



ISSN 2307-4221

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

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТА  
ELECTRIFICATION OF TRANSPORT

# ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 7 / 2014

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

7 / 2014

Індекс 68641

ДНІПРОПЕТРОВСЬК



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

# ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

**№ 7 / 2014**

**НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

*Передплатний індекс 68641*

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

**ДНІПРОПЕТРОВСЬК**

**№ 7, 2014**

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 № 1 від 29.08.2014 р.

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

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

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

ВІД УКРАЇНИ

Андрієнко П. Д. (Запорізький національний технічний університет);  
Гетьман Г. К. (Дніпропетровський національний університет залізничного транс-  
порту імені академіка В. Лазаряна); Гончаров Ю. П. (Національний технічний  
університет «Харківський політехнічний інститут»), 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 транс-  
порту імені академіка В. Лазаряна), Панасенко М. В. (Державний науково-  
дослідний центр Укрзалізниці), Сасенко Ю. Л. (Приазовський державний технічний  
університет), Максимчук В. Ф. (Головне управління електрифікації та  
електропостачання Укрзалізниці)

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ

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

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

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

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



**Бардушко В. Д., Туйгунова А. Г., Табанаков П. В.**

Об обеспечении требуемой точности моделирования тяговой сети с использованием среды MatLab .....8

**Бардушко В. Д., Туйгунова А. Г.,  
Табанаков П. В.**

**Bardushko V. D., Tuiygunova A. G.,  
Tabanakov P. V.**

Про забезпечення необхідної точності моделювання тягової мережі з використанням середовища MatLab .....8

On providing the required accuracy of modeling of traction network using MatLab environment.....8

**Денисюк С. П., Притискач І. В.**

Оцінювання стану в системах моніторингу силових трансформаторів тягових підстанцій ..13

**Денисюк С. П., Притискач І. В.**

**Denysiuk S. P., Prytyskach I. V.**

Оценка состояния в системах мониторинга силовых трансформаторов тяговых подстанций .....13

Condition evaluation in monitoring systems of traction substations power transformers.....13

**Дьяков В. А., Жирова Л. Ю., Перевертень М. Н., Шатыло В. Н.**

Особенности токосъема межрегиональных электропоездов .....21

**Дьяков В. О., Жирова Л. Ю.,  
Перевертень М. Н., Шатыло В. М.**

**Dyakov V. A., Zhyrova L. Y.,  
Pereverten M. N., Shatylo V. N.**

Особенности стромознімання міжрегіональних електропоїздів ..... 21

The features of the current collection of the interregional electric trains.....21

**Жарков Ю. И., Фигурнов Е. П.**

Проблемы организации защиты тяговой сети постоянного тока от коротких замыканий при повышенных токовых нагрузках .....28

**Жарков Ю. І., Фігурнов Є. П.**

**Zharkov Y. I., Figurnov E. P.**

Проблеми організації захисту тягової мережі постійного струму від коротких замикань при підвищених струмових навантаженнях ..... 28

The problems of organization the protection of the DC traction network from the short-circuit faults at the high current loads .....28

**Ляшук В. М., Грудзур М. М.**

Дослідження ефективності роботи системи електропостачання на ділянці Л – В при стабілізації напруги 3,3 кВ .....32

**Ляшук В. М., Грудзур М. М.**

**Lyashuk V. M., Grudzur M. M.**

Исследование эффективности работы системы электроснабжения на участке Л – В при стабилизации напряжения 3.3 кВ ..... 32

Researching the effectiveness of the power supply system in the district L - V at 3.3 kV voltage stabilization.....32

**Назаров О. Н., Кирюшин Д. Е.**

Научное обеспечение разработки нормативной базы и технологических решений для высокоскоростного движения в России .....39

**Назаров О. М., Кірюшин Д. Є.**

**Nazarov O. N., Kiryushin D. E.**

Наукове забезпечення розробки нормативної бази та технологічних рішень для високошвидкісного руху в Росії ..... 39

The scientific support of the development of the regulatory framework and solutions for the high-speed traffic in Russia.....39

**Саблін О. І., Кузнецов В. Г., Бондар О. І., Артемчук В. В.**

Моделювання взаємодії електрорухомого складу в режимі рекуперації електроенергії з розосередженою системою тягового електропостачання .....46

**Саблин О. И., Кузнецов В. Г.,  
Бондарь О. И., Артемчук В. В.**

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

Моделирование взаимодействия электроподвижного состава в режиме рекуперации

The simulation of an interaction of the electric rolling stock in the regenerating power with a



электроэнергии с рассредоточенной системой тягового электроснабжения .....	46	dispersed system of traction electric supply ...	46
<b>Храбонщ І., Дудзик М., Прусак Й., Стець В.</b>		<b>Chrąbąszcz I., Dudzik M., Prusak J., Stec W.</b>	
Мініатюризація підстанції міського трамвайного транспорту. Вибрані питання .....	54	Tramway traction substation miniaturization. Selected issues .....	54
<b>Храбонщ І., Дудзик М., Прусак Й., Стець В.</b>		<b>Chrąbąszcz I., Dudzik M., Prusak J., Stec W.</b>	
Миниатюризация подстанции городского трамвайного транспорта. Избранные вопросы .....	54		
<b>Ягуп В. Г., Ягуп Е. В.</b>		<b>Yagup V. G., Yagup E. V.</b>	
Компенсация реактивной мощности в тяговой системе переменного тока .....	60	Reactive power compensation in alternative current traction system .....	60
<b>Ягуп В. Г., Ягуп К. В.</b>		<b>Yagup V. G., Yagup E. V.</b>	
Компенсація реактивної потужності в тяговій системі змінного струму .....	60		
<b>Яндович В. М., Сиченко В. Г., Антонов А. В.</b>		<b>Yandovich V. M., Sychenko V. G., Antonov A. V.</b>	
Порівняльний аналіз контактних підвісок у країнах Євросоюзу та України: організація надійного струмознімання .....	67	The comparative analysis of the catenaries in the European Union and Ukraine: the organization of a reliable current collection .....	67
<b>Яндович В. Н., Сыченко В. Г., Антонов А. В.</b>		<b>Yandovich V. M., Sychenko V. G., Antonov A. V.</b>	
Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины: организация надежного токосъема .....	67		
<b>електромагнітна сумісність / electromagnetic compatibility</b>			
<b>Бадер М. П.</b>		<b>Bader M. P.</b>	
Аналіз і синтез електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання та інфраструктури на ділянках з високошвидкісним рухом .....	78	The analysis and the synthesis of the electromagnetic compatibility of the traction power supply system and infrastructure in the districts with the high-speed traffic .....	78
<b>Бадер М. П.</b>		<b>Bader M. P.</b>	
Анализ и синтез электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения и инфраструктуры на участках с высокоскоростным движением .....	78		
<b>Закарюкін В. П., Крюков А. В.</b>		<b>Zakaryukin V. P., Kryukov A. V.</b>	
Якість електроенергії в лініях електропередачі «два проводи – рейка» .....	84	The electric power quality in the power lines «two wires – rail» .....	84
<b>Закарюкин В. П., Крюков А. В.</b>		<b>Zakaryukin V. P., Kryukov A. V.</b>	
Качество электроэнергии в линиях электропередачи «два провода – рельс» .....	84		
<b>Кузнецов В. В.</b>		<b>Kuznetsov V. V.</b>	
Методологические основы выбора экономически целесообразных средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии .....	92	The methodological bases of choice the economically and the expedient facilities defense of the asynchronous engines, that working in the conditions of the low electric power quality .....	92
<b>Кузнецов В. В.</b>		<b>Kuznetsov V. V.</b>	
Методологічні основи вибору економічно доцільних засобів захисту асинхронних двигунів, працюючих в умовах неякісної електроенергії .....	92		
<b>Босий Д. О., Синьогіна О. М.</b>		<b>Bosiy D. O., Sinyogina O. M.</b>	
Облік електроенергії сучасними електронними лічильниками в умовах гармонійних .....	98	The energy metering of the modern electronic meters in a harmonic distortions .....	98
<b>Босый Д. А., Синегина О. Н.</b>		<b>Bosiy D. O., Sinyogina O. M.</b>	
Учет электроэнергии современными электронными счетчиками в условиях гармонических искажений .....	98		

**Арпуль С. В.**

Визначення швидкості руху та питомої потужності номінального режиму пасажирських електровозів.....107

**Арпуль С. В.**

**Arpul S. V.**

Определение скорости движения и удельной мощности номинального режима пассажирских электровозов ..... 107 The determination of a speed and a power density of the nominal operation of the passenger locomotives ..... 107

**Афанасов А. М.**

Анализ схемных решений источников мощности систем взаимного нагружения тяговых электромашин ..... 114

**Афанасов А. М.**

**Afanasov A. M.**

Аналіз схемних рішень джерел потужності систем взаємного навантаження тягових електромашин ..... 114 The analysis of the sources of power circuit design systems of the mutual loading of electric traction ..... 114

**Кулагин Д. А., Андриенко П. Д.**

Построение схемы тяговой электропередачи моторвагонного поезда с возможностью рекуперации ..... 121

**Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д.**

**Kulagin D. O., Andrienko P. D.**

Побудова схеми тягової електропередачі моторвагонного поїзда з можливістю рекуперації ..... 121 A scheme of the traction power emu-train with the possibility of recovery ..... 121

**енергозбереження /energy saving**

**Сілман Х.**

Електрична тяга у Чеській республіці, рівень ефективності та заходи енергозбереження ..127

**Силман Х.**

**Seelmann H.**

Электрическая тяга в Чешской республике, уровень эффективности и энергосберегающие мероприятия ..... 127 Electric rail traction in Czech Republic and level of effectiveness and energy saving measures ..... 127

**автоматизація і діагностика / automation and diagnose**

**Петруняк Р. М., Матусевич О. О.**

Дослідження та вдосконалення системи діагностики тягової підстанції на базі SMART технологій ..... 132

**Петруняк Р. М., Матусевич А. А.**

**Petruniak R. M., Matusevich O. O.**

Исследование и совершенствование системы диагностики тяговой подстанции на базе SMART технологий ..... 132 Researching and improving the diagnostic system of the traction substation based on the SMART technologies ..... 132

В. Д. БАРДУШКО, А. Г. ТУЙГУНОВА, П. В. ТАБАКОВ (ИРГУПС)

Иркутский государственный университет путей сообщения, кафедра Электроснабжение железнодорожного транспорта, Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, тел.: +7(3952) 63-83-45, эл. почта: [barvadan@irlit.irk.ru](mailto:barvadan@irlit.irk.ru)

## ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ ТРЕБУЕМОЙ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЯГОВОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ МАТЛАВ

### Введение

Физическое и виртуальное моделирование тяговой сети, представляется возможным на основе цепочечных схем замещения [1, 2]. В этой связи встает вопрос о протяженности реальной тяговой сети, составляющую модель одной ячейки. При этом в качестве критерия, очевидно, должна быть заданная точность моделирования. Наиболее ответственными результатами, погрешность для которых необходимо оценивать, являются уровень напряжения на токоприемнике расчетного поезда и потери мощности в тяговой сети.

### Основная часть

Ниже предлагается порядок определения параметров модели ячейки тяговой сети, которые бы соответствовали такой протяженности реального участка тяговой сети, для которой получаемые результаты находились бы в границах заданной точности.

Для анализа влияния числа ячеек ТС на точность расчета потерь напряжения на расчетном условном перегоне примем схему, приведенную в [1] и для удобства анализа воспроизведенную в настоящей статье на рис. 1. Будем полагать, что реальная схема тяговой сети замещается достаточно точно 12 ячейками – по четыре в каждом условном перегоне. Причем будем полагать, что электроподвижной состав (ЭПС), располагающийся на каждой ячейке, потребляет мощность (ток), соответствующую отдельному моменту времени. Очевидно, чем больше ячеек, тем больше количество мгновенных схем (МС) может быть задействовано для расчета методом сечения графика движения поездов [3] с одной стороны, и тем точнее каждый отдельный поезд может быть выставлен по координате с другой. Весь участок состоит из трех условных перегонов УП 1, УП 2 и УП 3<sup>1</sup>,

на каждом из которых есть свой поезд  $I_1^n, I_2^n, I_3^n$ , где  $n$  - номер мгновенной схемы. При одностороннем питании тяговой сети УП 3 будет являться, очевидно, лимитирующим по уровню напряжения. Поэтому выполним сравнительный анализ потерь напряжения как среднюю потерю напряжения на УПЗ за время хода по нему расчетного поезда с нагрузкой  $I_3^n$ . Пусть местоположения поездов такое, как это указано на рис. 2 для каждой МС в координатах схемы замещения.

Для каждой МС справедливы следующие выражения, оценивающие потери напряжения до токоприемника поезда №3, идущего по лимитирующему перегону (УПЗ).

Для первой МС

$$\Delta U_{T \text{ УПЗ}'}^{cx1} = z_0 \cdot \left[ (I_1' + I_2' + I_3') \cdot \frac{\Delta \ell}{2} + (I_2' + I_3') \cdot \frac{17}{4} \cdot \Delta \ell + I_3' \cdot \frac{17}{4} \cdot \Delta \ell \right].$$

Или

$$\Delta U_{T \text{ УПЗ}'}^{cx1} = z_0 \cdot \Delta \ell \cdot \left[ \frac{I_1'}{2} + \frac{19}{4} I_2' + 9 \cdot I_3' \right].$$

Для второй МС

$$\Delta U_{T \text{ УПЗ}''}^{cx1} = z_0 \cdot \Delta \ell \cdot \left[ \frac{3 \cdot I_1''}{2} + \frac{23}{4} I_2'' + 10 \cdot I_3'' \right].$$

Для третьей МС

$$\Delta U_{T \text{ УПЗ}'''}^{cx1} = z_0 \cdot \Delta \ell \cdot \left[ \frac{5 \cdot I_1'''}{2} + \frac{27}{4} I_2''' + 11 \cdot I_3''' \right].$$

Для четвертой МС

$$\Delta U_{T \text{ УПЗ}''''}^{cx1} = z_0 \cdot \Delta \ell \cdot \left[ \frac{7 \cdot I_1'''}{2} + \frac{31}{4} I_2'''' + 12 \cdot I_3'''' \right].$$

Здесь  $z_0$  - погонное сопротивление тяговой сети.

