.ru](mailto:redyfox@yandex.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-9533-2897](http://orcid.org/0000-0002-9533-2897), [orcid.org/0000-0003-3574-7414](http://orcid.org/0000-0003-3574-7414), [orcid.org/0000-0002-0216-7256](http://orcid.org/0000-0002-0216-7256)

## ОЦІНКА ДОДАТКОВИХ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ У СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШВИДКІСНОГО РУХУ

### Вступ

Відомо, що впровадження швидкісного руху потребує модернізації системи тягового електропостачання, оскільки висуваються більш жорсткі вимоги до режиму напруги в тяговій мережі та значно зростають тягові потужності. Завдання підвищення енергетичної ефективності електрифікованих ліній в умовах реформування залізничного транспорту є однією з найважливіших проблем. Прагнення забезпечити конкурентоспроможність перевізного процесу потребує збільшення швидкості руху пасажирських поїздів до 250-300 км/год, формування великовагових потягів, організації пакетного графіку руху без зниження рівня безпеки при високих показниках якості споживаної електроенергії і безумовному виконанні графіку руху потягів.

Найбільш серйозні проблеми виникають при організації швидкісного та великовагового руху на ділянках постійного струму. Досвід показав, що швидкісний рух характеризується різкозмінним імпульсним електроспоживанням. Збільшення об'єму перевезень та організація руху швидкісних та високошвидкісних поїздів призводить до того, що пристрої тягового електропостачання обмежують пропускну спроможність ділянки електрифікованої залізниці внаслідок зниження напруги на струмоприймачі електрорухомого складу нижче нормованих значень. Удосконалення режиму напруги в тяговій мережі застосовуваними нині засобами, як було показано [1], не вирішує існуючу проблему повною мірою, через збільшення техно-

логічних втрат потужності на міжпідстанційній зоні та відповідних експлуатаційних витрат.

У цих умовах традиційні способи підсилення (будівництво додаткових тягових підстанцій, пунктів паралельного з'єднання та ін.) виявляються малоефективними і неекономічними. В той же час, використання встановленої на тягових підстанціях потужності у більшості випадків не перевищує 30-40%.

### Постановка задачі дослідження

Існуючі системи електропостачання електрорухомого складу, які мають значну встановлену потужність тягових підстанцій, не дозволяють забезпечити потрібний рівень питомої потужності тягової мережі в межах 1,5 – 2 МВт/км. Використання застосовуваних останнім часом засобів підсилення в багатьох випадках не забезпечує необхідних енергетичних показників і є досить дорогими. Перелічені фактори створюють передумови до заміни централізованої системи тягового електропостачання децентралізованою.

Принципи побудови цих систем були сформульовані проф. Марквардтом К. Г. ще в середині минулого століття. Економічний ефект досягається за рахунок зменшення перерізу проводів 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 передбачає перехід до нової схемотехніки тягової мережі (рис. 1).

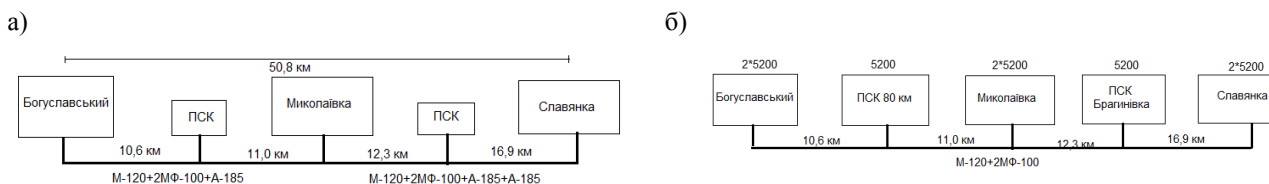


Рис. 1. Схема заміщення ділянки: а) при централізованому живленні; б) при розподіленому живленні

При проведенні порівняльних оціночних розрахунків систем живлення приймалися наступні припущення: електровози споживають постійний і незмінний за величиною струм, поїзди рухаються рівномірно із постійною встановленою швидкістю 160 км/год, не враховується час на розгін та гальмування, загальний час ходу всіх поїздів розрахунковою зоною становить 15 хв, напруга на шинах тягових підстанцій є сталою та незмінною за величиною у часі, внутрішні опори тягових підстанцій приймаються рівними. Результати порівняльного розрахунку наведених схем показують, що втрати електроенергії при реалізації заданого графіку руху поїздів при застосуванні схеми розподіленого живлення склали 104,21 кВт·год, що на 35,9 % менше від втрат електроенергії при централізованому живленні.

Необхідно вказати, що окрім втрат електричної енергії, величина яких має значний вплив на техніко-економічні показники мережі, оскільки вартість втрат енергії включається в розрахункову вартість (приведені затрати) та собівартість (річні експлуатаційні затрати) передачі електричної енергії ефективність транспорту електричної енергії визначається також і якістю електричної енергії в тяговій мережі.

В результаті процесів споживання електричної енергії та резонансів в тяговій мережі зростають струми та напруги вищих гармонік. Тому, при розрахунку режимів функціонування тягової мережі, необхідно враховувати амплітудно-частотні характеристики реактивного і активного опору елементів. Не менш важливим фактором є величина навантаження. Розрахунок амплітудно-частотних характеристик суттєво ускладнюється необхідністю врахування розподіленості параметрів ліній тягового електропостачання [2].

**Метою цієї роботи є** розробка одного з методологічних підходів при проведенні порівняльного аналізу різних типів схем живлення тягової мережі з урахуванням параметрів ліній живлення, що дозволяє більш точно враховувати втрати потужності в тяговій мережі.

### Методика розрахунку

Розрахунок централізованої та розподіленої систем тягового електропостачання постійного струму проводився на імітаційній моделі згідно методики розрахунку миттєвих схем [3].

1. *Централізоване живлення: Розрахунок за середнім значенням струму ЕРС*

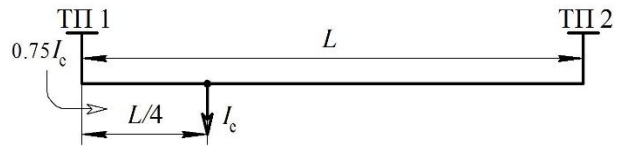


Рис. 2. Розрахункова ділянка

**Розрахункові умови:** Схема живлення – двостороння, довжина міжпідстанційної зони  $L=20$  км, ЕРС знаходиться на відстані  $x=5$  км від ТП 1, потужність тягових підстанцій  $P=25$  МВт, внутрішній опір тягової підстанції  $\rho=0,036$  Ом, тягова мережа М120+2МФ100+А185+Р65, струм, споживаний ЕРС за період (рис. 3), середній струм ЕРС за період  $I_e=1954,55$  А.

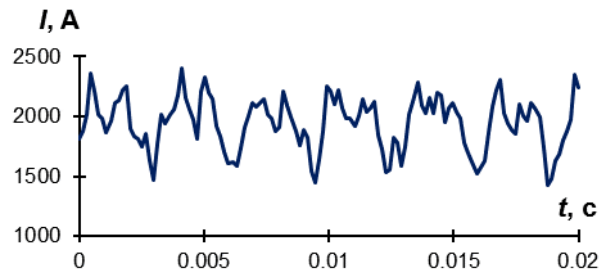


Рис. 3. Осцилограма струму ЕРС

Розрахунок внутрішнього опору тягових підстанцій проводився відповідно до [3] та за умови, що на кожній з тягових підстанцій розташовано 2 перетворювальні агрегати з дванадцятипульсовою схемою випрямлення, один з яких знаходиться в роботі.

Відповідно до рис. 2, струм фідера тягової підстанції ТП 1 буде становити:

$$I_{\phi 1} = 0,75 \cdot I_e. \quad (1)$$

Тоді, миттєві втрати потужності будуть:

$$\Delta P = 0,75 \cdot I_e^2 \cdot r_0 \cdot \frac{L}{4}. \quad (2)$$

2. *Розподілене живлення: Розрахунок за середнім значенням струму ЕРС*

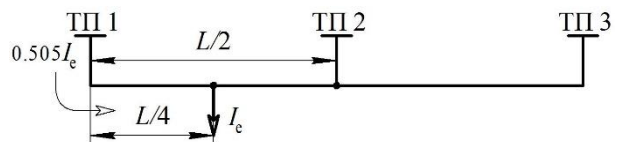


Рис. 4. Розрахункова ділянка

**Розрахункові умови:** Схема живлення – двостороння, довжина міжпідстанційної зони  $L/2=10$  км, ЕРС знаходиться на відстані  $x=5$  км від ТП 1, потужність тягових підстанцій  $P=6$  МВт, внутрішній опір тягової підстанції  $\rho=0,054$  Ом, тягова мережа

M120+2МФ100+A185+P65, струм, споживаний ЕРС за період (рис. 3), середній струм ЕРС за період  $I_e=1945,55$  А.

Розрахунок внутрішнього опору тягових підстанцій проводився відповідно до [3] та за умови, що на кожній з тягових підстанцій розташовано по одному перетворювальному агрегату з дванадцятипульсною схемою випрямлення.

Відповідно до рис. 4, струм фідера тягової підстанції ТП 1 буде становити:

$$I_{\phi 1} = 0,505 \cdot I_e. \quad (1)$$

Тоді, миттєві втрати потужності будуть:

$$\Delta P = 0,505 \cdot I_e^2 \cdot r_0 \cdot \frac{L}{4}. \quad (2)$$

### 3. Централізоване живлення: Розрахунок з урахуванням втрат від ВГ

Визначення зміни опору в заданому діапазоні частот виконувалось за допомогою імітаційної моделі [2], побудованої на основі схеми заміщення довгих ліній. В результаті моделювання отримано зміну опору розрахункової ділянки в заданому діапазоні частот рис. 5.

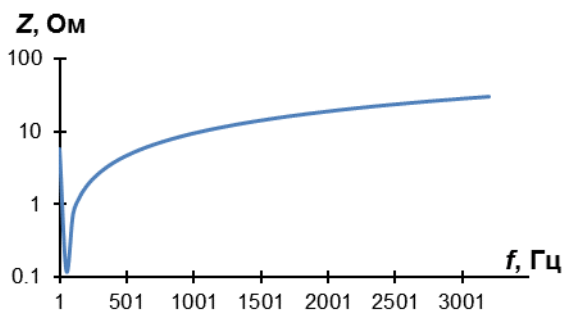


Рис. 5. АЧХ централізованої СТЕ

Спектральний склад струму, отриманий шляхом розкладання в ряд Фур'є струму ЕРС та зображений на рис. 6 (спектр показаний без постійної складової).

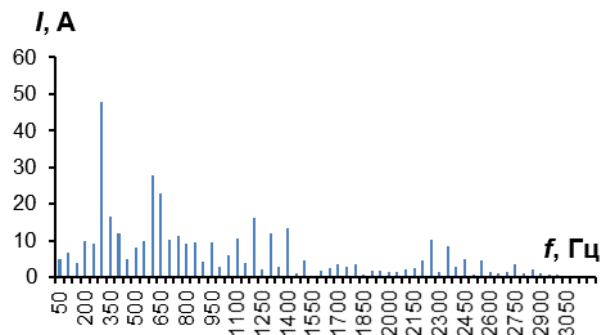


Рис. 6. Спектральний склад струму ЕРС

Втрати потужності з урахуванням оціночних втрат від вищих гармонік визначались за формулою [4]:

$$\Delta S = \sum_n^m I_n^2 \cdot Z_n, \quad (1)$$

де  $I_n$  – значення струму  $n$ -ї гармоніки, А;

$Z_n$  – значення опору на частоті  $n$ -ї гармоніки, Ом.

### 4. Розподілене живлення: Розрахунок з урахуванням втрат від ВГ

Розрахунок втрат потужності з урахуванням втрат від вищих гармонік проводився за аналогією розрахунку для централізованої системи. Відмінність полягала лише в імітаційній моделі, яка враховувала додаткову тягову підстанцію. Залежність опору розподіленої системи від частоти показано на рис. 7.

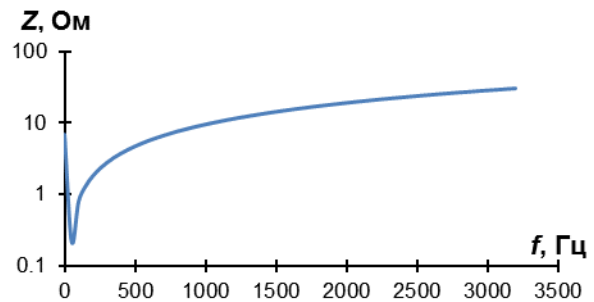


Рис. 7. АЧХ розподіленої СТЕ

### Результати розрахунку

Результати розрахунків приведені на рис. 8-9 та зведені в таблицю 1.

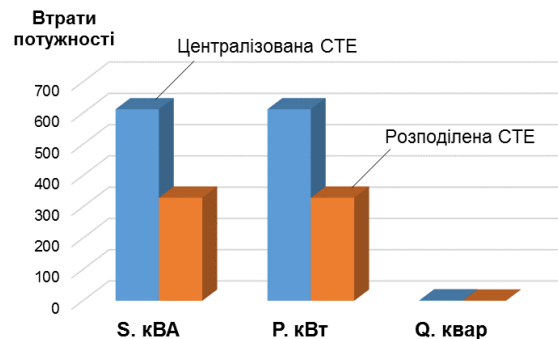


Рис. 8. Втрати потужності з урахуванням втрат від ВГ

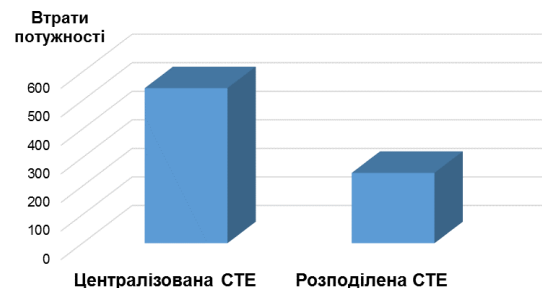


Рис. 9. Втрати потужності без урахування втрат від ВГ

Результати імітаційного моделювання порівняльного аналізу схем живлення

Найменування показника		Централізоване живлення		Розподілене живлення			
		без урахування вищих гармонік	з урахуванням вищих гармонік	без урахування вищих гармонік		з урахуванням вищих гармонік	
Середній струм ЕРС, А		1945,55	1945,55	1945,55		1945,55	
Середній струм фідера, А		1459,55	1459,55	982,5		982,5	
Середні втрати напруги, В		372,18	451,32	250,5		304,1	
Втрати потужності	кВА	542,93	$\Delta S$	612,11979	246,15	$\Delta S$	329,4787
	кВт		$\Delta P$	612,11968		$\Delta P$	329,4784
	квар		$\Delta Q$	1,102138		$\Delta Q$	0,5012
Частка втрат від вищих гармонік, %		—	0,18	—		0,15	

### Висновки

Рівень енергоспоживання та ощадливе використання електричної енергії на сьогоднішній день є одним з визначальних факторів при впровадженні швидкісного та великовагового руху на електрифікованих залізницях. Це потребує, нарівні з впровадженням нової техніки, розробки нових підходів до схемотехніки тягової мережі. Проведені попередні

оціночні розрахунки показують, що при застосуванні системи тягового електропостачання розподіленого типу втрати потужності та напруги в тяговій мережі значно менші (54,7 і 32,7%, відповідно) при значно меншій потужності тягових підстанцій. Це дає підставу для подальших досліджень з метою технічної реалізації системи розподіленого живлення на залізницях постійного струму.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аржанников, Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – 207 с.
2. Сиченко В.Г. Моделювання електромагнітних процесів у тяговій мережі постійного струму / Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна, Вип. 38 – 2011, - с. 73-76.
3. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.

Надійшла до друку 10.12.2016.

### REFERENCES

1. Arzhannykov, B. A. *Tyagovoe elektrosnabzhenye postoyannoho toka skorostnoho y tyazhelovesnoho dvizheniya poezdov* [Traction power supply DC high-speed and heavy train traffic]. Ekaterinburg, USURT Publ., 2012. 207 p.
2. Sychenko, V. G. *Modelyuvannya elektromagnetnykh protsesiv u tyahoviyi merezhi postynnoho strumu* [Simulation of Electro-Magnetic Process in the Idc Electric Traction Network] Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. ak. V. Lazaryana [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2011, no. 38, p. 73 – 76.
3. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Electricity electric-infected railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
4. Bessonov L. A. *Teoretycheskiye osnovy elektrotekhniky. Elektricheskiye tsepy* [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical circuits]. Moscow, Gardariki Publ., 2006. 701 p.

Внутрішній рецензент Кузнецов В.Г.

Зовнішній рецензент Андрієнко П.Д.

Впровадження швидкісного та великовагового руху на електрифікованих залізницях постійного струму висвітлює деякі протиріччя – при наявній надлишковій потужності тягових підстанцій в тяговій мережі не забезпечується необхідний рівень напруги та питомої потужності. Оскільки відомі існуючі способи підсилення недостатньо ефективні та й не отримали широкого впровадження в Україні, пропонується перехід до нової схемотехніки тягової мережі – розподіленого типу. В статті висвітлюється один з аспектів такого переходу – оцінка і порівняльний аналіз втрат потужності в порівнюваних системах централізованого та розподіленого типу з урахуванням втрат від вищих гармонійних складових.

**Ключові слова:** втрати потужності, система розподіленого живлення, тягова мережа, швидкісний рух.

УДК 621.331.3

В.Г. СЫЧЕНКО, Е.Н. КОСАРЕВ, П.В. ГУБСКИЙ, А.В. РОГОЗА (ДНУЖТ)

Кафедра «Интеллектуальные системы электроснабжения» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, 49010 г. Днепропетровськ, ул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: [elpostz@i.ua](mailto:elpostz@i.ua), [kosarev@e.diit.edu.ua](mailto:kosarev@e.diit.edu.ua), [peter.gybskiy@gmail.com](mailto:peter.gybskiy@gmail.com), [redyfox@yandex.ru](mailto:redyfox@yandex.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-9533-2897](http://orcid.org/0000-0002-9533-2897), [orcid.org/0000-0003-3574-7414](http://orcid.org/0000-0003-3574-7414), [orcid.org/0000-0002-0216-7256](http://orcid.org/0000-0002-0216-7256)

## ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

Внедрение скоростного и тяжеловесного движения на электрифицированных железных дорогах постоянного тока осветило некоторые противоречия – при имеющейся избыточной мощности тяговых подстанций и в тяговой сети не обеспечивается необходимый уровень напряжения и удельной мощности. Поскольку известные существующие способы усиления недостаточно эффективны и не получили широкого внедрения в Украине, предлагается переход к новой схемотехники тяговой сети – распределенного типа. В статье освещается один из аспектов такого перехода – оценка и сравнительный анализ потерь мощности в сравниваемых системах централизованного и распределенного типа с учетом потерь от высших гармонических составляющих.

**Ключевые слова:** потери мощности, система распределенного питания, тяговая сеть, скоростное движение.

Внутренний рецензент *Кузнецов В.Г.*

Внешний рецензент *Андриенко П.Д.*

UDC 621.331.3

V.G. SYCHENKO, YE.M. KOSARIEV, P.V. GUBSKIY, A.V. ROGOZA (DNURT)

Department " Intelligence electrification systems", Dnipropetrovsk national University of railway transport named after Acad. V. Lazaryan, 49010, Dnipropetrovsk, 2 Lazaryana str., tel. +38(056)373-15-25 e-mail: [elpostz@i.ua](mailto:elpostz@i.ua), [kosarev@e.diit.edu.ua](mailto:kosarev@e.diit.edu.ua), [peter.gybskiy@gmail.com](mailto:peter.gybskiy@gmail.com), [redyfox@yandex.ru](mailto:redyfox@yandex.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-9533-2897](http://orcid.org/0000-0002-9533-2897), [orcid.org/0000-0003-3574-7414](http://orcid.org/0000-0003-3574-7414), [orcid.org/0000-0002-0216-7256](http://orcid.org/0000-0002-0216-7256)

## EVALUATION OF ADDITIONAL POWER LOSSES IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF HIGH-SPEED TRAFFIC

The introduction of high-speed and heavy traffic on the electrified railway DC highlighted some contradictions in the existing excess capacity of traction substations and traction networks do not provide the necessary level of voltage and power density. Because there are existing ways of strengthening is not effective enough and not received wide implementation in Ukraine, we offer a transition to the new circuitry traction network – distributed type. The article highlights one aspect of this transition was to evaluate and compare Liny analysis of power losses to compare the centralized and the distributed type, taking into account losses from higher harmonics.

**Keywords:** power losses, distributed power, traction network, high-speed traffic.

Internal reviewer *Kuznetsov V.G.*

External reviewer *Andriienko P.D.*

В. О. ДЬЯКОВ<sup>1</sup> (ДНУЗТ), А. В. АНТОНОВ<sup>2</sup> (ДНУЗТ), С. Ю. МАЛИНКА<sup>3</sup> (ДНУЗТ)<sup>1,3</sup>Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 25<sup>2</sup>Каф. «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 25, ел. пошта [a.v.antonov91@gmail.com](mailto:a.v.antonov91@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-5701-6087](http://orcid.org/0000-0001-5701-6087)**ЗАХИСТ НЕЙТРАЛЬНИХ ВСТАВОК КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ВІД ПЕРЕПАЛІВ****Вступ**

При модернізації залізничного транспорту України, як і раніше, провідну роль грає електрифікація залізниць.

За станом на 01 січня 2016 року доля електричної тяги в експлуатаційній роботі залізничного транспорту України склала 91,5 %. Експлуатаційна довжина електрифікованих залізниць склала 9403 км, що відповідає 48 % загальної протяжності залізниць України. На сьогодні, Україна займає 10 місце в світі за протяжністю електрифікованих залізниць.

Перша електрифікована ділянка магістральних залізниць на території сучасної України була запущена в експлуатацію 5 листопада 1935 року (ділянка Долгінцево – Запоріжжя). В перші роки електрифікація залізниць проводилась на постійному струмі. Електрифікація на змінному струмі почалась на початку 60-х років минулого століття. На сьогодні, електрифікація залізниць на теренах України відбувається, як і в усьому світі, переважно на змінному струмі. На 01 січня 2016 року розгорнута довжина контактної мережі змінного струму становила 14384 км, а постійного струму – 11018 км.

**Мета**

Метою даної статті є аналіз причин перепалів проводів контактної мережі на нейтральних вставках.

**Актуальність**

Актуальність даної роботи обумовлена тим, що при перепалах проводів контактних підвісок на нейтральних вставках відбувається розрегулювання контактної мережі на суміжних анкерних ділянках. Крім того, при перепалах та обриві проводів контактної підвіски відбувається пошкодження струмоприймачів та іншого дахового обладнання електрорухомого складу (ЕРС), що призводить до значних витрат часу на відновлення та тривалих затримок поїздів.

**Методика**

Особливістю системи електропостачання однофазного змінного струму є те, що електрична енергія в контактну мережу поступає від двох фаз (наприклад А та В), а повертається на тягову підстанцію по рейковій мережі до фази С. В зв'язку з цим, біля тягових підстанцій для електричного розділення суміжних секцій, які отримують живлення від різних фаз, монтують два ізолюючих спряження з нейтральною вставкою (рис. 1) для попередження міжфазного короткого замикання через полоз струмоприймача, який проходить по ізолюючому спряженні.

Нейтральні вставки використовують також при електричному розділенні ділянок контактної мережі, які отримують живлення напругою різного роду струму (наприклад, ділянки Харків – Купянськ, Харків – Полтава та інші).

Довжина нейтральної вставки повинна бути більшою ніж відстань між крайніми струмоприймачами ЕРС. Для виключення перепалів контактних проводів ЕРС під нейтральною вставкою проходить по інерції (на вибізі), нейтральна вставка повинна бути обладнана сигнальними знаками (рис. 2).

Конструкція та місце розташування нейтральної вставки повинні забезпечувати безупинний прохід ЕРС при швидкості проходу сигнального знаку «відключити струм», який огорожує нейтральну вставку, не менше 20 км/год.

Для попередження перепалів контактних проводів на нейтральній вставці, в місці де відбувається відрив струмоприймача від контактного проводу, який йде на анкерування, монтують дугостійку конструкцію. На ділянках швидкісного руху поїздів (160-200 км/год) нейтральні вставки в місцях розділення фаз чи стикування електротяги постійного та змінного струму повинні бути обладнані пристроями для автоматичного відключення тягового струму ЕРС.

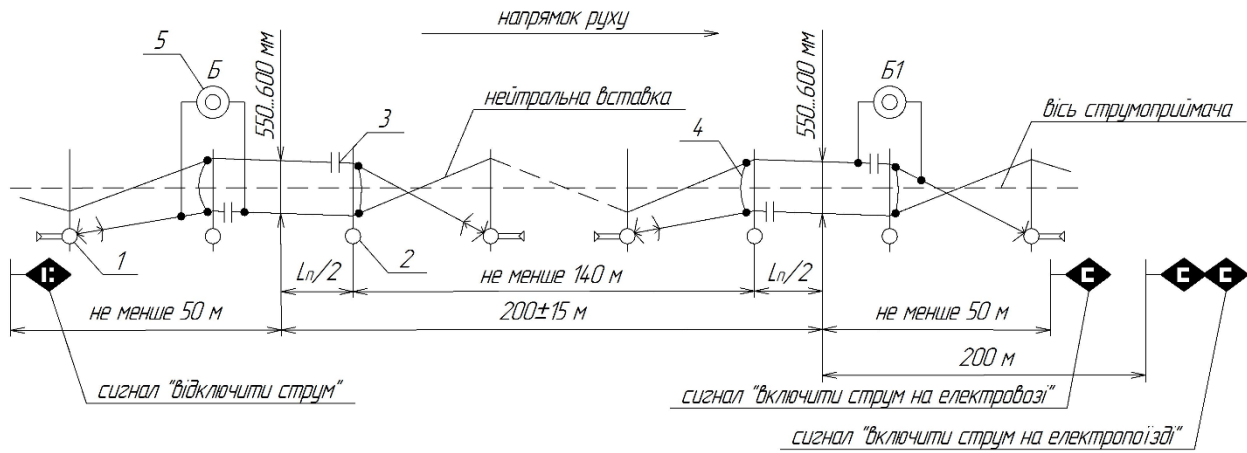


Рис. 1. Схема спряження анкерних ділянок з нейтральною вставкою для моторвагонної тяги: 1 – анкерна опора; 2 – перехідна опора; 3 – врізні ізолятори; 4 – поперечний електричний з'єднувач; 5 – нормально відключений секційний роз'єднувач з моторним приводом;  $L_p$  – довжина прогону між перехідними опорами

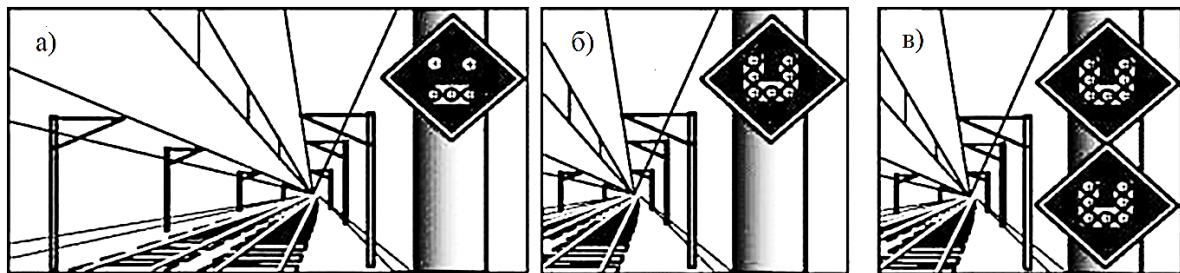


Рис. 2. Попереджувальні сигнальні знаки: а) «Відключити струм»; б) «Ввімкнути струм на електропоїзді»; в) «Ввімкнути струм на електропоїзді»

Для виведення ЕРС з-під нейтральної вставки, при його вимушеній зупинці, на неї тимчасово подають напругу. Для цього включають нормально відключений секційний роз'єднувач (див. рис. 1). Причому, вмикають той роз'єднувач, який подає напругу з тієї секції, в сторону якої рухається поїзд.

В перші роки експлуатації на електрифікованих залізницях України (2012-2013 роках) електропоїздів компанії Hyundai на нейтральних вставках відбувалися перепаля контактних проводів. Однією з причин перепадів контактних проводів могли бути помилкові дії машиністів електропоїздів, які під'їжаючи до знаку «Відключити струм» (рис.3) не виконували вимоги до порядку проходження електропоїздами нейтральних вставок. Відповідно до цих вимог машиніст повинен встановлювати головну рукоятку контролеру в нульове положення та відключати високовольтний вимикач.

Відповідно до вимог [5], машиністи електропоїздів повинні знати місце розташування нейтральної вставки та заздалегідь готуватися до її проходження: зарядити тормозну магістраль, розвинути необхідну швидкість руху для безупинного проїзду нейтральної вставки всім електропоїздом. Під'їжаючи до знаку «Відключити струм», машиніст повинен встановлювати

головну рукоятку контролеру в нульове положення та відключити високовольтний вимикач. Навіть якщо при проходженні нейтральної вставки буде відсутнє тягове навантаження, а живлення нетягових споживачів збережеться (вентилятори, компресори, освітлення, опалення, кондиціонування та інше), можливий пробій повітряних проміжків та їх іонізація. Це підтверджують сліди оплавлення контактних проводів на нейтральних вставках (рис. 4 та рис. 5).



Рис. 3. Попереджувальний знак «Відключити струм»



Рис. 4. Стан контактного проводу струмоведечого елемента на першому ізолюючому спряженні нейтральної вставки



Рис. 5. Стан контактного проводу нейтрального елемента на першому ізолюючому спряженні нейтральної вставки

Існуюча ситуація ускладнюється ще й тим, що електропоїзди компанії Hyundai можуть прослідкувати нейтральну вставку зі швидкістю 160 км/год (45 м/с).

В результаті, безструмова пауза на першому (по ходу руху) повітряному проміжку (рис. 6) може тривати всього 0,8 с, що недостатньо для деіонізації повітряного проміжку. При шунтуванні струмоприймачем другого повітряного проміжку можливе перепалювання контактного проводу. Окрім того, при проходженні електропоїздом нейтральної вставки зі швидкістю 160 км/год, суттєво скорочується довжина безструмової паузи через збільшення сили натиску струмоприймача на контактний провід.

$$P = P_{CT} + P_1 + P_a, \quad (1)$$

де  $P_{CT}$  – статична складова сили натиску струмоприймача ( $P_{CT} = 80 \dots 120$  Н);

$P_1$  – інерційна складова сили натиску струмоприймача;

$P_a$  – аеродинамічна складова сили натиску струмоприймача.

$$P_1 = m_T \cdot a, \quad (2)$$

де  $m_T$  – приведена маса струмоприймача;

$a$  – прискорення, яке отримується приведеною масою струмоприймача.

$$P_a = V_T^2 \cdot C_x, \quad (3)$$

де  $V_T$  – швидкість зустрічного потоку повітря;

$C_x$  – аеродинамічний коефіцієнт лобового опору рухомих рам та полозів струмоприймача.

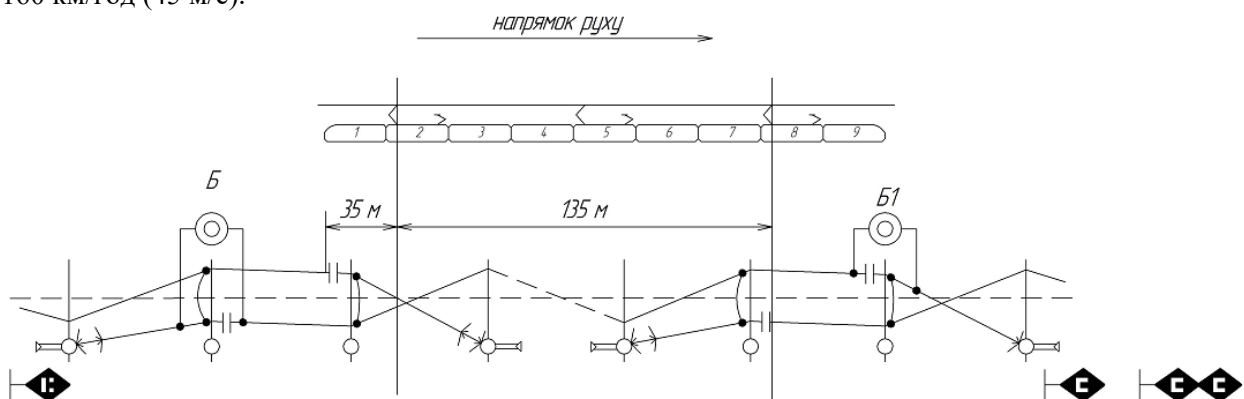


Рис. 6. Схема розміщення електропоїзда на нейтральній вставці

При швидкості 160 км/год суттєво збільшується аеродинамічна та інерційна складова натиску струмоприймача. В результаті, відрив струмо-

приймача від контактного проводу може відбуватися поблизу врізного ізолятора на першому ізолюючому спряженні (див. рис.6) та підтискання

контактного проводу нейтральної вставки струмоприймачем на другому ізолюючому спряженні до струмоведучого контактному проводу також може відбуватися поблизу врізного ізолятора. Це суттєво зменшує довжину нейтральної вставки, скорочує час деіонізації повітряного проміжку на першому ізолюючому спряженні, що підвищує вірогідність перепалів контактних проводів на нейтральних вставках в випадку відсутності розриву електричного ланцюга високовольтним вимикачем електропоїзда.

Те, що тривалість безструмової паузи суттєво впливає на діелектричні властивості повітряних проміжків підтверджують дослідження, проведені в високовольтній лабораторії кафедри «Електропостачання залізниць» (рис. 7).

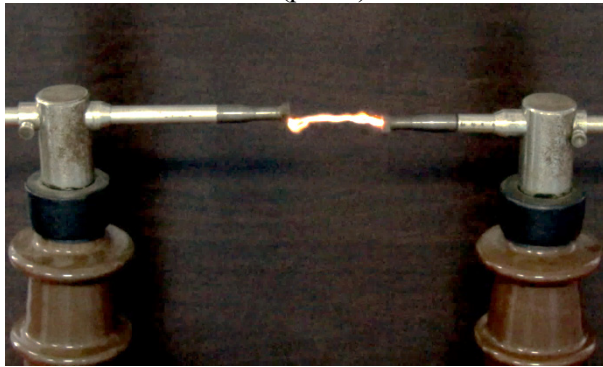


Рис. 7. Високовольтні випробування

Залежність пробивної напруги в міжелектродного проміжку «стержень-стержень» (імітація повітряного проміжку між контактними проводами на ізолюючому спряженні) від інтервалу між повторними випробуваннями ( $n$ ) приведена на рис. 8.

Результати досліджень показали, що навіть при струмах менше 10 мА, які протікали в міжелектродному проміжку під час його пробою, діелектричні властивості повітряного проміжку не відновлювались при інтервалі часу в 7 с (крива 2), діелектрична міцність проміжку зменшувалась, а при інтервалі часу в 60 с (крива 1) деіонізація повітряного проміжку встигала відбутися і пробивна напруга не змінювалась.