<sup>1</sup> Следует напомнить, что под условным перегонном понимается часть пути, на котором находится лишь один поезд.



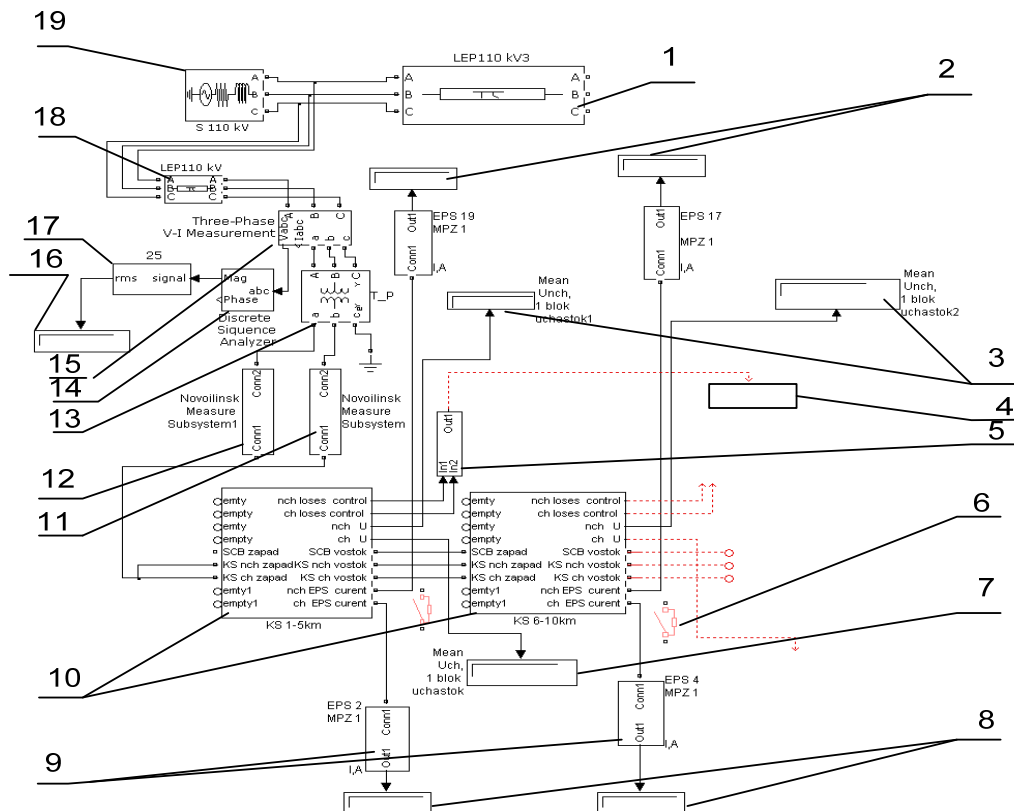


Рис. 1. Фрагмент структурной схема имитационной модели системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ

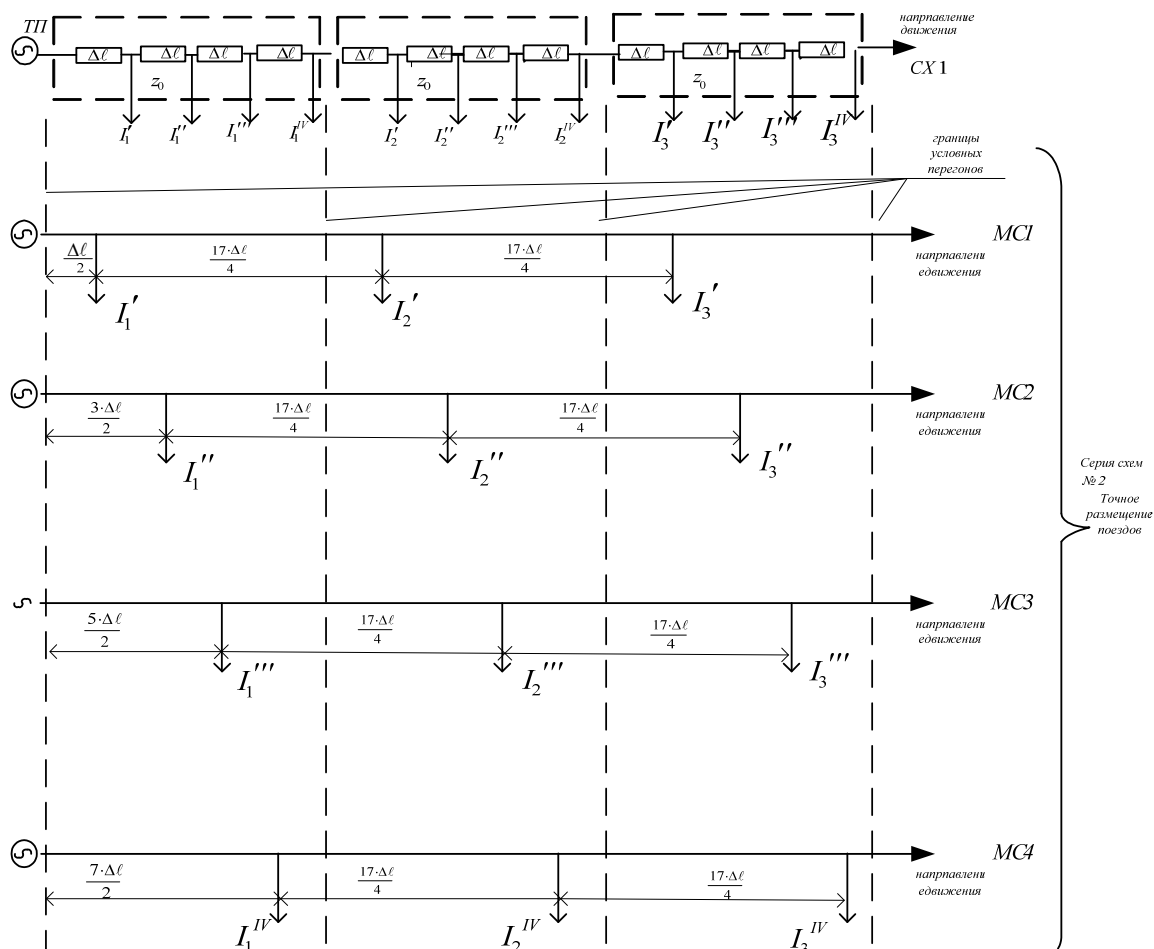


Рис. 2. Схемы расположения нагрузок в координатах двенадцати ячеечной схемы замещения тяговой сети

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

1, 18 – модели линий электропередачи, выполнены «пи» ячейками MatLab;

2 – индикаторы тока ЭПС нечетного направления;

3 – индикаторы напряжения ЭПС нечетного направления;

4 – индикаторы потерь мощности в ТС;

5 – сумматоры потерь электроэнергии по направлениям;

6 – выключатели для организации параллельных связей подвесок путей;

7 – индикаторы напряжения ЭПС четного направления;

8, 9 – индикаторы тока и модели ЭПС четного направления;

10 – модели ячеек ТС (по 5 км);

13 – модель трансформатора тяговой подстанции;

11,12,14,15, 16, 17 – измерительные системы на модели тяговой подстанции;

19 – модели источника электроэнергетической системы.

На схеме (рис. 2)  $\Delta\ell$  – элементарная длина ячейки ТС.

Тогда среднее значение потери напряжения за время хода расчетного поезда по условному перегону УПЗ (расчетному) составит

$$\overline{\Delta U_{\tau}^{УПЗ}} = \overline{\Delta U^{УПЗ}}_{cx1} = \frac{z_0 \cdot \Delta\ell}{4} \cdot \left( \frac{I'_1}{2} + \frac{3}{2} I''_1 + \frac{5}{2} I'''_1 + \frac{7}{2} I^{IV}_1 + \frac{19 \cdot I'_2}{4} + \frac{23}{4} I''_2 + \frac{27}{4} I'''_2 + \frac{31}{4} I^{IV}_2 + 9 \cdot I'_3 + 10 \cdot I''_3 + 11 \cdot I'''_3 + 12 \cdot I^{IV}_3 \right). \quad (1)$$

Для сравнения вычислим эту же величину для ячейечной схемы замещения, приведенной на рис.1 в верхней строке<sup>2</sup>.

Для первой МС

$$\Delta U^{УПЗ'}_{cx1} = z_0 \cdot \left[ \begin{aligned} &(I'_1 + I'_2 + I'_3) \cdot \Delta\ell + \\ &+ (I''_2 + I''_3) \cdot 4 \cdot \Delta\ell + \\ &+ I'_3 \cdot 4 \cdot \Delta\ell \end{aligned} \right].$$

Для второй МС

<sup>2</sup> То есть для случая, когда поезда могут быть выставлены только по координатам границ ячеек схемы замещения. Это означает, что в формулах нельзя оперировать долями длин ячеек.

$$\Delta U^{УПЗ''}_{cx1} = z_0 \cdot \left[ \begin{aligned} &(I''_1 + I''_2 + I''_3) \cdot 2 \cdot \Delta\ell + \\ &+ (I''_2 + I''_3) \cdot 4 \cdot \Delta\ell + \\ &+ I''_3 \cdot 4 \cdot \Delta\ell \end{aligned} \right].$$

Для третьей МС

$$\Delta U^{УПЗ'''}_{cx1} = z_0 \cdot \left[ \begin{aligned} &(I'''_1 + I'''_2 + I'''_3) \cdot 3 \cdot \Delta\ell + \\ &+ (I'''_2 + I'''_3) \cdot 4 \cdot \Delta\ell + \\ &+ I'''_3 \cdot 4 \cdot \Delta\ell \end{aligned} \right].$$

Для четвертой МС

$$\Delta U^{УПЗ^{IV}}_{cx1} = z_0 \cdot \left[ \begin{aligned} &(I^{IV}_1 + I^{IV}_2 + I^{IV}_3) \cdot 3 \cdot \Delta\ell + \\ &+ (I^{IV}_2 + I^{IV}_3) \cdot 4 \cdot \Delta\ell + \\ &+ I^{IV}_3 \cdot 4 \cdot \Delta\ell \end{aligned} \right].$$

Среднее за время хода расчетного поезда по условному перегону УПЗ (расчетному)

$$\overline{\Delta U^{УПЗ}}_{cx1} = \frac{z_0 \cdot \Delta\ell}{4} \cdot \left[ \begin{aligned} &I'_1 + 5 \cdot I'_2 + 9 \cdot I'_3 + 2 \cdot I''_1 + \\ &+ 6 \cdot I''_2 + 10 \cdot I''_3 + 3 \cdot I'''_1 + \\ &+ 7 \cdot I'''_2 + 11 \cdot I'''_3 + 4 \cdot I^{IV}_1 + \\ &+ 8 \cdot I^{IV}_2 + 12 \cdot I^{IV}_3 \end{aligned} \right].$$

Или

$$\overline{\Delta U^{УПЗ}}_{cx1} = \frac{z_0 \cdot \Delta\ell}{4} \cdot \left( \begin{aligned} &I'_1 + 5 \cdot I'_2 + 9 \cdot I'_3 + \\ &+ 2 \cdot I''_1 + 6 \cdot I''_2 + \\ &+ 10 \cdot I''_3 + 3 \cdot I'''_1 + 7 \cdot I'''_2 + 11 \cdot I'''_3 + \\ &+ 4 \cdot I^{IV}_1 + 8 \cdot I^{IV}_2 + 12 \cdot I^{IV}_3 \end{aligned} \right).$$

Погрешность, вызванная переходом к схеме замещения, очевидно, будет равна

$$\delta = \frac{\overline{\Delta U^{УПЗ}}_{cx2} - \overline{\Delta U^{УПЗ}}_{cx1}}{\overline{\Delta U^{УПЗ}}_{cx2}}.$$

Или

$$\delta = 1 - \frac{\frac{z_0 \cdot \Delta\ell}{4} \cdot \left( \begin{aligned} &I'_1 + 5 \cdot I'_2 + 9 \cdot I'_3 + 2 \cdot I''_1 + 6 \cdot I''_2 + \\ &+ 10 \cdot I''_3 + 3 \cdot I'''_1 + 7 \cdot I'''_2 + \\ &+ 11 \cdot I'''_3 + 4 \cdot I^{IV}_1 + 8 \cdot I^{IV}_2 + 12 \cdot I^{IV}_3 \end{aligned} \right)}{\frac{z_0 \cdot \Delta\ell}{4} \cdot \left( \begin{aligned} &\frac{I'_1}{2} + \frac{3}{2} I''_1 + \frac{5}{2} I'''_1 + \frac{7}{2} I^{IV}_1 + \\ &+ \frac{19 \cdot I'_2}{4} + \frac{23}{4} I''_2 + \frac{27}{4} I'''_2 + \frac{31}{4} I^{IV}_2 + \\ &+ 9 \cdot I'_3 + 10 \cdot I''_3 + 11 \cdot I'''_3 + 12 \cdot I^{IV}_3 \end{aligned} \right)}}.$$

Или, окончательно

$$\delta = 1 - \frac{I_1' + 5 \cdot I_2' + 9 \cdot I_3' + 2 \cdot I_1'' + 6 \cdot I_2'' + 10 \cdot I_3'' + 3 \cdot I_1''' + 7 \cdot I_2''' + 11 \cdot I_3''' + 4 \cdot I_1^{IV} + 8 \cdot I_2^{IV} + 12 \cdot I_3^{IV}}{\frac{I_1'}{2} + \frac{3}{2} I_2' + \frac{5}{2} I_3' + \frac{7}{2} I_1'' + \frac{19 \cdot I_2'}{4} + \frac{23}{4} I_2'' + \frac{27}{4} I_2''' + \frac{31}{4} I_2^{IV} + 9 \cdot I_3' + 10 \cdot I_3'' + 11 \cdot I_3''' + 12 \cdot I_3^{IV}} \quad (3)$$

Для оценки первого приближения можно вычислить погрешность для частного (в практике почти не встречающегося) случая, для которого токи поездов потребляются равномерно. В этом случае в (3) за скобки числителя и знаменателя могут быть вынесены токи и сокращены.