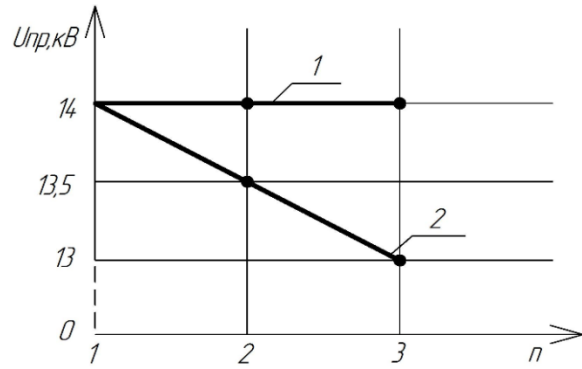


Рис. 8. Пробивна напруга

Узагальнюючи вищесказане, можна зробити висновок, що основною причиною перепалів контактних проводів на нейтральних вставках є те, що електропоїзди по них проходять без відключення високовольтного вимикача. В цьому випадку, для попередження перепалів контактних проводів на нейтральних вставках в випадках проходження по них електропоїздів без відключення струму можна використовувати:

- використання дугостійких систем (конструкцій);
- використовувати пристрої, які забезпечують автоматичне відключення тягового струму ЕРС при проходженні нейтральної вставки;
- використання чотирипрогонних ізолюючих спряжень, замість трипрогонних, дозволить зменшити кут нахилу контактних проводів, що відходять на анкерування (зменшення інерційної складової натиску струмоприймача);
- встановлення секційних ізоляторів на нейтральній вставці (рис. 9).

Для зменшення об'єму пошкоджень контактної мережі та дахового обладнання ЕРС на нейтральних вставках можна використовувати барабанні компенсатори з храповим колесом (див. рис. 10), яке при обриві компенсованого проводу стопорить барабан і подальше руйнування контактної підвіски та дахового обладнання ЕРС не відбувається.

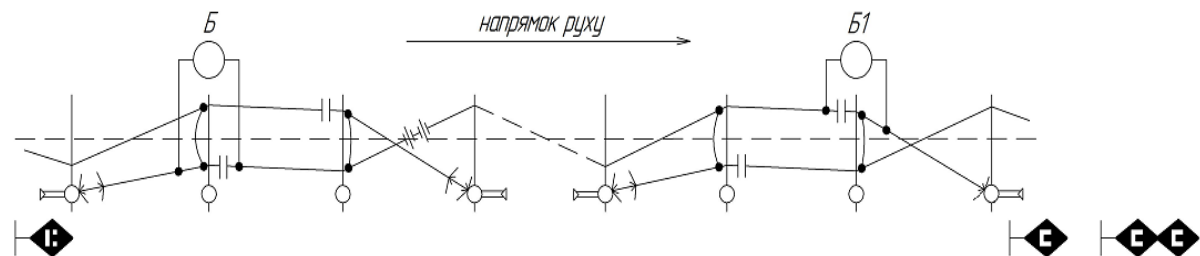


Рис. 9. Встановлення секційних ізоляторів на нейтральній вставці

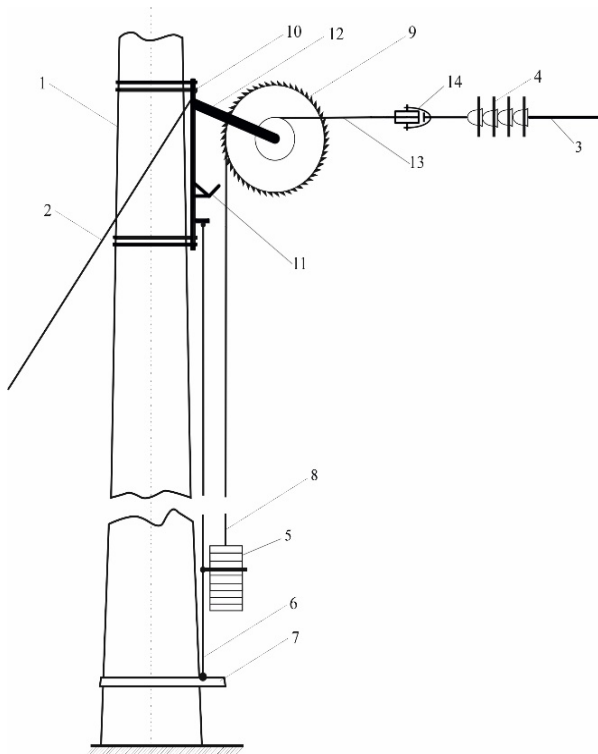


Рис. 10. Барабанний компенсатор з храповим колесом: 1 – анкерна опора; 2 – відтяжка; 3 – контактний провід (несучий трос); 4 – гірлянда ізоляторів; 5 – вантажі; 6 – трос обмежування розгойдування вантажів; 7 – кронштейн обмежувача розгойдування вантажів; 8 – трос компенсатора; 9 – компенсатор; 10 – кронштейн; 11 – стопор; 12 – рама; 13 – трос, запакований з однієї сторони на малі барабани храпового колеса; 14 – кінцевий захват, з'єднаний з рухомим блоком

Використовуючи закордонний досвід для попередження перепалів контактних проводів, можна замість нейтральних вставок використовувати струморозділення. На рис. 11 показаний такий тип струморозділення, воно виконане на переїзді, де експлуатується негабаритний автомобільний транспорт. В цьому випадку можна повністю виключити перепали контактних проводів при електричному розділенні суміжних секцій контактної мережі, які отримують живлення від різних фаз чи напругою різного роду струму.

Для зменшення об'єму пошкоджень контактної мережі та дахового обладнання ЕРС на нейтральних вставках необхідно використовувати барабанні компенсатори з храповим колесом (рис. 10), яке при обриві компенсованого проводу стопорить барабан і подальше руйнування контактної підвіски та дахового обладнання ЕРС не відбувається.



Рис. 11. Прохід електровозом зони струморозділення над переїздом: а) момент опускання струмоприймача; б) прохід переїзду; в) момент піднімання струмоприймача

### Наукова новизна та практична значимість

Приводиться обґрунтування можливих причин перепалів проводів контактних підвісок на нейтральних вставках та пропонуються організаційні та технічні заходи, які дозволяють уникнути пошкоджень контактної мережі та обладнання ЕРС.

Підвищення надійності роботи нейтральних вставок дозволить скоротити збитки, які викликані пошкодженнями контактної мережі та дахового обладнання ЕРС при обривах проводів контактних підвісок.

### Висновки

1. Основною причиною перепалів контактних проводів на нейтральних вставках є те, що електропоїзди по них проходять без відключення високовольтного вимикача.

2. Для попередження перепалів контактних проводів на нейтральних вставках в випадках проходження по них електропоїздів без відключення струму можна використовувати:

- використання дугостійких систем (конструкцій);

- використовувати пристрої, які забезпечують автоматичне відключення тягового струму ЕРС;
- використання чотирипрогонних ізолюючих спражень, замість трипрогонних, дозволить зменшити кут нахилу контактних проводів, що відходять на анкерування (зменшення інерційної складової натиску струмоприймача);
- встановлення секційних ізоляторів на нейтральній вставці.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Костюковский М. А. Управление электропоездом и его обслуживание: Учебник для технических школ ж. – д. транспорта. - М.: Транспорт, 1987. – 253 с.
2. Михеев В. П. Контактные сети и линии электропередачи: Учебник для вузов ж. -д. транспорта. - М.:Маршрут, 2003. – 416 с.
3. Сердинов С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1985. – 301 с.
4. ЦЕ – 0023 Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць, затверджені наказом Укрзалізниці 20.11.2007 р. №546 – Ц.
5. ЦШ – 0001 Інструкція з сигналізації на залізницях України, затверджена наказом Міністерства транспорту України № 259 від 8 липня 1995 р.
6. Яндович, В. Н. Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины: организация надежного токосъема / В. Н. Яндович, В. Г. Сыченко, А. В. Антонов // Электрификация транспорта. - 2014. - №7. - С. 67-77.

Надійшла до друку 15.11.2016.

Внутрішній рецензент *Муха А.М.*

3. Для зменшення об'єму пошкоджень контактної мережі та дахового обладнання ЕРС на нейтральних вставках необхідно використовувати барабанні компенсатори з храповим колесом.

4. Використовуючи закордонний досвід можна замість нейтральних вставок використовувати струморозділення.

## REFERENCES

1. Kostyukovskiy M.A. Upravleniya elektropoezdom i ego obsluzhivanie: Uchebnik dlya tehnikeskikh shkol zh. – d. transporta. - M.: Transport, 1987. – 253 s.
2. Miheev V.P. Kontaktnyie seti i linii elektroperechachi: Uchebnik dlya vuzov zh. -d. transporta. - M.:Marshrut, 2003. – 416 s.
3. Serdinov S.M. Povyishenie nadezhnosti ustroystv elektrosnabzheniya elektrifitsirovan-nyih zheleznnyih dorog. – M.: Transport, 1985. – 301 s.
4. TsE – 0023 Pravyla ulashtuvannya ta tekhnichnoho obsluhovuvannya kontaktnoyi merezhi elektrifikovanykh zaliznyts', zatverdzhenni nakazom Ukrzaliznytsi 20.11.2007 r. №546 – Ts.
5. TsSh – 0001 Instruksiya z syhnalizatsiyi na zaliznytsyakh Ukrayiny, zatverdzhena nakazom Ministers-tva transportu Ukrayiny № 259 vid 8 lypnya 1995 r.
6. Yandovich, V.N. Sravnitelnyy analiz kontaktnykh podvesok v stranakh Yevrosoyuza i Uk-rainy: organizatsiya nalezhnogo tokosema / V.N. Yandovich, V.G. Sychenko, A.V. Antonov // Yelektrifikatsiya transportu. - 2014. - №7. - S. 67-77.

Зовнішній рецензент *Шкрабець Ф. П.*

Метою даної статті є аналіз причин перепалів проводів контактної мережі на нейтральних вставках. Методика статті ґрунтується на використанні положень теорії електричного пробую газів.

Актуальність даної роботи обумовлена тим, що при перепалах проводів контактних підвісок на нейтральних вставках відбувається розрегулювання контактної мережі на суміжних анкерних ділянках і, як результат, виникають значні витрати часу на її відновлення. Крім того, при перепалах та обриві проводів контактної підвіски відбувається пошкодження струмоприймачів та іншого дахового обладнання електрорухомого складу, що призводить до тривалих затримок поїздів.

В роботі проведений аналіз та приведені обґрунтування можливих причин перепалів проводів контактних підвісок на нейтральних вставках і запропоновані організаційні та технічні заходи для попередження перепалів контактних проводів на нейтральних вставках в випадках проходження по них електропоїздів без відключення струму, а також засоби, які покликані зменшити об'єм пошкоджень контактної мережі та дахового обладнання ЕРС в випадку появи перепалів контактних проводів.

Підвищення надійності роботи нейтральних вставок дозволить скоротити збитки, які викликані пошкодженнями контактної мережі та дахового обладнання ЕРС при обривах проводів контактних підвісок.

**Ключові слова:** контактна мережа змінного струму, нейтральна вставка, електрорухомий склад, перепал контактного проводу, захисні заходи.

УДК 621.332

В. А. ДЬЯКОВ<sup>1</sup>, (ДНУЗТ), А. В. АНТОНОВ<sup>2</sup> (ДНУЗТ), С. Ю. МАЛИНКА<sup>3</sup> (ДНУЗТ)

<sup>1,3</sup>Каф. «Електроснабження залізничних доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 25

<sup>2</sup>Каф. «Електроснабження залізничних доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 25, ел. пошта [a.v.antonov91@gmail.com](mailto:a.v.antonov91@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-5701-6087](http://orcid.org/0000-0001-5701-6087)

## ЗАЩИТА НЕЙТРАЛЬНЫХ ВСТАВОК КОНТАКТНОЙ СЕТИ ОТ ПЕРЕЖОГОВ

Целью данной статьи является анализ причин пережогов проводов контактной сети на нейтральных вставках. Методика статьи основывается на использовании положений теории электрического пробоя газов.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что при пережогах проводов контактных подвесок на нейтральных вставках происходит разрегулировка контактной сети на смежных анкерных участках и, как результат, необходимы значительные затраты времени на ее восстановление. Кроме того, при пережогах и обрыве проводов контактной сети происходит повреждение токоприемников и другого крышевого оборудования электроподвижного состава, что приводит к длительным задержкам поездов.

В работе проведен анализ и приведено обоснование возможных причин пережогов проводов контактных подвесок на нейтральных вставках и предложены организационные и технические меры для предупреждения пережогов контактных проводов на нейтральных вставках в случаях прохождения по ним электропоездов без отключения тока, а также средства, которые призваны уменьшить объем повреждений контактной сети и крышевого оборудования ЭПС в случае появления пережогов контактных проводов.

Повышение надежности работы нейтральных вставок позволит сократить убытки, вызванные повреждениями контактной сети и крышевого оборудования ЭПС при обрывах проводов контактных подвесок.

**Ключевые слова:** контактная сеть переменного тока, нейтральная вставка, электроподвижной состав, пережог контактного провода, защитные меры.

Внутренний рецензент *Муха А.М.*

Внешний рецензент *Шкрабец Ф. П.*

UDC 621.332

V. O. DYAKOV<sup>1</sup> (DNURT), A. V. ANTONOV<sup>2</sup> (DNURT), S. Y. MALINKA<sup>3</sup> (DNURT)

<sup>1,3</sup>Dep. «Power Supply of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 373 15 25

<sup>2</sup>Dep. «Power Supply of Railways», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 373 15 25, e-mail [a.v.antonov91@gmail.com](mailto:a.v.antonov91@gmail.com), ORCID: [orcid.org/0000-0001-5701-6087](http://orcid.org/0000-0001-5701-6087)

## PROTECTION OF THE NEUTRAL SECTION OF CONTACT NETWORK FROM DEFLAGRATE

The aim of this article is to analyze the reasons for deflagration of the contact wires on the neutral section. Methodology of the article is based on the use of the theory of the electrical breakdown of gases.

The relevance of this work was caused by the fact, that at DEFLAGRATE contact wire of contact network on the neutral section, happens disadjustment of a contact network on the adjacent tension length. To address the impacts requires considerable time and material costs. Also there is a damage of pantographs and other roof equipment of electric rolling stock, which leads to long delays of trains.

The analysis and justification of possible reasons for burnout the contact wire of contact network on the neutral section and the proposed organizational and technical measures for prevention of the burnout of the contact wires on the neutral section in cases of passing them electric train without disconnecting the current. As well as means designed to reduce the amount of damage to the contact network and roof equipment of electric train in case of stratification the contact wires.

Improving the reliability of operation of neutral section will reduce the losses caused by damage of the contact grid and roof equipment of electric train when the wire breaks contact

**Keywords:** contact network of AC, neutral section, electric rolling stock, deflagrate of contact wire, protective measures.

Internal reviewer *Mukha A.M.*

External reviewer *Shkrabets F. P.*

Д. В. УСТИМЕНКО (ДНУЗТ)

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 37-31-537, ORCID: [orcid.org/0000-0003-2984-4381](https://orcid.org/0000-0003-2984-4381)

## СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ СТРУМОЗНІМАННЯ НА ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЯХ

### Вступ

На даний час системи контактного струмознімання з жорстким струмопроводом знайшли широке застосування в якості пристроїв передачі енергії на борт електрорухомого складу. Контактні підвіски з жорстким струмопроводом використовуються для рухомого складу магістральних електрифікованих залізниць. На сьогодні характерне підвищення швидкості руху, значне зростання струмових навантажень, поява нових типів електрорухомого складу, умови експлуатації якого потребують вдосконалення існуючих і створення нових пристроїв, що забезпечуватимуть надійну та економічну передачу електричної енергії на борт транспортних засобів.

Розв'язок задачі з ефективної експлуатації контактної мережі та електрорухомого складу ставить вимоги до подальшого зменшення зносу контактного дроту і випадків його руйнування, підвищення ресурсу роботи полозів струмоприймачів, зменшенню втрат електроенергії при струмозніманні.

### Опис проблеми

Зростання швидкості руху, збільшення потужності електрорухомого складу ускладнює умови роботи ковзного контакту «струмоприймач – контактний дріт». Пускові струми вантажних електровозів постійного струму сягають 1200 А, а пасажирських – до 1150 А. Крім того, навантаження на ковзний контакт «струмоприймач – контактний дріт» зросли в середньому на 400 А в результаті переходу пасажирських поїздів з вугільного індивідуального опалення на централізоване електричне [1].

В свою чергу контактний дріт є одним з основних елементів контактної мережі, від працездатності якого залежить безаварійна робота електрифікованих залізниць. Його безпосередня взаємодія з елементами полозів пантографів призводить до зносу, ерозійним пошкодженням, дії високих температур та механічних навантажень. На контактний дріт діють напруги розтягнення, він нагрівається транзитними

струмами і струмами в процесі струмознімання. Все це призводить до достатньо великої кількості його пошкоджень. Кожне пошкодження контактної дроту викликає перерив в русі поїздів, в середньому, на 2 години [1], що також супроводжується суттєвими матеріальними втратами.

Низький термін служби мідного контактної дроту визначається не тільки його зносом, але і високою ймовірністю обриву, що пов'язано з низьким опором такого дроту до втрати міцності при нагріванні. Це особливо важливо для високошвидкісних магістралей, оскільки дроти їхньої контактної мережі мають більший натяг для забезпечення надійного струмознімання.

Контактний дріт, що приймає участь у струмозніманні електричної енергії, представляє собою один з компонентів сильнострумового ковзного контакту.

Експлуатація сильнострумового ковзного контакту на відміну від широко поширених на практиці вузлів тертя супроводжується дією електричного струму на процеси зовнішнього тертя. Поряд з цим слід пам'ятати, що працездатність ковзних контактів, пов'язана з їх зносом, в основному визначається тими процесами, які протікають в поверхневих шарах пар тертя в звичайних трибологічних системах.

Проходження струму через поверхні пар тертя призводить до збільшення їх нагріву, росту кінетики протікання хімічних реакцій, проявляється перенос матеріалів контактів обумовлений електричними явищами. Висока температура точок контактів пояснюється високою густиною струму в цих зонах і тим, що тепло виділяється на невеликих контактних поверхнях, які в наслідок їх малого розміру представляють собою значні теплові опори.

У відповідності до закону Джоуля-Ленца в точках контакту виділяється тепло, пропорційне величині  $U \cdot I$ . Для кожного матеріалу контактів існують певні значення напруги, за яких не виникають пошкодження контактів. В контакті  $Cu - Cu$  напруга 0,03 В, 0,12 В, 0,3 В та 0,43 В викликає нагрів контактуючих елементів до

температури відповідно 16 °С, 190 °С, 700 °С та 1065 °С, а при напрузі 0,8 В мідь кипить [2]. В результаті нагрівання властивості матеріалу контакту різко змінюються. Зменшується робота, що затрачується на руйнування поверхні матеріалів в місці їх контакту.

Всі фактори, що впливають на працездатність сильноточових ковзних контактів прийнято розділяти на три групи:

1. конструктивні (профіль перерізу дроту, кількість накладок на полозі, тип підвіски, тип арматури підвіски);
2. металознавчі (матеріал контактів, вид змащування);
3. експлуатаційні (швидкість ковзання, сили, що діють на контакти, струм, вплив зовнішнього середовища).

В парі з контактним дротом працюють різного роду струмознімальні елементи. На змінному струмі струмознімання від контактного дроту здійснюється вугільними вставками як на коксовій так і на графітовій основі. На постійному струмі для тих же цілей вугільні вставки використовуються на малопотужному електроорухомому складі. Для зняття електроенергії на потужному електроорухомому складі постійного

струму використовують порошкові контактні пластини як на залізній, так і на мідній основі. Також на постійному струмі струмознімання здійснюється з використанням металовуглецевих вставок.

Ковзний контакт «струмоприймач – контактний дріт» відноситься до того виду електричного контакту робота якого супроводжується процесами тертя і зносу. В експлуатації електричних контактів тертя і знос відіграють важливу роль, оскільки одночасно з електрофізичними процесами протікають механічні і фізико-хімічні процеси, які супроводжуються зміною складу і структури матеріалів, що контактують.

У випадку ковзного контакту площа контактування визначається ймовірнісно-статистичним характером взаємодії окремих ділянок і в загальному випадку піддається флуктуаціям, головним результатом яких є динамічні процеси електричної ерозії та шумів в комутованих сигналах. З урахуванням сукупності механічних, електричних і фізико-хімічних факторів, що діють в ковзному контакті запропонована для їх системного аналізу схема на рис. 1 [3].

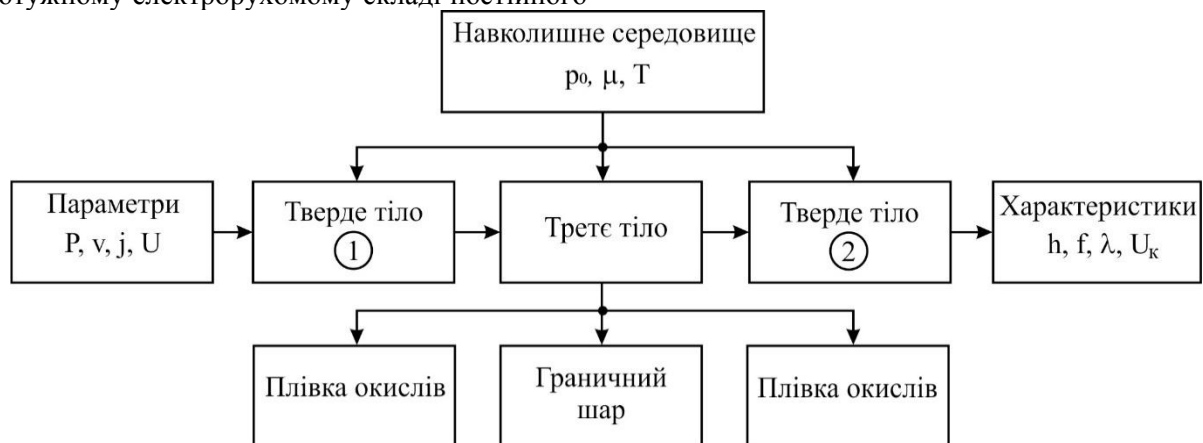


Рис. 1. Схема факторів, що діють в електричному контакті

Через хвилястість і шорсткість поверхонь, а також наявності непровідних плівок фактична площа контакту менше, ніж номінальна. Фрикційними і електромеханічними параметрами сполучення є сила натиску на контакти  $P$ , швидкість ковзання  $v$ , густина струму  $j$ , напруга, що комутується  $U$ . Додатковими факторами є тиск  $p_0$ , хімічна активність  $\mu$  і температура  $T$  навколишнього середовища. Вихідними характеристиками ковзного контакту служать коефіцієнт тертя  $f$ , інтенсивність зносу  $h$ , що визначає рівень механічних втрат і довговічність, а також інтенсивність відмов  $\lambda$  і контактний спад напруги  $U_k$ , що визначає надійність і рівень електричних втрат.

Визначення фактичної площі контакту необхідно при аналізі будь-якої пари тертя. Найбільш широко використовуються наступні підходи до визначення фактичної площі і опору контакту: метод опорних кривих (автори Н.В. Демкин і И.В. Крагельский) і метод випадкових полів (Н.Ф. Семенюк і Г.А. Сиренко).

Відхилення геометрії фактичної поверхні від номінальної приводить до спотворення в розподілі ліній струму в перерізах тіл, що контактують. При цьому виникає електричний опір – опір стягування, вираз для визначення якого запропонований Р. Хольмом [2].

До важливих експлуатаційних характеристик контактних пар пристроїв струмознімання,

що визначають їх надійність і економічність, відносять коефіцієнт тертя і інтенсивність зносу (зносостійкість). Знос як контактного дроту, так і контактних вставок пантографа вище критичних значень є неприпустимим. Для магістрального електричного транспорту середній питомий знос визначається для окремих анкерних ділянок перегонів, ділянок і т. і. Знос контактної дроту визначається значенням середнього питомого зносу виразом [3]:

$$i = \frac{\Delta S}{10^4 N} \quad (1)$$

де  $\Delta S$  – зменшення перерізу дроту;

$N$  – кількість проходів одиниць рухомого складу

Оцінка зносу контактних вставок пантографа виконується за допомогою їх питомої витрати на 1 млн. км [3]:

$$g_T = \frac{G_T}{L} \quad (2)$$

де  $G_T$  – загальна витрата вставок;

$L$  – пробіг електрорухомого складу.

В процесі струмознімання відбувається нагрівання як контактної дроту, так і контактних вставок пантографа. Максимальні значення температури пари тертя «струмоприймач – контактний дріт» регламентується відповідними нормами. Розрахунок загальної температури в зоні контакту визначається за методикою [4] наступним чином:

$$\Theta_{\text{заг}} = \Theta_V + \Theta_{\text{пов}} + \Theta_{\text{сп}} \quad (3)$$

де  $\Theta_V$  – об'ємна температура (від джоулевої теплоти);

$\Theta_{\text{пов}}$  – температура номінальної поверхні від тертя і контактної опору;

$\Theta_{\text{сп}}$  – температура спалаху.

Для оцінки коефіцієнта тертя і інтенсивності зносу контактних пар пристроїв струмознімання необхідно враховувати максимальну температуру.

Для сильнострумових ковзних контактів можливі два варіанти підвищення їх працездатності: використання металічних контактів із мастильними матеріалами, що наповнені дисперсійними електропровідними добавками, або використання композиційних металомістких матеріалів. У другому випадку оптимізація властивостей контакту досягається шляхом використання металізованих твердих мастильних компонентів (порошків або волокон), що регу-

ляризують структуру композита [5, 6]. До того ж цей метод найбільш ефективний для сильно-струмових контактів, що працюють з високою швидкістю ковзання (до  $10^2$  м/с).

Необхідність заміни контактної дроту визначається не тільки його середнім зносом, але розмірами і числом локальних зносів. Нерівномірність зносу дроту в основному пояснюється характером зміни натискання в контакті. Тому не менш важливою є задача визначення умов стабілізації і оптимізації контактної натискання.

Методика оцінки якості передачі електроенергії через ковзний контакт передбачає визначення двох основних показників – надійності та економічності знімання струму [7].

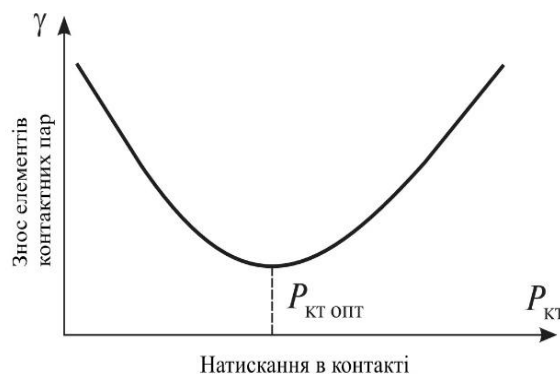


Рис. 2. Залежність зносу елементів ковзного контакту від сили натискання

Основним критерієм надійності та економічності є сила контактної натискання, при зменшенні якої зростає ймовірність відривів і пов'язаних з цим випадків іскроутворення, а при збільшенні виникає небезпека пошкодження елементів ковзного контакту (струмоприймача, дроту) за рахунок значних динамічних сил, особливо за умови високих швидкостей руху.

Зменшення сили натискання приводить до зменшення зносу, але тільки до деякого значення, після якого подальше зменшення натискання приводить до зростання зносу за рахунок іскроутворення і електроерозійного руйнування поверхневого шару контактних матеріалів (рис. 2) [3].

Таким чином, вибір оптимального натискання можна звести до розв'язку двох основних задач:

1. отримання U-подібних залежностей зносу від сили натискання при заданому струмі;
2. корегування вихідної сили натиску  $P_{\text{к,опт}}$  з урахуванням реальних параметрів струмоприймача і дії навколишнього середовища.

## Висновки

Проблема надійної та економічної експлуатації сильнострумових ковзних контактів, не може вирішуватись тільки за рахунок матеріалів, конструкції або технології, а потребує комплексного підходу з урахуванням реальних умов експлуатації.

Також необхідно зауважити, що не дивлячись на численні дослідження, існує значний розрив між інженерною практикою і теорією. Велика кількість робіт виконана спеціалістами

в області електротехніки і в них глибоко розглядались процеси та явища електричної природи в ковзному контакті та не враховані технологічні. В зв'язку з цим актуальність аспектів роботи електричних контактів не знижується, а зростає. Тому розвиток теорії струмознімання на електрифікованих залізницях з метою забезпечення їх надійної та економічної роботи в сучасних і перспективних умовах експлуатації є актуальною науковою задачею.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта [Текст] В.Я. Берент.-М.: Интекст. 2005. – 408 с.
2. Хольм Р. Электрические контакты [Текст] Р. Хольм - М.: Иностранная литература, 1961 – 464 с.
3. Сидоров О.А. Исследование и прогнозирование износа контактных пар систем токосъема с жестким токопроводом: Монография [Текст]/ О.А. Сидоров, С.А. Ступаков.-М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2012. – 174 с.
4. Гинзбург А.Г. Расчет средней температуры скользящего контакта пары контактный провод — токосъемные пластины пантографа [Текст] / А.Г. Гинзбург, А.М. Маханько, А.В. Чичинадзе // Трение и износ фрикционных материалов. – М.: Наука, 1977. – с. 20–26.
5. Кончиц В.В. Триботехника электрических контактов [Текст] В.В. Кончиц, В.В. Мешков, Н.К. Мышкин. — Минск: Наука и техника, 1986. – 260 с.
6. Кончиц В.В. Влияние электрического тока на фрикционное взаимодействие металлов [Текст] В.В. Кончиц // Трение и износ. – 1981. – Т. 2. – № 1. – с. 170–176.
7. Токосъем и токоприемники электроподвижного состава [Текст] / Под ред. И.А. Беляева. 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Транспорт, 1976. – 184 с.

Надійшла до друку 01.12.2016.

## REFERENCES

1. Berent V.Ya. Materialy i svoystva elektricheskikh kontaktov v ustroystvakh zheleznodorozhnogo transporta [The materials and properties of the electrical contact devices in railway transport] V.Ya. Berent.-M.: Intekst. 2005. – 408 s.
2. Holm R. Elektricheskie kontakty [Electrical contacts] R. Holm - M.: Inostrannaya literatura, 1961 – 464pp.
3. Sydorov O.A. Issledovaniye i prognozirovaniye iznosa kontaktnykh par system tokosema s ghoskim tokoprovodom: Monografia [Research and forecasting of wear contact pairs tokosema systems with rigid current lead]/ O.A. Sydorov, S.A. Stupakov.-M.: FGBOU «Uchebno-metodycheskyj tcentr po obrazovanyu na zheleznodorozhnom transporte». 2012. – 174pp.
4. Gynzburg A.G. Raschet sredney temperatury scolzjashego kontakta pary kontaknyj provod – tokocjemnye plastiny pantografa [The calculation of the average temperature of the sliding contact pair catenary - pantograph the current collection plate] / A.G. Gynzburg, A.M. Makhanko, A.V. Chichinadze // Trenie i iznos frikcionnykh materialov. – M.: Nauka, 1977. – pp. 22-26.
5. Konchits V.V., Konchits V.V., Meshkov V.V., Tribotekhnika elektricheskikh kontaktov [Tribotechnika of electrical contacts]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1986. 260 pp.
6. Konchits V.V. Vliyanie elektricheskogo toka na frikcionnoe vzaimodejstvie metallov [Effect on electric current frictionally engaged metals] V.V. Konchits // Trenie i iznos. – 1981. – Т. 2. - №1. – pp. 170-176.
7. Tokosem i tokopriemniki elektropodvizhnogo sostava [And current collection pantographs of electric rolling] / Pod red. I.A. Beljaeva. 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Transport, 1976. – 184 pp.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Танкевич Є. М.*

Розв'язок задачі з ефективної експлуатації контактної мережі та електрорухомого складу ставить вимоги до подальшого зменшення зносу контактного дроту і випадків його руйнування, підвищення ресурсу роботи полів струмоприймачів, зменшенню втрат електроенергії при струмозніманні. При цьому проблема надійної та економічної експлуатації сильнострумових ковзних контактів, не може вирішуватись тільки за рахунок матеріалів, конструкції або технології, а потребує комплексного підходу з урахуванням реальних умов експлуатації.

Не дивлячись на численні дослідження, існує значний розрив між інженерною практикою і теорією. Велика кількість робіт виконана спеціалістами в області електротехніки і в них глибоко розглядались процеси та явища електричної природи в ковзному контакті та не враховані технологічні. В зв'язку з цим актуальність аспектів роботи електричних контактів не знижується, а зростає. Тому розвиток теорії струмознімання на електрифікованих залізницях з метою забезпечення їх надійної та економічної роботи в сучасних і перспективних умовах експлуатації є актуальною науковою задачею.

льність аспектів роботи електричних контактів не знижується, а зростає. Тому розвиток теорії струмознімання на електрифікованих залізницях з метою забезпечення їх надійної та економічної роботи в сучасних і перспективних умовах експлуатації є актуальною науковою задачею.

**Ключові слова:** електричний ковзний контакт; контактна пара; струмознімання; контактний дріт; інтенсивність зносу; контактна вставка пантографа.

**УДК 621.336**

Д. В. УСТИМЕНКО (ДНУЖТ)

Кафедра «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпр, Україна, 49010, тел. +38 (056) 37-31-537, ORCID: [orcid.org/0000-0003-2984-4381](https://orcid.org/0000-0003-2984-4381)

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ТОКОСЪЕМА НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ

Решение задачи по эффективной эксплуатации контактной сети и электроподвижного состава ставит требования к дальнейшему уменьшению износа контактного провода и случаев его разрушения, повышение ресурса работы полозьев токоприемников, уменьшению потерь электроэнергии при токосъеме. При этом проблема надежной и экономичной эксплуатации сильноточных скользящих контактов, не может решаться только за счет материалов, конструкции или технологии, а требует комплексного подхода с учетом реальных условий эксплуатации.

Несмотря на многочисленные исследования, существует значительный разрыв между инженерной практикой и теорией. Большое количество работ выполнено специалистами в области электротехники и в них глубоко рассматривались процессы и явления электрической природы в скользящем контакте и не учтенные технологические. В связи с этим актуальность аспектов работы электрических контактов не снижается, а растет. Поэтому развитие теории токосъема на электрифицированных железных дорогах с целью обеспечения их надежной и экономичной работы в современных и перспективных условиях эксплуатации является актуальной научной задачей.

**Ключевые слова:** электрический скользящий контакт; контактная пара; токосъем; контактный провод; интенсивность износа; контактная вставка пантографа.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Танкевич Е.Н.*

**UDC 621.336**

D.V.USTYMENKO (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, st. Lazaryan, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 37-31-537, ORCID: [orcid.org/0000-0003-2984-4381](https://orcid.org/0000-0003-2984-4381)

## CURRENT STATE OF THE PROBLEM ON CURRENT COLLECTION OF ELECTRIFIED RAILWAYS

The task of the effective operation of a contact network of electric rolling stock and puts demands on the further reduction of the wear of the trolley wire, and if it is destroyed, increase the service life of runners of current collectors, a reduction of electricity losses in the current collector. The problem of reliable and economical operation of high-current sliding contacts, can not be solved only by the materials, design and technology, and requires a comprehensive approach taking into account the actual operating conditions.