Тогда

$$\delta = 1 - \frac{1 + 5 + 9 + 2 + 6 + 10 + 3 + 7 + 11 + 4 + 8 + 12}{\frac{1}{2} + \frac{3}{2} + \frac{5}{2} + \frac{7}{2} + \frac{19}{4} + \frac{23}{4} + \frac{27}{4} + \frac{31}{4} + 9 + 10 + 11 + 12} = 0.04. \quad (4)$$

То есть для самого благоприятного, с точки зрения реализации более простой имитационной модели, случая (равномерное электропотребление) может быть достигнута приемлемая для инженерных расчетов точность при моделировании ТС условных перегонов цепочечной схемой с четырьмя ячейками. Выполняя аналогичный анализ для различного числа ячеек (моделей тяговой сети), укладываемых в тот же реальный участок, можно получить сравни-

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Марквардт Г. Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе энергоснабжения. М.: Транспорт, 1972. – 204 с.
3. Ильяшенко В.П. Влияние квантования по пути на точность расчетов // Сб. научн. тр. ВЗИИТа, М., 1981. Вып. 115. С. 20-31.

Поступила в печать 02.04.2014.

Внутренний рецензент Кузнецов В. Г.

тельные характеристики точности моделирования. В частности при решении данной конкретной задачи – оценки напряжения на токоприемнике электроподвижного состава.

#### Выводы

Оценка погрешностей, показала, что упрощение схемы замещения с двенадцати ячейечной до девятиячейечной приводит более чем к трехкратному увеличению погрешности, которая составляет примерно 15%.

Следует отметить, что в модели электрической железной дороги, модели электроподвижного состава (ЭПС или электровозы с поездом), могут быть подключены только в узлах соединения ячеек (моделей тяговой сети). То есть при формировании мгновенных схем, в отличие от реального размещения ЭПС, координаты моделей ЭПС могут быть выставлены с

наибольшей погрешностью, равной  $\pm \delta = \frac{\Delta \ell}{2}$ ,

где  $\Delta \ell$  - протяженность моделируемой ячейки контактной сети. Таким образом, погрешность, вызываемая неточной расстановкой мгновенных нагрузок, зависит от того, где именно находятся нагрузки относительно ячеек модели тяговой сети. В ряде мгновенных схем<sup>3</sup> может иметь место совпадение точных координат подключения ЭПС с границами ячеек. Для этих мгновенных схем погрешность, вызываемая процедурой формирования размещения моделей ЭПС в модели электрической железной дороги, отсутствует.

<sup>3</sup> Только для части ЭПС, или, что еще реже для всех ЭПС.

#### REFERENCES

1. Markvardt K.G. Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznih dorog. [Power supply of electrified railways], Moscow, Transport, 1982, 528 p.
2. Markvardt G.G. Primenenie teorii veroyatnostej i vychislitel'noj tehniki v sisteme jenergosnabzhenija [Application of the theory of probability and computer technology in the power supply system], Moscow, Transport, 1972, 204 p.
3. Il'jashenko V.P. Vlijanie kvantovaniya po puti na tochnost' raschetov [The effect of quantization on the way to the accuracy of calculations]. Sb. nauchn. tr. VZIIT, Moscow, 1981, Vol. 115, pp. 20-31.

Внешний рецензент Андриенко П. Д.



В статье рассмотрена возможность обеспечения требуемой точности при моделировании реальной тяговой сети в среде MatLab. Проанализировано влияние числа ячеек в структурной схеме тяговой сети на точность расчета потерь напряжения, которые являются критерием для оценки данной имитационной модели. С помощью приведенных мгновенных схем и соответствующих расчетов достигается приемлемая для инженерных расчетов точность. Также следует отметить, что в модели электрической железной дороги имеет значение не только количество нагрузок, но и их расстановка, а именно погрешность, вызываемая неточной расстановкой этих мгновенных нагрузок. В местах совпадения координат ЭПС с границами ячеек подобная погрешность не имеет места.

**Ключевые слова:** тяговая сеть, моделирование, имитационное, точность, MatLab.

## УДК 621.331

В. Д. БАРДУШКО, А. Г. ТУЙГУНОВА, П. В. ТАБАКОВ (ИРДУШС)

Іркутський державний університет шляхів сполучення, кафедра Електропостачання залізничного транспорту, Росія, 664074, м. Іркутськ, вул. Чернишевського, 15, тел.: +7(3952) 63-83-45, ел. пошта: [barvadan@irlit.irk.ru](mailto:barvadan@irlit.irk.ru)

## ПРО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ТОЧНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ СЕРЕДОВИЩА MATLAB

У статті розглянута можливість забезпечення необхідної точності при моделюванні реальної тягової мережі в середовищі MatLab. Проаналізований вплив кількості комірок у структурній схемі тягової мережі на точність розрахунку втрат напруги, які є критерієм для оцінювання даної імітаційної моделі. За допомогою приведених миттєвих схем та відповідних розрахунків досягається прийнятна для інженерних розрахунків точність. Також слід зазначити, що в моделі електричної залізниці має значення не тільки кількість навантажень, але і їх розстановка, а саме похибка, яка викликається неточною розстановкою цих миттєвих навантажень. У місцях збіги координат ЕПС з межами осередків подібна похибка не має місця.

**Ключові слова:** тягова мережа, моделювання, імітаційне, точність, MatLab.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

## UDC 621.331

V. D. BARDUSHKO, A. G. TUYGUNOVA, P. V. TABAKOV (IRSURT)

Irkutsk State University of Railway Transport, Department of Railway Transport Powersupply, Russia, 664047, Irkutsk, 15 Chernishevskogo Street, tel.: +7(3952) 63-83-45, e-mail: [barvadan@irlit.irk.ru](mailto:barvadan@irlit.irk.ru)

## ON PROVIDING THE REQUIRED ACCURACY OF MODELING OF TRACTION NETWORK USING MATLAB ENVIRONMENT

The article discusses the possibility of providing the required accuracy in modeling real traction network environment MatLab. Analyzed the influence of the number of cells in the block diagram of traction network on the accuracy of calculation of voltage drops, which are the criteria for the evaluation of the simulation model. By using these schemes and the corresponding instantaneous calculations achieved acceptable accuracy for engineering calculations. It should also be noted that the pattern of electric railway is of importance not only the amount of load, but their arrangement, namely, the error caused by inaccurate placement of the instantaneous load. In places with a matching coordinate EPS cell boundaries such error does not occur.

**Keywords:** traction network, simulating, imitation, accuracy, MatLab.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

С. П. ДЕНИСЮК, І. В. ПРИТИСКАЧ (НТУУ «КПІ»)

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 03056, Київ, вул. Борщагівська 115, тел.: (093) 750-13-90, ел. пошта: [prytyskach.ivan@gmail.com](mailto:prytyskach.ivan@gmail.com)

## ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ В СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

### Вступ

Потужні трансформатори є найбільш дорогими і стратегічно важливими компонентами будь-якої електропостачальної системи. Серйозне пошкодження великого силового трансформатора призводить до значних витрат на ремонт і недовідпуск електроенергії через відключення споживачів. В той же час, значна частина діючого обладнання електропостачальних систем українських залізниць була введена в експлуатацію ще в 60-80-их роках минулого століття. Такий чином, високий середній термін експлуатації викликає високу пошкоджуваність силових трансформаторів і безпосередньо впливає на надійність системи електропостачання в цілому.

Одним із шляхів підвищення надійності є своєчасне діагностування розвитку дефектів, які можуть привести до аварійного виходу з ладу силового трансформатора. Тому вкрай важливо вміти правильно оцінювати стан силових трансформаторів, визначати допустимість певних режимів їх роботи, визначати ресурс їх ізоляції та прогнозувати допустимий термін служби.

В діючих електропостачальних системах України для підтримки електрообладнання підстанцій, в тому числі парку силових трансформаторів, в справному технічному стані найчастіше використовується планово-попереджувальна система технічного обслуговування і ремонту, яка регламентує виконання робіт по експлуатації з певною, чітко заданою, періодичністю. Проте, така система не є технічно і економічно доцільною. Відключення для профілактики та планових ремонтів справного електроустаткування призводить до невиправданих витрат. У зв'язку з цим, з метою зменшення витрат на експлуатацію та підвищення надійності роботи силових трансформаторів, як за кордоном, там і в Україні, інтенсивно розвиваються і впроваджуються системи безперервного моніторингу, які виконують оцінку поточного стану силових трансформаторів із засто-

суванням сучасних комп'ютерних технологій і автоматичного збору, обробки та аналізу даних.

### Постановка задачі

Існує велика кількість ефективних методів безперервного моніторингу (online monitoring), що дають можливість оцінити стан і виявити можливі відмови силових трансформаторів. Виявлення всього спектру можливих дефектів трансформаторного обладнання важко забезпечити як з чисто технічних так і з економічних причин, тому основна увага, звичайно, приділяється виявленню дефектів, які проявляються найбільш часто, або ж найбільш небезпечні для трансформатора. Вироблення конкретних вимог до систем моніторингу трансформаторів відбувалося під егідою МЕК, і в даний час найбільш повним документом з цього питання вважаються рекомендації інституту IEEE [1]. Діагностичні параметри, які зазвичай контролюються за вимогами цього керівництва наступні:

- ☐ струм, напруга, потужність;
- ☐ газу, розчинені в маслі, і вміст вологи;
- ☐ зміна ємності та tgδ вводів;
- ☐ температура масла в різних частинах трансформатора;
- ☐ комутаційні й атмосферні перенапруги;
- ☐ струми короткого замикання;
- ☐ часткові розряди.

Додатково до зазначених основних параметрів деякі виробники систем моніторингу пропонують наступні можливості: вимір та аналіз вологості масла в РПН; кількість і швидкість зміни газів у газовому реле; тиск, різниця тисків масла у вводах; віброхарактеристики трансформатора та РПН; вологість повітря в розширених [2].

Проте, використання всіх цих методів для силового трансформатора тягової підстанції як правило недоцільне, оскільки ці методи потребують встановлення дорогого обладнання або відключення трансформатора на значний час для виконання діагностики. Сукупність встановлених датчиків і систем моніторингу по-

винне визначається економічною доцільністю відповідно задачам та потужності трансформатора.

Розглянемо детальніше дію різних факторів на процес зміни стану силових трансформаторів, який впливає на термін служби та імовірність появи дефектів, які призводять до виходу обладнання з ладу.

### Матеріал і результати досліджень

Тепловий вплив, як правило, розглядається як один з найбільш важливих факторів, що впливає на термін служби силових масляних трансформаторів [3]. На даний час розроблені численні математичні моделі цього процесу для оцінки можливих наслідків різних режимів навантаження, циклічних або систематичних, за різних температур охолоджувального середовища. Одна з таких моделей наведена в ГОСТ14209-97 [4], який містить методики розрахунку допустимої температури в трансформаторі, зокрема, температури найбільш нагрітої точки обмотки. Температуру найбільш нагрітої точки обмотки, у свою чергу, використовують для визначення відносної швидкості термічного зносу ізоляції.

В стандарті [4] розрахункові формули для визначення температури масла в усталеному тепловому режимі за навантаження  $K$  подані для різних видів охолодження.

Для вид охолодження *ONAN*, *ON* використовується наступна формула

$$\theta_o(t) = \theta_a(t) + \Delta\theta_{or} \left( \frac{1 + RK(t)^2}{1 + R} \right)^X. \quad (1)$$

Для виду охолодження *OF* метод розрахунку заснований на температурі масла в нижній і середній частинах обмотки і середній температурі масла:

$$\begin{aligned} \theta_o(t) = \theta_a(t) + \Delta\theta_{br} \left( \frac{1 + RK(t)^2}{1 + R} \right)^X + \\ + 2[\Delta\theta_{imr} - \Delta\theta_{br}]K(t)^Y. \end{aligned} \quad (2)$$

У цих формулах  $\theta_a(t)$  – температура охолоджуючого середовища,  $X$  – показник степеню масла,  $R$  – відношення втрат,  $\Delta\theta_{br}$  – перевищення температури масла в нижній частині обмотки,  $\Delta\theta_{ir}$  – перевищення температури масла на виході з обмотки.

Для виду охолодження *OD* метод розрахунку, в основному, такий же, як і для виду охолодження *OF*, за винятком того, що до значення температури найбільш нагрітої точки обмотки  $\theta_h(t)$  додається поправка на зміну омичного опору обмоток від температури (за  $K > 1$ ).