Despite numerous studies, there is a considerable gap between theory and engineering practice. A large number of works carried out by experts in the field of electrical engineering and in their processes and phenomena of an electrical nature are deeply discussed in sliding contact and not addressed by technology. In this regard, the relevance of aspects of the electrical contacts is not reduced, and growing. Therefore, the development of the theory of current collection on electrified railways to ensure their reliable and efficient operation in the current and future operating conditions is an urgent scientific challenge.

**Keywords:** electric sliding contact; the contact pair; current collection; the contact wire; the intensity of wear of the pantograph contact strip.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Tankevych Ye. M.*

Д.О. БОСИЙ (ДНУЗТ), Д.Р. ЗЕМСЬКИЙ (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373-15-25, факультет «Управління енергетичними процесами», кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання», ел. пошта: [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua), [d.zemskyi@ukr.net](mailto:d.zemskyi@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0003-1818-2490](http://orcid.org/0000-0003-1818-2490), [orcid.org/0000-0003-4322-0727](http://orcid.org/0000-0003-4322-0727)

## ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У ЛІНІЯХ «ДВА ПРОВОДИ-РЕЙКА»

### Вступ

Відповідність якості електричної енергії до встановлених у нормативних документах допустимих значень є основною умовою електромагнітної сумісності та надійного функціонування електротехнічного обладнання. Водночас одним із проявів сучасного розвитку світової економіки є збільшення енергоспоживання у промисловому та побутовому секторі. За цих обставин питання раціонального використання енергетичних ресурсів не перестає бути актуальним.

У минулому на стадії проектування системи тягового електропостачання (СТЕ) залізниць була передбачена можливість приєднання до неї об'єктів залізничної інфраструктури (залізничних станцій, вагонних та локомотивних депо, пристроїв автоматики), електричних приймачів сторонніх (незалізничних) та побутових споживачів. Завдяки цьому зараз Укрзалізниця здійснює ліцензовану діяльність із продажу електричної енергії побутовим споживачам та юридичним особам як суб'єкт оптового ринку електричної енергії. Передача електричної енергії здійснюється від тягових підстанцій окремо спорудженими лініями електропередач або змонтованими із польової сторони опор контактної мережі лініями поздовжнього електропостачання, які у системі тяги змінного струму також відомі як лінії ДПР напругою 25 кВ.

Експлуатація ліній ДПР супроводжується характерними проявами порушення якості електричної енергії викликаними як конструкцією самої лінії так і умовами її роботи. Разом із цим існують складності у організації двостороннього живлення ліній поздовжнього електропостачання системі тяги змінного струму.

Метою даної статті є визначення заважаючих факторів, що супроводжують процес передачі енергії та впливають на її якість у лінях ДПР, огляд запропонованих та впровадження нових ідей для вирішення поставлених проблем.

### Основна частина

Однією із переваг електрифікації залізничного транспорту є можливість організації електропостачання споживачів не пов'язаних із процесом залізничних перевезень. На сьогоднішній день, в Україні, 50% від загальної довжини електрифікованих ліній припадає на систему тяги однофазного змінного струму 25 кВ [1]. Для живлення нетягових та сторонніх (незалізничних) споживачів електричної енергії, розташованих поблизу електрифікованих на змінному струмі залізниць, отримали широкого розповсюдження лінії, що виконані за системою «два проводи-рейка» (ДПР). Особливістю яких є використання рейкової колії замість третього фазного проводу. Це рішення дало можливість зменшити капітальні витрати на матеріали та будівництво лінії але призвело до зниження якості електроенергії. Погіршення викликане гальванічним зв'язком лінії ДПР із тяговою мережею та сильним електромагнітним впливом тягового навантаження типовим для якого є різкі зміни значень електричного струму, виникнення вищих гармонік та інтергармонік у спектральному розкладі живлячої напруги [2].

Однофазне навантаження, яким є електрорухомий склад залізниць, викликає нерівномірне навантаження фаз тягових обмоток трансформатора від яких живиться лінія ДПР. Заходи щодо зменшення несиметрії навантаження на живлячу мережу (приєднання фаз тягових підстанцій за правилом гвинта) не дають можливості реалізувати у більшості випадків двосторонню схему живлення ліній ДПР, яка з точки зору зменшення втрат під час передачі електричної енергії та надійності електропостачання має перевагу перед схемою консольного живлення [3, 4]. На рис. 1 зображена схема живлення ділянки однофазного змінного струму від трьох підстанцій за допомогою трансформаторів У/Д-11. Одноіменні виводи вторинних обмоток живлять контактну мережу між суміжними тяговими підстанціями ( $a_T$  і  $b_T$ ), вивід  $c_T$  трансформаторів приєднаний до рейки (зазем-

лена фаза). Напруга між контактним проводом та рейкою у першій міжпідстанцій зоні синфазна до напруги  $U_A$ , а у наступній зоні, відповідно, до  $-U_B$ .

Фази  $a_t c_t$ , та  $c_t b_t$  безпосередньо з'єднані із рейкою і контактною мережею лівого та правого плеча живлення та беруть на себе дві третіх від струмового навантаження своєї міжпідстанційної зони. За цієї схеми підключення фази  $b_t a_t$  у вторинній обмотці, та відповідно,  $B_t$  у первинній – найменш завантажені. Чергування приєднання фази  $B_t$ , як приведено на рис. 1 дозволяє частково компенсувати несиметрію напруги та струму у системі зовнішнього електропостачання.

Приведені векторні діаграми фазних напруг трансформаторів якісно показують відмінності у конфігурації векторів трансформаторів на ділянці. Взаєморозміщення вторинних напруг у системі векторів ТП2 повністю повторює трикутник напруг трансформатора із першою групою з'єднання обмоток. Тобто трансформатор на ТП2 У/Д-11 можна замінити на У/Д-1 за умови підключенням виводів первинної обмотки останнього подібно до трансформатора на ТП1. Таким чином, чергування найменш завантаженої фази порушує одну із умов паралельної

роботи трансформаторів – умову рівності груп з'єднання обмоток. Так, у будь-якому контурі, що утворюють вторинні обмотки трансформаторів та тягова мережа, результуюче значення напруг дорівнює нулю. У випадку з'єднання виводів  $b_t$  підстанцій 1 та 2 (пунктирна лінія на рис.1 а) виникне значний вирівнювальний струм через некомпенсовані напруги обмоток трансформаторів. Приймаючи напрямок обходу контуру  $b_t$  (ТП1) –  $a_t$  (ТП1) –  $a_t$  (ТП2) –  $b_t$  (ТП2) (див. рис.1) отримаємо

$$u_{ba1} - u_{ba2} = \frac{u_B - u_C}{k}, \quad (1)$$

де  $u_{ba1}$   $u_{ba2}$  – напруга вторинних обмоток відповідно ТП1 та ТП2;

$u_B, u_C$  – первинна напруга;

$k$  – коефіцієнт трансформації.

Лише між двома підстанціями із однаковим приєднанням виводів до системи зовнішнього електропостачання є можливість реалізації двосторонньої схеми живлення лінії ДПР, проте така комбінація має місце у випадку приєднання не менше шести підстанцій до системи із двостороннім живленням.

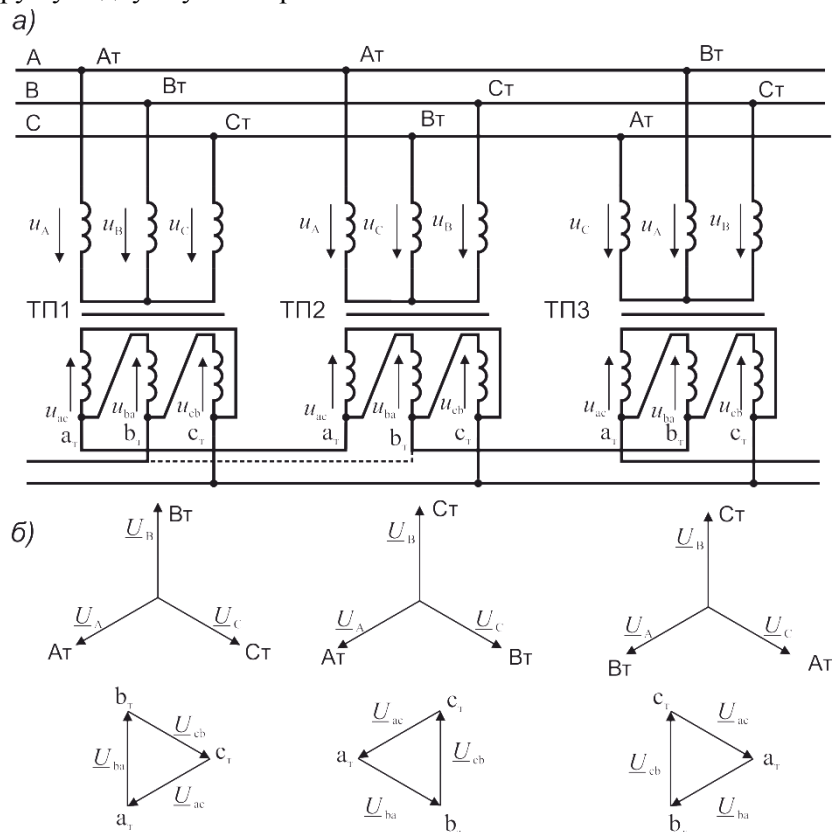


Рис. 1. Схема живлення ділянки однофазним змінним струмом: а – схема живлення; б – векторні діаграми напруг тягових обмоток;  $A_t, B_t, C_t$  – виводи первинної обмотки;  $a_t, b_t, c_t$  – виводи тягових обмоток.

У роботах [5, 6] представлені дослідження впливу негативних факторів на якість електричної енергії у лініях ДПР, виявлена можливість порушення вимог стандарту [7] за встановленими у ньому показниками якості, що проявляється у відхиленнях напруги, спотворенні синусоїдності та наявності несиметрії напруги. Зниження якості погіршує умови роботи та збільшує втрати в пристроях живлення інфраструктури електрифікованих залізниць та електроприймачах інших споживачів. Ступінь негативного впливу залежить від інтенсивності руху поїздів, кількості колій на ділянці, схеми та режиму роботи системи електропостачання.

Тривалий час компенсація та визначення електромагнітного впливу тягової мережі на лінії поздовжнього електропостачання залізниць змінного струму є предметом дослідження науковців у галузі енергетики. Існує думка, про цілковиту відмову від ДПР та запровадження окремих ліній напругою 25 кВ або їх збереження але із підвищення напруги до 35 кВ. Проте будівництвом окремої лінії або заміна ізоляції та КТП враховуючи розповсюдження цих ліній потребують значних інвестицій у проект, що ставить під питання його доцільність.

Є пропозиції щодо зміни конфігурації лінії у напрямку відмови від використання рейок та прокладання третього фазного проводу на опорах контактної мережі (рис.2) [8]. При її реалізації усувається гальванічний зв'язок із тяговою мережею, а також, за рахунок зближення проводів наведену тяговим струмом  $I_K$  (рис. 3) ЕРС можна вважати рівною у всіх трьох фазах. Індукована ЕРС  $E_{ка}$ ,  $E_{кв}$ ,  $E_{ка}$  змінює значення напруги у кожній фазі відносно землі однаково, а система векторів лінійних напруг  $\underline{U}_{ac}$ ,  $\underline{U}_{ba}$ ,  $\underline{U}_{cb}$  при цьому залишається симетричною. На противагу, у лінії ДПР під магнітним впливом контактної мережі потенціал рейок практично не змінюється, що призводить до несиметрії лінійних напруг. Модернізовану лінію ДПР автори називають лінією з заземленою фазою (ЛЗФ-27,5 кВ) оскільки третій провід приєднаний до фідеру живлення рейок.

Таким чином, дане рішення дозволяє зменшити несиметрію наруг у споживачів за рахунок зрівняння електромагнітного впливу на трифазну лінію тягової мережі та дає можливість попередити виникнення резонансних явищ за рахунок посилення взаємного екрануючого ефекту.

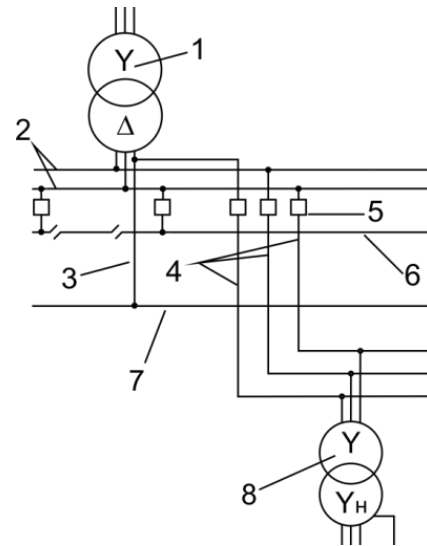


Рис. 2. Схема підключення ЛЗФ-27,5 кВ до шин тягової підстанції: 1 – тяговий трансформатор; 2 – шини; 3 – рейковий фідер; 4 – проводи ЛЗФ-27,5 кВ; 5 – вимикач; 6 – контактна мережа; 7 – рейка; 8 – трансформатор КТП.

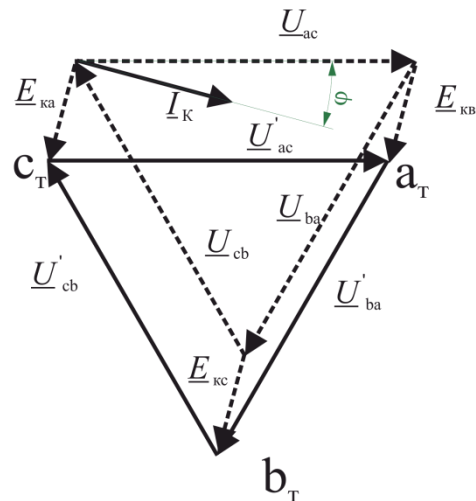


Рис. 3. Векторна діаграма напруги у лінії ЛЗФ-27,5 кВ

Інше технічне рішення запропоноване дослідниками МПТУ [9] передбачає від'єднання фази трансформатора КТП-25 кВ від рейки та підключення її до заземлювача з регульованим індуктивним елементом (рис.4). Величина індуктивності  $L_p$  визначається із виразу

$$L_p = l(L - 2M), \quad (2)$$

де  $L$  – індуктивність 1 км контуру провід – земля;

$M$  – взаємна індуктивність 1 км між контурами повітряний провід фази  $a$  – земля і провід фази  $b$  – земля;

$l$  – відстань від тягової підстанції до місця підключення комплектної трансформаторної підстанції до проводах.

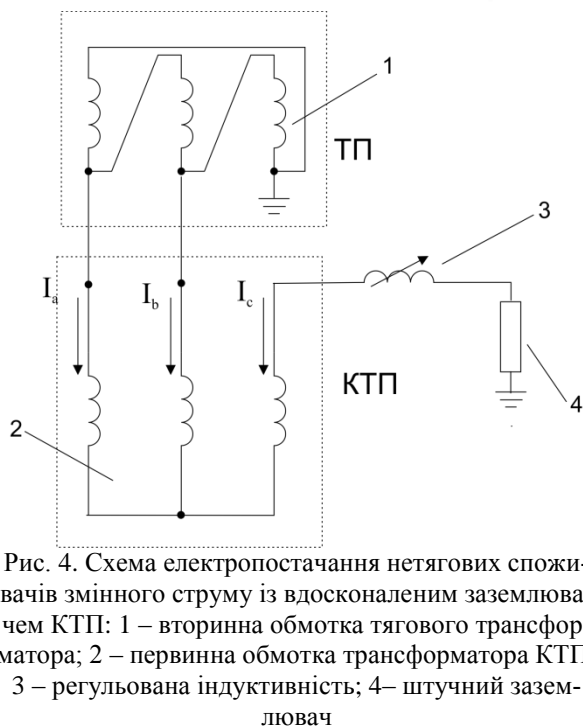


Рис. 4. Схема електропостачання нетягових споживачів змінного струму із вдосконалим заземлювачем КТП: 1 – вторинна обмотка тягового трансформатора; 2 – первинна обмотка трансформатора КТП; 3 – регульована індуктивність; 4 – штучний заземлювач

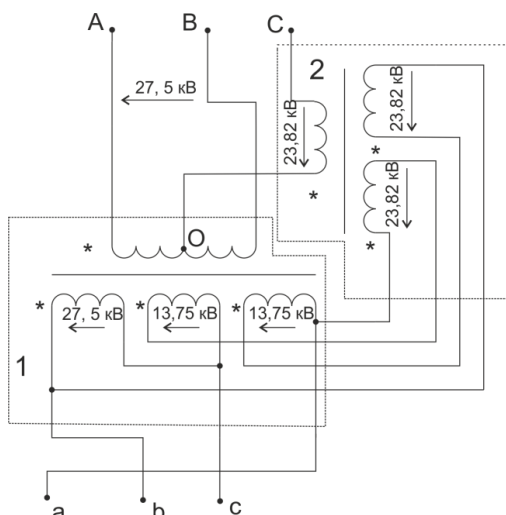


Рис. 5. Схема фазоповоротного трансформатора ДПР: 1, 2 – перший та другий однофазний трансформатор відповідно

У цій системі напруга на первинній стороні трансформатора КТП практично не залежить від струму, що протікає у рейках. Крім того, не порушується робота рейкових кіл, що призводить до підвищення безпеки руху поїздів на магістральних залізницях.

Падіння напруги у проводах та заземлювачі за величиною практично рівні та зміщені один від одного на  $120^\circ$ . У результаті це призводить до зниження до допустимого рівня коефіцієнта несиметрії за струмом і напругою на шинах комплектної трансформаторної підстанції.

Запропоновані способи у повній мірі не здатні вирішити окреслені проблеми пов'язані із якістю електроенергії у лініях поздовжнього

електропостачання і залишають відкритим питання організації системи нетягового електропостачання від ліній ДПР із двостороннім живленням. Розробки у цьому напрямку можуть дозволити суттєво (до 50%) зменшити втрати при передачі електроенергії, та зменшити відхилення напруги від номінального значення.

Можливим вирішенням проблеми без проведення заміни обладнання на підстанції може бути встановлення фазоповоротного пристрою приєднаного до шин 27,5 кВ. Такий пристрій представляє собою трансформатор принцип роботи якого подібний до трансформатора зібраного за схемою Скотта, але на виході якого утворюється трифазна система напруг (рис.5 та 6).

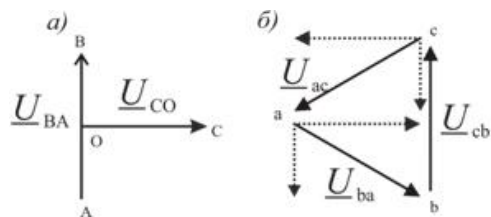


Рис. 6. Векторна діаграма напруг у первинній (а) та вторинній (б) обмотках фазоповоротного трансформатора ДПР

Механізм роботи пояснимо на прикладі перетворення системи вторинних напруг трансформатора ТП1 у систему, що ідентична системі векторів напруги на виході із ТП2 (див. рис. 1, б).

Нехай пристрій підключений до шин трансформатора ТП1 (найменування виводів трансформатора та пристрою співпадають). Тоді первинна обмотка фазоперетворювача формує систему із двох взаємоперпендикулярних векторів напруги (рис. 6, а). Всі вторинні обмотки з'єднанні послідовно у схему трикутник, який складається із трьох по-різному скомпонованих фаз. Так вихідна напруга отримується шляхом поєднання п'яти обмоток: по дві обмотки для фази  $ba$  та  $ac$  та одна обмотка для  $cb$ . Напруга у останній синфазна із вхідною напругою у фазі  $BA$  із первинної обмотки та одночасно із напругою  $U_{cb}$  на ТП2, тому надалі її було взято за базову. Розглянувши векторну діаграму та схему на відповідних рисунках можна визначити, що напруги  $U_{ac}$  формується через послідовне підключення обмоток першого та другого трансформатора, напруга  $U_{ba}$  через – зустрічне. Завдяки комбінації витків у цих обмотках можна регулювати фазовий кут та амплітуду напруги на виході із перетворювача.

## Висновок

Експлуатація системи поздовжнього електропостачання залізниць змінного струму супрово-

джується суттєвим погіршенням якості електричної, що викликається власною неоднорідністю лінії, електромагнітним впливом близько розташованої тягової мережі та гальванічним зв'язком із нею. Визначення та пошук шляхів компенсації заважаючого впливу, викликаного переліченими чинниками, були у минулому предметом низки наукових досліджень.

Істотним фактором який впливає на роботу системи поздовжнього електропостачання на залізницях

змінного струму є відсутність можливості у організації її двостороннього живлення від суміжних підстанцій, що пов'язано із симетруванням тягового навантаження відносно системи зовнішнього електропостачання. Вирішення цієї проблеми призведе до зниження втрат електричної енергії у лінії та підвищить надійність електропостачання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Корниенко, В. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор): Монография / В. В. Корниенко, А. В. Котельников, В. Т. Доманский. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
2. Сиченко, В. Г. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2009. - Вип. 29. - С. 82-87.
3. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
4. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. — Д. : Стандарт-Сервіс, 2015. — 340 с.
5. Финоченко, Т.Э. Магнитное влияние тяговых токов на показатели качества электроэнергии системы / Т.Э. Финоченко – Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. –2006. – № 3. – С. 90-93.
6. Закарюкин В. П. Качество электроэнергии в линиях электропередачи «два провода – рельс» / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Электрификация транспорта. – 2014. – № 7. – С.84-91.
7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия и совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.
8. Устройство для электроснабжения нетяговых потребителей на электрифицированных участках железных дорог переменного тока: пат. на полезную модель № 42484 РФ МПК: В60М1/02 / авторы и собственники патента Бочев А.С., Финоченко Т.Э.; начало действия патента: 12.07.2004; [Электронный ресурс]: <http://www.freepm.ru/Models/42484>.
9. Система электроснабжения нетяговых потребителей на электрифицированных участках железных дорог: пат. на полезную модель № 47819 РФ МПК: В60М3/00 В60М1/12; авторы Журавлев А.Н., Косарев А.Б., Косарев Б.И., Хананов В.В.; правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ) начало действия патента: 23.03.2005; [Электронный ресурс]: <http://www.freepm.ru/Models/47819>.

Надійшла до друку 01.12.2016.

Внутрішній рецензент Сиченко В.Г.

## REFERENCES

1. Kornienko, V. V. Elektrifikatsiya zheleznikh doroh. Myrovie tendentsyy u perspektivi (Analytycheskiy obzor): Monografiya / V. V. Kornienko, A. V. Kotelnikov, V. T. Domanskyi. – K.: Transport Ukraini, 2004. – 196 s.
2. Sychenko, V. H. Analiz rezhymiv napruhy na pryiednanniakh tiahovykh pidstantsii zminnoho strumu / V. H. Sychenko, D. O. Bosyi // Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana. - D., 2009. - Vyp. 29. - S. 82-87.
3. Markvardt, K. H. Elektrosnabzhenye elektrifytsirovannykh zheleznikh doroh. [Tekst] / K. H. Markvardt. – M.: Transport, 1982. – 528 s.
4. Sychenko, V. H. Yakist elektrichnoi enerhii u tiahovykh merezhakh elektrifikovanykh zaliznyts: monohrafiia / V. H. Sychenko, Yu. L. Saienko, D. O. Bosyi ; Dnipropetr. nats. un-t zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana. — D. : Standart-Servis, 2015. — 340 s.
5. Fynochenko, T.E. Mahnytnoe vlyanye tiahovykh tokov na pokazately kachestva elektroenerhyy systemi / T.E. Fynochenko – Vestnyk Rostovskoho hosudarstvennoho unyversyteta putei soobshcheniya. – 2006. – № 3. – S. 90-93.
6. Zakariukyn V. P. Kachestvo elektroenerhyy v lynyakh elektropredachy «dva provoda – rels» / V. P. Zakariukyn, A. V. Kriukov. – Elektrifikatsiia transportu. – 2014. – № 7. – S.84-91.
7. GOST 13109-97. Elektricheskaia enerhiia y sovместymost tekhnicheskyykh sredstv elektromagnitnaia. Normi kachestva elektricheskoi enerhyy v systemakh elektrosnabzheniya obshcheho naznacheniya [Tekst]. – K.: Hosstandart Ukraini, 1999. – 32 s.
8. Ustroistvo dlia elektrosnabzheniya netiahovykh potrebytelei na elektrifytsirovannykh uchastkakh zheleznikh doroh peremennogo toka: pat. na poleznuiu model № 42484 RF MPK: B60M1/02 / avtori y sobstvennyky patenta Bochev A.S., Fynochenko T.E.; nachalo deistviya patenta: 12.07.2004; [Elektronnyi resurs]: <http://www.freepm.ru/Models/42484>.
9. Sistema elektrosnabzheniya netiahovykh potrebytelei na elektrifytsirovannykh uchastkakh zheleznikh doroh: pat. na poleznuiu model № 47819 RF MPK: B60M3/00 B60M1/12; avtori Zhuravlev A.N., Kosarev A.B., Kosarev B.Y., Khananov V.V.; pravoobladatel Hosudarstvennoe obrazovatelnoe uchrezhdeniye vissheho professyonalnoho obrazovaniya Moskovskiy hosudarstvennii unyversytet putei soobshcheniya (MYUT) nachalo deistviya patenta: 23.03.2005; [Elektronnyi resurs]: <http://www.freepm.ru/Models/47819>.

Зовнішній рецензент Денисюк С. П.

© Босий Д. О., Земський Д. Р., 2016

Тенденція до збільшення кількості потужного електрообладнання та актуальна проблема раціонального використання енергетичних ресурсів привертають увагу до питань якості електричної енергії. У минулому, електрифікації залізничних ліній була використана для організації електропостачання споживачів розташованих поблизу залізниці через змонтовану на опорах контактної мережі лінію ДПР. Спотворення синусоїдності та несиметрію напруги, що виникає у лінії ДПР, пов'язане із використанням рейкової колії замість третього фазного проводу та сильним електромагнітним впливу тягової мережі. Суттєвим недоліком експлуатації лінії поздовжнього електропостачання залізниць змінного струму, що впливає на ефективність передачі електричної енергії, є відсутність можливості організації двостороннього живлення ліній ДПР між суміжними тяговими підстанціями. У статті приведені відомі способи підвищення якості електричної енергії при електропостачанні нетягових споживачів залізниць змінного струму. Автори пропонують схему фазоповоротного пристрою для ліній ДПР та пояснюють принцип його роботи.

**Ключові слова:** якість електричної енергії; система тяги змінного струму; лінія ДПР; нетягові споживачі; ЛЗФ-27,5 кВ; фазоповоротний трансформатор.

**УДК 621.331.3.025.1**

Д.А. БОСЫЙ (ДНУЖТ), Д.Р. ЗЕМСКИЙ (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373-15-25, факультет «Управление энергетическими процессами», кафедра «Интеллектуальные системы электроснабжения», эл. почта: [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua), [d.zemskyi@ukr.net](mailto:d.zemskyi@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0003-1818-2490](http://orcid.org/0000-0003-1818-2490), [orcid.org/0000-0003-4322-0727](http://orcid.org/0000-0003-4322-0727)

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ «ДВА ПРОВОДА-РЕЛЬС»

Тенденция к увеличению количества мощного электрооборудования и актуальная проблема рационального использования энергетических ресурсов привлекают внимание к вопросам качества электрической энергии. В прошлом, электрификации железнодорожных линий была использована для организации электроснабжения потребителей расположенных вблизи железной дороги через смонтированную на опорах контактной сети линию ДПР. Искажение синусоидности и несимметрию напряжения, что возникают в линии ДПР, связано с использованием рельсового пути вместо третьего фазного провода и сильным электромагнитным влиянием тяговой сети. Существенным недостатком эксплуатации линии продольного электроснабжения железных дорог переменного тока, который влияет на эффективность передачи электрической энергии, является отсутствие возможности организации двустороннего питания линий ДПР между смежными тяговыми подстанциями. В статье приведены известные способы повышения качества электрической энергии при электроснабжении нетяговых потребителей железных дорог переменного тока. Авторы предлагают схему фазоповоротного устройства для линий ДПР и объясняют принцип его работы.

**Ключевые слова:** качество электрической энергии; система тяги переменного тока; линия ДПР; нетяговые потребители; ЛЗФ-27,5 кВ; фазоповоротный трансформатор.

Внутренний рецензент Сыченко В.Г.

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

**UDC 621.331.3.025.1**

D.O. BOSIY (DNURT), D.R. ZEMSKYI (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan Street, 2 Dnepr, Ukraine, 49010, Tel. +38 (056) 373-15-25, Department of "Management of energy processes" Chair "Intelligent power systems", e-mail: [dake@i.ua](mailto:dake@i.ua), [d.zemskyi@ukr.net](mailto:d.zemskyi@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0003-1818-2490](http://orcid.org/0000-0003-1818-2490), [orcid.org/0000-0003-4322-0727](http://orcid.org/0000-0003-4322-0727)

## IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN “TWO WIRE-RAIL” LINES

The tendency to increase the number of high-power electric equipments and urgent problem of rational use of energy resources attract attention to the issues of quality of electric energy. In the past, the electrification of railway lines was used to provide power supply for the consumers located near the railway through mounted on the contact line network supports the TWR. Distortion of sinusoidal voltage and asymmetry that arise in the TWR line, due to the use of the track instead of the third phase conductor, and the strong influence of the electromagnetic of traction network. A significant disadvantage of operating power supply longitudinal line of the AC traction, which affects the efficiency of power transmission, is the absence of the possibility of organizing bilateral TWR power lines between adjacent traction substations. The article presents the known methods of improving the quality of electric energy in the electric power supply of consumers not traction railway AC roads. The authors suggest of electric circuit phase-shifting device for TWR lines and explain how it works.

**Keywords:** quality of electrical energy; AC traction system; DPR line; not traction consumers; LZP-27.5 kV; phase-shifting transformer.

Internal reviewer Sychenko V.H.

External reviewer *Denisyuk S. P.*

УДК 629.424.1.001.76

С. Г. БУРЯКОВСЬКИЙ<sup>1</sup> (УкрДУЗТ), А. С. МАСЛІЙ<sup>2</sup> (УкрДУЗТ), Д. П. ПОМАЗАН<sup>3</sup> (УкрДУЗТ), І. В. ДЕНІС (ПРАТ «КАРТЕЛЬ»)

Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61050, Україна,  
<sup>1</sup>к.т.н., професор, тел.: +380503012069, ел. пошта: [sergbyr@i.ua](mailto:sergbyr@i.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9422-6390](https://orcid.org/0000-0001-9422-6390),  
<sup>2</sup>к.т.н., доцент, тел.: +380974137970, ел. пошта: [a.masliy@ukr.net](mailto:a.masliy@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0003-0938-7144](https://orcid.org/0000-0003-0938-7144),  
<sup>3</sup>студент, тел.: +380630176561, ел. пошта: [danil.pomazan@mail.ru](mailto:danil.pomazan@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-5467-8824](https://orcid.org/0000-0002-5467-8824),  
 ПРАТ «КАРТЕЛЬ» вул. Дніпровське шосе, 84а, м. Кривий Ріг, 50026, Україна, генеральний директор, тел.: +380503214176, ел. пошта: [div99@ukr.net](mailto:div99@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0002-0160-2340](https://orcid.org/0000-0002-0160-2340)

## ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЗУ ЧМЕЗ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГІБРИДНОЇ СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

### Вступ

В умовах подорожчання паливно-енергетичних ресурсів гостро постає питання підвищення енергоефективності роботи рухомого складу, зокрема маневрових тепловозів. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування гібридної силової установки.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій та виділення невирішених частин загальної проблеми

Дослідження питання модернізації маневрових локомотивів і, зокрема, тепловозу ЧМЕЗ представлено у працях А.П. Фалендиша, А.Л. Сумцова, О.В. Клименко, Ю.В. Черняка, В.О. Гатченко, А.В. Гаюр, А.І. Варакіна, І.Н. Варакіна, В.В. Менухова [1-5] та ін., у яких наведені аналізи різних способів модернізації тепловоза ЧМЕЗ. Проте там не представлені моделі, які б наглядно показували ефект від модернізації.

### Мета статті

Висвітлення одного зі способів підвищення енергоефективності тепловозу ЧМЕЗ, а саме:

глибокої модернізації з використанням гібридної силової установки та електроприводу на базі вентильно-індукторних двигунів.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Як показує статистика, більше 40% маневрової роботи приходить на простій з двигуном, що працює, а 10-15% часу приходить на пересування без вагонів [8]. Розподілення режимів роботи маневрового локомотива показано на рис. 1. Також тепловози ЧМЕЗ використовуються у легкій поїзній роботі із невеликою кількістю вагонів.



Рис. 1. Розподілення режимів роботи маневрового локомотива

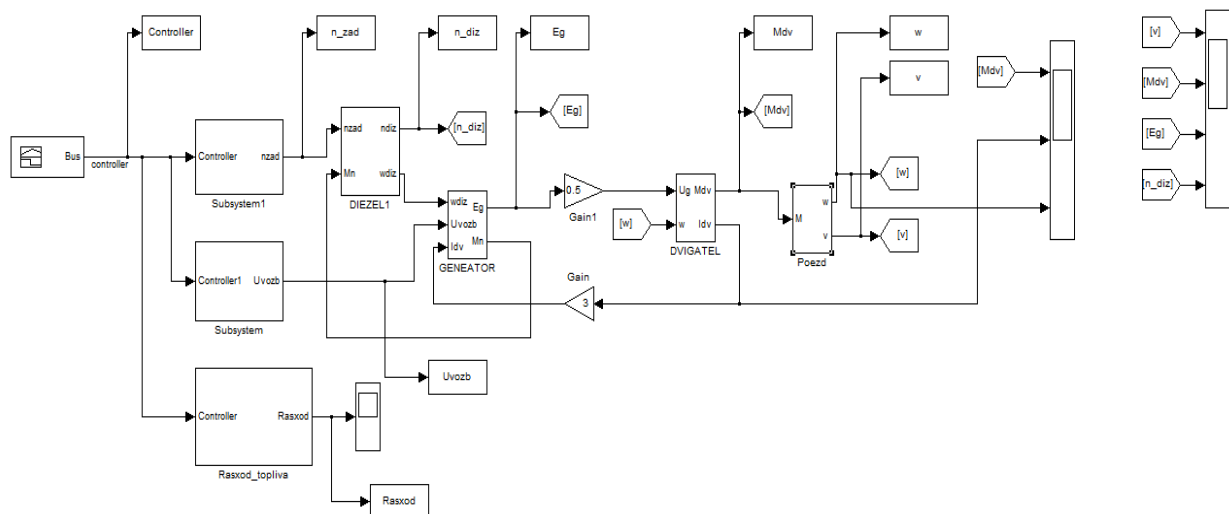


Рис. 2. Загальний вид моделі руху поїзда з тепловозом ЧМЕЗ

З вище сказаного видно, що використання потужних маневрових тепловозів не оправдане економічно, тому що використання тепловозів при частковому завантаженні веде до перевитрат палива.

Для дослідження властивостей тепловозу та підрахунку витрати палива при поїзній роботі із поїздом масою 500 т. на ділянці Харків-Мерефа була створена імітаційна модель у середовищі Matlab, яка зображена на рис. 2

Результатом моделювання є графіки швидкості руху поїзда, моменту на валу двигуна та частоти обертання вала дизеля (рис. 3, 4, 5).

З графіків видно, що при використанні системи генератор-двигун відбувається ступінчастий розгін потяга, що негативно впливає на роботу тягових двигунів та редукторів.

В режимі тяги величина витрат палива приймається відповідно до позиції контролера машиніста, що використовується. Значення витрат палива для кожної позиції контролера машиніста локомотива ЧМЕЗ наведені у таблиці.

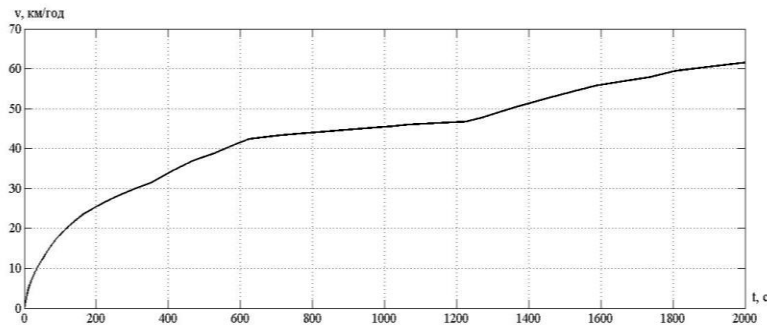


Рис. 3. Швидкість руху поїзда

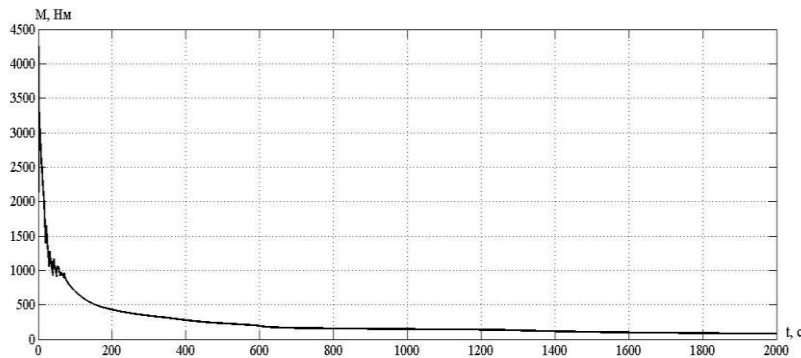


Рис. 4. Момент на валу двигуна

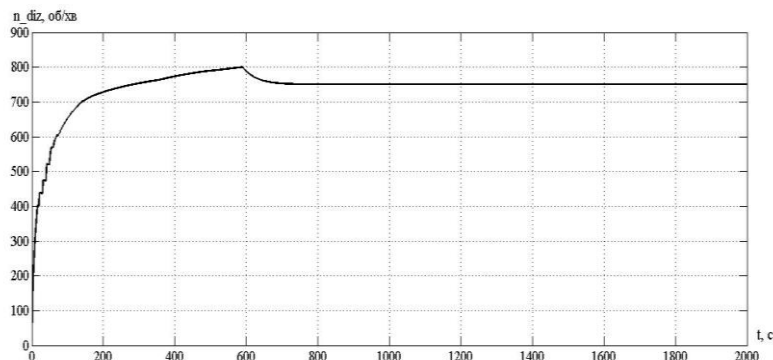


Рис. 5. Частота обертання вала дизеля

Таблиця 1

Годинна витрата палива тепловозом ЧМЕЗ

Показник	Позиція контролера машиніста							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Витрати палива, кг/год	31	63	96	110	120	160	174	180

У відповідності до цієї методики у результаті математичного моделювання було визначено, що витрати палива на ділянці Харків-Мерефа склали 100 кг.

У модернізованому варіанті пропонується встановлення дизель-генераторної установки із

синхронним генератором меншої потужності, яка працює на зарядку акумуляторної батареї. Від батареї живляться через статичні перетворювачі тягові вентильно-індукторні двигуни. Принципова схема модернізованого тепловозу наведена на рис. 6.

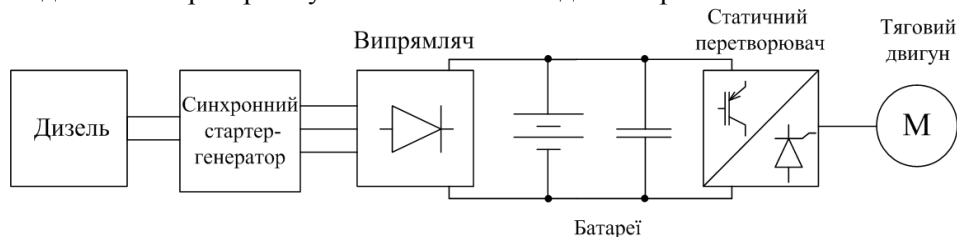


Рис. 6. Принципова схема модернізованого тепловозу ЧМЕЗ

В якості тягового обраний вентильно-індукторний двигун, який відрізняється високою надійністю та високим ККД. Використання статичних перетворювачів покращує тягові характеристики тепловоза, тому що це дозволяє здійснити плавний пуск із необхідним прискоренням.

Перевагами вентильно-індукторних двигунів з використанням статичних перетворювачів є:

- простота конструкції;
- висока надійність;
- низька собівартість;
- низький момент інерції;
- можливість роботи у складних умовах;
- висока ремонтпридатність;
- низькі втрати в роторі;
- мінімальні температурні коефіцієнти.

Ці переваги показують перспективність застосування даного типу електромеханічних перетворювачів у якості тягових.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фалендиш, А. П. Аналіз варіантів модернізації тепловозів серії ЧМЕЗ [Текст] / А.П. Фалендиш, А.Л. Сумцов, О.В. Клименко // Зб. наук. пр. / Дон. інст. зал. трансп. – Донецьк, 2013. – Вип. 36 – С. 162-166.
2. Черняк, Ю.В.. Аналіз існуючих і перспективних напрямів застосування рекуперативних систем на транспорті з метою підвищення його енергоефективності [Текст] / Ю.В. Черняк, В.О. Гатченко, А.В. Гаюр // Зб. наук. пр. / Дон. інст. зал. трансп. – Донецьк, 2014. – Вип. 37 – С. 134-139.
3. Варакин, А.И. Маневровый и универсальный локомотив с гибридной силовой установкой и накопителем энергии на базе электрохимических конденсаторов [Текст] / А.И. Варакин, И.Н.Варакин, В.В. Менухов // Наука и техника транспорта, 2007 - №12 – с. 34-40.
4. Фалендиш, А. П. Визначення раціональних параметрів гібридного маневрового тепловоза на базі ЧМЕЗ [Текст] / А.П. Фалендиш, М.В. Володарець, О.В. Артеменко // Зб. наук. пр. / Східноукр. нац. універс. ім. В.Даля. – Сєвєродонецьк, 2015. –

#### Висновок

Таким чином, у ході дослідження була створена імітаційна модель руху поїзда з тепловозом ЧМЕЗ, яка дозволяє розглянути процеси, що відбуваються при русі та обчислити витрати палива на роботу тепловоза. Був запропонований один зі способів глибокої модернізації тепловозу, а саме застосування гібридної силової установки та електроприводу на базі вентильно-індукторних двигунів. Гібридна силова установка дає змогу знизити витрати паливо-мастильних матеріалів через те, що вона меншої потужності, ніж існуюча, а також вона працює на номінальному режимі з постійними обертами, на відміну від існуючої системи. Використання електроприводу на базі вентильно-індукторних двигунів дозволить знизити витрати на ремонт, а також покращити тягові характеристики локомотива.

#### REFERENCES

1. Falendysh, A. P. Analiz variantiv modernizatsiyi teplovoziv seriyi ChME3 [Analysis of upgrade options locomotives series CHME3] / A.P. Falendysh, A.L. Sumtsov, O.V. Klymenko // Zb. nauk. pr / Don. inst zal. transp [Technologies. Donetsk Institute of Railway Transport] Donetsk, 2013. Vol. 36. PP. 162-166.
2. Chernyak, Yu.V.. Analiz isnuyuchykh i perspektivnykh napryamiv zastosuvannya rekuperativnykh system na transporti z metoyu pidvyshchennya yoho enerhoefektyvnosti [Analysis of existing and future areas of application recuperative systems in transport to improve its energy efficiency] / Yu.V. Chernyak, V.O. Hachenko, A.V. Hayur // Zb. nauk. pr / Don. inst zal. transp. [Technologies. Donetsk Institute of Railway Transport] Donetsk, 2014. Vol. 37. PP. 134-139.
3. Varakyn, A.Y. Manevrovyi y unyversal'nyi lokomotyv s hybrydnoy sylovoy ustanovkoy y nakopytelem enerhyy na baze elektrokhymyieskykh kondensatorov [Shunting and versatile locomotive with hybrid-term propulsion and energy storage based on electrochemical capacitors] / A.Y. Varakyn, Y.N.Varakyn, V.V. Menukhov // Nauka y tekhnika transporta [Science and Transport Equipment]. 2007. №12. PP. 34-40.
4. Falendysh, A. P. Vyznachennya ratsional'nykh parametriv hibrydnogo manevrovoho teplovoza na bazi

Вип. 1(218) – С. 253-256.

5. Щербаков, В. Т. Маневровые локомотивы с комбинированной (гибридной) силовой установкой [Текст] / В.Т. Щербаков, Л.М. Бондаренко, Ю.П. Ерохин // Локомотив. – 2011. – №. 8. – С. 33-35.

6. Про створення Транспортної стратегії України на період до 2020 року [Електронний ресурс]: постанова Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р. №2174 р. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/> - (Дата звернення 06.07.2016).

7. Гапанович, В.А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте [Текст] : учебник для вузов / В.А. Гапанович, В.Д. Авилов, Б.А. Аржанников. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 620 с.

8. Овчинников, В. М. Пути снижения расхода топлива в маневровой работе на железнодорожных станциях [Текст] / В. М. Овчинников и др. // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2010. – № 2 (21). – С. 151-158.

9. Энергозберігаючий шлях розвитку [Електронний ресурс] : інформація / Газета «Магістраль» - Режим доступу : <http://www.magistral-uz.com.ua/articles/energozberigajuchij-shljah-rozvitku.html>. – (Дата звернення 06.07.2016).

Надійшла до друку 15.12.2016.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

ChME3 [Determination of rational parameters of hybrid shunting locomotive at the chme3] / A.P. Falendysh, M.V. Volodarets', O.V. Artemenko // Zb. nauk. pr / Skhidnoukr. nats. univers. im. V.Dalya [Technologies. East Ukrainian National University of Dal]. Syevyeronodetsk, 2015. Vol. 1(218). PP. 253-256.

5. Shcherbakov, V. T. Manevrovye lokomotivy s kombynyrovannoy (hybrydnoy) sylovyoy ustanovkoy [Shunting locomotives with a combined (hybrid) propulsion system] / V.T. Shcherbakov, L.M. Bondarenko, Yu.P. Erokhyn // Lokomotyv [Locomotive]. 2011. № 8. PP. 33-35.

6. On establishment of the Transport Strategy of Ukraine till 2020 [electronic resource]: the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 20.10.2010 g. №2174 p. - Access: <http://zakon5.rada.gov.ua/> - (Date of appeal 06.07.2016).

7. Hapanovych V. A., Avylov V. D., Arzhannykov B. A. Enerhosberezhenye na zheleznodorozhnom transporte [Energy savings in rail transport] Moscow, MYSyS Publ., 2012. 620 p.

8. Ovchynnykov, V. M. Puty snyzhenyia rashkoda toplyva v manevrovoy rabote na zheleznodorozhnykh stantsyyakh [Ways to reduce fuel consumption in shunting operations at railway stations] / V. M. Ovchynnykov y dr. // Vestnyk BelHUTA: Nauka y transport. [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transportation] 2010. № 2 (21). PP. 151-158.

9. Energy saving path of development [ele-enforcement resource]: information / Newspaper "Highway" - Access: <http://www.magistral.uz.com.ua/articles/energozberigaj-uchij-shljah-rozvitku.html>. - (06.07.2016 Date of appeal).

Зовнішній рецензент *Сокіл Є. І.*

Стаття присвячена проблемам неефективного використання паливно-енергетичних ресурсів маневровими тепловозами під час виконання ними робіт. Станом на 2009 рік тепловози ЧМЕЗ (особливо в Росії і в Україні) крім своїх основних функцій, часто використовуються, як локомотиви приміських поїздів на коротких мало-задіяних ділянках. Тому даний час питання зниження споживання паливно-енергетичних ресурсів є досить гострим для нашої країни, тому ця стаття є досить актуальною. Розроблені імітаційні моделі роботи тепловозу досить наглядно показують неефективність системи, що використовується у даний час. Функціонально модель поділяється на блоки, що моделюють роботу дизеля, тягового генератора, тягових двигунів та блоку, що обчислює опір руху поїзда. Для обчислення опору руху поїзда прийнята ділянка Харків-Мерефа. Запропонована функціональна схема гібридного тепловозу включає дизель, синхронний стартер-генератор, випрямляч, акумуляторну та суперконденсаторну батареї, статичний перетворювач, тягові двигуни. Використання накопичувачів енергії на тепловозі дозволяє запровадити системи керування тяговими двигунами для покращення їх характеристик. Застосування гібридного тепловозу дозволяє підвищити його ККД за рахунок високого ККД при роботі від накопичувачів енергії. Подібне рішення дозволяє скоротити витрату палива не менше ніж на 40%, так як більша частина маневрової роботи буде здійснюватися на живленні від тягової акумуляторної батареї, і забезпечити високу екологічну чистоту локомотива. Економія палива після виконання такої модернізації складає близько 100 т на рік, при такій економії час повернення коштів, витрачених на модернізацію, складає близько 5 років.

**Ключові слова:** тепловоз ЧМЕЗ; гібридна силова установка; математична модель; вентиляно-індукторний двигун.

**УДК 629.424.1.001.76**

С. Г. БУРЯКОВСКИЙ<sup>1</sup> (УкрДУЖТ), А. С. МАСЛИЙ<sup>2</sup> (УкрДУЖТ), Д. П. ПОМАЗАН<sup>3</sup> (УкрДУЖТ), И. В. ДЕНИС (ЧАО «КАРТЕЛЬ»))

Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, г. Харьков, 61050, Украина <sup>1</sup>к.т.н., профессор, тел.: +380503012069, эл. почта: [sergbyr@i.ua](mailto:sergbyr@i.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9422-6390](http://orcid.org/0000-0001-9422-6390), <sup>2</sup>к.т.н., доцент, тел.: +380974137970, эл. почта: [a.masliy@ukr.net](mailto:a.masliy@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0003-0938-7144](http://orcid.org/0000-0003-0938-7144), <sup>3</sup>студент, тел.: +380630176561, эл. почта: [daniil.pomazan@mail.ru](mailto:daniil.pomazan@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-5467-8824](http://orcid.org/0000-0002-5467-8824), ЧАО «КАРТЕЛЬ» ул. Днепровское шоссе, 84а, м. Кривой Рог, 50026, Украина, генеральный директор, тел.: +380503214176, эл. почта: [div99@ukr.net](mailto:div99@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0002-0160-2340](http://orcid.org/0000-0002-0160-2340)

## ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЗА ЧМЭЗ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

Статья посвящена проблемам неэффективного использования топливно-энергетических ресурсов маневровыми тепловозами при выполнении ими работ. По состоянию на 2009 год тепловозы ЧМЭЗ (особенно в России и в Украине) кроме своих основных функций, часто используются, как локомотивы пригородных поездов на коротких малоделятельных участках. Поэтому настоящее время вопрос снижения потребления топливно-энергетических ресурсов является достаточно острым для нашей страны, поэтому эта статья является достаточно актуальной. Разработанные имитационные модели работы тепловоза достаточно наглядно показывают неэффективность системы, используемой в настоящее время. Функционально модель делится на блоки, моделирующие работу дизеля, тягового генератора, тяговых двигателей и блока, который вычисляет сопротивление движению поезда. Для вычисления сопротивления движению поезда принят участок Харьков-Мерефа. Предложенная функциональная схема гибридного тепловоза включает дизель, синхронный стартер-генератор, выпрямитель, аккумуляторную и суперконденсаторную батареи, статический преобразователь, тяговые двигатели. Использование накопителей энергии на тепловозе позволяет внедрить системы управления тяговыми двигателями для улучшения их характеристик. Применение гибридного тепловоза позволяет повысить его КПД за счет высокого КПД при работе от накопителей энергии. Подобное решение позволяет сократить расход топлива не менее чем на 40%, так как большая часть маневровой работы будет осуществляться на питании от тяговой аккумуляторной батареи, и обеспечить высокую экологическую чистоту локомотива. Экономия топлива после выполнения такой модернизации составляет около 100 т в год, при такой экономии возврат средств, потраченных на модернизацию, составляет около 5 лет.

**Ключевые слова:** тепловоз ЧМЭЗ; гибридная силовая установка; математическая модель; вентильно-индукторный двигатель.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Сокол. Е. И.*

UDC 629.424.1.001.76

S. H. BURYAKOVSKYY<sup>1</sup> (USURT), A. S. MASLIY<sup>2</sup> (USURT), D. P. POMAZAN<sup>3</sup> (USURT), I. V. DENYS (PJSC "CARTEL")

Ukrainian State Academy of Railway Transport. Feuerbach sq., 7, Kharkov, 61050, Ukraine <sup>1</sup>Ph.D., Professor, tel: +380503012069, e-mail: [sergbyr@i.ua](mailto:sergbyr@i.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0001-9422-6390](http://orcid.org/0000-0001-9422-6390), <sup>2</sup>Ph.D., docent, tel: +380974137970, e-mail: [a.masliy@ukr.net](mailto:a.masliy@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0003-0938-7144](http://orcid.org/0000-0003-0938-7144), <sup>3</sup>student, tel: +380630176561, e-mail: [daniil.pomazan@mail.ru](mailto:daniil.pomazan@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0002-5467-8824](http://orcid.org/0000-0002-5467-8824), PJSC "CARTEL" str. Dnieper highway, 84a, m. Krivoy Rog, 50026, Ukraine, CEO, tel: +380503214176, e-mail: [div99@ukr.net](mailto:div99@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0002-0160-2340](http://orcid.org/0000-0002-0160-2340)

## RATIONALE FOR MODERNIZATION OF DIESEL LOCOMOTIVES CHME3 USING HYBRID PROPULSION SYSTEM

This article is devoted to problems of inefficient use of energy resources shunting locomotives during their work. As of 2009, diesel chme3 (especially in Russia and Ukraine) in addition to its core functions, often used as a commuter train locomotives on short malozadiyanyh areas. So now the question of reducing consumption of energy resources is quite acute for our country, so this article is very relevant. The developed simulation model of locomotive quite clearly shows the inefficiency of the system in use at present. Functionally, the model is divided into blocks of modeling jobs diesel traction generator and traction motors unit that calculates the resistance of the train. To calculate the resistance of the train entered Kharkiv-Merefa. The proposed functional diagram of a hybrid locomotive includes diesel, synchronous starter generator, rectifier, battery and battery ultracap, static converters, traction engines. The use of energy storage allows to introduce diesel locomotive traction engines control systems to improve their performance. Application hydride locomotive can increase its efficiency by high efficiency when working on energy storage. This solution can reduce fuel consumption by at least 40%, as most of shunting will be powered by the traction battery, and ensure high environmental cleanliness locomotive. Fuel savings after implementation of this modernization is about 100 tons per year, in this economy you return the money spent on modernization, is about 5 years.

**Keywords:** CHME3 diesel; hybrid propulsion system; mathematical model; valve-inductor motor.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Sokil Ye. I.*

О.М. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup> (ХНУМГ), Б.Г. ЛЮБАРСЬКИЙ<sup>2</sup> (НТУ «ХП»), Є.С. РЯБОВ<sup>3</sup>  
(«ЕЛЕКТРОВАЖМАШ»)

<sup>1</sup>Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, кандидат технічних наук, доцент, тел.: 095 688 27 16, ел. пошта: [petersanya2007@mail.ru](mailto:petersanya2007@mail.ru)

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, доктор технічних наук, професор, тел.: 067 993 75 69, ел. пошта: [iboris19111972@mail.ru](mailto:iboris19111972@mail.ru)

<sup>3</sup>Державне підприємство завод «Електроважмаш», Харків, кандидат технічних наук, завідувач сектором, тел.: 097 302 14 54

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГУНА НА РЕЖИМИ РОБОТИ АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА НАПРУГИ

### Вступ та постановка проблеми

У сучасному тяговому приводі для живлення асинхронного тягового двигуна (АТД) застосовуються два режими роботи автономного інвертору напруги (АІН) – режим однократної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), при великих швидкостях обертання та просторово-векторної ШІМ, при пуску та малих швидкостях. Ефективність тягового приводу в певному режимі його роботи оцінюватимемо за критерієм максимуму його ККД за умови дотримання вимог, що накладаються режимами роботи. Тому завдання визначення ефективності тягового приводу зводиться до знаходження максимуму функції ККД приводу. Слід зазначити що енергія, яка перетворюється електрорухоми́м складом, протягом перетворення проходить шлях, що визначається, в першу чергу, структурою тягового приводу. На режими роботи кожний з ланок тягового приводу впливають різні фактори. Так, наприклад, на режими роботи вхідного перетворювача впливають в першу чергу процеси у тяговій мережі, на механічну частину тягового приводу – режими руху електрорухоми́го складу (ЕРС) на ділянці колії (швидкість руху та сила тяги). Режими роботи АТД та вихідного перетворювача визначаються режимами роботи ЕРС – параметрами руху ЕРС, а також режимами роботи тягового приводу. На відміну від тягового приводу на основі колекторних тягових двигунів, тяговий привод на основі АТД з АІН може працювати в одній і той же точці тягової характеристики (частоти обертання та моменту) з різним рівнем втрат у елементах приводу. Тому задачу визначення оптимальних режимів роботи тягового приводу можливо звести до визначення оптимальних режимів роботи ланки АТД – АІН з урахуванням обмежень, що встановлюються на роботу механічної частини тягово-

го приводу (обмеження по зчепленню та швидкості).

### Літературний огляд

У роботах [1-9] зазначається, що тяговий привод (ТП) електрорухоми́го складу може працювати у режимах:

- максимальної тяги або гальмування – режим максимального моменту АТД;
- підтримання заданої швидкості руху – режим максимального ККД АТД;
- вибіг або механічне гальмування – режим холостого ходу АТД.

Для кожного з цих режимів перехід з режиму роботи АІН з однократної ШІМ до просторово-векторної проходить при різних частотах обертання. У роботах [1-3] зазначається значний вплив температури обмоток АТД на режими роботи ТП та на його ефективність. У роботі [4] обумовлені загальні підходи по визначенню ефективності тягового приводу. У роботах [1-3] зазначено, що температура обмоток АТД суттєво впливає на режими роботи ТП. Таким чином, ідентифікація режимів роботи АІН в залежності від температури ТД є актуальною науковою задачею.

### Мета статті

Розробка методики визначення залежності зміни режиму роботи автономного інвертору напруги з режиму просторово-векторної до однократної широтно-імпульсної модуляції від температури обмоток тягового двигуна.

### Основний матеріал дослідження

За положеннями роботи [6] ефективність тягового приводу можливо навести у вигляді виразів:

$$\eta_1 = \begin{cases} \begin{cases} U_{op} = 1; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ F_d \rightarrow \max, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v_{nc} < v_{\max} \\ F_d > 0 \end{cases}; & \begin{cases} U_{op} = 2; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v_{nc} < v_{\max} \\ F_d > 0 \end{cases} \\ \begin{cases} U_{op} = 3; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v_{nc} < v_{\max} \\ F_d < 0 \end{cases}; & \begin{cases} U_{op} = 5; \\ \eta_1 \rightarrow \max, \\ F_d \rightarrow \min, \\ |F_d| < |F'_k|, \\ v_{nc} < v_{\max} \\ F_d < 0 \end{cases} \end{cases}, \quad (1)$$

де  $\eta_1$  – ККД ланки АТД – АІН,

$U_{op}$  – режим роботи тягового приводу ЕРС,

$F_d$  – сила тяги або гальмування, яку створює ЕРС,

$F'_k$  – сила обмеження за зчепленням контакту колесо-рейка,

$v_{nc}$  – швидкість руху складу,

$v_{\max}$  – конструктивна швидкість руху.

$U_{op}=4$  – режим вибігу – холостого ходу, тому він не розглядається при визначенні ефективності приводу.

Визначення ККД ланки АТД – АІН проводиться на основі підходів запропонованих у роботах [1,2,7] що включають в себе наступне: для вирішення задачі визначення оптимальних режимів роботи ТП необхідно вирішити чотири задачі умовної оптимізації параметрів роботи тягового приводу (в режимах розгону  $U_{op}=1$ , режим рекуперативного гальмування  $U_{op}=5$ , режим підтримання заданої швидкості руху  $U_{op}=2,3$  ).

Для кожний з цих задач необхідно розглянути два режиму: застосування однократної або просторово-векторної ШІМ. Режим розгону та режим рекуперативного гальмування схожі між собою. Застосуємо метод векторних цільових функцій запропонований в роботі [10]. У якості цільової функції для режиму розгону оберемо векторну функцію з наступними параметрами:

$$F_{c1} = \begin{bmatrix} 1 - \eta_1 \rightarrow \min, \\ -F_d \rightarrow \min, \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Перший компонент обрано таким чином, що при його мінімізації приходиться максимізація ККД тягового приводу.

Для режиму рекуперативного гальмування векторна цільова функція має вигляд:

$$F_{c5} = \begin{bmatrix} 1 - \eta_1 \rightarrow \min, \\ F_d \rightarrow \min, \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Для режиму підтримання заданої швидкості руху у якості цільової функції оберемо:

$$F_{c3} = F_{c4} = 1 - \eta_1 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Таким чином було обрано цільові функції для визначення оптимальних режимів роботи тягового приводу, які дозволяють визначити оптимальні режими ТП при застосування різних режимів ШІМ.

Вектор параметрів для вирішення задачі для режиму просторово-векторного ШІМ має вигляд:

$$X_{PV} = \begin{bmatrix} s \\ K_m \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де  $s$  – ковзання АТД,  $K_m$  – коефіцієнт модуляції АІН,

а для режиму однократної ШІМ має скалярний вигляд

$$X_O = s \quad (6)$$

Таким чином визначені параметри умовної оптимізації режимів роботи ТП при застосуванні просторово-векторної та однократної ШІМ.

Для вирішення задачі оптимізації використаний пакет *optlab* для *MATLAB* розроблений в НТУ «ХПІ» [10,11], який дозволяє легко варіювати різними методами рішення задач оптимізації. Як показали рішення тестових завдань, широко використовуваним методом багатогранника, що деформується результат рішення сильно залежить від стартової точки. Досягнення бажаної величини сили лінійного двигуна можливо при різних поєднаннях геометричних розмірів. Можливі випадки, коли рішення взагалі не може бути знайдене. Це говорить про множину локальних мінімумів, тобто про те, що цільова функція – багатоекстремальна. Тому оператори оптимізаційної процедури повинні містити разом з детермінованими і стохастичні компоненти, здатні оживити пошуковий процес при завмиранні його в локальних мінімумах рельєфу цільової функції. Одним з таких методів оптимізації є метод, що використовує генетичні алгоритми [10-13].

Генетичним алгоритмам властивий один недолік – вони знаходять оптимальне рішення з ма-

лою точністю. Для виключення цього недоліку в [12] запропонований комбінований генетичний алгоритм, який в завершальній стадії пошуку використовує локальні методи оптимізації, зокрема, метод Нелдера - Міда [11]. Такий підхід підвищує ефективність пошуку і уточнює глобальний мінімум.

Результати досліджень для тягового приводу трамвая Татра ТЗВПА з асинхронним тяговим двигуном АД 931 наведено на рис. 1.

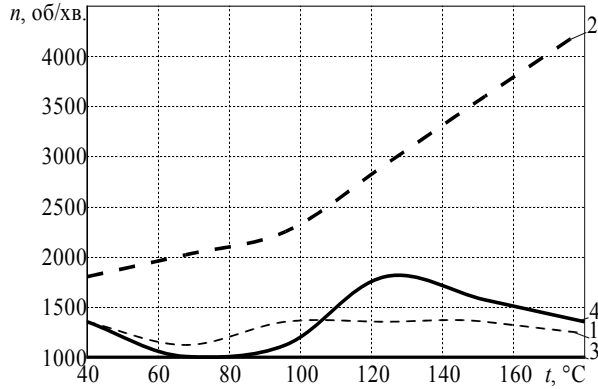


Рис. 1. Точка переходу тягового приводу трамвая з режиму просторово-векторної до однократної ШІМ при режимах  $U_{op} = 1$  – розгін трамвая; 2 –  $U_{op} = 2$  – тяга при підтриманні заданої швидкості руху; 3 –  $U_{op} = 3$  – гальмування при підтриманні заданої швидкості руху; 4 –  $U_{op} = 5$  – електричне гальмування

В режимі розгону рухомого складу  $U_{op} = 1$  (див. рис. 1), цей перехід здійснюється на частоті обертання близько 1125...1350 об/хв., і незначно змінюється від температури обмоток двигуна. Перехід при рекупераційному гальмуванні ( $U_{op} = 5$ ) здійснюється при більших значеннях частот обертання 1013...1800 об/хв. При збільшенні температури частота обертів точки переходу у трамвая зростає до 1800 об/хв. при темпера-

турі обмоток близько 120 °С, а потім зменшується до 1350 об/хв. при температурі 180 °С.

### Висновки.

1. Розроблено методику визначення залежності зміни режиму роботи автономного інвертору напруги від температури обмоток тягового двигуна, яка основана на визначенні ефективності тягового приводу. Особливістю методики є визначення ККД приводу за результатами вирішення задачі оптимізації параметрів тягового приводу з застосуванням комбінованого методу пошуку на базі генетичного алгоритму та методу Нелдера – Міда.

2. Запропоновані цільові функції для визначення ефективності приводу які дозволяють визначити оптимальні режими тягового приводу при застосуванні різних режимів ШІМ. Для режимів розгону та гальмування запропоновано застосування векторної цілющої функції з компонентами, що обумовлюють ККД та силу тяги, а для режиму підтримання швидкості руху скалярна функція, яка обумовлена ККД приводу.

3. В якості параметрів для режиму просторово-векторної ШІМ обрано вектор зі складовими ковзання та коефіцієнту модуляції, а для однократної ШІМ – ковзання.

4. Встановлено, що у режимі розгону трамвая Татра ТЗВПА з асинхронним тяговим двигуном АД 931, перехід з режиму просторово-векторної до однократної ШІМ здійснюється на частоті обертання близько 1125...1350 об/хв. і незначно змінюється від температури обмоток двигуна. Перехід при рекупераційному гальмуванні здійснюється при більших значеннях частот обертання 1013...1800 об/хв. При збільшенні температури частота обертів точки переходу у трамвая зростає до 1800 об/хв. при температурі обмоток близько 120 °С, а потім зменшується до 1350 об/хв. при температурі 180 °С.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Любарский, Б. Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу: дис. на здобуття наукового ступеня д. т. н. за спец. 05.22.09 «Електротранспорт» / Б. Г. Любарский; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Х., 2014. – 368 с.
2. Любарский, Б.Г. Оптимизация режимов работы тягового асинхронного привода / Б.Г. Любарский // Электрика. – 2014 – №6. – С. 5–10.
3. Петренко, О.М. Математична модель оптимального керування рухом електрорухомого складу на підставі вирішення рівнянь Гамільтона-Якобі-Беллмана/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті

### REFERENCES

1. Lyubarskiy B. G. *Teoretychni osnovy dlya vyboru ta otsinky perspektyvnykh system elektromekhanichnoho peretvorenniya enerhiyi elektrorukhomoho skladu*. Dokt., Diss. [The theoretical basis for the selection and evaluation of promising systems of Electromechanical energy conversion electric rolling stock. Doct. Diss.]. Kharkiv, 2014. 368 p.
2. Lyubarskiy B. G. Optimizatsiya rezhimov raboty tyagovogo asinkhronnogo privoda [Optimization of operation modes of asynchronous traction drive]. *Elektrika – Electrics*, 2014, no. 6, pp. 5-10.
3. Petrenko O.M., Lyubarskiy B. G. Matematychna model' optymal'noho keruvannya rukhom elektromekhanichnoho skladu na pidstavi vyrishennya rivnyan' Hamil'tona-Yakobi-Bellmana [Mathematical model of optimal motion control of electric rolling stock on the

ті. – 2016. - № 2. – С. 19-24

4. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов / Е.П. Блохин, А.Н. Пшинько, Г.В. Евдомах, В.В. Скалозуб // *Залізничний транспорт України*. - 2001. - № 6. - С. 19-22.

5. Дмитриенко, В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. - Х.: Изд. центр "НТМТ", 2013. - 248 с.

6. Петренко, О.М. Програмно-орієнтована математична модель руху транспортного засобу/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський, М.Л. Глебова // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. - Х., 2016. - № 6(1178). - С. 89-95.

7. Петренко, О.М. Визначення ефективності електрорухомого складу. Основні положення та підходи / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. - 2015. - № 6. - С. 8-13.

8. Петренко, О.М. Аналіз методів визначення енергетично оптимальних параметрів управління транспортних засобів / О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // *Системи озброєння і військова техніка*. - 2015. - № 4(44). - С. 96-100.

9. Петренко, О.М. Визначення чинників, що впливають на ефективність електричного транспортного засобу/ О.М. Петренко, Б.Г. Любарський // *Системи обробки інформації*. - 2015. - № 12(137). - С. 37-42.

10. Моделі і методи оптимізації показників якості систем автоматичного управління енергоблоку атомної електростанції: автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.13.07 / В.П. Северин; Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т". - Харків, 2007. - 35 с.

11. Северин, В. П. Методы одномерного поиска. / В.П. Северин, Е.Н. Никулина. - Х.: НТУ ХПИ, 2013. - 124 с.

12. Рябов, Е.С. Синтез тягового реактивного индукторного двигателя с аксиальным магнитным потоком для скоростного подвижного состава / Б.Г. Любарский, В.П. Северин, Е.С. Рябов В.Л. Емельянов // *Електротехніка і електромеханіка*. - 2010. - №6. - С. 28-30.

13. Панченко, Т. В. Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко. - Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. - 88 с.

Надійшла до друку 10.12.2016.

basis of the solution of the equations of Hamilton-Jacobi-Bellman]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti* - *Information management systems in railway transport*, 2016, no. 2, pp. 19-24.

4. Blokhin E.P., Pshin'ko A.N., Evdomakha G.V., Skalozub V.V. Vybor energeticheski optimal'nykh rezhimov vedeniya poezdov [The selection of energetically optimal modes of trains]. *Zaliznychnyy transport Ukrainy* - *Railway transport of Ukraine*, 2001, no. 6, pp. 19-22.

5. Dmitrienko V.D., Zakovorotnyy A.Yu. *Modelirovanie i optimizatsiya protsessov upravleniya dvizheniem dizel'-poezdov* [Modeling and optimization of the processes control the movement of diesel trains]. Kharkiv, NTMT Publ., 2013. 248 p.

6. Petrenko O.M., Lyubarskiy B. G., Hlyebova M.L. Prohramno-orientovana matematychna model' rukhu transportnoho zasobu [Software-oriented mathematical model of the vehicle]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'kyy politekhnichnyy instytut»* [Bulletin of National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"], 2016, no. 6 (1178), pp. 89-95.