По відношенню моделі ГОСТ14209-97, більш точними є моделі згідно Swift [5] і Susa [6]. Ці моделі характеризуються наступними диференціальними рівняннями

□ Swift

$$\begin{aligned} \theta_o(t) = \theta_o(t-1) + \frac{\Delta t}{T_0} \times \\ \times \left( \frac{1 + RK^2(t)}{1 + R} \Delta\theta_{or}^{1/n} - (\theta_o(t) - \theta_a(t))^{1/n} \right); \end{aligned} \quad (3)$$

□ Susa

$$\begin{aligned} \theta_o(t) = \theta_o(t-1) + \frac{\Delta t}{T_0} \times \\ \times \left( \frac{1 + RK^2(t)}{1 + R} \Delta\theta_{or} - \frac{1}{\frac{1-n}{(\mu(t)\Delta\theta_{or})^n}} (\theta_o(t) - \theta_a(t))^{1/n} \right); \\ \mu(t) = \frac{1,3573 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{2797,3}{\theta_o(t)+273}}}{\mu_H}. \end{aligned} \quad (4)$$

Апаратна частина системи моніторингу може включати датчики для вимірювання температури масла в різних частинах баку, а в деяких випадках і температури його найбільш нагрітої точки обмотки. Проте, зважаючи на економічну доцільність та технічну можливість, найчастіше виконують вимірювання тільки температури масла в верхніх шарах. Інформація від даного датчика може бути використана для виявлення різних дефектів трансформатора шляхом співставлення із моделлю цього процесу. Алгоритм роботи системи моніторингу передбачає постійне порівняння вимірюваних значень параметрів стану (в даному випадку, температури) з одержаними за допомогою їх моделей. Таким чином, індикатор моніторингу для моделі аналізу температури масла в цьому визначимо як

$$v_\theta = \frac{\theta_{o,t}(t) - \theta_{o,p}(t)}{\theta_{o,t}(t)}, \quad (5)$$

де  $\theta_{o,t}(t)$  – теоретичне значення температури масла знайдене за рівняннями (1)–(4);



$\theta_{o.p}(t)$  – практичне значення температури виміряне відповідним датчиком.

Іншим важливим завданням, що вирішується системою моніторингу в процесі експлуатації трансформатора, є оцінка погіршення технічного стану його ізоляції спричинене термічним старінням внаслідок роботи під навантаженням. Використання ГОСТ14209-97 в інженерній практиці зазвичай передбачає детермінований підхід до оцінки режимів навантаження трансформатора за різними критеріями. Проте з розвитком та впровадженням сучасних мікропроцесорних систем збору та обробки інформації про електричні навантаження на підстанціях з'являється можливість скористатися більш точними стохастичними моделями, які базуються на моделюванні випадкових фізичних процесів в трансформаторі з використанням ймовірнісної вихідної інформації.

У ГОСТ14209-97 використовується відношення Монтсінгера [7], яке є спрощенням закону Арреніуса щодо термохімічного зносу. Його можна записати як

$$t_c \approx a e^{-b\theta} \quad (6)$$

де  $t_c$  – термін служби ізоляції;

$a, b$  – сталі;  $\theta$  – температура.

Для розглянутого в стандарті діапазону температур використання рівняння Монтсінгера вважається достатнім і, по суті, дає оцінку термічного зносу з запасом міцності.

Вираз для обчислення відносного зносу ізоляції (або відносного скорочення терміну служби) протягом певного періоду часу можна подати у вигляді

$$L(\delta t_i) = \frac{1}{T_6} \int_0^{\delta t_i} 2[\theta_h(t) - \theta_{h,r}] / \Delta\theta dt; \quad (7)$$

звідки

$$L(\delta t_i) = \frac{\delta t_i}{T_6} 2[\theta_{h,i} - \theta_{h,r}] / \Delta\theta, \quad (8)$$

де  $\theta_{h,i}$  – температура ННТ обмотки для  $i$ -го моменту часу;  $\theta_{h,r}$  – граничне значення температури найбільш нагрітої точки обмотки.

Для детермінованої постановки задачі оцінки навантажувальної здатності критеріями є наступні умови:

□ значення температури в будь-який момент часу менше або дорівнює припустимому значенню  $\theta_{доп}$ , тобто

$$\theta(t) \leq \theta_{доп}; \quad (9)$$

відносний знос ізоляції  $L(t)$  за час  $T$  менше або дорівнює одиниці, тобто

$$L(t) \leq 1. \quad (10)$$

За стохастичного підходу кожен з зазначених умов розглядають як бажану або небажану подію. Критерієм оптимальності в цьому випадку є імовірності виконання даних подій [8]. У цьому випадку максимізують або нормують (умова ухвалення оптимального рішення) мінімальну імовірність появи бажаної події і мінімізують або нормують максимальну імовірність появи небажаної події, наприклад:

$$p[\theta(t) \geq \theta_{ном}] = 0,05. \quad (11)$$

$$p[L(t) \geq 1] = 0. \quad (12)$$

Оцінка режиму навантаження в системі моніторингу може бути здійснена шляхом імітаційного моделювання відносного зносу та терміну служби ізоляції. Одержання сукупності реалізацій температур масла  $\theta_o(t)$ , найбільш нагрітої точки обмотки  $\theta_h(t)$  та відносного зносу ізоляції трансформатора виконуємо в наступній послідовності:

1) Імітуємо сукупність реалізацій навантажувального струму  $I(t)$  на інтервалі часу  $T_6$  згідно [8]. При цьому може бути використана як більш складна, так і спрощена імітація струму, який підкоряється нормальному закону розподілу.

2) Для кожної реалізації навантажувального струму обчислюємо реалізації  $\theta_{o,v}(t)$  і  $\theta_{h,v}(t)$  з використанням термічної моделі трансформатора як показано у [9], а також реалізації його відносного зносу згідно ГОСТ 14209-97.

3) Проводимо статистичну обробку сукупностей реалізацій кожної з характеристик з одержанням їх статистичних характеристик, насамперед, детермінованих функцій квантилів  $\theta_{o,\alpha_0}(t)$ ,  $\theta_{h,\alpha_0}(t)$ ,  $L_\beta(t)$ ,  $t_{c,\beta}$  за відповідними ймовірностями  $\alpha_0$  (імовірність перевищення температурою масла або ННТ обмотки певного її значення) та  $\beta$  (імовірність перевищення зносом ізоляції певного значення).

На основі одержаних значень статистичних характеристик параметрів можна оцінити допустимість використання заданого трансформатора для живлення споживача. Для цього порівнюються отримані значення квантилів темпера-

тур з їх допустимими значеннями, а також перевіряють виконання умови  $L_B(t) < 1$ .

Наявність вологи в ізоляційній системі силового масляного трансформатора призводить до старіння його ізоляції зменшуючи її електричну і механічну міцність. В загальному, вважається що збільшення вмісту вологи в два рази зменшує ресурс ізоляції з точки зору механічної міцності вдвічі, а швидкість термічного зносу пропорційна до вмісту вологи [10]. Наявність води в маслі також збільшує ймовірність виникнення бульбашок під час процесу десорбції вологи з целюлози через збільшення локально концентрації газів в маслі.

В діючих стандартах наводяться допустимі значення вмісту вологи, які не призводять до прискореного старіння ізоляції та не викликають аварійний вихід його з ладу. У першому варіанті IEEE Std 62 – 1995 [11] вміст вологи в твердій ізоляції був визначений наступним чином:

- ☐ суха ізоляція 0 - 2%
- ☐ волога ізоляція 2 - 4%
- ☐ дуже волога ізоляція 4,5% і більше.

У більш пізньому документі IEEE Std C57.106 - 2002 [12] допустимий рівень вологи в роботі визначається за значеннями вмісту води в маслі, враховуючи припущення про стабільність температури і рівноважний стан процесів передачі вологи між папером і маслом (табл. 1).

Таблиця 1

Допустимі рівні вологовмісту за IEEE Std C57.106 - 2002

Номинальна напруга трансформатора	Максимальний вміст води в маслі, проміле (ppm)			Еквівалентний вміст води в папері
	50°C	60°C	70°C	
До 69 кВ	27	35	55	3%
69 – 230кВ	12	20	30	2%
230 кВ та вище	10	12	15	1.25%

Для опису процесу зміни вологовмісту в ізоляційній системі трансформатора можна використовувати модель описану в [13]. Стаціонарна модель оцінює вміст води в маслі, після закінчення перехідного процесу поглинання або десорбції води з паперу при даній температурі. На вхід моделі подається вміст вологи в папері і температура. Вміст вологи в папері може бути визначений за вмістом вологи в маслі, вимірюваному в ті періоди, коли процес обміну вологи досяг свого стаціонарного стану. Модель вважає паперову ізоляцію як «нескінченне джерело вологи». Це означає, що процеси поглинання і десорбції суттєво не змінюють вміст вологи в папері. Проте за певних температур, що спричиняють значне старіння ізоляції, значно зростає видалення вологи з паперу. В такому випадку вміст вологи в папері не може вважатися постійним і потрібно включати в модель додатковий поправочний коефіцієнт.

Для визначення рівноважного вмісту вологи в папері використовуються криві паперово-масляної рівноважної вологості за Oommen [14] з розширеним робочим діапазоном температур і вологовмісту масла.

Насичення вологою по відношенню до масла залежить не тільки від вмісту води, але і від температури. Обмін вологою між папером і маслом відбувається по всій поверхні обмотки. Через це, стаціонарна модель використовує се-

редню температуру обмотки для отримання концентрації вологи в маслі. Середня температура масла в обмотках  $\theta_{lm}$  може визначатися за температурами верхніх  $\theta_o$  і нижніх  $\theta_b$  шарів масла за формулою

$$\theta_{lm} = \frac{\theta_o + \theta_b}{2}. \quad (13)$$

Через повільний процес обміну вологи між маслом і папером, а також постійну зміну температури масла через варіації навантаження та добове коливання температури навколишнього середовища, необхідно враховувати перехідний процес зміни вологості масла. Форма рівнянь цього процесу, буде залежати від типу циркуляції масла (примусова чи природня).

Для варіанту коли маслосос ввімкнений форма рівняння наступна [13]

$$\tau_{pap}\tau_{sens}\frac{d^2M_m}{dt^2} + (\tau_{pap} + \tau_{sens})\frac{dM_m}{dt} + M_m = M_{oil-ss} + \Delta t\frac{dM_{oil-ss}}{dt}. \quad (14)$$

Наступне рівняння являє собою функцію перехідного процесу для природного охолодження [13]:

$$\begin{aligned}
& \tau_{pap}\tau_{oil}\tau_{sens}\frac{d^3M_m}{dt^3} + \\
& + (\tau_{pap}\tau_{oil} + \tau_{pap}\tau_{sens} + \tau_{oil}\tau_{sens})\frac{d^2M_m}{dt^2} + \\
& + (\tau_{oil} + \tau_{sens} + \tau_{pap})\frac{dM_m}{dt} + M_m = \\
& = M_{oil-ss} + \Delta t \frac{dM_{oil-ss}}{dt}.
\end{aligned} \quad (15)$$

Для використання наведеної моделі в системі моніторингу, необхідно представити диференціальні рівняння в дискретній формі. Отримаємо

□ маслонасос ввімкнений

$$\begin{aligned}
M_m(t) = & k_{1hf}M_m(t-1) + k_{2hf}M_m(t-2) + \\
& + k_{3hf}M_{oil-ss}(t) + k_{4hf}M_{oil-ss}(t-1);
\end{aligned} \quad (16)$$

□ природне охолодження

$$\begin{aligned}
M_m(t) = & k_{1hn}M_m(t-1) + k_{2hn}M_m(t-2) + \\
& k_{3hn}M_m(t-3) + k_{4hn}M_{oil-ss}(t) + \\
& + k_{5hn}M_{oil-ss}(t-1).
\end{aligned} \quad (17)$$

У цих рівняннях  $M_m(t)$  – вміст вологи в маслі в певний момент часу,  $M_{oil-ss}(t)$  – рівноважний вміст вологи в маслі за стаціонарного стану, знайдений за відповідними кривими (рис. 1),  $k_{i,hf}$  та  $k_{j,hf}$  – коефіцієнти, що характеризують конкретний трансформатор та відповідають за точне налаштування моделі.

Отже використовуючи вищенаведені рівняння можна отримати теоретичне значення вологовмісту масла. Для кожного інтервалу дискретизації знаючи вимірний показник визначається відносна величина відмінності від теоретичного значення, що і буде індикатором моніторингу для моделі аналізу вологи:

$$v_M = \frac{M_{m,t}(t) - M_{m,p}(t)}{M_{m,t}(t)}, \quad (18)$$

де  $M_{m,t}(t)$  – теоретичне значення вологовмісту масла знайдене за рівнянням (16) або (17) відповідно до режиму роботи системи охолодження,

$M_{m,p}(t)$  – практичне значення вологовмісту виміряне відповідним датчиком.

Величина тангенса кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta$  дає усереднену об'ємну характеристику ста-

ну діелектрика. Оскільки  $\text{tg}\delta$  збільшується з підвищенням температури, то для оцінки ступеня погіршення ізоляції обмоток рекомендується виміряні значення приводити до температури вимірювання показників ізоляції на заводі. Наприклад, якщо  $\text{tg}\delta$  ізоляції обмоток вимірювався при температурі  $t_\phi$ , відмінною від температури  $t_0$ , записаної в паспорті трансформатора, то приведений до заводської температури  $\text{tg}\delta_{\text{пр}}$  ізоляції обмоток визначається після ділення виміряного  $\text{tg}\delta_\phi$  на коефіцієнт  $K_1$  (табл. 2). Температура вимірювання визначається за показами датчика температури верхніх шарів масла.