7. Petrenko O.M., Lyubarskiy B. G. Vyznachennya efektyvnosti elektrorukhomoho skladu. Osnovni polozhennya ta pidkhody [Determination of the effectiveness of electric rolling stock. The main provisions and approaches]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti* - *Information management systems in railway transport*, 2015, no. 6, pp. 8-13.

8. Petrenko O.M., Lyubarskiy B. G. Analiz metodiv vyznachennya enerhetychno optymal'nykh parametriv upravlinnya transportnykh zasobiv [Analysis of methods for determining energy-optimal control parameters of vehicles]. *Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika* - *Weapons systems and military equipment*, 2015, no. 4(44), pp. 96-100.

9. Petrenko O.M., Lyubarskiy B. G. Vyznachennya chynnykiv, shcho vplyvayut' na efektyvnist' elektrychnoho transportnoho zasobu [Determination of factors affecting the efficiency of electric vehicles]. *Systemy obrobky informatsiyi* - *System of information processing*, 2015, no. 12(137), pp. 37-42.

10. Severyn V.P. *Modeli i metody optimizatsiyi pokaznykiv yakosti system avtomatichnoho upravlinnya enerhobloku atomnoyi elektrostansiyi*. Avtoreferat Diss. [Models and methods for optimization of quality parameters of automatic control systems of the nuclear power plant unit. Author's abstract]. Kharkiv, 2007, 35 p.

11. Severyn V.P., Nikulina E.N. *Metody odnomernogo poiska* [Methods of one-dimensional search]. Kharkiv, NTU KhPI Publ., 2013. 124 p.

12. Lyubarskiy B. G., Severyn V.P., Ryabov E.S., Emel'yanov V.L. Sintez tyagovogo reaktivnogo induktornogo dvigatelya s aksial'nym magnitnym potokom dlya skorostnogo podvizhnogo sostava [Synthesis of reactive traction induction motor with axial magnetic flux for high-speed rolling stock]. *Elektrotekhnika i elektromekhanika* - *Electrical engineering and electromechanics*, 2010, no. 6, pp. 28 - 30.

13. Panchenko T. V. *Geneticheskie algoritmy* [Genetic algorithms]. Astrakhan', Astrakhan University Publ., 2007. 88 p.

Внутрішній рецензент Гетьман Г. К.

Зовнішній рецензент Андрієнко П.Д.

Стаття присвячена розробці методики визначення залежності зміни режиму роботи автономного інвертору напруги від температури обмоток тягового двигуна, яка основана на визначенні ефективності тягового приводу. Особливістю методики є визначення ККД приводу за результатами вирішення задачі оптиміза-

ції параметрів тягового приводу з застосуванням комбінованого методу пошуку на базі генетичного алгоритму та методу Нелдера – Мида. Запропоновані цільові функції для визначення ефективності приводу які дозволяють визначити його оптимальні режими при застосування різних режимів ШІМ. Для режимів розгону та гальмування запропоновано застосування векторної цільової функції з компонентами, що обумовлюють ККД та силу тяги, а для режиму підтримання швидкості руху скалярна функція, яка обумовлена ККД приводу.

В якості параметрів для режиму просторово-векторної ШІМ обрано вектор зі складовими ковзання та коефіцієнту модуляції, а для однократної ШІМ – ковзання.

**Ключові слова:** асинхронний тяговий двигун; автономний інвертор напруги; широтно-імпульсна модуляція; оптимальні режими роботи; ККД тягового приводу; температура обмоток тягового двигуна.

УДК 629.429.3:621.313

А.Н. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup> (ХНУГХ), Б.Г. ЛЮБАРСКИЙ<sup>2</sup> (НТУ «ХПИ»), Е.С. РЯБОВ<sup>3</sup> (ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ)

<sup>1</sup>Харківський національний університет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, Харьков, кандидат технических наук, доцент, тел.: 095 688 27 16, эл. почта: [petersanya2007@mail.ru](mailto:petersanya2007@mail.ru)

<sup>2</sup>Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, доктор технических наук, профессор, тел.: 067 993 75 69, эл. почта: [iboris19111972@mail.ru](mailto:iboris19111972@mail.ru)

<sup>3</sup>Государственное предприятие завод «Электротяжмаш», Харьков, кандидат технических наук, заведующий сектором, тел.: 097302 14 54

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТОК АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РЕЖИМ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОР НАПРЯЖЕНИЯ

Статья посвящена разработке методики определения зависимости изменения режима работы автономного инвертора напряжения от температуры обмоток тягового двигателя, которая основана на определении эффективности тягового привода. Особенностью методики является определение КПД привода по результатам решения задачи оптимизации параметров тягового привода с применением комбинированного метода поиска на базе генетического алгоритма и метода Нелдера - Мида. Предложенные целевые функции для определения эффективности привода позволяющие определить его оптимальные режимы работы при применении различных режимов ШИМ. Для режимов разгона и торможения предложено применение векторной целевой функции с компонентами, обусловленными КПД и силой тяги, а для режима поддержания скорости движения скалярная функция, которая обусловлена КПД привода.

В качестве параметров для режима пространственно-векторной ШИМ выбран вектор с составляющими скольжения и коэффициента модуляции, а для однократной ШИМ - скольжение.

**Ключевые слова:** асинхронный тяговый двигатель; автономный инвертор напряжения; широтно-импульсная модуляция; оптимальные режимы работы; КПД тягового привода; температура обмоток тягового двигателя.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Андриенко П.Д.*

UDC 629.429.3:621.313

О.М. ПЕТРЕНКО<sup>1</sup> (NUUE), B.G. LIUBARSKYI<sup>2</sup> (NTU“KPI”), Y.S. RYABOV<sup>3</sup> (ELECTROTYAZHMASH)

<sup>1</sup> Associate Professor, National University of Urban Economy in Kharkiv, tel.: 095 688 27 16, e-mail: [petersanya2007@mail.ru](mailto:petersanya2007@mail.ru)

<sup>2</sup> Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" tel.: 067 993 75 69, e-mail: [iboris19111972@mail.ru](mailto:iboris19111972@mail.ru)

<sup>3</sup> Candidate of Sciences, SE Plant Electrotiazhmash, Kharkiv, Section Head, tel.: 097 302 14 54

## THE RESEARCH OF TEMPERATURE EFFECTS WINDINGS OF THE INDUCTION TRACTION MOTORS ON OPERATION AUTONOMOUS VOLTAGE INVERTERS

The article is devoted to the development of methods for determining changes depending on the operating mode of autonomous inverter voltage from the traction motor temperature, which is based on determining the effectiveness of traction drive. A feature of the technique is the definition of drive efficiency as a result of solving the problem of optimizing the traction drive parameters using the combined method of the search on the basis of genetic algorithm and method of Nelder - Mead. The proposed target function to determine the effectiveness of its drive for determining the optimum operating conditions when using different modes of PWM. For acceleration and deceleration mode provides the use of a vector of the objective function with the components caused by the efficiency and power of traction, and the mode is the cruise scalar function, which is due to drive efficiency.

As parameters for the mode space vector PWM is selected vector with sliding components and a modulation ratio, and for the single PWM - slip.

**Keywords:** asynchronous traction motor; autonomous voltage inverter; pulse-width modulation; optimal modes; effectiveness factor; temperature windings traction engine.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andriienko P.D.*

Р.М. ШИДЛОВСЬКИЙ<sup>1</sup> (ЛКТІ), М.О. БАБ'ЯК<sup>2</sup> (ЛФ ДНУЗТ), В.В. АРТЕМЧУК<sup>3</sup> (ДНУЗТ)

<sup>1</sup>Львівський коледж транспортної інфраструктури Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, вул. Снопківська, 47, 79011, м. Львів, Україна, тел.: +38 (096) 21-838-12, ел. пошта: [shydlovskiy@email.ua](mailto:shydlovskiy@email.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0002-3499-0861](http://orcid.org/0000-0002-3499-0861)

<sup>2</sup>Каф. «Транспортні технології», Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12<sup>а</sup>, 79052, м. Львів, Україна, тел.: +38 (097) 907-50-72, ел. пошта: [babik@mail.ru](mailto:babik@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0001-5125-9133](http://orcid.org/0000-0001-5125-9133)

<sup>3</sup>Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, тел.: +38 (067) 565-98-03, ел. пошта: [art\\_vv@ukr.net](mailto:art_vv@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0002-6056-5834](http://orcid.org/0000-0002-6056-5834)

## СУЧАСНИЙ СТАН НАДІЙНОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ВАНТАЖНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

### Вступ

Головне завдання транспорту полягає в повному і своєчасному задоволенні потреб промисловості і населення в перевезеннях, підвищення ефективності та якості роботи транспортної системи. Для досягнення мети серед багатьох завдань є, зокрема, підвищення рівня використання і надійності роботи електрорухомого складу на залізницях. Ефективність електричної тяги повинна зростати не тільки внаслідок створення нових потужних електровозів, але й поліпшення тягових, гальмівних, динамічних і техніко-економічних характеристик існуючого електрорухомого складу постійного і змінного струму, а також підвищення його надійності.

### Постановка проблеми

Одним з основних завдань щодо забезпечення функціональності рухомого складу України є оновлення та модернізація залізничного рухомого складу з метою збільшення його строку служби, підвищення безпеки та швидкості руху [1].

Магістральними електровозами виконується близько 82% вантажних і 70% пасажирських перевезень у прямому та місцевому сполученнях, тому їх наявність у потрібній кількості відіграють у перевізному процесі ключову роль [2].

На даний час відзначається істотне старіння експлуатованого парку електровозів. У найближчі кілька років залізниці будуть змушені забезпечувати перевезення вантажо- і пасажиропотоків без збільшення і помітного оновлення парку тягового рухомого складу.

Експлуатація морально застарілого рухомого складу з низькими динамічними властивостями є однією з причин недостатнього рівня безпеки руху поїздів і високих експлуатаційних витрат, обумовлених збільшенням витрат на ремонтні

роботи, а також підвищенням споживання енергії на тягу поїздів.

У процесі експлуатації електровозів змінюються їх характеристики, які пов'язані із зносом контактуючих поверхонь вузлів тертя, втратою характеристик демпферів, гумових і гумометалевих деталей, зі зміною передбачених конструкцією зазорів, що, як правило, призводить до неконтрольованого зростання показників динаміки, збільшення динамічної напруженості основних несучих елементів екіпажу, обмеження швидкості руху локомотивів.

Експлуатація рухомого складу за межами призначеного терміну служби веде не тільки до погіршення показників експлуатаційної надійності, але і до зростання витрат на його утримання. В якості тимчасового заходу на період відсутності розвиненого виробництва необхідно проводити модернізацію з продовженням терміну служби на ремонтних заводах. У зв'язку з цим великий інтерес представляє можливість удосконалення показників динамічних якостей електровозів ВЛ10, ВЛ11м і ВЛ80т, які мають уніфіковану механічну частину.

При цьому надзвичайно актуальними є завдання збереження, а в більшості випадків поліпшення його експлуатаційних характеристик. Виходячи з реального стану економіки України в умовах жорсткої економії коштів питання оновлення тягового рухомого складу не стоїть на першому плані, а першочерговим є модернізація тягового рухомого складу з метою збільшення його строку служби.

Це питання актуальне і для Львівської залізниці, про що свідчить модернізація електровозів ВЛ11м на Львівському локомотиворемонтному заводі. Збереження існуючого тягового рухомого складу, підтримання його в працездатному стані шляхом дотримання вимог Положення [3],

Правил ремонту – завдання першочергове для служби локомотивного господарства.

На жаль, з кожним роком збільшується кількість позапланових ремонтів електровозів здебільшого з причин неякісного виконання ремонту і передчасного зношування вузлів та агрегатів. Виходячи з Аналізу стану безпеки руху поїздів в локомотивному господарстві Львівської залізниці за 2014-2015 рр.[4] (табл. 1), очевидно, що найбільшу кількість позапланових ремонтів становлять електровози, постановка яких на позаплановий ремонт викликана несправностями механічної частини – колісних пар та іншого меха-

нічного обладнання. Тому актуальним є розробка заходів, що дозволяють домогтися збільшення терміну служби елементів механічної частини локомотива. Нажаль, утримання механічної частини електровозів у справному стані не завжди виконується. Так, при експлуатації на ділянках колії із підвищеним зношуванням гребеня необхідно звертати увагу на утримання протівідносних пристроїв та коліскового підвішування (рис. 1, рис. 2), оскільки порушення норм їх утримання погіршує умови вписування в криві ділянки колії, а, відповідно, і зношування гребеня бандажа.

Таблиця 1

Дані постановки електровозів на позаплановий ремонт

Депо	Усього		В тому числі							
			ТЕД	Допоміжні машини	Електричні апарати	Мех. обладнання	Компресори	Автогальмівні прилади	Прилади безпеки	Інші
	2015	2014	2015/2014	2015/2014	2015/2014	2015/2014	2015/2014	2015/2014	2015/2014	2015/2014
Львів-Захід	42	64	3/10	0/4	3/17	12/14	1/2	0/2	2/2	21/13
Мукачеве	107	246	3/34	6/11	15/49	60/113	1/5	1/0	2/2	19/32
Залізниця	149	310	6/44	6/15	18/66	72/127	2/7	1/2	4/4	40/45
Різниця 2015/2014 рр.	-161		- 38	- 9	- 48	- 55	- 5	- 1	0	- 5

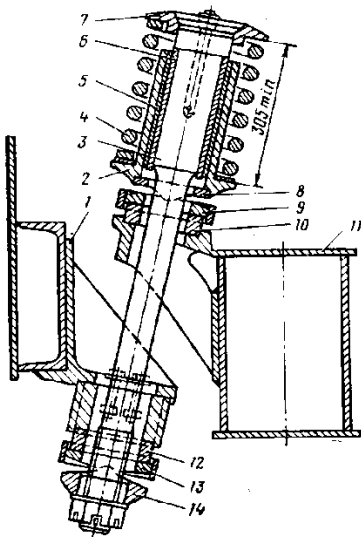


Рис. 1. Конструкція коліскового підвішування кузова електровозів серій ВЛ11м, ВЛ80:

1 – кронштейн рами кузова; 2 – направляючий стакан; 3 – стержень підвішування; 4 – пружина; 5 – захисна втулка стакану; 6 – облицювальна втулка стержня; 7 – грибоподібна верхня опора пружини; 8 – опора верхнього шарніра; 9 – прокладка верхнього шарніра; 10 – нижня опора верхнього шарніра; 11 – боковина рами візка; 12, 14 – опори нижнього шарніра; 13 – прокладка нижнього шарніра



Рис. 2. Коліскове підвішування кузова електровозів серій ВЛ11м, ВЛ80

## Огляд літератури

У роботах Мілованова А.А. досліджено вплив конструкції механічної частини електровозів, а саме – вузлів зв'язку візка з кузовом на інтенсивність зношування гребеня бандажа та запропоновано способи їх модернізації [5]. Однак, не тільки даний вузол впливає на зношування гребеня бандажа – механічна частина працює в комплексі. Шляхи зменшення цієї проблеми необхідно досліджувати.

## Викладення основного матеріалу

Особливість кінематичної схеми коліскового підвішування – наявність декількох джерел виникнення сил поперечного напрямку, що призводять до поступового зміщення стержня до зіткнення з елементами верхнього шарніра [6]. При стисканні витой пружини завжди спостерігається явище угону, тобто прагнення одного упорного кінця пружини зміститися в поперечному напрямі відносно іншого. У цій конструкції це призводить до вибірки поперечних проміжків між втулками і притиснення їх один до одного з неконтрольованим зусиллям  $T_1$  (рис. 3).

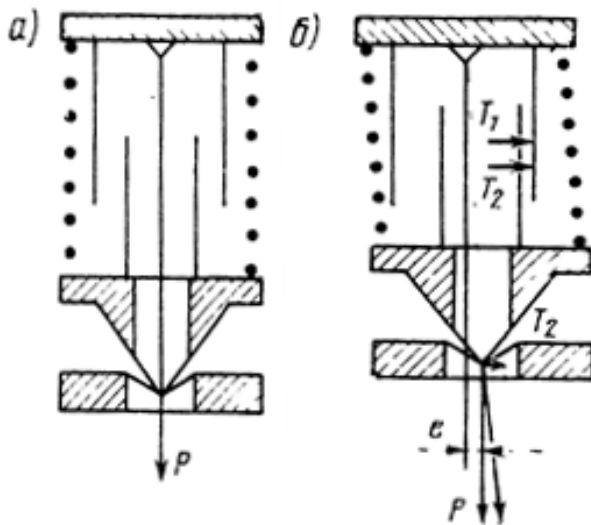


Рис. 3. Схеми навантаження елементів коліскового підвішування

Зважаючи на те що пружина працює на стискання, вона, подібно до маятникової опори, має негативну складову поперечної жорсткості, що прагне зміщувати верхню опору відносно стержня в поперечному напрямі.

При довжині пружини в стислому стані 300 мм це зусилля  $T_2$  складає приблизно 200 Н на 1 мм поперечного зміщення; воно

додається до сили  $T_1$  притискаючої втулки. Сила тертя між втулками істотно загрублює пружний зв'язок кузовної ступені підвішування і погіршує вертикальну плавність ходу локомотива. Одночасно сила  $T_2$  і момент, що створюється нею постійно навантажують усі суміжні опорні поверхні, викликаючи їх поступове зношування, що супроводжується ростом сили  $T_2$  у міру збільшення початкового зміщення  $e$ .

Втулки коліскового підвішування (а також маятникової підвіски ТЕД, стійок ресорного підвішування, корпусів букс для кріплення валика ресорного підвішування) мають бути із високомарганцевистої зносостійкої сталі 110Г13Л (сталь Гадфільда). Висока в'язкість і, одночасно, спроможність зміцнюватись, надають цій сталі стійкість проти зношування, що задовольняє умовам надійності ЕРС в експлуатації. Проте, при відсутності втулок із сталі 110Г13Л у локомотивних депо дозволяється втулки виготовляти із листів ресорної сталі 55С2, 60С2, 60С2А ГОСТ 14959-79 – листи після нагріву гнуть і зварюють стиковим швом, після цього – обробляють до розмірів у кресленні.

Можливе також виготовлення втулок із сталі 45 з подальшою механічною обробкою.

Як наслідок, елементи коліскового підвішування піддаються надмірному зношуванню, а також отримують різного виду пошкодження (рис. 4, 5).

Системи з колісковим механізмом отримали широке застосування, у тому числі і для швидкісного рухомого складу. Це пояснюється порівняльною простотою виготовлення і обслуговування коліскового механізму, стабільністю його характеристик.

У той же час наявність кінематичних пар з поверхневим тертям, а отже, зношуванням, велике число і значна вага деталей, неможливість зменшення вертикального габаритного розміру коліскового механізму, що утрудняє компонування візків, все частіше примушують відмовлятися від цього рішення.

Перспективним в експлуатації може стати використання втулок із полімерних антифрикційних композиційних матеріалів, що містять в якості волокнистого наповнювача скловолокно та/або вуглецеве волокно. [7, 8]. Це дозволить знизити коефіцієнт тертя та зменшити знос поверхонь тертя, що, в свою чергу, підвищить термін служби втулок.



Рис. 4. Пошкодження стержнів і втулок коліскового підвішування кузова електровозів серій ВЛ11М, ВЛ80:  
а) стержень із новими втулками; б) стержень із надмірнозношеною втулкою та зношенням тіла стержня; в) зношення втулок стержня



Рис. 5. Пошкодження втулок стержня коліскового підвішування кузова електровозів серій ВЛ11М, ВЛ80

### Висновки

На даний час підприємствам локомотивного господарства залізниць, що експлуатують електровози ВЛ10, ВЛ11м і ВЛ80т у експлуатації необхідно ретельно підбирати антифрикційні матеріали із достатнім запасом міцності, зносостійкості, високою контактною витривалістю, високою корозійною стійкістю і забезпечувати при монта-

жі мінімальне початкове зміщення поверхонь тертя. Зміцнення поверхонь втулок, змащування елементів тертя, правильне регулювання підвішування з дотриманням зазорів, використання нових типів матеріалів дозволяють збільшити довговічність вузлів, що у свою чергу дозволить продовжити термін експлуатації електрорухомого складу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Транспортна стратегія України на період до 2020 року: [схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2010 р. N 2174-р]. – [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80>
2. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 ро-

### REFERENCES

1. Transportna stratehiya Ukrayiny na period do 2020 roku [Transport Strategy of Ukraine till 2020 year]. Cabinet of Ministers of Ukraine, 2010. Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2174-2010-%D1%80>
2. Kompleksna prohrama onovlennya zaliznychnoho rukhomoho skladu Ukrayiny na 2008-2020 roky [Comprehensive program update railway

ки[схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27серпня 2008 р. N 1155-р]. – Київ: Міністерствотранспорту та зв'язку України, Укрзалізниця, 2009. – 300 с.

3. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового та моторвагонного рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро та дизель-поїздів): [наказ Укрзалізниці N 429Ц/од від 15.10.2015р.]. – Київ: Міністерство інфраструктури України, Укрзалізниця, 2015.

4. Аналіз стану безпеки руху поїздів в локомотивному господарстві Львівської залізниці за 2014-2015 р.р. – Львів: Львівська залізниця, 2015.

5. Милованов А.А. Повышение эксплуатационной эффективности люлежного подвешивания локомотивов применением опорных сферических шарниров: автореф. дис. канд. тех. наук: /Милованов Алексей Алексеевич; Иркутский государственный университет путей сообщения. – Иркутск, 2004. Режим

доступа:

<http://www.dissercat.com/content/povyshenie-ekspluatatsionnoi-effektivnosti-lyulechnogo-podveshivaniya-lokomotivov-primenenie#ixzz4CL2Mu5ED>

6. Механическая часть тягового подвижного состава: Учебник для вузов ж.-д. трансп./И. В. Бирюков, А. Н. Савоськин, Г. П. Бурчак и др.; Под ред. И. В. Бирюкова. – М.: Транспорт, 1992. – 440 с.

7. Патент 2441787 С1, RU МПК B61H 13/34, F16C 33/04. Втулка рычажной тормозной системы рельсового транспорта /Литвиненко А. В., Южалин Д.С., Южалин С.Н. (RU) – № 2010137691/11; заявл. 09.09.2010; опубл. 10.02.12, Бюл. №4. – [Електрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/images/patents/17/2441787/patent-2441787.pdf>

8. Патент 2499921 С1, RU МПК F16C 33/04, F16C 33/12, B61H 13/34. Втулка рычажной тормозной системы рельсового транспорта /Коломиец Т. В., Марьин Э. В., Моторин С.В., Озолин А. А. (RU) – № 2012130413/11, заявл. 23.07.2012; опубл. 27.11.13, Бюл. №33. – [Електрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/images/patents/497/2499921/patent-2499921.pdf>

Надійшла до друку 02.12.2016.

Внутрішній рецензент *Горобець В. Л.*

Зовнішній рецензент *Лагодич В. М.*

У статті розглянуто причини постановок електровозів на позапланові ремонти по Львівській залізниці, причини зношування вузлів механічної частини електровозів, конструктивні особливості та особливості кінематичної схеми коліскового підвішування електровозів. Розроблені рекомендації щодо підвищення експлуатаційних характеристик та надійності механічної частини електровозів серій ВЛ10, ВЛ11М, ВЛ80.

**Ключові слова:** механічна частина електровозів; зношення гребеня бандажа; ресорне підвішування електровозів.

rolling stock Ukraine in 2008-2020 years ]. Kyiv, Ministry of Transport and Communications of Ukraine, Ukrzaliznytsia, 2009. – 300 p.

3. Polozhennya pro planovo-poperedzhuval'nu systemu remontu i tekhnichnoho obsluhovuvannya tyahovoho ta motorvahonnoho rukhomoho skladu (elektrovoziv, teplovoziv, elektro ta dyzel'-poyizdiv). [The provisions of the planned warning system repair and maintenance of traction and motor-wagon rolling stock (locomotives, diesel locomotives, electric and diesel trains)]. Kyiv, Ministry of Infrastructure of Ukraine, Ukrzaliznytsia, 2015.

4. Analiz stanu bezpeky rukhu poyizdiv v lokomotyvnomu hospodarstvi L'vivs'koyi zaliznytsi za 2014-2015 r.r. [Analysis of traffic safety in the locomotive department of Lviv railway for 2014-2015 years]. Lviv, Lviv Railway, 2015.

5. Milovanov A.A. Povyshenie ekspluatatsionnoy effektivnosti lyulechnogo podveshivaniya lokomotivov primeneniem opornyih sfericheskikh sharnirov. Avtoreferat Diss. [Increase operational efficiency cradle suspension locomotives using the reference spherical joints]. Irkutsk, 2004. Available at: <http://www.dissercat.com/content/povyshenie-ekspluatatsionnoi-effektivnosti-lyulechnogo-podveshivaniya-lokomotivov-primenenie#ixzz4CL2Mu5ED>

6. Birjukov I. V., Savos'kin A. N., Burchak G. P. Mehanicheskaya chast' t'govogo podvizhnogo sostava [Mechanical parts traction rolling stock]. Moscow, Transport Publ., 1992. 440 p.

7. Litvinenko A. V., YUjalin D.S., YUjalin S.N. Vtulka ryichajnoy tormoznoy sistemy rel'sovogo transporta [Bushing brake lever rail transport] Patent RU no. 2441787 S1, 2010. Available at: <http://www.freepatent.ru/images/patents/17/2441787/patent-2441787.pdf>

8. Kolomiets T. V., Marin E. V., Motorin S.V., Ozolin A. A. Vtulka ryichajnoy tormoznoy sistemy rel'sovogo transporta [Bushing brake lever rail transport] Patent RU no. 2499921 S1, 2012. Available at: <http://www.freepatent.ru/images/patents/497/2499921/patent-2499921.pdf>

УДК 629.423

Р.М. ШИДЛОВСКИЙ<sup>1</sup> (ЛКТИ), Н.А. БАБЯК<sup>2</sup> (ЛФ ДНУЖТ), В.В. АРТЕМЧУК<sup>3</sup> (ДНУЖТ)

<sup>1</sup> Львовский колледж транспортной инфраструктуры Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, г. Львов, ул. Снопковская, 47, 79011, Украина, тел.: +38 (096) 21-838-12, эл. почта: [shydlovskiy@email.ua](mailto:shydlovskiy@email.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0002-3499-0861](https://orcid.org/0000-0002-3499-0861)

<sup>2</sup> Каф. «Транспортные технологии», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И.Блажкевич, 12<sup>а</sup>, 79052, г. Львов, Украина, тел.: +38 (097) 907-50-72, эл. почта: [babik@mail.ru](mailto:babik@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0001-5125-9133](https://orcid.org/0000-0001-5125-9133)

<sup>3</sup> Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 49010, г. Днипро, ул. Лазаряна, 2, тел.: +38 (067) 565-98-03, эл. почта: [art\\_vv@ukr.net](mailto:art_vv@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0002-6056-5834](https://orcid.org/0000-0002-6056-5834)

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ

В статье рассмотрены причины постановок электровозов на внеплановые ремонты по Львовской железной дороге, причины износа узлов механической части электровозов, конструктивные особенности и особенности кинематической схемы колыбельного подвешивания электровозов. Разработаны рекомендации по повышению эксплуатационных характеристик и надежности механической части электровозов серий ВЛ10, ВЛ11М, ВЛ80.

**Ключевые слова:** механическая часть электровозов; износ гребня бандажа; рессорное подвешивание электровозов.

Внутренний рецензент *Горобец В. Л.*

Внешний рецензент *Лагодич В. М.*

UDC 629.423

R.M. SHYDLOVSKYI<sup>1</sup> (LCTI), M.O. BABYAK<sup>2</sup> (LB DNURT), V.V. ARTEMCHUK<sup>3</sup> (DNURT)

<sup>1</sup> Lviv College of transport infrastructure of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 47, Snopkivska Street, Lviv, Ukraine, 79011, tel.: +38 (096) 21-838-12, e-mail: [shydlovskiy@email.ua](mailto:shydlovskiy@email.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0002-3499-0861](https://orcid.org/0000-0002-3499-0861)

<sup>2</sup> Department of "Transportation Technology", Lviv branch of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 12<sup>a</sup>, I. Blajevych Street, Lviv, Ukraine, 79052, tel.: +38 (097) 907-50-72, e-mail: [babik@mail.ru](mailto:babik@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0001-5125-9133](https://orcid.org/0000-0001-5125-9133)

<sup>3</sup> Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: [art\\_vv@ukr.net](mailto:art_vv@ukr.net), ORCID: [orcid.org/0000-0002-6056-5834](https://orcid.org/0000-0002-6056-5834)

## CURRENT STATE RELIABILITY OF THE ELEMENTS OF MECHANICAL PARTS FREIGHT LOCOMOTIVES

The article examines the reasons statements of electric locomotives on unplanned repair in Lviv railway, causes wear of the mechanical units of electric locomotives, features and characteristics of the kinematic scheme cradle suspension locomotives. Designed recommendations to improve the performance and reliability of the mechanical part of the series electric locomotives VL10, VL11M, VL80.

**Keywords:** electric transport; power recuperation; dispersed power supply; zone recovery; the voltage at the poles.

Internal reviewer *Gorobets V. L.*

External reviewer *Lagodych V. M.*

Л. Л. ГОНЧАРОВА (ДЕТУТ)

Державний економіко-технологічний університет транспорту, кафедра «Автоматизація та комп'ютерно - інтегровані технології транспорту», 03049, Київ - 49, вул. Лукашевича, 19, тел.: 099-288-12-08, ел. пошта: [ktarael@yandex.ru](mailto:ktarael@yandex.ru)

## МІКРОПРОЦЕСОРНІ СИСТЕМИ І МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КОМУТАЦІЙНОГО РЕСУРСУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ ТЯГОВИХ МЕРЕЖ

### Постановка проблеми

Рішення комплексної проблеми організації надійності функціонування тягових електричних мереж і оптимізації режимів електроживлення пов'язано з необхідністю проведення циклу наукових досліджень в сфері інтелектуалізації спектру процедур управління швидкоплинними технологічними процесами електропостачання залізницям. Суттєві можливості сучасних мікропроцесорних засобів і комп'ютерних мереж та інформаційних технологій створили основу для появи нового напрямку «розумної енергетики» і відкрили нові можливості організації інтелектуальних мереж електропостачання в яких найшло відображення сучасних тенденцій ціноутворення, особливостей функціонування швидкоплинних процесів електропостачання, а також використання енергоресурсів включаючи спектр взаємних послуг між суб'єктами ринку електроенергії [1-3]. Організація інтелектуальних тягових електричних мереж базується на нових принципах самовідновлення і саморегуляції, що є основою сучасних SMART Grid – технології які, на сьогоднішній день, є загальноновизнаними у світі [2]. В той же час, необхідно відмітити, що на ефективність електропостачання і безаварійність роботи енергосистеми суттєво впливають високі значення параметрів потоку відказів високовольтних комутаційних апаратів, що характеризується, в першу чергу, недостатнім застосуванням мікропроцесорних засобів моніторингу параметрів режимів для проведення аналізу роботоспроможності і прогнозу аварійних ситуацій високовольтних вимикачів [3,4]. Домінуючим, при цьому, є комутаційний ресурс високовольтного апарату який нормується як допустиме число відключень і являється показником надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що експлуатація високовольтних вимикачів неможлива без засобів комп'ютерної діагностики яка завдяки моніторингу функціонування забезпечує своєчасно персонал інформа-

цією про фактичний стан комутаційного апарату [2]. Неповнота отриманих первинних інформаційних даних проявляється в сукупності негативних впливів у вигляді збільшенні втрат, погіршенні надійності роботи та неекономічності режимів. В ряді публікацій американських і європейських енергетичних компаній акцентується увага на те, що використання мікропроцесорних засобів моніторингу і діагностики відкриває суттєві можливості удосконалення обслуговування комутаційних апаратів з різним дугогасним середовищем (повітряним, елегазовим, масляним), зменшити термін технічного обслуговування, зменшити більш як в два рази число їх відказів та об'єктивно регулювати міжремонтні строки по фактичному стану високовольтних вимикачів [2-4]. В умовах значного старіння парку високовольтних комутаційних апаратів, підвищених потоків відмов та несвоечасного технічного переозброєння електромереж природним стало питання комп'ютерної інтелектуалізації процедур реєстрації, обробки, передачі і представлення інформації для контролю і діагностику комплексу важливих параметрів вимикачів в процесі комутації під напругою, аналізувати їх роботоспроможність та прогнозувати рівень їх надійності.

### Відокремлення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми

Проведена автором сукупність наукових досліджень в предметній області управління і інтелектуалізації процедур керування електропостачанням дозволили зробити висновок, що питанням діагностики експлуатаційного стану комутаційних апаратів, виявленню дефектів в процесі їх функціонування, запобігання відмов, оптимізації технічного обслуговування апаратів в науково-технічній літературі приділено високу увагу в теоретичному і прикладному аспектах. В той же час питанням створення комп'ютерних засобів безперервного моніторингу параметрів режимів роботи високовольтних вимикачів і в першу чергу вузлів та елеме-

нтів, що мають великий рівень уразливості для контролю поведінки головної контактної мережі та функціональних елементів управління вимикачами – компонентів дугогасильних пристроїв і їх приводів приділено не достатньо уваги.

### Мета роботи

Розробка математичних моделей уразливих вузлів високовольтних вимикачів і методів синтезу мікропроцесорних систем моніторингу і визначення комутаційного ресурсу.

### Основний матеріал дослідження

До комплексу показників, що є найбільш відповідальними при відображенні експлуатаційного стану високовольтних комутаційних апаратів можна віднести проміжок часу включення і відключення вимикача, тривалості горіння дуги, величина струму, що відключається, залишковий ресурс, наявність повторного загорання. Вищевказані характеристики необхідно контролювати в повітряних, масляних і елегазових вимикачах. Крім того, в деяких повітряних вимикачах необхідно вести постійний контроль вологості газу в дугогасному середовищі, в масляних комутаційних апаратах проводити моніторинг температури і рівня масла, його прозорості, а для елегазових необхідний постійний контроль вологості, щільності, кислотності елегазу концентрації продуктів його розпаду, наявність часткових розрядів і витоку елегазу. Для забезпечення надійності функціонування комутаційних апаратів необхідно проводити під напругою моніторинг комплексу важливих параметрів з врахуванням їх передісторії для оцінки їх технічного стану, аналізу роботоспроможності і прогнозу можливих аварійних режимів. Неповнота зареєстрованих первинних даних в процесі експлуатації може негативно проявитися в погіршенні надійності роботи, збільшенні втрат електроенергії і неекономічності електроспоживання. Тому при створенні сучасних мікропроцесорних засобів моніторингу режимів і визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів необхідні обґрунтовані технічні рішення. Для виконання функцій комутації в процесі електропостачання популярними стали елегазові високовольтні апарати підвищеної надійності в яких високі технічні параметри досягаються завдяки використанню в якості ізолюючого середовища інертного елегазу, електроізолюючі властивості якого вищі ніж в повітря майже в три рази. Для забезпечення надійності, довговічності і висо-

кого рівня якості роботи комутаційних апаратів розглянемо приклади організацію комп'ютерних засобів проведення під напругою постійного моніторингу сукупності параметрів сучасних елегазових високовольтних вимикачів. В процесі виконання комутаційних процедур елегазовим вимикачем головною проблемою є організація постійного контролю електричного зношення контактів, що необхідно реалізувати від початку  $t_p$  розмикання контактів до моменту  $t_k$  повного зникнення струму при виконанні комутаційної операції. Величина  $R^j$ , що характеризує електричне зношення контактів в результаті виконання відповідної  $j$  комутації може бути визначена згідно виразу [1-3]

$$R^j = \int_{t_s}^{t_a} i^2(t) dt, \quad (1)$$

де  $i(t)$  - значень струму, що протікає через контакти елегазового високовольтного вимикача в момент комутації. Повне електричне зношення контактів  $R^n$  по кожній фазі високовольтного елегазового вимикача за проведених відповідно  $n$  комутаційних процедур може бути визначено наступним чином

$$R^n = \sum_{j=1}^n \int_{t_s}^{t_a} i^2(t) dt. \quad (2)$$

Отримані параметри моніторингу  $R^j$  і  $R^n$  можуть бути використані для прогнозу критичного запасу  $R^{kp}$  комутаційного ресурсу вимикача за допомогою наступної залежності

$$\left| R^{\max} - R^n \right| \leq R^{kp}, \quad (3)$$

де  $R^{\max}$  - значення ресурсу, що надається згідно технічних умов, електричного зношення контактів високовольтних елегазових вимикачів.

По аналогії можна визначити критичний час  $T^{kp}$  горіння дуги в момент комутації

$$\left| T^{\max} - \tau^g \right| \leq T^{kp}, \quad (4)$$

де  $T^{\max}$  - максимальний час горіння дуги, що надається згідно технічних умов;  $\tau^g$  - час горіння дуги за  $n$  комутацій, що визначається згідно виразу

$$\tau^g = \sum_{j=1}^n \tau_j^g. \quad (5)$$

Екстремальні значення струмів в процесі виконання  $j$ -ї комутації можуть бути визначені як

$$\begin{aligned} i_{\max}^j &\in \{ i^j(t) \}; \\ i_{\min}^j &\in \{ i^j(t) \}; \\ j &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (6)$$

Запас надійності по струму комутаційних апаратів обчислюється згідно

$$\begin{aligned} |i_{\max}^j - i_{\max}^3| &\leq \varepsilon_1, \\ |i_{\min}^j - i_{\min}^3| &\leq \varepsilon_2, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $i_{\max}^3, i_{\min}^3$  - відомі значення максимального і мінімального струму, що надаються згідно технічних умов.

Дуже важливою характеристикою є такий показник як запас надійності по тиску  $P_j$  дугового газу в камері високовольтного вимикача, що може бути записано

$$|P_j - P^3| \leq \varepsilon_3 \quad (8)$$

де  $P_j$  - тиск газу в камері комутаційного апарату в процесі виконання  $j$ -ї комутації;  $P^3$  - значення тиск газу, що надається згідно технічних умов.

Схемна реалізація мікропроцесорної системи моніторингу комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів, організована з єдиних інформаційних позицій і орієнтована для проведення моніторингу технічного стану будь якого типу високовольтного комутаційного апарату, наведена на рис.1.

В системі проводиться комп'ютерний моніторинг широкого спектру параметрів таких як відпрацьований вимикачем ресурс, залишковий ресурс, критичний ресурс та його граничні значення, а також реалізується прогноз величини надійності і визначення перед-аварійних та аварійних режимів з метою формування експрес і повної інформації для передачі її на всі рівні керування електропостачанням з метою прийняття оперативних рішень. Комп'ютерна система включає мікропроцесор для організації безперервного моніторингу високовольтних вимикачів і обробки та представлення первинної інформації, а також набір електронних ключів, шифраторів, запам'ятовуючого пристрою, регістрів, дешифраторів, формувача аналогових сигналів, аналого-цифрового перетворювача і чотирьох портового модуля для забезпечення комунікації мікропроцесорної системи з комп'ютерним середовищем керування електропостачанням на тягу.

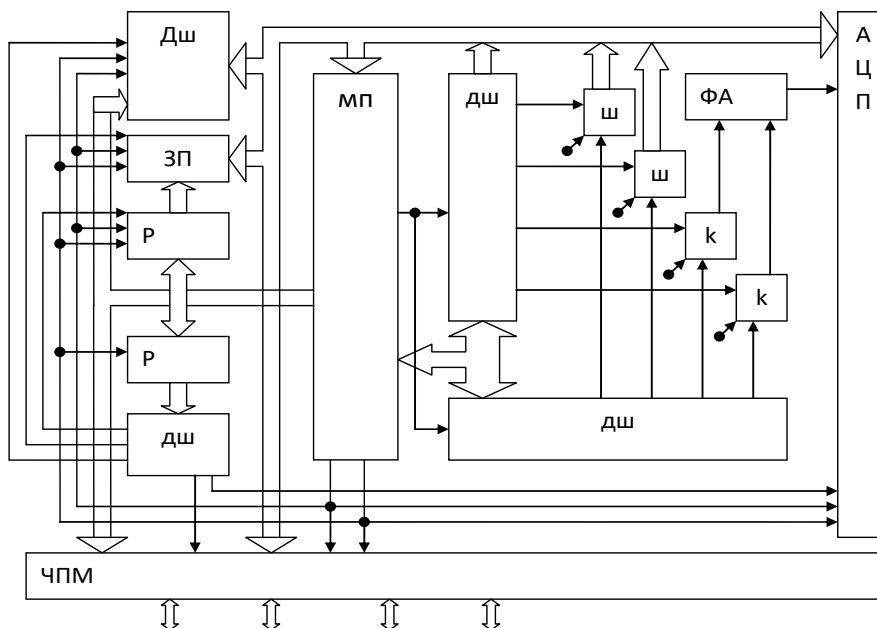


Рис. 1. Мікропроцесорна система моніторингу комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів тягових мереж

Після запуску мікропроцесорної системи моніторингу комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів проводиться її інсталяція і обробляється ряд процедура на предмет можливого обміну інформацією з верхнім рівнем керування електропостачанням, після чого виконується процедура, що переводить систему в робочий режим. В процесі функціонуванні системи моніторингу, за заданим періодом  $T$  реалізується опитування сукупності датчиків аналогових сигналів струму  $i(t)$ , тиску  $P_j$ , температури, моменту  $t_s$  початку відключення високовольтного вимикача і ряду інших, а також дискретних сигналів, що характеризують стан системи захисту. Аналогові сигнали через відповідні ключі і формувач аналогових сигналів поступають на вхід аналого-цифрового перетворювача де представляються у вигляді цифрового еквівалента і записуються в пам'ять мікропроцесора. В той же час, дискретні сигнали за допомогою шифраторів шифруються у вигляді відповідного цифрового значення і записуються також в запам'ятовуючий пристрій мікропроцесора. Після реєстрації первинної інформації мікропроцесором проводиться аналіз на предмет появи сигналу  $t_s$  початку відключення комутаційного апарату. Якщо сигнал  $t_s$  з'явився, то в мікропроцесорі реалізується обчислювальний процес значень вторинних параметрів згідно математичних залежностей (1)-(8) які визначають режим комутаційного апарату. В той же час, мікропроцесор запускає таймера в роботу і з заданою частотою  $f$  опитує датчик кінця виключення комутаційного апарату. В момент відключення високовольтного вимикача, мікропроцесором реєструється термін  $\tau_j^g$  горіння дуги і відповідно момент зникнення струму. Після цього в мікропроцесорі, на основі обчислених значень сукупності параметрів згідно математичних виразів (1)-(8) проводиться аналіз технічного стану високовольтного вимикача. Якщо ресурс високовольтного комутаційного апарату відповідає технічним умо-

вам, тобто не критичний, то процедура моніторингу продовжується. В тому випадку коли ресурс критичний, то мікропроцесором формується експрес-інформація і повна інформація про аномальний режим високовольтного комутаційного апарату. Далі мікропроцесором за допомогою чотирьох портового модуля, що забезпечує ряд комунікаційних процедур мікропроцесорної системи з комп'ютерних середовищем керування електропостачанням на тягу, вся інформація передається на вищі рівні управління для прийняття відповідних рішень.

### Висновки

1. На основі проведеного аналізу сучасного стану тягових мереж і силових електричних об'єктів тягових підстанцій показано, що сучасні тенденції забезпечення високого рівня ефективності і оптимізації електропостачання пов'язані з необхідністю проведення циклу наукових досліджень в сфері інтелектуалізації спектру процедур управління швидкоплинними технологічними процесами електропостачання залізницям та безперервного моніторингу параметрів режимів роботи високовольтних вимикачів і в першу чергу вузлів та елементів, що мають великий рівень уразливості для контролю поведінки головної контактної мережі.

2. На основі проведених досліджень розглянуто ряд математичних моделей і комп'ютерно-орієнтованих методів визначення надійності уразливих вузлів високовольтних комутаційних апаратів як основи синтезу комп'ютерних засобів проведення під наругою серійного моніторингу параметрів режимів високовольтних вимикачів в процесі виконання комутаційних процедур.

3. Запропоновано мікропроцесорну систему визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів тягових мереж, що реалізує з єдиних інформаційних позицій моніторингу параметрів режимів, контроль функціонування та прогноз залишкового, відпрацьованого, і критичного ресурсу.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стасюк О.І., Гончарова Л.Л., Максимчук В.Ф. Методи організації інтелектуальних електричних мереж залізниць на основі концепції SMART Grid // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2014. № 2 – С.29 – 37.
2. Буткевич О.Ф., Левконюк А.В., Стасюк О.І. Підвищення надійності моніторингу допустимості завантажень контрольованих перетинів енергосистем // Технічна електродинаміка. – 2014. - №2 – С.

### REFERENCES

1. Stasjuk O.I., Goncharova L.L., Maksymchuk V.F. Metody organizacii' intelektual'nyh elektrychnykh merezh zaliznych' na osnovi koncepcii' SMART Grid [Methods of intelligent electrical networks of railways on the concept of SMART Grid] // Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti. [Information controlling systems for railway], 2014, No 2, pp.29 – 37.
2. Butkevych O.F., Levkonjuk A.V., Stasjuk O.I.

56-67.

3. Гончарова Л.Л. Математичні моделі комп'ютерної інтелектуалізації технологій синхронних векторних вимірів параметрів електричних мереж // Гончарова Л.Л., Стасюк О.І. Кібернетика і системний аналіз, Київ-2016, №5 – С 41-49. <http://www.kibernetika.org>.

4. Гончарова Л.Л. Диференційні математичні моделі дослідження комп'ютерної архітектури всерединної системи керування дистанції електропостачання залізниць // Гончарова Л.Л., Стасюк О.І. Кібернетика і системний аналіз, Київ-2017, № 1 – С 1-8. <http://www.kibernetika.org>.

Надійшла до друку 15.12.2016.

Pidvyshtennja nadijnosti monitoryngu dopustymosti zavantazhen' kontrol'ovanyh peretyniv energosys-tem [Improving the reliability of monitoring admissibility downloads intersections of controlled power systems] // Tehnichna elektrodynamika [Technical electrodynamics], 2014, No 2, pp. 56-67.

3. Goncharova L.L. Matematychni modeli komp'yutnoi intelektualizacii' tehnologij synhron-nyh vektornyh vymiriv parametriv elektrychnykh me-rezh [Mathematical models of computer technologies intellectualization synchronous vector measurements of parameters of power networks]. Kibernetika i systemnyj analiz [Cybernetics and System Analysis], 2016, No 5, pp. 41-49. <http://www.kibernetika.org>.

4. Goncharova L.L. Dyferencijni matematychni modeli doslidzhennja komp'yutnoi' arhitektury vse-rezhymnoi' systemy keruvannja dystancii' elektropostachannja zaliznych' [Differential mathematical model studies computer architecture vserezhymnoyi distance control system electrical railways]. Kibernetika i systemnyj analiz [Cybernetics and System Analysis], 2017, No 1, pp. 1-8. <http://www.kibernetika.org>

Внутрішній рецензент *Кузнецов В.Г.*

Зовнішній рецензент *Стасюк О.І.*

Наведено результати аналізу сучасного стану наукових досліджень в сфері інтелектуалізації процедур оптимізації електропостачання на тягу, показано, що сучасні тенденції забезпечення високого рівня ефективності і оптимізації електропостачання пов'язані з необхідністю проведення циклу наукових досліджень в сфері інтелектуалізації спектру процедур управління швидкоплинними технологічними процесами електропостачання залізницям та безперервного моніторингу параметрів режимів роботи високовольтних вимикачів. Наведені математичні моделі і комп'ютерно-орієнтовані методи визначення надійності уразливих вузлів високовольтних комутаційних апаратів як основи синтезу комп'ютерних засобів моніторингу параметрів режимів. Запропоновано мікропроцесорну систему визначення комутаційного ресурсу високовольтних вимикачів тягових мереж, що реалізує з єдиних інформаційних позицій моніторингу параметрів режимів, контроль функціонування та прогноз залишкового, відпрацьованого, і критичного ресурсу.

**Ключові слова:** математична модель; метод; ресурс; моніторинг; мікропроцесорна система.

**УДК 681.325**

**Л. Л. ГОНЧАРОВА (ГЭТУТ)**

Государственный экономико-технологический университет транспорта, кафедра «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии транспорта», 03049, Киев-49, ул. Лукашевича, 19, тел.: 099-288-12-08, эл. почта: [ktarael@yandex.ru](mailto:ktarael@yandex.ru)

## МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННОГО РЕСУРСА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ

Приведены результаты анализа современного состояния научных исследований в сфере интеллектуализации процедур оптимизации электроснабжения на тягу, показано, что современные тенденции обеспечения высокого уровня эффективности и оптимизации электроснабжения связаны с необходимостью проведения цикла научных исследований в сфере интеллектуализации спектра процедур управления мимолетными технологическими процессами электроснабжения железным дорогам и непрерывного мониторинга параметров режимов работы высоковольтных выключателей. Приведены математические модели и компьютерно-ориентированные методы определения надежности уязвимых узлов высоковольтных коммутационных аппаратов как основы синтеза компьютерных средств мониторинга параметров режимов. Предложено микропроцессорную систему определения коммутационного ресурса высоковольтных выключателей тяговых сетей, реализует с единых информационных позиций мониторинга параметров режимов, контроль функционирования и прогноз остаточного, отработанного и критического ресурса.

**Ключевые слова:** математическая модель; метод; ресурс; мониторинг; микропроцессорная система.

Внутренний рецензент *Кузнецов В.Г.*

Внешний рецензент *Стасюк О.И.*

© Гончарова Л. Л., 2016

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ НЕФТЕПРОВОДА

При низких температурах позволяет уменьшить вязкость транспортируемых веществ и обеспечить работоспособность этих трубопроводов. При эксплуатации трубопроводов возможно образование конденсата и его замерзание, также необходим обогрев.

Подогрев труб может осуществляться горячей водой или паром. Экономические расчеты показывают, что при обогреве трубопроводов паром необходимы значительные капитальные затраты и высокие эксплуатационные расходы. Отечественная и зарубежная практика показывают, что при электрическом нагреве трубопроводов капитальные затраты в 1,5 раза меньше, чем при нагреве паром.

В настоящее время, например электрический нагрев, находит все большее применение. Кроме того, электрический нагрев позволяет просто регулировать температуру, а конструкции систем электрического нагрева трубопроводов проще, чем конструкции нагрева паром [1].

Электронагрев нефтепроводов может осуществляться индукционным способом:

Индукционный нагрев характеризуется выделением тепла в проводящем нагреваемом объекте и бесконтактной передачей энергии, поэтому применение индукционного нагрева нефтепроводов во многих случаях оказывается предпочтительным.

Если нагреваемый объект из металла поместить в электромагнитное поле проводника, по которому проходит переменный ток, то в объекте по закону электромагнитной индукции будут индуцироваться вихревые токи, вызывающие разогрев объекта. При этом проводник, по которому пропускается переменный электрический ток, называют индуктирующим проводом. Индуктирующему проводу конструктивно может быть придана любая форма в зависимости от типа нагреваемого объекта. Чаще всего это цилиндрическая спираль. Устройство, выполненное на основе индуктирующего провода, называется индуктором.

Следует особо подчеркнуть тот факт, что наибольшее использование электромагнитной энергии будет в том случае, если коэффициент

мощности индуктора будет равен единице. Этого можно добиться, если параллельно индуктору подключить компенсирующую батарею конденсаторов. Компенсирующая батарея конденсаторов и индуктор образуют нагрузочный колебательный контур, в котором реактивная энергия, запасенная в магнитном поле индуктора, передается конденсаторам, переходя в энергию электрического поля. В качестве источника питания нагрузочного колебательного контура используется высокочастотный генератор, например, транзисторный преобразователь частоты.

Высокочастотные индукционные нагреватели имеют выходной диапазон частот 10-40 или 30-100 кГц. Глубина проникновения индукционного поля в этом частотном диапазоне составляет 2-5 мм. При необходимости дальнейшего нагрева в глубину детали увеличивается время нагрева.

Современные транзисторные высокочастотные преобразователи индукционных установок, собранные на IGBT модулях имеют мощность от 5 кВт до 1000 кВт (1 МВт).

Процесс нагрева нефтепровода в полевых условиях может быть осуществлен с помощью всепогодной индукционной установки, представленной на рисунке 1 [2].

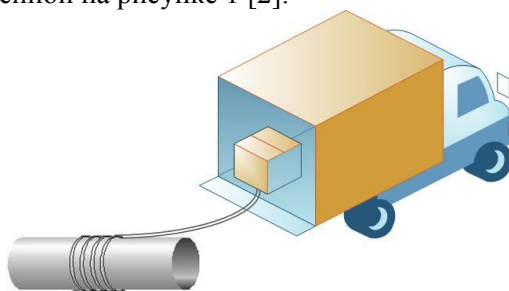


Рис. 1. Технологический процесс нагрева нефтепровода

Индуктирующий провод наматывается снаружи нефтепровода, образуя цилиндрический индуктор, зашунтированный компенсирующей батареей конденсаторов и подключается к высокочастотному генератору через закалочный (согласующий) трансформатор.

Согласующий трансформатор выполняет две важные функции, во-первых, оптимальное согласование параметров высокочастотного генератора с параметрами нагрузочного контура, а во-вторых, обеспечивает гальваническую развязку индуктора с генератором, повышая безопасность обслуживания. Управление режимом технологического процесса осуществляется с помощью контроллера.

На рисунке 2 показана принципиальная схема преобразователя частоты для индукционного нагрева нефтепровода [3].

На рисунке 3, 4 представлены результаты моделирования преобразователя частоты для индукционного нагрева нефтепровода. Как видно на рисунке получена частота 10 кГц.

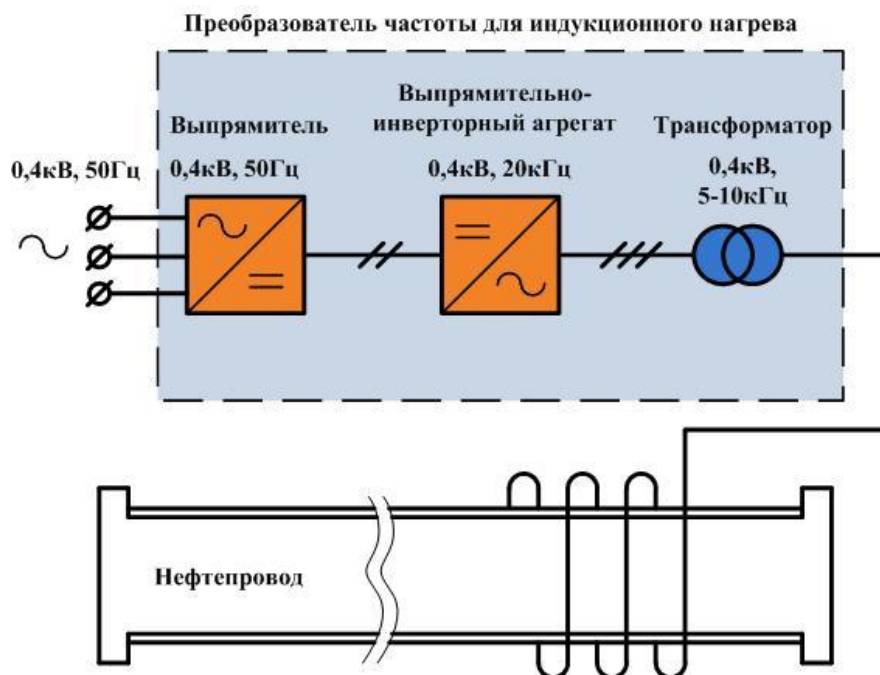


Рис. 2. Принципиальная схема преобразователя частоты для индукционного нагрева

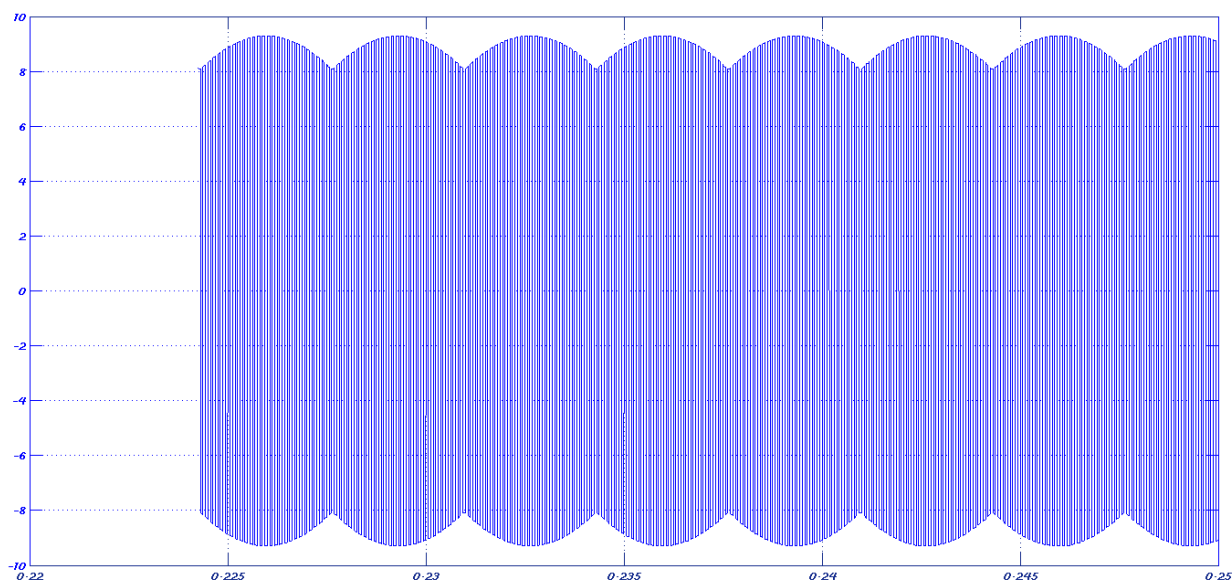


Рис. 3. Результаты моделирования в программном комплексе MatLab

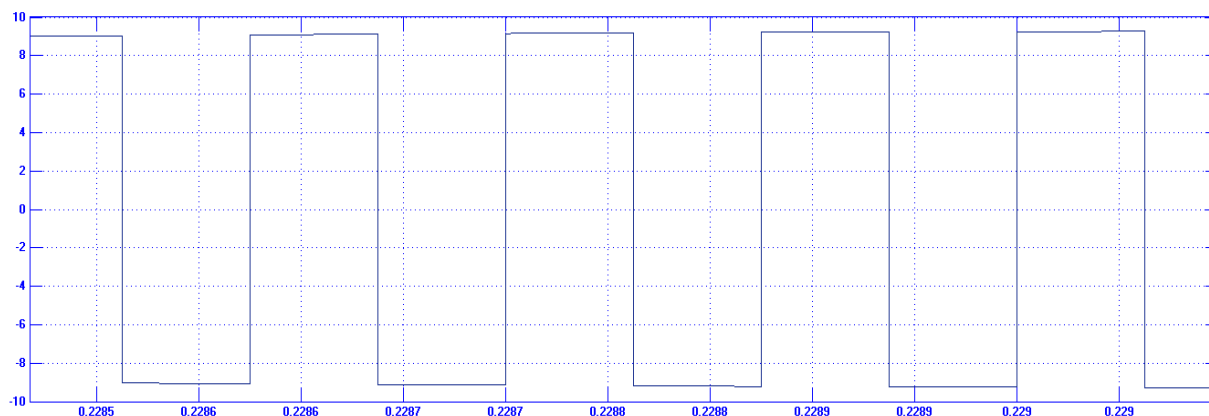


Рис. 4. Результаты моделирования в программном комплексе MatLab

## Выводы

Создана установка для индукционного нагрева нефтепровода с использованием высоких частот, что в свою очередь осуществляет нагрев всей полости нефтепровода. Большинство

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Технологические трубопроводы нефтебаз. Справочное издание. Тюменский индустриальный институт Ю.Д. Земенков, Н.А. Малюшин, Л.М. Маркова, А.Е. Лошинин. Источник: <http://www.gosthelp.ru/text/Tehnologicheskietruboprov.html>
2. Индукционный нагрев трубопроводов в полевых условиях. Дата публикации: 19.06.2013. Источник: <http://www.elsit.ru>
3. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л., Энергия, 1974, 264 с.

ство установок осуществляют нагрев только поверхности нефтепровода. Результаты данной работы применимы для практического использования в существующих НПЗ

## REFERENCES

1. Tekhnologicheskyye truboprovody neftebaz. Spravochnoe yzdanye. Tiimenskiy yndustrialnyi ynstitut Yu.D. Zemenkov, N.A. Maliushyn, L.M. Markova, A.E. Loshchynyn. Ystochnyk: <http://www.gosthelp.ru/text/Tehnologicheskietruboprov.html>
2. Ynduktsyonnyi nahrev truboprovodov v polevykh uslovyakh. Data publykatsyy: 19.06.2013. Ystochnyk: <http://www.elsit.ru>
3. Slukhotskiy A.E., Ryskin S.E. Yndukторы dlia ynduktsyonnoho nahreva. L., Enerhiya, 1974, 264 s.

Поступила в печать 05.12.2016.

Внутренний рецензент Муха А.М.

Внешний рецензент Омарбеков А.К.

Для транспортировки нефти по нефтепроводам, необходим индукционный нагрев, который предотвращает отложения на стенках труб и затвердевание. Подогрев нефти проводится на нефтяных промыслах, при транспортировке нефти дальним потребителям - НПЗ.

При низких температурах позволяет уменьшить вязкость транспортируемых веществ и обеспечить работоспособность этих трубопроводов. При эксплуатации трубопроводов возможно образование конденсата и его замерзание.

Индукционный нагрев характеризуется выделением тепла в проводящем нагреваемом объекте и бесконтактной передачей энергии, поэтому применение индукционного нагрева нефтепроводов во многих случаях оказывается предпочтительным.

Если нагреваемый объект из металла поместить в электромагнитное поле проводника, по которому проходит переменный ток, то в объекте по закону электромагнитной индукции будут индуцироваться вихревые токи, вызывающие разогрев объекта. При этом проводник, по которому пропускается переменный электрический ток, называют индуктирующим проводом. Индуктирующему проводу конструктивно может быть придана любая форма в зависимости от типа нагреваемого объекта. Чаще всего это цилиндрическая спираль. Устройство, выполненное на основе индуктирующего провода, называется индуктором.

Следует особо подчеркнуть тот факт, что наибольшее использование электромагнитной энергии будет в том случае, если коэффициент мощности индуктора будет равен единице. Этого можно добиться, если параллельно индуктору подключить компенсирующую батарею конденсаторов. Компенсирующая батарея конденсаторов и индуктор образуют нагрузочный колебательный контур, в котором реактивная энергия, запасенная в магнитном поле индуктора, передается конденсаторам, переходя в энергию электрического поля. В качестве источника питания нагрузочного колебательного контура используется высокочастотный генератор

**Ключевые слова:** индукционный нагрев; преобразователь частоты; транзисторы; электромагнитное поле, нефтеперерабатывающий завод, нефтепровод.

УДК 621.396

Д.Г. ИНСЕПОВ (КНДУ)

Казахський Національний дослідницький університет імені К.І. Сатпаєва, Республіка Казахстан, м. Алмати, вул. Ашхабадська, 1, 050011 тел. +7 (708) 107.5577, ел. пошта: [d.insepov@gmail.com](mailto:d.insepov@gmail.com)

## ВИСОКОЧАСТОТНИЙ ІНДУКЦІЙНИЙ ПІДГРІВ НАФТОПРОВОДУ

Для транспортування нафти нафтопроводом, необхідний індукційний нагрів, який запобігає відкладенню на стінках труб та його затвердіння. Підігрів нафти проводиться на нафтових промислах, при транспортуванні нафти віддаленим споживачам - НПЗ.

При низьких температурах це дозволяє зменшити в'язкість речовин, що транспортуються і забезпечити працездатність цих трубопроводів. При експлуатації трубопроводів можливе утворення конденсату і його замерзання.

Індукційний нагрів характеризується виділенням тепла в провідному об'єкті, що нагрівається і безконтактною передачею енергії, тому застосування індукційного нагріву нафтопроводів в багатьох випадках виявляється кращим.

Якщо нагрівається об'єкт з металу помістити в електромагнітне поле провідника, у якому проходить змінний струм, то в об'єкті за законом електромагнітної індукції виникають вихрові струми, що викликають розігрів об'єкта. При цьому провідник, по якому пропускається змінний електричний струм, називають індукуючим проводом. Індукуючий провід конструктивно може бути надана будь-якої форми в залежності від типу нагрівається об'єкта. Найчастіше, це циліндрична спіраль. Пристрій, виконаний на основі індукуючого проводу, називається індуктором.

Слід особливо підкреслити той факт, що найбільше використання електромагнітної енергії буде в тому випадку, якщо коефіцієнт потужності індуктора буде дорівнювати одиниці. Цього можна домогтися, якщо паралельно індуктора підключити компенсуючу батарею конденсаторів. Компенсуюча батарея конденсаторів і індуктор утворюють навантажувальний коливальний контур, у якому реактивна енергія, накопичена в магнітному полі індуктора, передається конденсаторів, переходячи в енергію електричного поля. Як джерело живлення навантажувального коливального контуру використовується височастотний генератор.

**Ключові слова:** індукційний підігрів; перетворювач частоти; транзистори; електромагнітне поле, нафтопереробний завод, нафтопровід.

Внутрішній рецензент *Муха А.М.*

Зовнішній рецензент *Омарбеков А.К.*

UDC 621.396

D.G. INSEPOV (KNRU)

Kazakh National Research University named after KI Satpayev, Republic of Kazakhstan st. Ashgabat, 1, 050011 tel. +7(708)107.5577, e-mail: [d.insepov@gmail.com](mailto:d.insepov@gmail.com)

## HIGH FREQUENCY INDUCTION HEATED OF THE OF OIL PIPELINE

For the transportation of oil via oil pipelines, necessary induction heating, which prevents deposits on the walls of the pipes and hardening? Heating oil held in the oil fields, oil transportation distant consumers - refineries.

At low temperatures, to reduce viscosity and provide substances transported operability of these pipes. Formation of condensation and ice is possible in oil pipeline.

Induction heating is characterized by heat in the conductive object and heated contactless power transmission, so the use of induction heating of pipelines in many cases preferred.

If a metal object to be heated put in the electromagnetic field of the conductor through which passes the alternating current in the object according to the law of electromagnetic induction will induce eddy currents cause heating of the object. At the same time the conductor through which an alternating electrical current, called the inducing wire. Induces structurally wire may be shaped into any form depending on the type of object to be heated. Most often it is a cylindrical helix. The apparatus of wires based on inducing called inducer.

It should be emphasized that the use of most of the electromagnetic energy would be the case if the power factor of the inductor is equal to unity. This can be achieved if parallel inductor connected compensating capacitor bank. Compensating capacitor bank and the inductor form a load oscillating circuit, in which the reactive energy stored in the magnetic field of the inductor is transferred to the capacitors, moving into the energy of the electric field. The high-frequency generator is used as the power source of the load oscillating circuit

**Keywords:** induction heating; the inverter; transistors, electromagnetic field; oil refinery; oil pipeline.

Internal reviewer *Mukha A.M.*

External reviewer *Omarbekov A.K.*

В. Г. КУЗНЕЦОВ (ДНУЗТ), О. І. САБЛІН (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, кафедра інтелектуальних систем електропостачання, 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, тел. (056) 793-19-11, ел. пошта: [vkuz@i.ua](mailto:vkuz@i.ua), [olegsss@i.ua](mailto:olegsss@i.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0003-4165-1056](http://orcid.org/0000-0003-4165-1056), [orcid.org/0000-0001-6784-648X](http://orcid.org/0000-0001-6784-648X)

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В ЗАДАЧАХ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ

### Вступ

Одним з важливих енергоощадних заходів на електрифікованому транспорті є ефективне використання енергії рекуперації, що при раціональних режимах руху транспортних засобів дозволяє знижувати енергоємність перевізного процесу в різних видах руху на 10...40% [1, 2].

Проте у зв'язку із часовим дисбалансом процесів споживання і генерації енергії різними транспортними засобами, що знаходяться на ділянці в тягових і рекуперативних режимах, показник відновлення енергії при існуючих системах енергозабезпечення транспорту на сьогодні є незначним. Середній показник рекуперації енергії, наприклад по мережі залізниць постійного струму, зараз не перевищує 2...3 % [3-5], що особливо помітно при зниженні розмірів руху на ділянках.

### Актуальність і постановка задачі

Вдосконалення систем електропостачання електрифікованого транспорту з метою підвищення ефективності використання енергії рекуперації, а саме впровадження накопичувачів енергії (НЕ) на тягових підстанціях (ТП), інверторних агрегатів (ІА) та регуляторів напруги (РН) на шинах ТП потребує розвитку підходів щодо визначення технічного та економічно доцільного потенціалу енергозбереження при рекуперації для існуючих і перспективних систем транспорту. Це дозволить обирати науково обґрунтовані технології та енергозберігаюче обладнання з мінімальними вартісними показниками та надлишковою потужністю в залежності від експлуатаційних показників ділянок.

### Мета роботи

Розробка наукового методу визначення потенціалу енергозбереження в існуючих і перспективних системах електротранспорту для підвищення ефективності використання енергії рекуперації.

### Огляд літератури

Кількість електроенергії, яка може бути генерована транспортним засобом при рекуперативному гальмуванні для зниження чи обмеження швидкості, визначається зменшенням його кінетичної енергії за вирахуванням роботи з подолання сил опору руху і дорівнює [1, 2]

$$W_{\text{рек}} = (0,01073(1 + \gamma)Q(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2) - 2,725Q(w_0 \pm i_{\text{екв}})S)\eta_{\text{рек}}, \quad (1)$$

де  $Q$  – маса поїзда;  $(1 + \gamma)$  – коефіцієнт інерції його обертових мас;  $v_{\text{п}}$ ,  $v_{\text{к}}$  – швидкість відповідно на початку і наприкінці гальмування;  $w_0$  – основний питомий опір руху поїзда при середній швидкості на ділянці гальмування;  $i_{\text{екв}}$  – еквівалентний ухил на ділянці гальмування;  $S$  – довжина гальмівного шляху;  $\eta_{\text{рек}}$  – ККД електрорухомого складу (ЕРС) в режимі рекуперації.