Таблиця 2

**Значення коефіцієнта  $K_1$   
для перерахунку значень  $\text{tg}\delta$**

Різниця температур $t_\phi - t_0, \text{C}$	Значення $K_1$
1	1,03
2	1,06
3	1,09
4	1,12
5	1,15
10	1,31
15	1,51
20	1,75
25	2,0
30	2,3

Отримане значення потрібно порівнювати з нормальним значенням тангенса кута діелектричних втрат для даного трансформатора, за яке можна прийняти величину виміряну під час заводських випробувань і вказану в паспорті. За індикатор моніторингу для моделі аналізу тангенса кута діелектричних втрат в цьому випадку пропонується прийняти наступну величину

$$v_{\text{tg}\delta} = \frac{\text{tg}\delta_{\text{н}} - \text{tg}\delta_{\text{пр}}}{\text{tg}\delta_{\text{н}}}, \quad (19)$$

де  $\text{tg}\delta_{\text{н}}$  – нормальне значенням тангенса кута діелектричних втрат для даного трансформатора,  $\text{tg}\delta_{\text{пр}}$  – виміряне відповідним датчиком значення  $\text{tg}\delta$  приведене до номінальної температури (температури за якої отримане нормальне значення).

Критеріями оцінки стану трансформатора можуть бути порогові значення вимірних величин, відмінність їх від прогнозу відповідної моделі, відношення величин. Оцінку поточного стану трансформатора пропонується виконувати на основі визначення «індексу стану» що є певною неперервною величиною, і який буде



залежати від всіх індикаторів доступних для даного трансформатора.

Отримані за формулами (5), (8), (19) індикатори моніторингу в загальному випадку можна вважати випадковими величинами. Для підвищення надійності і стабільності результатів роботи системи моніторингу пропонується виконувати попередню статистичну обробку цих величин з отриманням статистично достовірних характеристик. Отримані статистичні характеристики представляють інтегральну статистичну оцінку кожного з індикаторів моніторингу. Самі індикатори моніторингу вибрано таким чином, що їх зростання за модулем сигналізує про погіршення стану трансформатора.

Задача відображення результатів моніторингу в зручному для сприйняття та аналізу обслуговуючим персоналом вигляді вирішується в рамках програмного забезпечення інформаційно-діагностичних комплексів, які дозволяють відображати вікна з певними повідомленнями на екрани локальних або віддалених робочих місць, заносити показники в базу даних моніторингу, роздруковувати необхідну інформацію.

Для неперервних показників, таких як індекс стану, пропонується виводити як саме значення

так і певні дискретні оцінки відповідно до заданих уставок рівнів  $S_{L,k}$ , отриманих на основі оцінки певних історичних даних про несправності та експертних оцінок.

### Висновки

Впровадження сучасних комплексів та систем моніторингу силових трансформаторів дають в перспективі якісно нові можливості для підвищення їх надійності та якості функціонування. Збільшення інтелектуальної складової в такому елементі підстанцій як силові трансформатори дозволить виконувати безперервну оцінку їх стану та призведе до спрощення профілактичного догляду за цим обладнанням. Інформація про фактичний стан дозволить проводити профілактичні заходи до появи конкретних дефектів у трансформаторі або до аномальних режимів його роботи. Реалізація розглянутого стохастичного підходу до оцінки навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів за критерієм зносу ізоляції на основі імітаційного моделювання, дозволить приймати більш достовірні рішення про можливість його експлуатації за даних режимів роботи.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. C57.143-2012. IEEE Guide for Application for Monitoring Equipment to Liquid-Immersed Transformers and Components. – 2012. – 83 p.
2. Живодерников С.В., Овсянников А.Г., Русов В.А. Зарубежный опыт мониторинга состояния маслонаполненного оборудования // Материалы четвертого научно-практического семинара Общественного Совета специалистов Сибири и Востока по проблемам мониторинга трансформаторного оборудования и диагностики электрических установок, Белокуриха, 20-24 апреля 2009. – Новосибирск, ГЦРО, 2009. – С.7–22.
3. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов – М: Энергия, 1980. – 208 с.
4. ГОСТ 14209-97. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов. – Введенный с 01.01.2002. – 82 с.
5. G. Swift, T. S. Molinski, W. Lehn, A fundamental approach to transformer thermal modeling – Part I: Theory and equivalent circuit // IEEE Trans. Power Del. – vol. 16, № 2. – 2001. – P. 171–175.
6. D. Susa, M. Lehtonen, H. Nordman. Dynamic thermal modeling of power transformers // IEEE Trans. Power Del. – vol. 20, №. 1. – 2005. – P.197–204.
7. Montsinger V.M. Loading transformers by temperature // Trans.-Amer. Inst. electr. Eng. – 19(1930) – №3. – P. 776-790.
8. Денисенко М.А. Спеціальні питання електропостачання – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – Ч. 1.: Вибір елементів електропостачальних систем на основі

### REFERENCES

1. C57.143-2012. IEEE Guide for Application for Monitoring Equipment to Liquid-Immersed Transformers and Components. – 2012. – 83 p.
2. Zhyvodernykov S., Ovseannicov A., Russov V. Foreign experience of oil-filled equipment condition monitoring // Proceedings of the Fourth Scientific Workshop of the Public Council of the East Siberia and specialists on monitoring and diagnosis of transformer equipment electrical installations Belokuriha, 20-24 April 2009. – Novosibirsk, HTSRO, 2009. – P.7–22.
3. L. Kish. Transformers heating and cooling - M: Energy, 1980. - 208 p.
4. GOST 14209-97. Loading guide for oil-immersed power transformers. – Introduced in 01.01.2002. - 82 p.
5. G. Swift, T. S. Molinski, W. Lehn, A fundamental approach to transformer thermal modeling – Part I: Theory and equivalent circuit // IEEE Trans. Power Del. – vol. 16, № 2. – 2001. – P. 171–175.
6. D. Susa, M. Lehtonen, H. Nordman. Dynamic thermal modeling of power transformers // IEEE Trans. Power Del. – vol. 20, №. 1. – 2005. – P.197–204.
7. Montsinger V.M. Loading transformers by temperature // Trans.-Amer. Inst. electr. Eng. – 19(1930) – №3. – P. 776-790.
8. Denisenko M. Special issue of power supply. Selection of items of electricity supply systems based on stochastic modeling of processes occurring in them. – K.: NTU "KPI", 2009. – 288 p.
9. Denisenko M., Prytytskach I. Stochastic estima-

© Денисюк С. П., Притисках І. В., 2014

стохастичного моделювання процесів, що відбуваються в них. – 288 с.

9. Денисенко М.А., Притискач І.В. Стохастичне оцінювання навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів // Промелектро. – 2011. – №1. – С. 25–31.

10. J. Fabre, A. Pichon. Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers. – International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRE), Paris, France. – Paper 137. – 1960.

11. IEEE Std 62-1995, IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators and Reactors.

12. IEEE Std C57.106, Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil Equipment.

13. B. García, J. C. Burgos, Á. Alonso, J. Sanz. A moisture-in-oil model for power transformer monitoring - Part I: Theoretical foundation // IEEE Transactions on Power Delivery – vol. 20, № 2 – 2005. – P. 1417 – 1422.

14. T. V. Oommen, Moisture equilibrium in paper-oil insulation systems // Proc. Electrical/Electronics Insulation Conf. – Chicago, IL. – 1983.

tion of power oil transformer loading capacity // Pro-melektro. – 2011. – №1. – p. 25-31.

10. J. Fabre, A. Pichon. Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil. Application to Transformers. – International Conference on Large High Voltage Electric System (CIGRE), Paris, France. – Paper 137. – 1960.

11. IEEE Std 62-1995, IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus – Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators and Reactors.

12. IEEE Std C57.106, Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil Equipment.

13. B. García, J. C. Burgos, Á. Alonso, J. Sanz. A moisture-in-oil model for power transformer monitoring - Part I: Theoretical foundation // IEEE Transactions on Power Delivery – vol. 20, № 2 – 2005. – P. 1417 – 1422.

14. T. V. Oommen, Moisture equilibrium in paper-oil insulation systems // Proc. Electrical/Electronics Insulation Conf. – Chicago, IL. – 1983.

Надійшла до друку 25.06.2014.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

Порушення в роботі силових трансформаторів безпосередньо впливають на надійність енергосистеми в цілому, що пояснює високі вимоги, які пред'являються до їх надійності. Для виявлення дефектів трансформатора на ранній стадії їх розвитку найбільш ефективними є системи безперервного моніторингу, які виконують оцінку поточного стану. У роботі розглянуто можливості використання різних моделей фізичних процесів, які впливають на стан трансформатора, як складових частин системи моніторингу. Найбільш часто в трансформаторі пошкоджується ізоляційна система, яка зазнає в роботі теплових, електричних і механічних впливів. Як термічна модель для використання в системі моніторингу силового трансформатора можуть бути запропоновані як моделі описані в стандартах IEC та IEEE, так і більш точні моделі описані в сучасних працях. Для оцінки залишкового ресурсу та допустимості певних режимів навантаження в системах моніторингу запропоновано використовувати більш точні, порівняно з детермінованими, стохастичні моделі процесів у трансформаторі.

**Ключові слова:** моніторинг, силовий трансформатор, оцінка стану, електропостачальна система, тепла модель, навантажувальна здатність, модель вологовмісту.

УДК 621.314.222.6.004

С. П. ДЕНИСЮК, И. В. ПРЫТЫСКАЧ (НТУУ «КПИ»)

Институт энергосбережения и энергоменеджмента, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», 03056, Киев, ул. Борщаговская 115, тел. : (093) 750-13-90, эл. почта: [prytskyach.ivan@gmail.com](mailto:prytskyach.ivan@gmail.com)

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Нарушения в работе силовых трансформаторов непосредственно влияют на надежность энергосистемы в целом, что объясняет высокие требования, предъявляемые к их надежности. Для выявления дефектов трансформатора на ранней стадии их развития наиболее эффективны системы непрерывного мониторинга, выполняющие оценку текущего состояния. В работе рассмотрены возможности использования различных моделей физических процессов, влияющих на состояние трансформатора, как составных частей системы мониторинга. Наиболее часто в трансформаторе повреждается изоляционная система, которая несет в работе тепловых, электрических и механических воздействий. Как термическая модель для использования в системе мониторинга силового трансформатора могут быть предложены как модели описаны в стандартах IEC и IEEE, так и более точные модели описаны в современных работах. Для оценки остаточного ресурса и допустимости определенных режимов нагрузки в системах мониторинга предложено использовать более точные, по сравнению с детерминированными, стохастические модели процессов в трансформаторе.

© Денисюк С. П., Притискач И. В., 2014

**Ключевые слова:** мониторинг, силовой трансформатор, оценка состояния, система электроснабжения, тепловая модель, нагрузочная способность, модель влагосодержания.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

**UDC 621.314.222.6.004**

**S. P. DENYSIUK, I. V. PRYTYSKACH (NTUU "KPI")**

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», 03056, Kyiv, Borschagivska st., 115, tel.: (093) 750-13-90, e-mail: [prytyskach.ivan@gmail.com](mailto:prytyskach.ivan@gmail.com)

## **CONDITION EVALUATION IN MONITORING SYSTEMS OF TRACTION SUBSTATIONS POWER TRANSFORMERS**

Malfunction of power transformers directly affect the reliability of the power system as a whole, which explains the high demands placed on their reliability. To detect defects in transformers at an early stage of development the most effective are continuous monitoring system that evaluates the current state. This article examines the possibility of using different models of the physical processes that affect the state of the transformer as part of the monitoring system. The most commonly damaged part is transformer insulation system that suffers from the thermal, electrical and mechanical influences. As thermal model for use in the monitoring of power transformer may be proposed a model described in the standard IEC and IEEE, and a more accurate models described in the modern works. To assess the residual life and the admissibility of certain modes of load monitoring system is proposed to use a more accurate, compared to deterministic, stochastic models of processes in transformer.

**Keywords:** monitoring, power transformer, state assessment, electricity supply system, thermal model, load capacity, water content model.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

В. А. ДЬЯКОВ, Л. Ю. ЖИРОВА, М. Н. ПЕРЕВЕРТЕНЬ, В. Н. ШАТЫЛО (ДНУЖТ)

Кафедра Электроснабжения железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: [dva-44@i.ua](mailto:dva-44@i.ua)

## ОСОБЕННОСТИ ТОКОСЪЕМА МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

### Введение

Под токосъемом понимается процесс передачи электрической энергии от линии электропередачи (контактная сеть) потребителю (электрооборудование электроподвижного состава). На электрифицированных железных дорогах токосъем осуществляется контактным способом от контактного провода контактной подвески токоприемнику электроподвижного состава (ЭПС). Надежность токосъема определяется отсутствием повреждений контактной сети и оборудования ЭПС, которые могут привести к задержке поездов и, как следствие, к большим материальным потерям.

При взаимодействии токоприемников ЭПС с контактной подвеской должен обеспечиваться надежный и экономичный токосъем (минимизация износа контактного провода и токосъемных элементов токоприемников) с обеспечением экологических требований (радио- и тепломехи, шумовые воздействия, засорение почвы).

Для реализации этих требований при увеличении скоростей движения ЭПС возникла необходимость совершенствования конструкции контактных подвесок и токоприемников ЭПС.

Во второй половине прошлого века при электрификации железных дорог Украины на переменном токе на перегонах была смонтирована компенсированная контактная подвеска, рассчитанная для реализации скоростей ЭПС до 160 км/час. Однако до последнего времени экспериментально проверить надежность токосъема при скоростях движения до 160 км/час не представлялось возможности, так как на электрифицированных железных дорогах Украины эксплуатировался ЭПС при скоростях, как правило, не более 120 км/час. И только в 2012 году на стальных магистралях Украины появились электропоезда способные развивать скорость до 160 км/час. В этой связи при взаимодействии токоприемников ЭПС и контактной подвески появились проблемы, на которые необходимо обратить особое внимание.