При гальмуванні поїздів для зниження швидкості руху на прямих ділянках повна робота сил опору руху значно менше зміни кінетичної енергії, тому (1) може бути записано як

$$W_{\text{рек}} = 0,01073(1 + \gamma)Q(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2)\eta_{\text{рек}}. \quad (2)$$

При пригальмовуванні поїзда для підтримки заданої швидкості руху (при  $v \approx \text{const}$ ) на ділянках з затяжними спусками кількість генерованої електроенергії визначається зміною потенційної енергії поїзда і дорівнює

$$W_{\text{рек}} = 2,725Q(i_{\text{екв}} - w_0)S\eta_{\text{рек}}. \quad (3)$$

В якості кількісного показника ефективності рекуперації енергії може розглядатися величина коефіцієнта рекуперації [6] за час електроспоживання (рекуперації)  $T$ , що є відношенням генерованої енергії при електричному гальмуванні  $W_{\text{рек}}$  до витрати енергії на тягу  $W_{\text{тяг}}$  (з урахуванням витрат на власні потреби поїзда) на конк-

ретній ділянці, в режимі руху тощо, який може бути визначений як

$$k_{\text{рек}} = \frac{W_{\text{рек}}}{W_{\text{тяг}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{t_{\text{пи}}}^{t_{\text{ки}}} U_c(t) I_{\text{рек}}(t) dt}{\int_0^T U_c(t) I_{\text{тяг}}(t) dt}, \quad (4)$$

де  $U_c(t)$  – напруга на струмоприймачі транспортного засобу;  $I_{\text{рек}}(t)$ ,  $I_{\text{тяг}}(t)$  – відповідно струм в режимі рекуперації і тяги;  $t_{\text{пи}}$ ,  $t_{\text{ки}}$  – відповідно моменти початку та закінчення рекуперативного гальмування;  $n$  – кількість активів рекуперативного гальмування.

При використанні режимів рекуперативного гальмування в вантажному та пасажирському русі поїздів, де рекуперація використовується переважно для обмеження швидкості руху на ділянках зі спусками, потенціал енергозбереження, за різними оцінками фахівців [1], може сягати 12...15% від витрат на тягу.

При використанні даних режимів на транспорті з циклічними режимами руху (приміські електропоїзда, міський електротранспорт, метрополітен), рівень відновлення витраченої на тягу енергії є значно більшим, і може сягати 40...45%. Так, наприклад дослідження резервів зниження електроспоживання на тягу за рахунок використання на електропоїздах рекуперативного гальмування для умов Київського метрополітену, що проведені в [7] дали змогу визначити максимальні значення енергії рекуперації при гальмуванні. Встановлено, що на помірно прямих ділянках повернення енергії в мережу може сягати 60% від витраченої енергії на тягу, а на ділянках зі спусками повернення може в 2...3 рази перевищувати спожиту на розгін поїзда енергію, що в середньому по мережі дає зниження тягового електроспоживання на 40...44%.

В [8] на базі експериментальних досліджень встановлено, що в умовах Дніпропетровського метрополітену існує значний резерв енергозбереження при рекуперації енергії, який становить відповідно 14...34% в прямому (на підйомі 8‰) і 38...52% у зворотному (на відповідному спуску) напрямках, тобто в середньому складає 26...43% від електроспоживання на тягу. На сьогодні цей резерв не може бути реалізований у зв'язку з відсутністю на експлуатованому парку рухомого складу систем рекуперації та технічних засобів ефективного зберігання (розподілу) рекуперативної енергії при малих розмі-

рах руху поїздів (1-2,5 пар поїздів) в метрополітені.

Тому на етапі розробки відповідних енергозберігаючих заходів системи електротранспорту потребують попередньої оцінки можливого потенціалу енергозбереження, що вимагає розробки відповідних наукових підходів.

### Основний матеріал

Теоретичний потенціал енергозбереження від застосування рекуперації в системі електричної тяги може бути визначений шляхом виконання тягових розрахунків з розв'язанням гальмівної задачі, де при відомих параметрах ділянок, режимах руху, швидкості початку гальмування і маси поїздів за виразом (1) визначається максимальна енергія рекуперації  $W_{\text{рек}}$ , яка буде різною для різних ділянок і експлуатаційних факторів (розмірів руху на ділянках, тощо). Таким чином величина (1) є в абсолютних одиницях теоретичним потенціалом енергозбереження при використанні рекуперації енергії

$$\Pi^{\text{теор}} = W_{\text{рек}}. \quad (5)$$

У відносних одиницях це буде теоретичний коефіцієнт рекуперації  $k_{\text{рек}}^{\text{теор}}$ .

Величина  $k_{\text{рек}}^{\text{теор}}$  залежно від експлуатаційних показників для ділянок зі шкідливими спусками може бути виражена як [9]

$$k_{\text{рек}}^{\text{теор}} = \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} \frac{i - (w_0 + w_{\text{кр}})}{i + w_0 + w_{\text{кр}}} \eta_{\text{сер}} \eta_{\text{рек}} \gamma_{\text{рек}}, \quad (6)$$

де  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  – річні вантажопотоки відповідно в бік підйому і спуску, млн т/рік;  $\gamma_{\text{рек}}$  – частка гальмівної сили рекуперації в загальній гальмівній силі поїзда при додатковому пригальмовуванні механічними гальмами.

Для середньо-експлуатаційних умов маємо  $w_0 + w_{\text{кр}} \approx 4$  Н/кН,  $\eta_{\text{сер}} \approx 0,88$ ,  $\eta_{\text{рек}} \approx 0,87$  [9], тоді вираз (6) прийме вигляд

$$k_{\text{рек}}^{\text{теор}} = 0,65 \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} \frac{i - 4}{i + 4} \gamma_{\text{рек}}. \quad (7)$$

В умовах експлуатації рекуперація на гірських ділянках дозволяє скоротити витрату електроенергії на 10...20 % ( $k_{\text{рек}}^{\text{теор}} \approx 0,1...0,2$ ), що особливо відчутно, якщо спуск розташований у вантажонапруженому напрямку (при  $\Gamma_2 > \Gamma_1$ ).

Енергетичну ефективність рекуперації у циклічних видах руху на ділянках з легким і середнім профілем, де гальмування використовується переважно для зупинок доцільно охарактеризувати величиною  $k_{\text{рек}}$ , що визначається у вигляді відношення кількості енергії, що повертається при рекуперації до втрат енергії в гальмах при відсутності рекуперації

$$k_{\text{рек}}^{\text{теор}} = \left(1 - \frac{v_{\text{к}}^2}{v_{\text{п}}^2}\right) \eta_{\text{сер}} \eta_{\text{рек}} \quad (8)$$

Для ЕРС з колекторним електроприводом і релейно-контакторною системою управління можна вважати  $v_{\text{к}} = (0,4 \dots 0,6) v_{\text{п}}$  [9],  $\eta_{\text{сер}} \eta_{\text{рек}} = 0,65$ , тоді отримаємо

$$k_{\text{рек}}^{\text{теор}} = 0,2 \dots 0,25 \quad (9)$$

Оскільки втрати в гальмах ЕРС циклічного руху сягають 40...60 % від витраченої електроенергії, то застосовуючи рекуперацію в таких видах тяги в мережу можна регенерувати значну частку витраченої енергії. Для сучасного ЕРС циклічного руху з плавним регулюванням повернення енергії на сьогодні може досягати 30...40 %, за рахунок рекуперації в мережу практично до зупинки (до швидкості 5 км/год) та більш високих значень експлуатаційних ККД [1].

Найважливішим етапом вирішення задачі вибору енергозберігаючих заходів окрім знання теоретичного потенціалу є визначення технічного потенціалу енергозбереження, який можна знаходити як для окремого  $i$ -го енергозберігаючого заходу в  $k$ -му ( $k = k \in K$ ) елементі (об'єкті) розглядуваної системи, так і для різних множин таких заходів  $i$ ,  $i \in I$  [10].

Цей потенціал може розраховуватися як в абсолютному вираженні, так і у відносних одиницях

$$\Pi_{KI}^{\text{тех}} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) T_{k_i} \quad (10)$$

$$\Pi_{KI}^{\text{тех}} = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) T_{k_i}}{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B T_{k_i})} \quad (11)$$

де  $\Pi_{KI}^{\text{тех}}$ ,  $\Pi_{KI}^{\text{тех}}$  – відповідно абсолютний і відносний потенціали енергозбереження;  $W_{k_i}^B$ ,  $W_{k_i}^P$  – витрата електроенергії на тягу відповідно до і після реалізації енергозберігаючих заходів в

умовних одиницях вимірювання;  $T_{k_i}$  – період часу, для якого розраховується зниження витрат енергії при відповідному енергозберігаючому заході.

При використанні виразів (10) і (11) для  $k$ -го елементу системи може розглядатися тільки один енергозберігаючий захід з кожної альтернативної множини.

В умовах реальної експлуатації на реалізацію теоретичного потенціалу (1) опосередковано впливає ряд випадкових факторів, що не входять до (1). Найчастіше при рекуперативному гальмуванні транспортних засобів реалізується енергія

$$W_{\text{рек}}' < W_{\text{рек}} \quad (12)$$

а її нереалізована частина є надлишковою енергією, яка дорівнює

$$\Delta W_{\text{рек}} = W_{\text{рек}} - W_{\text{рек}}' \quad (13)$$

При відсутності на ТП НЕ, ІА, або РН вона утилізується в гальмівних пристроях поїздів, що знижує ефективність системи електричної тяги.

Наявність складової  $\Delta W_{\text{рек}}$  пов'язана з розкидом в часі процесів споживання і генерації енергії транспортних засобів, що знаходяться одночасно на ділянках в тягових і рекуперативних режимах. Енергія  $\Delta W_{\text{рек}}$  особливо виражена при зниженні розмірів руху на ділянках, та в різних видах транспорту може сягати 30...100 % від власне величини (1) [5].

Отже енергія рекуперації що реалізується в реальних умовах експлуатації згідно (12) є технічно реалізованим потенціалом енергозбереження, що дорівнює

$$\Pi^{\text{тех}} = W_{\text{рек}}' = W_{\text{рек}} k_{\text{вик}} \quad (14)$$

де  $k_{\text{вик}}$  – коефіцієнт використання енергії рекуперації (іншими транспортними засобами, що знаходяться в тягових режимах).

Величина  $k_{\text{вик}}$  при відсутності НЕ, ІА, РН на ТП належить діапазону 0...1, залежить переважно від поїзної ситуації на ділянці, напруги на шинах ближньої ТП і режимів електроспоживання поїздів в зоні рекуперації та значною мірою являє собою випадкову величину. Залежно від напруги на струмоприймачі рекуперуючого транспортного засобу  $U_c(t)$  величина  $k_{\text{вик}}$  може бути виражена як

$$k_{\text{вик}}(U_c(t)) = \begin{cases} 1, & \text{при } U_c(t) < U_T^{\text{max}}, I_{\text{тяг}}(t) \geq I_{\text{рек}}(t), \\ 0, & \text{при } U_c(t) \geq U_T^{\text{max}}, I_{\text{тяг}}(t) = 0. \end{cases}$$

де  $U_c^{\text{max}}$  – гранично допустима напруга на струмоприймачі і в контактній мережі [11, 12];  $I_{\text{рек}}(t)$ ,  $I_{\text{тяг}}(t)$  – відповідно струм рекуперації і тяги в зоні рекуперації.

Проміжні значення величини  $k_{\text{вик}}$  в зазначеному діапазоні відповідають випадку з обмеженим тяговим електроспоживанням в зоні рекуперації, коли

$$I_{\text{тяг}}(t) < I_{\text{рек}}(t),$$

при цьому має місце надлишковий струм рекуперації

$$\Delta I_{\text{рек}}(t) = I_{\text{рек}}(t) - I_{\text{тяг}}(t),$$

якому відповідає надлишкова (нереалізована) енергія рекуперації

$$\Delta W_{\text{рек}} = \Pi^{\text{теор}} - \Pi^{\text{тех}} = \Pi^{\text{теор}}(1 - k_{\text{вик}}). \quad (15)$$

При відсутності інтелектуальних принципів управління електроспоживанням поїздів регулювання лише їх положень шляхом оптимізації графіка руху поїздів (ГРП) на ділянці не може гарантовано забезпечити в зоні рекуперації одночасного збігу процесів рекуперації та електроспоживання поїздів. У такому випадку навіть при наявності систем рекуперації на всьому парку ЕРС показник відновлення енергії при існуючих розмірах і режимах руху поїздів не може перевищувати 10...20 % від значення (1).

Необхідно зазначити, що оцінка енергетичної ефективності рекуперації в різних видах руху істотно залежить від величини  $k_{\text{вик}}$ . Дана величина визначає ефективність споживання енергії рекуперації в СТЕ і власне формує енергозберігаючий ефект від використання режимів відновлення енергії в системах електрифікованого транспорту. Дана величина залежить від багатьох як детермінованих факторів, таких як наявність приймачів енергії  $\Delta W_{\text{рек}}$ , так і невизначених факторів, таких як поїзна ситуація на ділянках, миттєве тягове електроспоживання в зоні рекуперації, напруга на ввіді ТП та ін., тому для різних ділянок і ситуацій є імовірнісною. Коефіцієнт використання енергії рекуперації в СТЕ є динамічною величиною, і представляє собою

складну функцію багатьох змінних, основні з яких це

$$k_{\text{вик}} = f(U_{\text{ТП}}(t), N(t), P_{\text{тяг}}(t), L_{\text{рек}}(t), U_{\text{вх}}(t)), \quad (16)$$

де  $U_{\text{ТП}}(t)$  – напруга на шинах граничних ТП;  $N(t)$  – кількість поїздів на МПЗ у режимі тяги;  $P_{\text{тяг}}(t)$  – тягове електроспоживання в зоні рекуперації;  $L_{\text{рек}}(t)$  – відстань між поїздами в режимі рекуперації і тяги;  $U_{\text{вх}}(t)$  – напруга на ввіді ТП.

Треба зазначити, що навіть за умови обладнання ТП постійного струму ІА на таких ділянках не може гарантовано забезпечуватися  $k_{\text{вик}} = 100\%$ , оскільки здатність системи зовнішнього електропостачання до прийому енергії  $\Delta W_{\text{рек}}$  в значній мірі залежить від її поточного завантаження нетяговими споживачами у вузлах приєднання ТП. Оскільки енергосистема країни на сьогодні є недовантаженою і напруги на приєднаннях ТП (35, 110, 220 кВ) переважно тримаються на верхній межі, а часто перевищують її [13], то ефективність і власне можливість споживання надлишкової енергії рекуперації системою зовнішнього електропостачання може бути обмеженою.

На практиці важливе значення має визначення економічно доцільного потенціалу енергозбереження та формування на цій основі планів його реалізації. Граничною умовою економічної доцільності реалізації енергозберігаючого заходу є, як мінімум, рівність додаткових витрат (інвестиційних, експлуатаційних та ін.) за життєвий цикл, пов'язаних з реалізацією такого заходу  $Z_{ki}$  і сумарної вартості зекономлених енергоресурсів за життєвий цикл його реалізації, що формалізується в такому вигляді:

$$\Pi_{KI}^{\text{ек}} = \sum_{t=1}^T \left( Z_{ki} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} C_t \cdot \Delta O_{kit} \right) \geq 0, \quad (17)$$

де  $\Pi_{KI}^{\text{ек}}$  – економічно доцільний потенціал енергозбереження;  $t$  – розрахунковий етап у періоді життєвого циклу;  $C_t$  – вартість електроенергії;  $\Delta O_{kit}$  – обсяг зекономленої електроенергії.

Необхідно зазначити, що технічний і економічно доцільний потенціал може змінюватися з часом, під впливом науково-технічного прогресу та економічної кон'юнктури. Однак

зміни під впливом цих факторів, як правило, відбуваються протягом досить тривалого періоду.

У загальному вигляді процес оцінки потенціалу енергозбереження для систем електричного транспорту включає наступні етапи:

а) формулювання цілей оцінки потенціалу енергозбереження;

б) визначення переліку об'єктів і відповідних енергозберігаючих заходів (множини  $K$  і  $L$ );

в) розробка алгоритмів оцінки потенціалу енергозбереження, який би відображав специфіку об'єкта та енергозберігаючого заходу;

г) збір необхідної інформації для реалізації відповідних алгоритмів;

д) розрахунок потенціалу енергозбереження.

З урахуванням специфіки розв'язуваної задачі, показник потенціалу енергозбереження ідентифікується набором класифікаційних ознак, причому деякі з них прямо залежать від особливостей досліджуваної системи.

При вирішенні практичних завдань по визначенню пріоритетів реалізації потенціалу енергозбереження та формування відповідних планів необхідно враховувати наявність обмежень, насамперед інвестиційних. Це пов'язано з тим, що не завжди виявляється можливою реалізація заходів з найбільшим технічно досяжним потенціалом енергозбереження.

Тому, для вирішення таких завдань необхідно застосування оптимізаційних моделей, які у спрощеній постановці формалізуються в наступному вигляді:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N_k} b_{kin} \cdot \Pi_{kin}^{\text{ек}} \rightarrow \max, \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N_k} b_{kin} = 1, \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} Z_{ki} \leq Z^{\text{sum}}, \quad (20)$$

де  $n$  – індекс множини альтернативних енергозберігаючих заходів;  $b_{kin}$  – булева змінна;  $Z^{\text{sum}}$  – загальний обсяг коштів на реалізацію енергозберігаючих заходів.

При освоєнні потенціалу енергозбереження при рекуперації енергії в першу чергу доцільно реалізовувати організаційно-технологічні енергозберігаючі заходи, які не вимагають значних витрат. Одним із них є реалізація технічно доступного потенціалу зниження витрат для систем електропостачан-

ня тяги поїздів на постійному струмі за рахунок узгодженої оптимізації графіка руху поїздів і їх схем електроживлення.

Особливістю цього потенціалу є те, що він залежить від рівня втрат при фактичному стані системи енергозабезпечення і при оптимальній схемі дорівнює

$$\Pi_{KI}^{\text{ек}} = F(k_i, N^{\text{opt}}) - F(k_i, N^{\text{fact}}), \quad (21)$$

де  $k_i$  – коефіцієнт інтенсивності руху поїздів, що визначає завантаження обладнання підстанцій, нерівномірність навантаження та ін.;  $N^{\text{opt}}, N^{\text{fact}}$  – відповідно оптимальна та фактична схеми електропостачання.

Таким чином, цей потенціал може істотно змінюватися з часом (є динамічним), що обумовлено його специфікою. Поряд з цим, специфічним для централізованих систем електропостачання є наявність системного ефекту від зниження витрат на нижчих класах напруги, оскільки це викликає додаткове зниження витрат на більш високих класах напруги в живильних лініях електропередачі і трансформаторах [14]. Величина цього додаткового ефекту буде визначатися характеристиками елементів, що входять в систему електропостачання, а також всіма наявними між ними зв'язками. При цьому потенціал енергозбереження системи електропостачання являє собою сукупність потенціалів енергозбереження вхідних у нього елементів і може бути розрахований як сума значень потенціалів окремих елементів.

Отже визначення технічного потенціалу енергозбереження при рекуперації енергії може бути зведено до визначення залежності коефіцієнта використання енергії рекуперації (16) від відповідних чинників. Дані залежності можуть бути визначені або експериментально, що представляють значні труднощі, або в результаті моделювання роботи СТЕ при заданих експлуатаційних показниках роботи конкретної ділянки. При цьому можуть бути отримані діапазони даної величини при врахуванні можливостей СТЕ щодо накопичення енергії  $\Delta W_{\text{рек}}$ , її інвертування та передачі до живильної мережі, або передачі до віддалених тягових навантажень на суміжних міжпідстанційних зонах шляхом плавного пониження напруги на виходах ТП.

В табл. 1 наведено основні статистичні характеристики технічно реалізованої величини  $k_{\text{вик}}^{\text{тех}}$  при впровадженні різних підходів до

підвищення ефективності використання енергії рекуперації.

Таблиця 1

Основні статистичні характеристики коефіцієнта  $k_{\text{вик}}^{\text{тех}}$ 

№ п/п	Енергозберігаюча технологія	$k_{\text{вик}}^{\text{тех}}$			
		$k_{\text{вик}}^{\min}$	$k_{\text{вик}}^{\max}$	$m_{k_{\text{вик}}}$	$\sigma_{k_{\text{вик}}}$
1	Оптимізація ГРП	0,4	0,5	0,47	0,11
2	Використання ІА на ТП	0,7	0,85	0,73	0,05
3	Використання НЕ на ТП	0,7	0,75	0,71	0,12
4	Використання РН на ТП	0,6	0,7	1,68	0,09

Данні значення отримані на основі розрахунків струмозподілу енергії рекуперації в СТЕ при наявності ІА, НЕ та РН на ТП [2], а також при оптимізації ГРП за критерієм споживання енергії рекуперації [15].

Для визначення раціональних економічно-обґрунтованих енергозберігаючих заходів для підвищення ефективності використання енергії рекуперації в транспортних системах необхідно

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Д: Изд-во Маковецкий, 2011. – 456 с.
2. Быков Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование / Е. И. Быков. – М.: Транспорт, 1983. – 447 с.
3. Щербак, Я. В. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізничний транспорт України. – 2011. - № 2. – С. 30-34.
4. Сергієнко, М. І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати / М. І. Сергієнко // Локомотив-інформ. – 2010. - № 4. – С. 24-26.
5. Сопов, В. И. Способы повышения эффективности использования энергии электрического торможения подвижного состава [Электронный ресурс] / В. И. Сопов // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. – Режим доступа: [URL:http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43](http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43).
6. Саблін, О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 9-13.
7. Сулим, А. А. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена [Текст] : матер. Х межд. науч.-тех. конф. / А. А. Сулим, С. Д. Сичев, В. Р. Распопин

враховувати динамічні режими тягового електропостачання, режими зовнішнього електропостачання, що містять значну випадкову складову, тому це вимагає побудови складних динамічних, в більшій ступені нечітких моделей, що є нагальною задачею авторів.

## Висновки

Запропоновано визначати потенціал енергозбереження в системах електрифікованого транспорту при рекуперації залежно від коефіцієнта використання енергії рекуперації  $k_{\text{вик}}$  та отримано його залежності величини від експлуатаційних факторів.

Визначено діапазон можливих значень технічно реалізованої величини  $k_{\text{вик}}^{\text{тех}}$  при потенційній реалізації різних енергозберігаючих заходів з підвищення ефективності споживання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту.

Данні результати є основою для вибору економічно доцільних заходів з підвищення ефективності використання енергії рекуперації, що дозволять мінімізувати вартісні показники енергозберігаючих заходів.

## REFERENCES

1. Getman, G. K. Teoriya elektricheskoy tyagi [Tekst] / G. K. Getman. – D: Izd-vo Makovetskiy, 2011. – 456 s.
2. Byikov E. I. Elektrosnabzhenie metropolitenov. Ustroystvo, ekspluatatsiya i proektirovanie / E. I. Byikov. – M.: Transport, 1983. – 447 s.
3. Scherbak, Ya. V. Analiz zastosuvannya rekupe-rativnogo galmuvannya na zaliznitsyah UkraYini / Ya. V. Scherbak, V. P. Nerubatskiy // Zaliznichniy trans-port UkraYini. – 2011. - № 2. – S. 30-34.
4. SergiEnko, M. I. Osnovni napryamki roboti Ukrzallnitsi z energoberezhennya ta Yiyi rezultati / M. I. SergiEnko // Lokomotiv-inform. – 2010. - № 4. – S. 24-26.
5. Sopov, V. I. Sposobyi povysheniya effektivnosti ispolzovaniya energii elektricheskogo tormozheniya podvizhnogo sostava [Elektronnyy re-surs] / V. I. Sopov // Onlayn Elektrik: Elektro-energetika. Novyie tehnologii, 2012. – Rezhim do-stupa: [URL:http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43](http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43).
6. Sablin, O. I. Doslidzhennya effektivnosti protsesu rekuperatsiyi elektroenergiyi v umovah metropolitenу / O. I. Sablin // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredoviyh tehnologiy. – 2014. – № 6/8 (72). – S. 9-13.
7. Sulim, A. A. Ekonomiya elektroenergiyi pri ispolzovanii rekuperativnogo tormozheniya na vagonah metropolitena [Tekst] : mater. H mezhd. nauch.-teh. konf. / A. A. Sulim, S. D. Sichev, V. R. Raspopin // Elektromekhanicheskie i energeticheskie sistemy,

// Электромеханические и энергетические системы, методы моделирования и оптимизации. – КНУ им. М. Остроградского, 2012. – С. 344.

8. Кузнецов В.Г., Саблин О.И., Губский П.В., Колыхаев Е.Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена [Текст] / В.Г. Кузнецов, О.И. Саблин, П.В. Губский, Е.Г. Колыхаев // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2015. – № 95. – С. 81-89.

9. Теория электрической тяги / Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н., Озеров М. И. – Москва: Транспорт, 1995. – 328 с.

10. Кузнецов В. Г., Костюковский Б. А. Оценка потенциала энергосбережения систем тягового электроснабжения постоянного тока / В. Г. Кузнецов, Б. А. Костюковский // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2012. – № 26. – С. 109-116.

11. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75 – [Действует с 1977-01-01] – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 3 с.

12. Напряжение питания тяговых железнодорожных сетей: Стандарт NF EN 50163-1996 – [Действует с 01.11.1996]. МКС 29.280, 1995. – 11 с.

13. Саблін, О. І. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О. І. Саблін, Д. О. Босій, В. Г. Кузнецов та ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 73-79.

14. Yunhe H. Modeling of electricity prices / H. Yunhe, H. Yang // Green Circuits and Systems (ICGCS), 2010 Intern. Conf. on. – 21-6-2010. – P. 549-554.

15. Кузнецов В. Г., Калашников К.А. Разработка научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем регулирования транспортного потока / В. Г. Кузнецов, К.А. Калашников // Электрификация транспорта. – 2014. – № 8. – С. 104-109.

metodyi modelirovaniya i optimizatsii. – KNU im. M. Ostrogradskogo, 2012. – S. 344.

8. Kuznetsov V.G., Sablin O.I., Gubskiy P.V., Kolyhaev E.G. Analiz rezervov energosberezheniya pri vnedrenii sistemyi rekuperatsii energii na poezdah Dnepropetrovskogo metropolitena [Tekst] / V.G. Kuznetsov, O.I. Sablin, P.V. Gubskiy, E.G. Kolyhaev // Glrnicha elektromehanika ta avtomatika. – 2015. – № 95. – S. 81-89.

9. Teoriya elektricheskoy tyagi / Rozenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N., Ozerov M. I. – Moskva: Transport, 1995. – 328 s.

10. Kuznetsov V. G., Kostyukovskiy B. A. Otsenka potentsiala energosberezheniya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka / V. G. Kuznetsov, B. A. Kostyukovskiy // Vestnik Natsionalnogo tehnikeskogo universiteta «HPI». – 2012. – № 26. – S. 109-116.

11. Transport elektrifitsirovannyiy s pitaniem ot kontaktnoy seti. Ryad napryazheniy: GOST 6962-75 – [Deystvuet s 1977-01-01] – M.: Izd-vo standartov, 1976. – 3 s.

12. Napryazhenie pitaniya tyagovyih zheleznodorozhnyih setey: Standart NF EN 50163-1996 – [Deystvuet s 01.11.1996]. MKS 29.280, 1995. – 11 s.

13. Sablin, O. I. Efekty`vnist` rekuperatsiyi elektroenergiyi v sy`stemi elektrottransportu z invertorny`my` tyagovy`my` pidstanciyamy` postijnogo strumu / O. I. Sablin, D. O. Bosy`j, V. G. Kuznecov ta in. // Visny`k Vinny`cz`kogo politexnichnogo insty`tutu. – 2016. – № 2. – S. 73-79.

14. Yunhe H. Modeling of electricity prices / H. Yunhe, H. Yang // Green Circuits and Systems (ICGCS), 2010 Intern. Conf. on. – 21-6-2010. – P. 549-554.

15. Kuznetsov V. G., Kalashnikov K.A. Razrabotka nauchnyih printsipov umensheniya poter elektroenergii v tyagovoy seti postoyannogo toka putem regulirovaniya transportnogo potoka / V. G. Kuznetsov, K.A. Kalashnikov // Elektrifikatsiya transporta. – 2014. – № 8. – S. 104-109.

Надійшла до друку 02.12.2016.

Внутрішній рецензент *Афанасов А. М.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

У зв'язку із розкидом в часі процесів споживання і генерації енергії різними транспортними засобами, що знаходяться на ділянці в тягових і рекуперативних режимах, показник відновлення енергії при існуючих системах енергозабезпечення транспорту на сьогодні є незначним. Перспектива вдосконалення систем енергозабезпечення електрифікованого транспорту для підвищення ефективності використання енергії рекуперації, а саме впровадження накопичувачів енергії на тягових підстанціях, інверторних агрегатів та регуляторів напруги на шинах тягових підстанцій потребує розвитку підходів щодо визначення технічного та економічно доцільного потенціалу енергозбереження при рекуперації для існуючих і перспективних систем транспорту. Це дозволить обирати науково обґрунтовані технології та енергозберігаюче обладнання з мінімальними вартісними показниками та надлишковою потужністю в залежності від експлуатаційних показників ділянок.

**Ключові слова:** рекуперація енергії; потенціал енергозбереження; тягове електроспоживання; надлишкова потужність; тягове та зовнішнє електропостачання; коефіцієнт використання.

УДК 621.331.3

В. Г. КУЗНЕЦОВ (ДНУЖТ), О. И. САБЛИН (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, кафедра интеллектуальных систем электроснабжения, 49010, г. Днепр, ул. Лазаряна, 2, тел. (056) 793-19-11, эл. почта: [vkuz@i.ua](mailto:vkuz@i.ua), [olegsss@i.ua](mailto:olegsss@i.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0003-4165-1056](http://orcid.org/0000-0003-4165-1056), [orcid.org/0000-0001-6784-648X](http://orcid.org/0000-0001-6784-648X)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ

В связи с разбросом во времени процессов потребления и генерации энергии различными транспортными средствами, находящимися на участке в тяговых и рекуперативных режимах, показатель возобновления энергии при существующих системах энергообеспечения транспорта на сегодня является незначительным. Перспектива совершенствования систем энергообеспечения электрифицированного транспорта для повышения эффективности использования энергии рекуперации, а именно внедрение накопителей энергии на тяговых подстанциях, инверторных агрегатов и регуляторов напряжения на шинах тяговых подстанций требует развития подходов относительно определения технического и экономически целесообразного потенциала энергосбережения при рекуперации для существующих и перспективных систем транспорта. Это позволит выбирать научно обоснованные технологии и энергосберегающее оборудование с минимальными стоимостными показателями и избыточной мощностью в зависимости от эксплуатационных показателей участков.

**Ключевые слова:** рекуперация энергии; потенциал энергосбережения; тяговое электропотребление; избыточная мощность; тяговое и внешнее электроснабжение; коэффициент использования.

Внутренний рецензент *Афанасов А. М.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.331.3

V. G. KUZNETSOV (DNURT), O. I. SABLIN (DNURT)

Dnipropetrovsk national University of railway transport named after academician V. Lazaryan, Department of intelligent power supply systems, 49010, Dnipro, Lazaryan str., 2, tel (056) 793-19-11, al. email: [vkuz@i.ua](mailto:vkuz@i.ua), [olegsss@i.ua](mailto:olegsss@i.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0003-4165-1056](http://orcid.org/0000-0003-4165-1056), [orcid.org/0000-0001-6784-648X](http://orcid.org/0000-0001-6784-648X)

## DETERMINATION OF POTENTIAL ENERGY SAVINGS IN SYSTEMS OF ELECTRIC TRANSPORT IN THE TASK OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF ENERGY CONSUMPTION RECOVERY

In connection with the variation in time of the consumption and generation of energy by various means of transport, located on a plot of the traction and regenerative modes, the rate of renewal of energy in existing energy supply systems transport today is insignificant. The prospect of improving power supply systems of electric transport to improve the efficiency of use of energy recovery, namely the introduction of energy storage devices in traction substations, of inverter units and voltage regulators on the busbars of traction substations requires the development of approaches regarding the definition of the technical and economically feasible potential of energy saving in energy recovery for existing and future transport systems. This will allow you to select scientifically sound technologies and energy-efficient equipment with minimal cost indicators and excess capacity depending on the operational parameters of the sites.

**Keywords:** energy recovery; the potential energy savings; traction power consumption; surplus power; traction and power supply.

Internal reviewer *Afanasov A. M.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

А. А. БОСОВ (ДНУЗТ), О. М. КОПТОВЕЦЬ (НГУ), Л. Н. ШИРІН (НГУ),  
Д. А. БЕСАРАБ (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, кафедра прикладної математики, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел.: (067)587-28-08, ORCID: [orcid.org/0000-0002-5348-2205](http://orcid.org/0000-0002-5348-2205)

Державний вищий навчальний заклад України «Національний гірничий університет», кафедра транспортних систем і технологій, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19, 49600, тел.: (066)165-84-00, ел. пошта: [leonid.nmu@gmail.ua](mailto:leonid.nmu@gmail.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0002-5012-5878](http://orcid.org/0000-0002-5012-5878).

## ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ КОЛІЇ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ШВИДКІСНОГО РУХУ

### Вступ

На даний час в Україні 9763 км (63%) електрифікованих ділянок і процес електрифікації поступово продовжується. Перевага електрифікованих ділянок колії над неелектрифікованими безперечна, але потребує в кожному конкретному випадку техніко-економічного обґрунтування, тому що крім зменшення собівартості перевезень виникають додаткові постійні витрати на облаштування та підтримання технологічної здатності електрифікованих ліній, особливо це суттєво на ділянках прискореного та швидкісного руху. Тому, визначення особливостей експлуатації залізничної колії на електрифікованих ділянках залізниць при впровадженні та розширенні полігону швидкісного руху представляє собою актуальну науково-прикладну проблему для залізничного транспорту.

### Історія електрифікації залізниць в Україні

Зі здобуттям незалежності України гостро постало питання собівартості перевезень. Високі ціни на нафтопродукти роблять дизельну тягу економічно не вигідною.

Один із шляхів вирішення проблеми, прийнятий урядом України, – електрифікація залізниць. Однак особливістю мережі залізниць України є те, що окремі ділянки колії були електрифіковані по-різному.

На початку електрифікації її ввели на постійному струмі напругою 3 кВ. Це були основні завантажені напрямки в районах Донбасу, Криворіжжя, від Львова через Карпатські перевали в Закарпатті, від Харкова через Придніпров'я до Криму.

В подальшому інша частина залізничних колій України електрифіковані на змінному струмі напругою 25 кВ (підвищена напруга дає економію на електроматеріалах, на різкому скороченні витрат на будівництво електропідстанцій, а також допускає передачу більшої електричної потужності на локомотив, тобто дозволяє вести більш великогабові склади і прискорити рух). Так електрифікувалась центральна Україна, виходи до портів Одеси,

шлях Київ – Львів через Коростень, через Бердичів і Тернопіль.

При електрифікації перспективних ділянок залізничної мережі України зараз перевагу віддають змінному струмі більш високої напруги (~ 25 кВ). Однак якщо потрібно електрифікувати ділянку колії з постійним струмом (= 3 кВ), то використовують і цю напругу.