### Описание и анализ существующих проблем

Проблемы, которых раньше не существовало из-за более низкой скорости движения ЭПС и наличия пружинного рессорного подвешивания кузовов вагонов подвижного состава (рис. 1) привели к повреждениям контактной сети и токоприемников ЭПС. Современный ЭПС, способный развивать скорость 160 км/час и более, имеет пневматические рессоры, на которые подвешен кузов вагона (рис. 2).

При входе и выходе ЭПС с прямого участка пути на кривой (особенно малого радиуса) оси тележек и кузова вагона ЭПС, на котором закреплен токоприемник, могут не совпадать из-за большой инерции баллонов пневматических рессор, что может привести к сходу контактного провода с рабочей части токоприемника [1, 2, 3].

Эту проблему можно было бы решить используя способ закрепления токоприемника с помощью специальной стойки, которая жестко опирается на ненаклонные балки тележки. Такое закрепление токоприемника используется на электропоезде двойного питания Allegro, который эксплуатируется на участке Хельсинки (Финляндия) – Санкт - Петербург (Российская Федерация).



Рис. 1. Подвешивание кузова вагона на пружинных рессорах





Рис. 2. Подвешивание кузова вагона на пневматических рессорах

В ближайшей перспективе скорости ЭПС на железных дорогах Украины могут возрасти и до 200 км/час. В этой связи предстоит модернизация контактной сети, которая уже предусмотрена Главным управлением электрификации и электроснабжения Укрзализныци [4]. В 2012 году введена в действие «Програма модернізації пристроїв електропостачання на 2012 – 2016 роки», в которой предусмотрены мероприятия по реконструкции, обновлению и модернизации устройств электроснабжения. Особенно актуальным является модернизация и капитальный ремонт контактной сети на участках с перспективным повышением скорости движения ЭПС. В этой связи речь идет о приведении

в соответствие международным требованиям параметров контактной сети.

В общих технических требованиях к системе тягового электроснабжения постоянного и переменного тока скоростных и высокоскоростных линий, разработанных совещанием экспертов V Комиссии Организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД) в 2000 году и в рекомендациях по геометрическим, динамическим и электромеханическим параметрам контактной сети, токоприемников и токосъемных элементов для скоростного и высокоскоростного электроподвижного состава транспортных коридоров, разработанных экспертами Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу в 2004 году приведены рекомендуемые параметры контактной сети для скоростного движения. Основные из этих параметров приведены в табл. 1.

В этой связи можно сделать вывод, что с увеличением скорости движения ЭПС для обеспечения надежного токосъема необходимо выравнивать жесткость (эластичность) контактной подвески в пролете. Однако расчеты, проведенные для типовых контактных подвесок постоянного и переменного токов, эксплуатируемых на территории Украины, показали несоответствие требованиям нормативных документов коэффициента неравномерности эластичности для скоростей до 160 км/час (табл. 2).

Таблица 1

Параметры контактной сети	до 160 км/час	до 200 км/час	до 250 км/час	до 300 км/час
Номинальное натяжение, кН: а) контактного провода; б) несущего троса в) рессорного троса	10,0	12,0	15,0	15,0
	16,0	18,0	20,0	20,0
	2,5...3,0	3,0...4,0	3,5...4,0	3,5...4,0
Максимальная длина пролета, м	70,0	65,0	60,0	60,0
Наибольшая длина анкерного участка, м	1500	1400	1300	1200
Коэффициент неравномерности эластичности (не более)	1,3	1,2	1,15	1,1

Таблица 2

Тип контактной подвески	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta_{\max}, \text{мм/даН}$	$\eta_{\min}, \text{мм/даН}$	$K_n$
Полукомпенсированная ПБСМ – 95 + МФ – 100	-30	$\frac{11,5}{8,5}$	$\frac{4,45}{3,4}$	$\frac{2,55}{2,5}$
	+50	$\frac{7,9}{10,5}$	$\frac{3,35}{4,2}$	$\frac{2,35}{2,33}$
Компенсированная ПБСМ – 95 + МФ – 100	-30	$\frac{9,1}{8,1}$	$\frac{3,9}{3,25}$	$\frac{2,5}{2,49}$
	+50	$\frac{7,1}{7,156}$	$\frac{3,1}{4,584}$	$\frac{2,29}{1,57}$
Полукомпенсированная М – 120 + 2МФ – 100	-30	$\frac{4,879}{7,156}$	$\frac{2,903}{4,556}$	$\frac{1,68}{1,57}$
	+50	$\frac{7,156}{7,156}$	$\frac{4,584}{4,556}$	$\frac{1,56}{1,57}$

© Дьяков В. А. и др., 2014



Тип контактной подвески	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta_{\max},$ мм/даН	$\eta_{\min},$ мм/даН	$K_n$
Компенсированная М – 120 + 2МФ – 100	-30	<u>4,658</u> 4,658	<u>2,72</u> 2,688	<u>1,712</u> 1,733
	+50	<u>6,06</u> 6,06	<u>3,503</u> 3,433	<u>1,73</u> 1,765
Компенсированная Бр – 120 + БрФ – 120	-30	<u>4,7</u> 4,7	<u>3,80</u> 3,65	<u>1,236</u> 1,287
	+50	<u>4,60</u> 4,55	<u>3,9</u> 3,6	<u>1,179</u> 1,26
Компенсированная Бр – 120 + 2БрФ – 120	-30	<u>3,063</u> 3,063	<u>2,53</u> 2,53	<u>1,211</u> 1,211
	+50	<u>3,396</u> 3,396	<u>2,803</u> 2,803	<u>1,212</u> 1,212

Примечания:

1. В числителе приведены значения  $\eta$  (эластичности) и  $K_n$  (коэффициента неравномерности эластичности) с учетом разгрузки струн, в знаменателе – без учета разгрузки струн.

2. Разгрузка струн учитывалась при контактом нажатии токоприемника  $P = 20$  даН (переменный ток) и  $P = 25$  даН (постоянный ток).

Для компенсированных проводов их натяжения на основании требований нормативных документов [5] определялось с учетом реакций струн, консолей, фиксаторов. Расчет эластичности полукомпенсированных контактных подвесок с учетом разгрузки струн производилась только при положительных стрелах провеса.

Изменение натяжения компенсированных проводов в анкерном участке в зависимости от температуры обусловлено реакцией струн, фиксаторов, консолей (рис. 3).

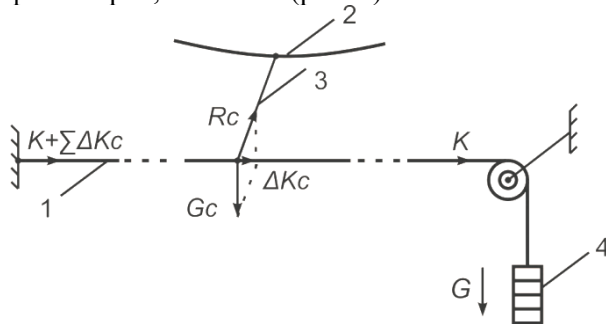


Рис. 3. Схема влияния наклона струны на натяжение компенсированного контактного провода:

1 – контактный провод; 2 – несущий трос;  
3 – наклонная струна ( $t < t_m$ ); 4 – компенсатор;  
 $\Delta K_c$  – реакция струны;  $G_c$  – вертикальная нагрузка на струну;  $G$  – вес грузов компенсатора;  $R_c$  – усилие в струне;  $t_m$  – температура монтажа (регулировки);  $K$  – номинальное натяжение контактного провода

Изменение натяжения компенсированных проводов в анкерном участке не должно превышать при скорости до 160 км/час для контактных проводов  $\pm 15\%$  (рис. 4), а для несущих тросов  $\pm 10\%$  номинального их натяжения, создаваемого компенсаторами (для скоростей до 200 км/час  $\pm 5\%$  для компенсированных контактных проводов и несущих тросов).

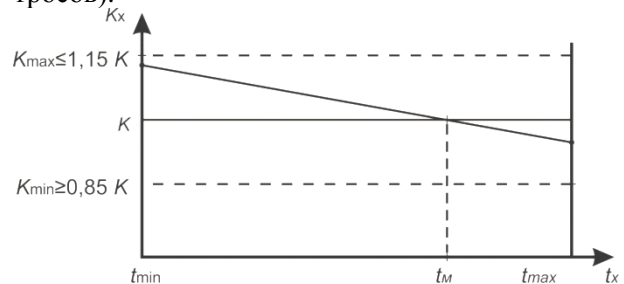


Рис. 4. Зависимость натяжения компенсированного контактного провода от температуры у средней анкеровки:  $t_m$  – температура, при которой струны располагались вертикально

Расчетная схема для определения эластичности контактной подвески постоянного тока приведена на рис. 5 (а), а переменного тока – на рис. 6 (а). Эпюры эластичности контактных подвесок постоянного и переменного токов приведены соответственно на рис. 5 (б) и 6 (б).

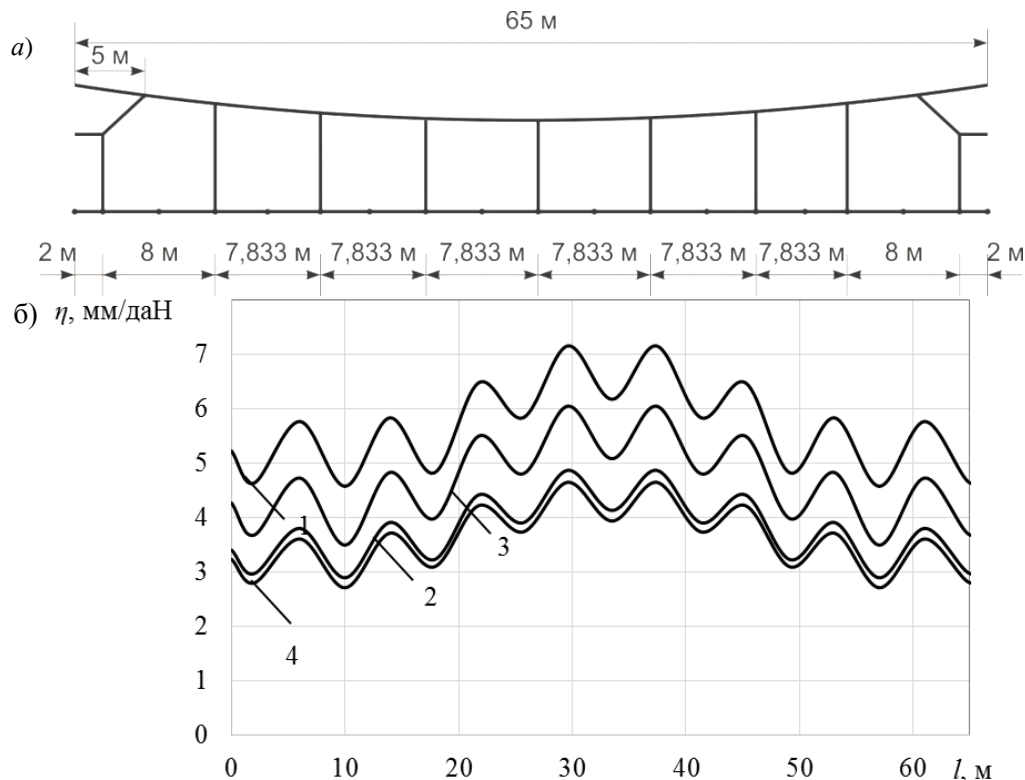


Рис. 5. Расчетная схема для контактной подвески постоянного тока М-120+2МФ-100 (а), эпюра эластичности в расчетном пролете с учетом разгрузки струн (б):  
1 – полукомпенсированная подвеска при максимальной температуре, 2 – полукомпенсированная подвеска при минимальной температуре; 3 – компенсированная подвеска при максимальной температуре; 4 – компенсированная подвеска при минимальной температуре

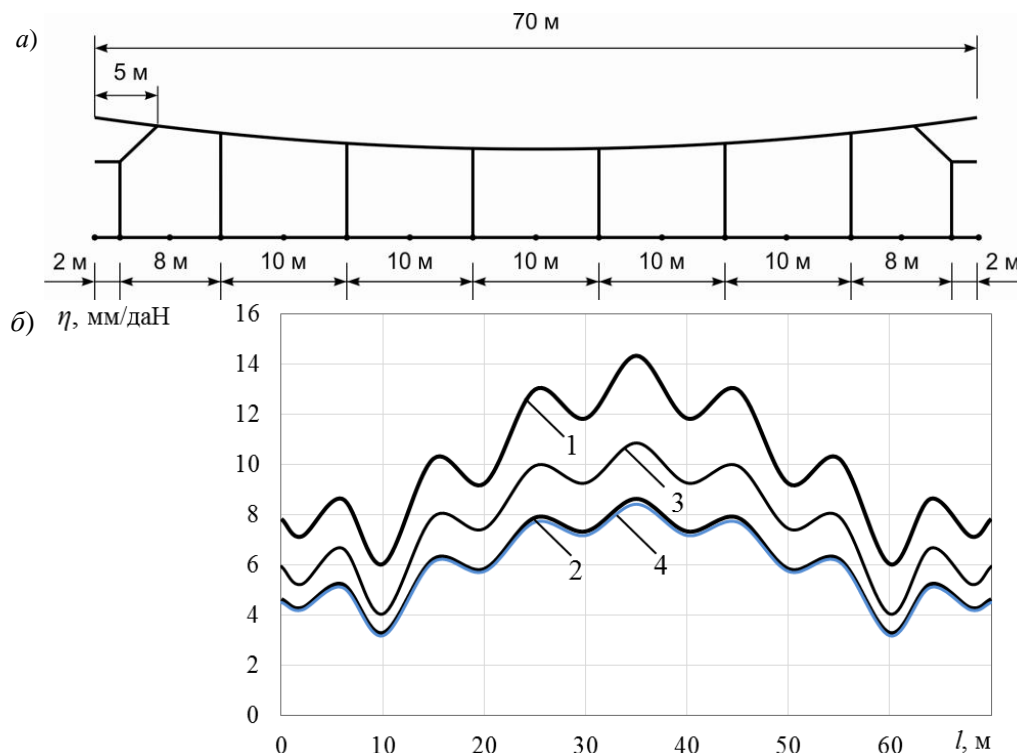


Рис. 6. Расчетная схема для контактной подвески переменного тока ПБСМ-95+МФ-100 (а), эпюра эластичности в расчетном пролете с учетом разгрузки струн (б):  
1 – полукомпенсированная подвеска при максимальной температуре, 2 – полукомпенсированная подвеска при минимальной температуре; 3 – компенсированная подвеска при максимальной температуре; 4 – компенсированная подвеска при минимальной температуре

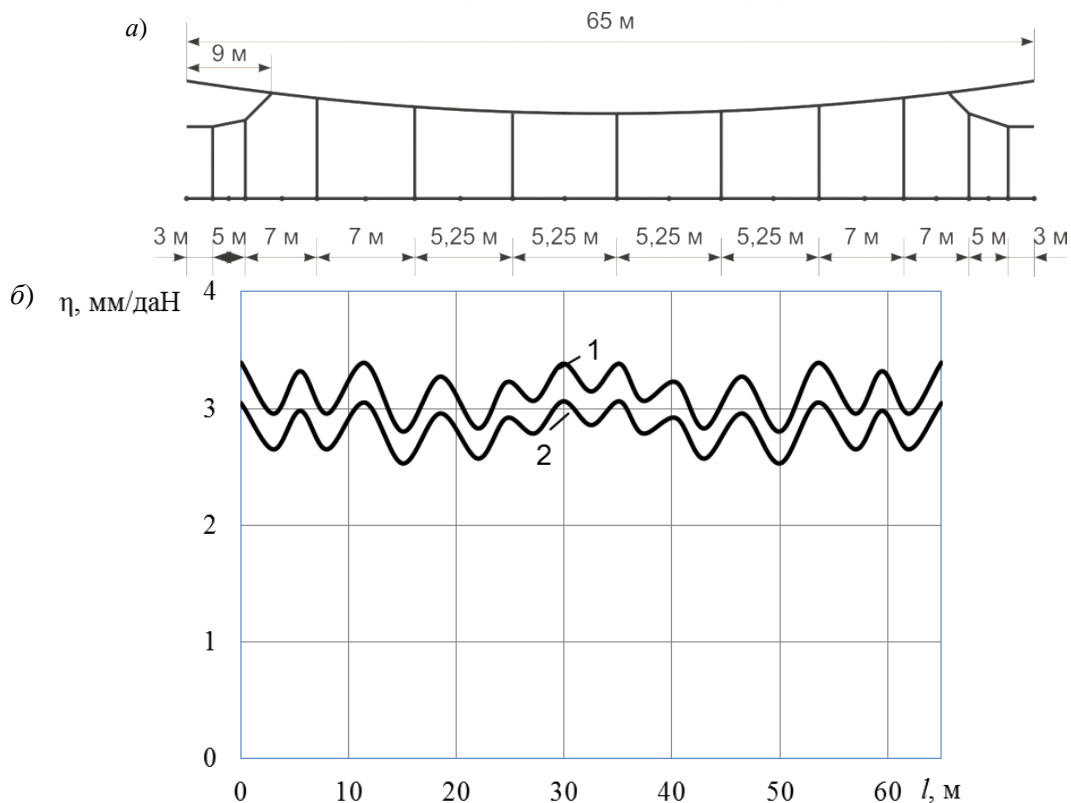


Рис. 7. Расчетная схема для контактной подвески постоянного тока Бр-120+2БрФ-120 (а), эпюра эластичности в расчетном пролете с учетом разгрузки струн (б): 1 – при максимальной температуре, 2 – при минимальной температуре

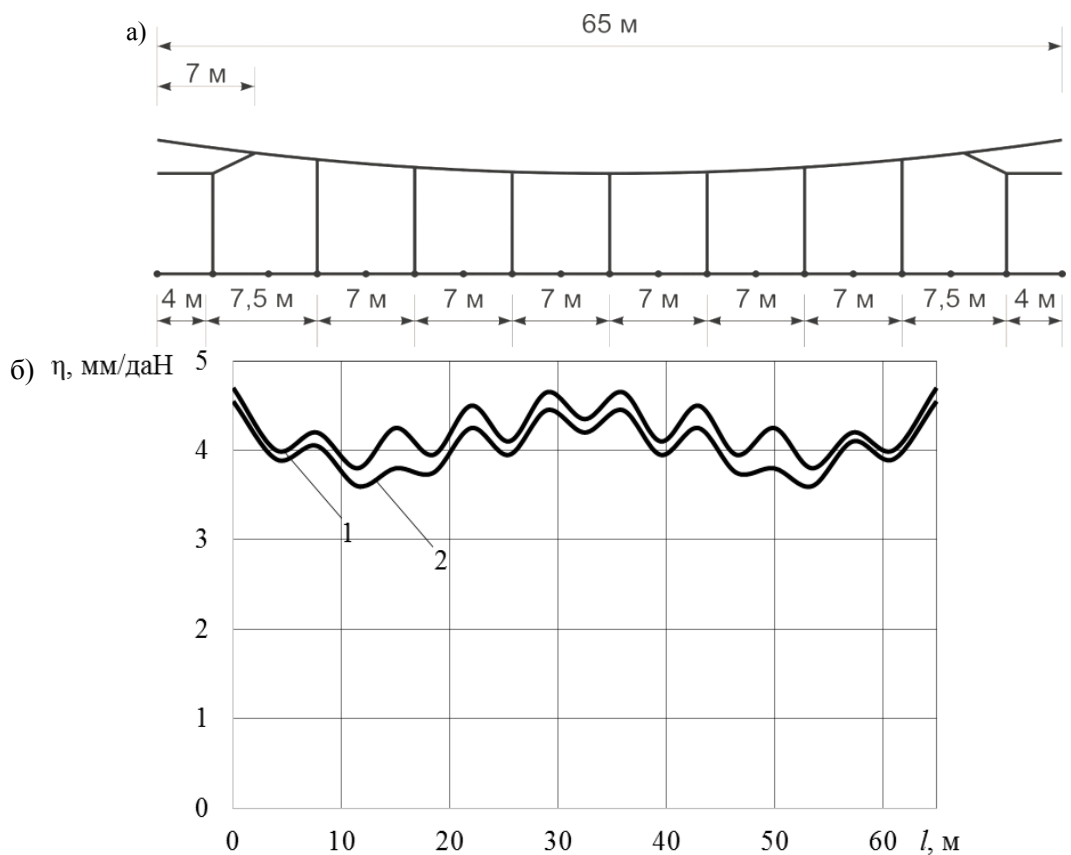


Рис. 8. Расчетная схема контактной подвески переменного тока Бр-120+2БрФ-120 (а), эпюра эластичности в расчетном пролете с учетом разгрузки струн (б): 1 – при максимальной температуре, 2 – при минимальной температуре

## Выводы

Для предотвращения повреждений контактной сети и токоприемников диагностирование динамических и геометрических параметров контактной сети необходимо производить с помощью вагон-лабораторий контактной сети (ВИКС), способных развивать скорость 160 км/час и более. Кроме того, ВИКС должен иметь подвешивание кузова на рессорах, которые используются у современных ЭПС.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Grajnert J.. Podstawy teoretyczno – doświadczalne projectowania zawieszon pneumatycznych. – Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1996. – 180 p.
2. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983. – 261 с.
3. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
4. Максимчук В.Ф. Стратегічні задачі та пріоритети розвитку господарства електрифікації та електропостачання / В.Ф. Максимчук// Електрифікація транспорту – 2013. - № 5. – с.99 - 105.
5. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.2 / под. ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1981. – 392 с.
6. ВБН В.2.3-2-2009 Споруди транспорту. Електрифікація залізниць. Норми проектування. К.: 2009. – 143 с.

Поступила в печать 28.05.2014.

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

Для обеспечения надежного токосъема при увеличении скоростей движения ЭПС до 200 км/час и более необходимо изменять конструктивные параметры контактной подвески и увеличивать натяжение контактных проводов и несущих тросов, заменяя медные провода на бронзовые.

Ключевые слова: межрегиональные электропоезда, пружинные и пневматические рессоры, токоприемник, контактная подвеска, токосъем, коэффициент неравномерности эластичности.

## REFERENCES

1. Grajnert J. Podstawy teoretyczno – doświadczalne projectowania zawieszon pneumatycznych. – Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1996.–180p.
2. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya novykh i moderniziruyemykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Norms for calculation and design of new and upgraded railway wagons IPU 1520 mm gauge (non-self)]. – М.: VNIIV-VNIIZHT, 1983. – 261 p.
3. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Norms for calculation and design of railway wagons IPU 1520 mm gauge (non-self)]. – М.: GosNIIV-VNIIZHT, 1996. – 319 p.
4. Maksimchuk V.F. Strategichni zadachi ta prioriteti rozvitku gospodarstva yelektrifikatsii ta yelektrypostachannya [Maximchuk VF Strategic objectives and development priorities direction electrification and power supply] / V.F. Maksimchuk// Elektrifikatsiya transportu – 2013. - № 5. – p.99 - 105.
5. Spravochnik po elektrosnabzheniyu zheleznykh dorog [Reference supply railways. V.2]. T.2 / pod. red. K.G. Markvardta. – М.: Transport, 1981. – 392 p.
6. VBN V.2.3-2-2009 Sporudi transportu. Yelektrifikatsiya zaliznits'. Normi proyektuvannya [VBI B.2.3-2-2009 Constructions of transport. Electrification of railways. Design standards]. K.: 2009. – 143 p.

Внешний рецензент Панасенко Н. В.

При увеличении скорости ЭПС на железных дорогах Украины возникла необходимость совершенствования конструкции контактных подвесок и токоприемников. Появление на стальных магистралях электропоездов, способных развивать скорость до 160 км/час, выявило проблемы при токосъеме, которых раньше не существовало из-за более низкой скорости ЭПС. Оказалось, что смонтированная еще в начале 60-х годов компенсированная контактная подвеска, рассчитанная на скорость до 160 км/час, не в состоянии обеспечить надежный токосъем, так как экспериментально проверить ее технические характеристики не удавалось из-за более низкой скорости ЭПС.

В статье рассмотрены некоторые особенности токосъема у межрегиональных электропоездов и приведен анализ изменения коэффициента неравномерности эластичности типовых контактных подвесок, эксплуатируемых в Украине, от температуры окружающей среды. Показано, что при модернизации контактной сети под скоростное движение необходимо изменять конструктивные параметры контактных подвесок и для выравнивания эластичности контактной подвески в пролете заменять медные контактные провода и несущие тросы на бронзовые, имеющие более высокую механическую прочность.

**Ключевые слова:** межрегиональные электропоезда, пружинные и пневматические рессоры, токоприемник, контактная подвеска, токосъем, коэффициент неравномерности эластичности.

УДК 621.336.2

В. О. ДЬЯКОВ, Л. Ю. ЖИРОВА, М. М. ПЕРЕВЕРТЕНЬ, В. М. ШАТИЛО (ДНУЗТ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. (056) 793-19-11, ел. пошта: [dva-44@i.ua](mailto:dva-44@i.ua)

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУМОЗНІМАННЯ МІЖРЕГІОНАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ

Змонтована ще на початку 60-х років компенсована контактна підвіска, що розрахована на швидкість до 160 км/год, не в змозі забезпечити надійне струмознімання, так як експериментально перевірити її технічні характеристики не вдавалось через більш низькі швидкості ЕРС. Виявилось, що змонтована ще на початку 60-х років компенсована контактна підвіска, що розрахована на швидкість до 160 км/год, не в змозі забезпечити надійне струмознімання, так як експериментально перевірити її технічні характеристики не вдавалось через більш низькі швидкості ЕРС.

В статті розглянуті деякі особливості струмознімання і приведений аналіз зміни коефіцієнту нерівномірності еластичності типових контактних підвісок, які експлуатуються в Україні, від температури навколишнього середовища. Показано, що при модернізації контактної мережі для швидкісного руху необхідно змінювати конструктивні параметри контактних підвісок і для вирівнювання еластичності контактних підвісок в прольоті замінити мідні контактні проводи і несучі троси на бронзові, що володіють більш високою механічною міцністю.

**Ключові слова:** міжрегіональні електропоїзди, пружинні та пневматичні ресори, струмоприймач, контактна підвіска, струмознімання, коефіцієнт нерівномірності еластичності.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 621.336.2

V. A. DYAKOV, L.Y. ZHYROVA, M. N. PEREVERTEN, V. N. SHATYLO (DNURT)

Department of railway power supply, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan str. Lazaryan, 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, Tel. (056) 793-19-11, e-mail: [dva-44@i.ua](mailto:dva-44@i.ua)

## FEATURES CURRENT COLLECTION INTERREGIONAL ELECTRIC TRAIN

By increasing, the speed of CSE on the railways of Ukraine became necessary to improve the design of overhead lines and current collectors. Appearance on steel mains electric, capable of speeds up to 160 km / h, revealed problems with current collector, which previously did not exist because of the lower rate of CSE. It turned out that mounted in the early 60s compensated catenary, designed for speeds up to 160 km / h, is unable to provide reliable current collection, as experimentally verify its specifications could not be due to the lower rate of EPS.