З 1991 року були електрифіковані наступні ділянки загальною довжиною понад 1700 км: Роздільна - Кучурган; Львів - Сихів; Красне - Тернопіль - Підволочиськ - Хмельницький - Жмеринка; Здолбунів - Рівне - Ківерці - Луцьк - Ковель; Ніжин - Чернігів, Південно-Західна залізниця; Борщагівка - Київ-Жовтневий, Конотоп - Ворожба, (одна колія); Коростень - Шепетівка, Фастів - Житомир, Дебальцеве - Червона Могила, Донецької залізниці; Дебальцеве - Луганськ, Донецької залізниці; Яготин - Гребінка - Полтава-Київ. - Огульці - Раднаркомівська; Полтава - Кременчук - Бурти; Полтава - Красноград - Лозова.

### Перспективи електрифікації залізниць України

Основні напрямки розвитку вітчизняного залізничного транспорту, в тому числі розвиток інфраструктури, включаючи колійне господарство та господарство енергопостачання, передбачено в Стратегії розвитку ПАТ «Укрзалізниця» на 2017-2021 роки [1].

Основні напрямки розвитку інфраструктури:

1. Оптимізація охоплення і використання інфраструктурної мережі (майже 3,5 тис км малодіяльних напрямків);
2. Зниження операційних витрат на обслуговування інфраструктури на 4 млрд грн протягом 2017-2021 років;
3. Стратегічні ініціативи підвищення продуктивності залізничної інфраструктури (будівництво, електрифікація, реконструкція);
4. Створення інфраструктурного продукту і перехід на державне замовлення (мережевий контракт);
5. Перехід від регіональних принципів управління перевізним процесом до організації

руху поїздів на полігонах значної довжини (економія до 1,4 млрд грн протягом 2017–2021);

6. Капітальні інвестиції за 5 років 40 млрд грн інвестицій: 9 млрд грн. на реконструкцію 1 300 км колій; 4 млрд грн. на модернізацію контактної мережі та СЦБ; 17 млрд грн на проекти електрифікації та розвитку.

Одними із стратегічних цілей та ініціатив вертикалі пасажирських перевезень є: поступове перенесення пасажиропотоків на денні та прискорені (швидкісні) поїзди між ключовими пасажирськими хабами (45% в 2021 р.); придбання нового рухомого складу – розширення мережі швидкісних поїздів IC, IC+; нічний експрес.

На даний час Міністерством інфраструктури України заплановані наступні проекти електрифікації залізниць:

1. Проект «Електрифікація залізничного напрямку Долинська – Миколаїв – Колосівка» (орієнтовна вартість проекту становить близько 4 282,1 млн. грн.). Долинська – Миколаїв (148 км), який є змішаним для руху вантажних і пасажирських поїздів і є необхідним для створення другого електрифікованого ходу на південь та портів Чорного моря. Орієнтовний термін реалізації 2016-2017 роки; Миколаїв – Колосівка (105 км), який дозволить разом з електрифікацією дільниць Долинська – Миколаїв здійснювати вантажні та пасажирські перевезення із півдня на північ країни. Орієнтовний термін реалізації 2016-2017 роки.

2. Проект «Електрифікація залізничного напрямку Ковель – Ізов – Держжордон» (94 км), (орієнтовна вартість проекту 644,3 млн. грн), який дозволить здійснювати без зупинки пропуск поїздів до Державного кордону без зміни виду тяги. Орієнтовний термін реалізації 2016 рік.

3. Проект «Електрифікація залізничного напрямку Бердичів – Житомир – Коростень – Овруч – Держжордон» орієнтовна вартість проекту 1 840,2 млн. грн) (195 км) (орієнтовний термін реалізації 2016–2018 роки).

4. Чернігів – Горностаївка – Держжордон (71 км), (орієнтовна вартість проекту 590,6 млн. грн.), (орієнтовний термін реалізації 2019-2020 роки), які разом з електрифікацією з Білоруською стороною дозволять збільшити пропуск поїздів у напрямку Балтійське море – Чорне море;

5. Потоки – Золотнишине (14 км), (орієнтовна вартість проекту 76,9 млн. грн.), (орієнтовний термін реалізації 2019 рік).

#### **Програма впровадження швидкісного руху поїздів.**

Програма запуску швидкісного руху почалася в серпні 2002 з запуском «швидкісного» поїзда Київ – Харків. Власне «швидкісними» поїздами (максимальна швидкість до 140 км/ч) до травня 2012 року були поїзда на двох напрям-

ках: Київ – Харків (2002); Київ – Дніпропетровськ (2003).

Для їх запуску була проведена істотна реконструкція інфраструктури, в тому числі електрифікація, збільшення радіусу кривих, переукладання колії, впровадження стрілок з безперервною поверхнею кочення. У поїздах використовуються нові вагони Крюківського вагонобудівного заводу і електровози ЧС7, ЧС8, ДС3. У наступні роки з'явилися поїзда з максимальною швидкістю руху до 160 км/год. Проект швидкісного руху передбачав сполучення між усіма найбільшими містами України.

В рамках цієї програми було виконано:

- укладено понад 6 тис. км безстикової колії;
- проведена реконструкція залізних магістралей та їх інфраструктури за основними напрямками Київ – Харків, Київ – Дніпропетровськ, Київ – Хутір-Михайлівський, Київ – Львів;
- введені в експлуатацію 370 безстикових стрілочних переводів з безперервною поверхнею кочення;
- покладені 3,3 тис. км колії на залізобетонних шпалах з пружними скріпленнями;
- збільшена швидкість руху пасажирських поїздів до 140-160 км/год на більш ніж 1,8 тис. км головних колій магістральних напрямків.

#### **Особливості експлуатації електрифікованих ділянок при зростанні швидкостей руху.**

Враховуючи тенденції збільшення електрифікованих ділянок і підвищення швидкостей руху поїздів в Україні актуальними питаннями також є ефективна експлуатація таких ділянок. Можна виділити наступні моменти.

При впровадженні прискореного руху повинні бути виконані роботи щодо [2]:

- встановлення та утримування параметрів кривих ділянок колії у межах встановлених норм та допусків відповідно до запланованих швидкостей;
- розроблення нормативної бази з визначенням норм і допусків за ухилами відводів ширини колії та підвищення зовнішньої рейки, вертикальних та бокових уступів головок рейок, вертикальних нерівностей, вертикальних прискорень та інших параметрів максимального збільшення протяжності безстикової колії з довгими рейковими плитами та мінімізації кількості розрядних ланок;
- забезпечення будівництва пунктів діагностики із встановленням приладів для вимірювання параметрів динамічної взаємодії колії та рухомого складу;
- застосовування технології підсилення земляного полотна які забезпечують його стабільність на весь період експлуатації;
- вкладання на мостах безстикової колії із зрівнювальними пристроями і пружними скріпленнями;
- забезпечення дистанції колії, які будуть обслуговувати напрямки прискореного руху матеріа-

лами, механізмами, транспортними засобами і контингентом;

- організації робіт з машинізованого утримання колії з застосуванням сучасних високопродуктивних колійних машин для ремонту і поточного утримання колії, стрілочних переводів та інших облаштувань колійного господарства.

На ділянках прискореного руху повинні передбачатися виконання таких основних колійних робіт:

- модернізація колії;
- середній (посилений середній) ремонт колії;
- комплексно-оздоровчий ремонт колії з використанням машинних комплексів;
- суцільна заміна рейок і металевих частин стрілочних переводів новими;
- шліфування рейок.

#### Рейкова колія.

На ділянках прискореного руху повинні вкладатися рейкові пліті безстикової колії звичайної довжини або довгі. Рейкові пліті звичайної довжини виготовляються з нових термозміцнених рейок типів Р65 або UIC60, вищої або 1 категорії якості. Рейки в заводських умовах зварюються електроконтактним способом з 25-метрових одиночних рейок без болтових отворів в пліті довжиною до 800 м. При укладанні довгих плітей безстикової колії 800-метрові пліті на місці укладки зварюються в довгі пліті безстикової колії без зрівнювальних прольотів на довжину блоку ділянки, або на довжину перегону [3, 4].

На ділянках прискореного руху повинні застосовуватися залізобетонні шпали не нижче 1 сорту. Укладання старопридатних шпал не дозволяється. Залізобетонні шпали не повинні мати дефектів, які забороняють їх використання в колії при прискореному русі. Епюра шпал приймається відповідно до затвердженої категорійності колій.

На ділянках прискореного руху поїздів проміжні рейкові скріплення застосовуються підкладкового типу з пружними або жорсткими клепами або безпідкладкового типу з пружними клепами. Скріплення безпідкладкового типу дозволяється застосовувати лише на ділянках з вантажонапруженістю не більш 60 млн т/км/км за рік.

Скріплення повинні забезпечувати стійкість рейкових ниток проти поперечних переміщень (в межах встановлених нормативів по ширині колії) і стійкість проти поздовжнього уgonу.

#### Стрілочні переводи.

Стрілочні переводи на головних коліях повинні забезпечувати встановлені швидкості і мати конструкцію: рейки типу Р65 та UIC60. Вістряки, рамні рейки, вусовики і рухомі осердя – термозміцнені.

Стрілочні переводи на станціях, де зупиняються прискорені пасажирські поїзди, повинні забезпечувати швидкість по прямому напрямку не менше 120 км/год, а по боковому – 40 км/год [2].

Швидкість руху пасажирських поїздів по станціях, на яких не передбачається зупинка, встановлюється відповідно до технічних характеристик стрілочних переводів, укладених на маршрутах прямування.

При визначенні типу стрілочних переводів, що будуть використовуватись при будівництві, необхідно при новому будівництві використовувати стрілочні переводи із діючого каталогу, що забезпечують необхідну швидкість руху пасажирських поїздів.

Стрілочні переводи повинні укладатись на щебеневий баласт.

Пристрої підключення електрообігріву стрілочних переводів повинні давати можливість відбору електроенергії для живлення електричного колійного інструменту.

#### Переїзди.

Порядок улаштування, обслуговування та утримання залізничних переїздів, що експлуатуються на залізницях України визначаються інструкцією ЦП-0174.

На лініях з прискореним рухом перетини залізничних колій з автомобільними дорогами, а саме існуючі переїзди при швидкостях більше 120 км/год обов'язково повинні бути переведені в розряд із черговим працівником. При швидкостях більше 120 км/год черговий по переїзду або працівник, що виконує його обов'язки повинен припинити рух через переїзд транспортних засобів і закрити переїзд на горизонтально-поворотні шлагбауми, що повністю перекривають проїжджу частину та замкнути їх на навісний замок за 5 хвилин до проходження прискореного пасажирського поїзда. Підходи до залізничного переїзду повинні бути обладнані щитами з інформаційно-попереджувальними написами про потенційну небезпеку від порушень Правил дорожнього руху, наприклад: «Увага! Небезпечно! Швидкість поїзда більше 140 км/год».

#### Габарити на електрифікованих лініях.

Споруди та пристрої на ділянках залізниць, призначених для прискореного руху поїздів мають відповідати вимогам габариту наближення споруд С [3,5].

На лініях, які споруджуються і тих, що реконструюються, при встановленні нових опор контактної мережі відстань від осі колії до внутрішнього краю опор повинна бути не менше 3,3 м. На існуючих лініях до реконструкції опорного господарства допускається відстань від осі колії до внутрішнього краю опор не менше 3,1 м.

На ділянках, де реконструюється земляне полотно опори встановлюються з ближчим до колії габаритом, але не меншим 3,3 м і лише у виїмках, що надміру заносяться снігом і на виходах з них (на довжині до 100 м), за водовідвідним кюветом з габаритом 5,7 м.

Можливості підвищення енергоефективності експлуатації поїздів на електрифікованих ділянках колії

Підвищення енергоефективності експлуатації поїздів на певних напрямках електрифікованих ділянок залізниць можливе декількома способами [6-15], частина яких пов'язана з розробкою та впровадженням енергозберігаючих технологій водіння поїздів як з використанням спеціальних режимних карт, так й застосуванням технічних засобів навчання локомотивних бригад (тренажерів машиністів локомотивів) [12-14], інші способи пов'язані з облаштуванням безпосередньо інфраструктури [6-11]. І тут системи енергопостачання мають «не конфліктувати» з колійною інфраструктурою, а органічно її доповнювати. Мається на увазі жорстке дотримання правил та норм проектування, будівництва та технічного обслуговування і ремонту елементів тягового енергопостачання (розміщення опор, тип підвіски та характеристики контактного проводу) та елементів верхньої будови колії (допуски на співосніть з контактною мережею, дотримання технічного стану колії тощо). Максимального ефекту можливо досягти при комплексному підході до оцінки технічного стану інфраструктури та адаптивності до безпечного пропуску поїздів. Особливо це важливо та актуально на ділянках суміщеного руху пасажирських та вантажних поїздів, коли налаштування параметрів контактної мережі та колії робиться усереднено з урахуванням можливих відхилень характеристик рухомого складу. Це дає можливість формулювання та подальшого вирішення задач векторної оптимізації параметрів інфраструктури за критеріями не тільки швидкості руху й витрат електроенергії на тягу поїздів різної маси, а й з урахуванням капітальних витрат на облаштування елементів інфраструктури і заходів з безпеки руху.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основні аспекти стратегії розвитку ПАТ «Укрзалізниця» 2017-2021 роки. [http://uz.gov.ua/press\\_center/up\\_to\\_date\\_topic/450697](http://uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/450697).
2. Інструкція з організації прискореного руху пасажирських поїздів на залізницях України щодо вимог до інфраструктури та рухомого складу. Затв. наказом Укрзалізниці від 16.01.2012 № 004-Ц. – К., 2012. – 83 с.
3. Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України. ЦП-0269, затв. наказом Укрзалізниці від 01.03.2012 №072-Ц/ Е.І. Даніленко, А.М. Орловський, М.Б. Курган, В.О. Яковлев та інші. – К.: «НВП Поліграфсервіс», 2012. – 395 с.
4. ДБН В.2.3-19-2008 Споруди транспорту. Залізничні колії 1520 мм. Норми проектування.
5. ДСТУ Б В.2.3-29:2011. Габарити приближення зданий и подвижного состава железных дорог пути 1520 (1524) мм.
6. Дослідження вимог Європейського союзу щодо опису залізничної інфраструктури / О. Пшінко, С. Мямлін, Д. Козаченко, В. Алеиник, І. Тревогін // Українські залізниці. - 2015. - № 5-6 (23-24). - С. 46-51.
7. Мямлін С.В. Досвід проведення структурних реформ залізничного транспорту в країнах світу /

Таким чином, проаналізовано основні напрямки розвитку інфраструктури вітчизняних залізниць з урахуванням можливостей колійного господарства та господарства енергопостачання. Безумовно, що розвиток інфраструктури має супроводжуватися комплексом науково-технічних та технологічних розробок для підвищення ефективності експлуатації об'єктів інфраструктури і збільшення доходності залізничного транспорту в цілому.

## Висновки

Електрифікація ділянок залізниці для ПАТ «Укрзалізниця» є одним з пріоритетних напрямків, в зв'язку з ефективністю електротяги в порівнянні з дизельною тягою. В межах здійснення заходів щодо організації швидкісного руху в Україні проводилась і продовжується робота з підготовки контактної мережі на основних напрямках руху до швидкісного руху. Основним завданням департаменту колійного господарства було і залишається забезпечення технічного стану колії, штучних споруд і облаштувань, що гарантує безперебійний і безпечний рух поїздів з встановленими швидкостями. Безумовно це може реалізовуватися на основі систематичного технічного нагляду і діагностичного контролю стану об'єктів колійного господарства з виявленням дефектів і попередженням причин, що викликають їх несправності і розлади, виконанням в необхідних обсягах по установленій технологічній послідовності регламентних робіт з ремонту і поточного утримання. В даній роботі розглянуто основні особливості експлуатації залізничної колії, які потрібно врахувати при впровадженні та розгалуженні мережі швидкісного руху з урахуванням специфіки електрифікації магістральних ділянок колії.

## REFERENCES

1. Osnovni aspekty stratehii rozvytku PAT «Ukrzaliznytsia» 2017-2021 roky. [http://uz.gov.ua/press\\_center/up\\_to\\_date\\_topic/450697](http://uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/450697).
2. Instruktziia z orhanizatsii pryskorenogo rukhu pasazhyrskykh poizdiv na zaliznytsiakh Ukrainy shchodo vymoh do infrastruktury ta rukhomoho skladu. Zatv. nakazom Ukrzaliznytsi vid 16.01.2012 № 004- C. – K., 2012. – 83 s.
3. Instruktziia z ulashtuvannia ta utrymannia kolii zaliznyts Ukrainy. CP-0269, zatv. nakazom Ukrzaliznytsi vid 01.03.2012 №072-C/ E.I. Danilenko, A.M. Orlovskiy, M.B. Kurhan, V.O. Yakovliev ta inshi. – K.: «NVP Polihrafsservis», 2012. – 395 s.
4. DBN V.2.3-19-2008 Sporudy transportu. Zaliznytsi kolii 1520 mm. Normy proektuvannia.
5. DSTU B V.2.3-29:2011. Habaryti pryblizheniya zdanyi y podvyzhnoho sostava zheleznikh doroh puty 1520 (1524) mm.
6. Doslidzhennia vymoh Yevropeiskoho soiuzu shchodo opysu zaliznychnoi infrastruktury / O. Pshinko, S. Miamlin, D. Kozachenko, V. Aleinyk, I. Trevohin // Ukrainski zaliznytsi. - 2015. - № 5-6 (23-24). - S. 46-51.
7. Miamlin S.V. Dosvid provedennia strukturnykh reform zaliznychnoho transportu v krainakh svitu / S.V.

С.В. Мямлін, Л.П. Безовська // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (14.05-15.05.2015) : тези 75 Міжнар. науково-практ. конф. / ДНУЗТ. - Дніпропетровськ, 2015. - С. 35-36.

8. Мямлін С. Лідер інфраструктурних проєктів / С.Мямлін, П. Пшінько, А. Краснюк, І. Клименко // Українські залізниці. -2014. - №12 (18). - С. 54-55.

9. Мямлін С.В. Пристосування методів оцінки ефективності інноваційних енергозберігаючих проєктів залізничного транспорту / С. В. Мямлін, А. В. Грідасова // Електрифікація транспорту "ТРАНСЕЛЕКТРО-2014" (Одеса-Дніпропетровськ, 23.10-26.10.2014): Матеріали VII Міжнарод. научно-практ. конф. / ДНУЗТ. - Дніпропетровськ, 2014. -С. 103-104.

10. Мямлін С.В. Широка колія від України до Австрії / С. В. Мямлін, М. Б. Курган, Д. В. Гнатенко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту (15.05-16.05.2014) : тези 74 Міжнар. науково-практ. конф. / ДНУЗТ. - Дніпропетровськ, 2014. - С. 247-248.

11. Манашкин Л.А. К вопросу о возможных процессах образования волнообразного износа рельсов / Л.А. Манашкин, С.В. Мямлин // Развитие научной школы транспортной механики : тези доп. Міжнар. наук.-техн. конф., 5 груд. 2013 р., м. Дніпропетровськ / Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - Дніпропетровськ, 2013. - С. 7-9.

12. Повышение эффективности подготовки персонала для железных дорог за счет использования тренажеров [Текст] / С. В. Мямлин, Е. П. Блохин, Е. А. Письменный, В. В. Жижко // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. - Луганськ, 2006. - № 8. - С. 195-197.

13. Тренажерный комплекс для обучения машинистов локомотивов [Текст] / Е. П. Блохин, К. И. Железнов, В. В. Глухов, С. В. Мямлин, Л. В. Урсуляк, Г. В. Евдомах, О. В. Бабакова, В. В. Жижко // Інформ.-керуючі системи на заліз. трансп. - 1999. - № 6. - С. 15-16.

14. Энергооптимальные технологии на железнодорожном транспорте [Текст] / А. Н. Пшінько, С. В. Мямлин, В. В. Скалозуб, А. П. Иванов // Энергоэффективность-2004 : зб. наук. пр. Міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 13-16 жовт. 2004 р. - Одеса, 2004. - С. 203-204.

15. Мямлін С. В. Аспекти політики енергозбереження в тягових системах залізничного транспорту [Текст] / С. В. Мямлін, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко // Енергосбережение на железнодорожном транспорте : матеріали I Міжнарод. науч.-практ. конф., 29 сент.-1 окт. 2010 г., г. Мисхор. - Дніпропетровськ, 2010. - С. 13-18.

Miamlin, L.P. Bezovska // Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu (14.05-15.05.2015) : tezy 75 Mizhnar. naukovo-prakt. konf. / DNUZT. - Dnipropetrovsk, 2015. - S. 35-36.

8. Miamlin S. Lider infrastruktturnykh proektiv / S.Miamlin, P. Pshinko, A. Krasniuk, I. Klymenko // Ukrainski zaliznytsi. -2014. - №12 (18). - S. 54-55.

9. Miamlin S.V. Prystosuvannya metodiv otsinky efektyvnosti innovatsiinykh enerhozberihaiuchykh proektiv zaliznychnoho transportu / S. V. Miamlin, A. V. Hridasova // Elektryfikatsiya transporta "TRANSELEKTRO-2014" (Odessa-Dnepropetrovsk, 23.10-26.10.2014): Materyali VII Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. / DNUZT. - Dnepropetrovsk, 2014. -S. 103-104.

10. Miamlin S.V. Shyroka koliia vid Ukrainy do Avstrii / S. V. Miamlin, M. B. Kurhan, D. V. Hnatenko // Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu (15.05-16.05.2014) : tezy 74 Mizhnar. naukovo-prakt. konf. / DNUZT. - Dnipropetrovsk, 2014. - S. 247-248.

11. Manashkyn L.A. K voprosu o vozmozhnikh protsessakh obrazovaniya volnoobraznogo yznosa relsov / L.A. Manashkyn, S.V. Miamlyn // Rozvytok naukovo shkoly transportnoi mekhaniky : tezy dop. Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., 5 hrud. 2013 r., m. Dnipropetrovsk / Dnipropetr. nats. un-t zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana. - Dnipropetrovsk, 2013. - S. 7-9.

12. Povishenye efektyvnosti podgotovky personala dlia zheleznikh doroh za schet yspolzovaniya trenazherov [Tekst] / S. V. Miamlyn, E. P. Blokhyn, E. A. Pysmennii, V. V. Zhyzhko // Visn. Skhidnoukr. nats. un-tu im. V. Dalia. - Luhansk, 2006. - № 8. - S. 195-197.

13. Trenazhernii kompleks dlia obucheniya mashynystov lokomotyvov [Tekst] / E. P. Blokhyn, K. Y. Zheleznov, V. V. Hlukhov, S. V. Miamlyn, L. V. Ursuliak, H. V. Evdomakha, O. V. Babakova, V. V. Zhyzhko // Inform.-keruiuchi systemy na zalizn. transp. - 1999. - № 6. - S. 15-16.

14. Enerhooptymalnie tekhnolohyy na zheleznodorozhnom transporte [Tekst] / A. N. Pshynko, S. V. Miamlyn, V. V. Skalozub, A. P. Yvanov // Enerhoefektyvnist-2004 : zb. nauk. pr. Mizhnar. nauk.-prakt. konf., m. Odesa, 13-16 zhovt. 2004 r. - Odesa, 2004. - S. 203-204.

15. Miamlin S. V. Aspekty polityky enerhozberezhennia v tiahovykh systemakh zaliznychnoho transportu [Tekst] / S. V. Miamlin, V. H. Kuznetsov, V. H. Sychenko // Enerhosberezhennia na zheleznodorozhnom transporte : materyali I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 29 sent.-1 okt. 2010 h., h. Myskhor. - Dnepropetrovsk, 2010. - S. 13-18.

Надійшла до друку 01.12.2016.

Внутрішній рецензент Муха А.М.

Зовнішній рецензент Саєнко Ю.Л.

При впровадженні та розширенні полігону швидкісного руху перевага електрифікованих ділянок безперечна, але необхідно враховувати додаткові постійні витрати на облаштування та підтримання технологічної здатності електрифікованих ліній.

Метою роботи є аналіз основних напрямків розвитку інфраструктури вітчизняних залізниць з урахуванням можливостей колійного господарства та господарства енергопостачання.

Основною задачею є формування основних особливостей експлуатації залізничної колії, які потрібно врахувати при впровадженні та розгалуженні мережі швидкісного руху з урахуванням специфіки електрифікації магістральних ділянок колії.

Отримані необхідні вихідні стосовно розвитку інфраструктури, що має супроводжуватися комплексом науково-технічних та технологічних розробок для підвищення ефективності експлуатації об'єктів інфраструктури і збільшення доходності залізничного транспорту в цілому.

**Ключові слова:** експлуатація залізничної колії; електрифікація залізниць; діагностичний контроль; стан об'єктів колійного господарства.

УДК 625.11

А. А. БОСОВ (ДНУЖТ), А. Н. КОПТОВЕЦ (НГУ), Л. Н. ШИРИН (НГУ),  
Д. А. БЕСАРАБ (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, кафедра прикладной математики, ул. Лазаряна, 2, г. Днепр, Украина, 49010 тел.: (067) 587-28-08, ORCID: [orcid.org/0000-0002-5348-2205](https://orcid.org/0000-0002-5348-2205)

Государственное высшее учебное заведение Украины «Национальный горный университет», кафедра транспортных систем и технологий, г. Днепр, пр. Дмитрия Яворницкого, 19, 49600, тел.: (066)165-84-00, эл. почта: [leonid.nmu@gmail.ua](mailto:leonid.nmu@gmail.ua), ORCID: [orcid.org/0000-0002-5012-5878](https://orcid.org/0000-0002-5012-5878).

## ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ ВНЕДРЕНИЯ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ

При внедрении и расширении полигона скоростного движения преимущество электрифицированных участков бесспорно, но необходимо учитывать дополнительные постоянные затраты на обустройство и поддержание технологической способности электрифицированных линий.

Целью работы является анализ основных направлений развития инфраструктуры отечественных железных дорог с учетом возможностей путевого хозяйства и хозяйства энергоснабжения.

Основной задачей является формирование основных особенностей эксплуатации железнодорожного пути, которые нужно учесть при внедрении и разветвлении сети скоростного движения с учетом специфики электрификации магистральных участков пути.

Получены необходимые исходные по развитию инфраструктуры, которые должны сопровождаться комплексом научно-технических и технологических разработок для повышения эффективности эксплуатации объектов инфраструктуры и увеличение доходности железнодорожного транспорта в целом.

**Ключевые слова:** эксплуатация железнодорожного пути; электрификация железной дороги; диагностический контроль; состояние объектов путевого хозяйства.

Внутренний рецензент *Муха А.М.*

Внешний рецензент *Сасенко Ю.Л.*

UDC 625.11

А. А. БОСОВ (DNURT), О. Н. КОПТОВЕЦ (NMU), Л. Н. ШИРИН (NMU),  
Д. А. БЕСАРАБ (DNURT),

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V.Lazaryana, Department of Applied Mathematics, Lazaryan Street, 2, Dnipro, Ukraine, 49010 tel.: (067) 587-28-08, ORCID: [orcid.org/0000-0002-5348-2205](https://orcid.org/0000-0002-5348-2205)

State universities in Ukraine "National Mining University", The Department of Transport Systems and Technology, Dnipro, pr. Dmytra Yavornytskoho, 19, 49600, tel.: (066) 165-84-00, e.-mail: [leonid.nmu@gmail.ua](mailto:leonid.nmu@gmail.ua), , ORCID: [orcid.org/0000-0002-5012-5878](https://orcid.org/0000-0002-5012-5878).

## FEATURES OF OPERATION OF ELECTRIFIED RAILWAY TRACK WHEN IMPLEMENTING HIGH-SPEED TRAFFIC

Advantage of the electrified sites is indisputable at introduction and expansion of the proving ground of the high-speed movement, but it is necessary to consider additional constant costs of arrangement and maintenance of technological ability of the electrified lines.

The purpose of work is the analysis of the main directions of development of infrastructure of the native railroads taking into account opportunities of road economy and economy of power supply.

The main objective is formation of the main features of operation of a railway track which need to be considered at introduction and a branching of network of the high-speed movement taking into account specifics of electrification of the main sites of a way.

Necessary inputs which have been received, on development of infrastructure which have to be followed by a complex of scientific and technical and technological developments for increase in efficiency of operation of infrastructure facilities and increase in profitability of railway transport in general.

**Keywords:** operation of a railway track; electrification of the railroad; diagnostic check; condition of objects of traveling facilities.

Internal reviewer *Mukha A.M.*

External reviewer *Sayenko Yu.L.*

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання» сьогодні належить до лідерів вищої освіти нашої держави, посідаючи провідні позиції в царині електрифікації залізниць України. Завданням кафедри є підготовка кваліфікованих фахівців в галузі електротехнічних систем електроспоживання, які користуються попитом на ринку праці в цих галузях господарської діяльності, професійно компетентних, конкурентоздатних та успішних у житті, впровадження якісно нових, відповідаючих сучасним вимогам умов навчання, здатних підняти якість освіти, що дозволить кожному з наших випускників знайти своє місце в житті.



За роки існування кафедра підготувала більше 5000 спеціалістів у галузі проектування, монтажу та експлуатації систем електропостачання. Серед них керівники високого рангу: перший заступник міністра транспорту та зв'язку, к.т.н. Корнієнко В.В., в.о. гендиректора Укрзалізниці, к.т.н. Завгородній О. В. начальники Головного управління електрифікації та електропостачання Укрзалізниці (ЦЕ) Анохов І. В., Малишко І. В., Данильченко В. І. і т.д.

На кафедрі «Інтелектуальні системи електропостачання» ведеться підготовка за освітньо-кваліфікаційними рівнями бакалавр та магістр, за спеціалізаціями: «Енергетичний менеджмент», «Системи управління і розподілом електричної енергії» та «Електротехнічні системи електроспоживання». Також студенти кафедри ІСЕ можуть навчатися в магістратурі за спеціалізацією «Інфраструктура високошвидкісного залізничного транспорту» та отримати диплом міжнародного зразка від університету Spam.

В ході навчання студенти отримують глибокі теоретичні знання та набувають практичних навичок під час занять у спеціалізованих науково-

дослідних лабораторіях. Усі лабораторні практикуми забезпечені методичними вказівками по їх виконанню, які своєчасно оновлюються.

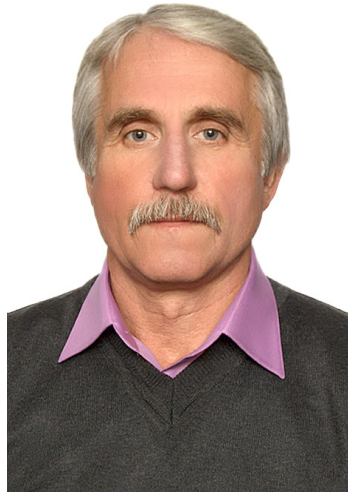
Науково-дослідна робота кафедри тісно пов'язана з виконанням Державної програми електрифікації залізниць. На кафедрі була розроблена Концепція енергетичної стратегії Укрзалізниці на період до 2010 р. та на перспективу до 2020 р. Наявність на кафедрі галузевої науково-дослідної лабораторії сприяє активній науковій діяльності викладачів, наукових співробітників та інженерів. ГНДЛ «Електропостачання та енергозбереження» є провідною в Укрзалізниці з питань впровадження новітніх технологій на електрифікованих ділянках, реалізації на залізницях України швидкісного руху. До роботи в цій лабораторії залучаються також аспіранти та студенти. Результати робіт впроваджують в промислову експлуатацію, серійне виробництво та в навчальний процес. Щорічно співробітники кафедри публікують наукові роботи в провідних технічних українських та зарубіжних виданнях, отримують патенти на винахід, доповідають результати своєї роботи на науково-технічних та науково-практичних конференціях різного рівня.

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання» ДНУЗТу спільно з Східним науковим центром Транспортної Академії України щорічно проводять міжнародні науково-практичні конференції, в яких беруть участь спеціалісти у галузі електроприводу, електротехнологій, електричного транспорту та енергозбереження з України, Росії, Польщі, Чехії, Казахстану, Латвії, Литви, Сербії, Ізраїлю. Результатом роботи конференцій є захист дисертацій на здобуття наукових ступенів кандидатів і докторів технічних наук її учасниками, розширення наукових і технічних зв'язків між підприємствами і науковими організаціями різних країн.

Кафедра продовжує також активно співпрацювати з провідними науковими та навчальними установами України та зарубіжжя: Київський національний університет України «Київський політехнічний інститут», Харківський національний університет «Харківський політехнічний інститут», Харківський національний університет комунального господарства, Львівський національний університет «Львівська політехніка», Вінницький національний технічний університет, Інститутом електродинаміки НАН України, Інститутом загальної енергетики НАН України, Краківською політехнікою, Варшавською політехнікою, Інститутом залізничного транспорту (Варшава) та іншими.

Запрошуємо до співпраці.

**Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»  
Дніпропетровського національного університету  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
сердечно поздоровляє начальника Дорожньої електротехнічної  
лабораторії регіональної філії «Придніпровська залізниця»  
Публічного акціонерного товариства «Укрзалізниця»  
**КОРДИНА ОЛЕКСАНДРА ПЕТРОВИЧА**  
**з 60-річчям!****



Кордін О. П. у 1973 р. вступив до Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту ім. М. І. Калініна (ДІІТ) на факультет «Електрифікація залізничного транспорту». Розпочав трудову діяльність на посаді електромеханіка по телекеруванню у Ремонтно-ревізійній дільниці Пензенської дистанції електропостачання (Куйбишевська залізниця). У 1981 р. перейшов працювати електромеханіком групи телекерування та надійності у Дорожню електротехнічну лабораторію Придніпровської залізниці, у 1990 р. був переведений на посаду старшого електромеханіка цієї групи. З 2001 року – начальник Дорожньої електротехнічної лабораторії.

Трудова діяльність тісно пов'язувалась із дослідницькою роботою факультету «Електрифікації залізниць» ДНУЗТ. За безпосередньої участі Олександра Петровича співробітниками кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання» виконані дослідження якості електричної енергії та режимів роботи обладнання системи тягового електропостачання.

Є постійним членом державної екзаменаційної комісії на захисті дипломних проектів випускників кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання».

Кордін О.П. користується заслуженою повагою та авторитетом серед колег.

Нагороджений Золотим знаком за багаторічну бездоганну працю на залізничному транспорті та вагомий особистий внесок у розвиток господарства електропостачання і залізниці.

**ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ  
ТРАНСПОРТУ**

*науковий журнал*

**ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ  
ТРАНСПОРТА**

*научный журнал*

**ELECTRIFICATION  
OF TRANSPORT**

*scientific journal*

*Свідоцтво про державну реєстрацію № 17327 – 6097Р 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



*Редактор: Сиченко В. Г.*

*Комп'ютерна верстка: Босий Д. О.*

**Поштова адреса:**

**49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2**

**ДНУЗТ, кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»,**

**тел.: (056) 373-19-11, факс: (0562) 47-16-74**

**E-mail: [elpostz@i.ua](mailto:elpostz@i.ua) URL: <http://ert.diit.edu.ua/>**

**Формат 60×84 1/8 Ум. др. арк. 14,7.**

**Наклад 150 прим.**

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

**49010, Україна, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2**

**тел.: +38 (0562) 33-58-96, факс: +38(0562) 33-58-97**