The article describes some of the features in the current collection of interregional trains and provides an analysis of changes in the elasticity coefficient of irregularity typical overhead lines operating in Ukraine, on the ambient temperature. It is shown that the modernization of the contact network for high-speed trains need to change the design parameters of catenary and elasticity to align the catenary in the span to replace copper contact wires and cables carrying on bronze, having a high mechanical strength.

**Keywords:** interregional train, spring and air suspension, pantograph, catenary, current collector, irregularity factor elasticity.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*



## ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЗАЩИТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ

С увеличением мощности локомотивов, массы грузовых поездов, скоростей движения существенно обостряются вопросы надежной защиты от токов короткого замыкания контактной сети. Особенно остро эта проблема стоит для системы постоянного тока, где пусковые токи электровозов соизмеримы с токами удаленных коротких замыканий и отличить их друг от друга не всегда возможно.

**1 (нормальный режим).** В качестве пускового тока (тока трогания) электроподвижного состава (ЭПС), для выбора уставок защит принимается наибольшее мгновенное (пиковое) значение тока в режиме трогания поезда с ме-

ста. Для ЭПС со ступенчатым реостатным регулированием в режиме пуска наибольшие пики тока возникают при переходе на параллельное соединение тяговых электродвигателей и при ослаблении поля. Так, например, при трогании состава с электровозами ВЛ11, ВЛ15С и пиковыми значениями пускового тока, ток в присоединении контактной сети достигает примерно 6000 А. В то же время, при КЗ возле поста секционирования, например, на расстоянии 7 км ток этого присоединения (с учетом падения напряжения в дуге) может оказаться лишь чуть больше 5000 А (табл. 1).

Таблица 1

Пиковые значения токов трогания

Серия ЭПС	Число секций или моторных вагонов	Мощность часового режима $P_{\text{ч}}$ , кВт	Мощность длительного режима $P_{\text{дл}}$ , кВт	КПД $\eta$	Наибольший пик тока трогания $I_{\text{тр}}$ , А
ВЛ8	2	4200	3760	0,89	2350
ВЛ10, ВЛ10 <sup>У</sup>	2	5360	4600	0,90	2900
ВЛ11, ВЛ11 <sup>М</sup>	2	5360	4600	0,88	2850
	3	8040	6900		4100
ВЛ15	2	9000	8400	0,88	4600
ВЛ15С	3	13500	12600	0,88	6900
ЧС2, ЧС2 <sup>Х</sup>	1	4620	4080	0,91	2500
ЧС3	1				1600
ЧС6, ЧС200	2	8400		0,91	4200
ЧС7	2		6160	0,9	3500
ЭП20	2	8750*			3040
Velaro RUS В1 «Сапсан»	4	9200*			3300

В этих случаях либо во время трогания поезда контактная сеть слишком часто будет внезапно отключаться, либо, если такое ложное и вредное отключение исключать выбором уставки защиты, на контактной сети появляются так называемые «мертвые зоны», короткие замыкания на которых защита не чувствует. Контактная сеть не отключается и провода пережигаются. Движение поездов останавливается.

Если же за режим пуска принимать тот, который приведен в Правилах производства тяговых расчетов (ППТР), то уставку защиты во

многих случаях вообще выбрать не удастся. Вместе с тем, в реальных условиях машинисты иногда затягивают режим пуска, пусковые токи снижаются, снижаются и приращения токов при переходе на параллельные соединения тяговых двигателей и при ослаблении поля. Это позволяет избежать ложных отключений быстродействующих выключателей при пусках и обеспечить защиту от токов КЗ в зоне «подстанция-пост». Формально режим пуска должен отвечать ППТР, а фактически вероятно возможна договоренность между службой Э и

Дирекцией тяги относительно режима пуска в некоторых случаях, когда иначе уставку не выбрать. Поэтому в качестве полумеры для действующих участков, способной во многом снять эту остроту, следует предложить договариваться на дорогах энергетикам и локомотивщикам с тем, чтобы трогание поездов осуществлялось не по режиму, принятому в Правилах производства тяговых расчетов, а замедленно, с меньшими пусковыми токами.

Для вновь строящихся, реконструируемых или обновляемых участков эту проблему можно вообще снять, если вместо пунктов параллельного соединения устанавливать упрощенные посты секционирования, что выгодно и для надежности эксплуатации (сокращается вдвое длина обесточенного участка), и для повышения надежности отключения коротких замыканий до уровня, достигнутого в контактной сети переменного тока за счет т.н. «дальнего резервирования» (рис. 1).

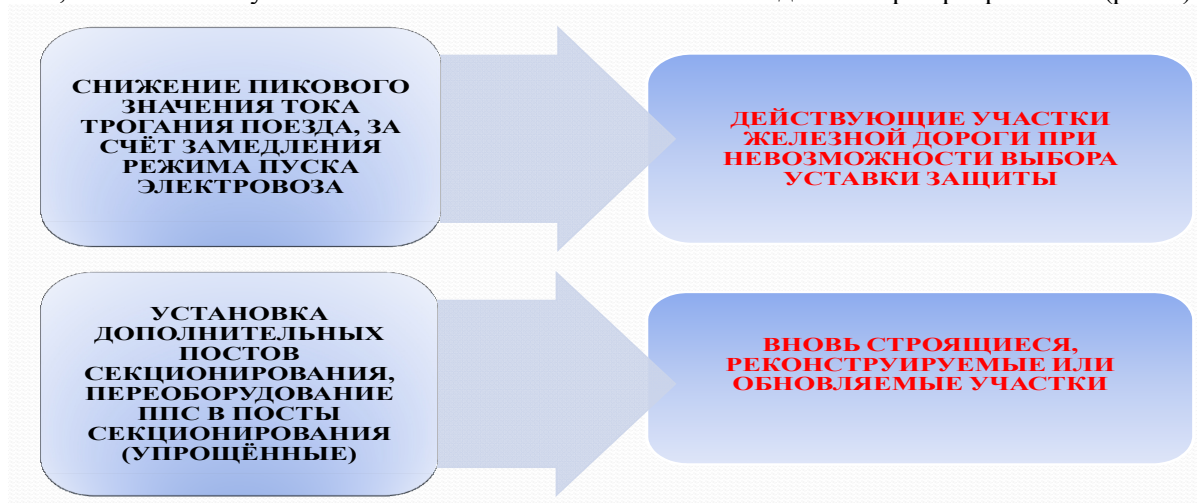


Рис. 1. Отстроенность защиты от токов нормального режима

**2 (короткое замыкание).** Очень важно правильно оценивать значение токов короткого замыкания. Наиболее опасными для контактной сети оказываются наименьшие токи КЗ, поскольку они мало отличаются от максимальных токов нормального режима и их трудно обнаружить.

Особенно опасны КЗ на трассе группового заземления. В соответствии с действующей Инструкцией по заземлению ЦЭ-191 (п.2.1.4.), сечение и марку проводов троса группового заземления следует выбирать так, чтобы трос не ограничивал ток КЗ. На самом деле при длине 1200 м (железобетонные опоры) трос очень ограничивает ток КЗ и создает мертвые зоны. Практику выбора этого троса марки АС-70, ПБСМ-70 считаем ошибочной, т.к. уже 600 м такого троса имеет сопротивление как несколько км контактной сети и он снижает ток КЗ. Хотя в Инструкции по заземлению записано, что трос группового заземления не должен снижать ток КЗ ниже значений, обеспечивающих надежную работу защиты. Однако это требование в большинстве случаев не выполняется. При интенсивном движении и кратной тяге на длине 1,5 – 2 км возле тяговых подстанций и постов секционирования вместо троса группового заземления следует в таких случаях применять индивидуальные заземления. Возможности применения троса группового заземления и его сечение

должны быть обоснованы расчетом, иначе могут образовываться мертвые зоны.

То же относится и к падению напряжения в дуге при КЗ, которое в расчетах принимается явно заниженным (соответственно одному тательчатому изолятору в пирамиде, хотя давно уже ставят два или три изолятора). Сейчас расчет токов КЗ не учитывает изложенное и ведется по несколько облегченным положениям. Нужно разработать соответствующие нормативные документы по методике расчета токов КЗ в контактной сети постоянного тока (рис. 2).

**3 (защита).** В последние годы подстанции постоянного тока оснащаются устройствами цифровых защит и автоматики фидеров ЦЗАФ-3,3. Устройство полезное, но там где ток КЗ меньше или соизмерим с наибольшими значениями тока нормального режима (с учетом тока трогания), оно не снимает остроты проблемы. И в этом случае следовало бы вместо пунктов параллельного соединения устанавливать посты секционирования.

Особенную пользу комплектов ЦЗАФ-3,3 мы видим в наличии дистанционной защиты, защите по минимальному напряжению и квазитепловой защите. Дистанционная защита в ряде случаев может несколько продлить защищаемую зону, сократить вдвое длину «мертвой зоны», принять на себя функцию основной защи-

ты. Кваситепловая защита должна быть обязательно включена в работу на всех присоединениях. Она является мощным средством для защиты от перегрузок, отжига проводов контактной сети при неотключенных КЗ на электроподвижном составе, которые не обнаруживаются основной защитой. Кваситепловую защиту следует обязательно включать и в комплект ЦЗАФ-27,5 (ИнТер) для контактной сети переменного тока тоже.

С увеличением размеров перевозок, скоростей движения и массы поездов на участках постоянного тока существующая защита на по-

стах секционирования и пунктах параллельного соединения может оказаться недостаточной и понадобятся резервные и дополнительные защиты. Возможно, придется думать о каком-то более простом термине для них. Или еще проще – использовать типовые (существующие) датчики тока и напряжения производства ООО «НИИЭФА-ЭНЕРГО» с небольшим микропроцессорным комплексом (или без него), который легко может освоить МЭЗ ОАО «РЖД», поскольку защита по переходным процессам здесь не нужна (рис. 3).

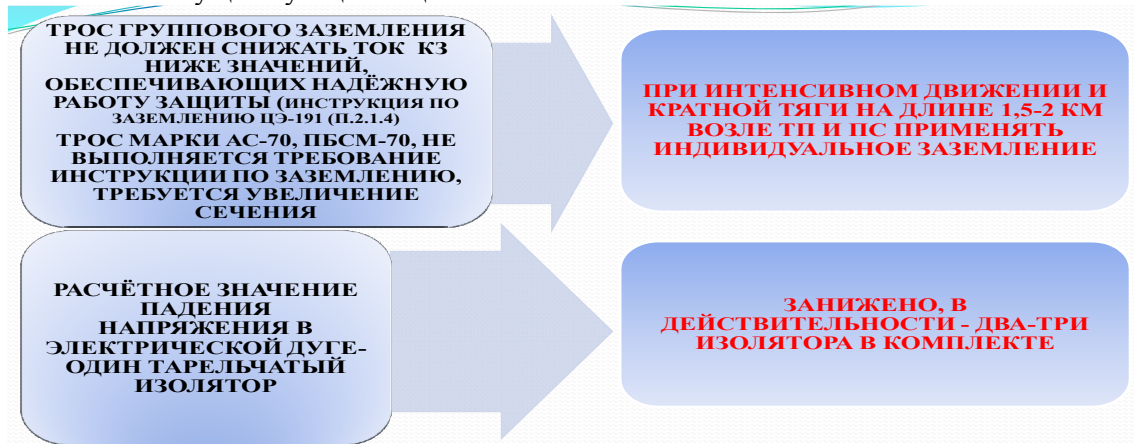


Рис. 2. Аварийный режим (короткое замыкание)



Рис. 3. Цифровые защиты присоединений контактной сети

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Фигурнов Е. П. Релейная защита: учебн. для студентов электротехнических и электромеханических специальностей трансп. и др. вузов / Е. П. Фигурнов. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 565 с.
2. Фигурнов Е. П. Релейная защита устройств электропостачания железных дорог: учебн. для вузов жд. трансп. / Е. П. Фигурнов. – М.: Транспорт, 1981. – 215 с.
3. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи: Учебн. для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

## REFERENCES

1. Figurnov E. P. *Releynaya zashchita: uchebn. dlya studentov elektrotekhnicheskikh i elektromekhanicheskikh spetsial'nostey transp. i dr. vuzov* [Relay protection: a textbook for students of electrical and electromechanical specialties of transport and others. universities]. Kyiv, Transport of Ukraine Publ., 2004. 565 p.
2. Figurnov E. P. *Releynaya zashchita ustroystv elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog: uchebn. dlya vuzov zh.d. transp.* [Relay protection the devices of railway power supply: textbook. for universities of railway

© Жарков Ю. И., Фигурнов Е. П., 2014

Поступила в печать 19.05.2014.

**Ключевые слова:** тяговая сеть, постоянный ток, релейная защита, короткое замыкание.

transport]. Moscow, Transport Publ., 1981. 215 p.

3. Burkov A. T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli: uchebn. dlya vuzov zh.-d. transp.* [Electronic technique and converters: textbook. for universities of railway transport]. Moscow, Transport Publ., 1999. 464 p.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

В работе широко рассмотрена проблема защиты контактной подвески от тока короткого замыкания. Особенно остро эта проблема стоит для системы постоянного тока, где пусковые токи электровозов соизмеримы с токами удаленных коротких замыканий и отличить их друг от друга не всегда возможно. Рассмотрена проблематика «мертвых зон» и значений уставок в тяговой сети. В реальных условиях машинисты допускают затягивание режим пуска, пусковые токи снижаются, снижаются и приращения токов при переходе на параллельные соединения тяговых двигателей и при ослаблении поля. Это позволяет избежать ложных отключений быстродействующих выключателей при пусках и обеспечить защиту от токов КЗ в зоне «подстанция-пост». Формально режим пуска должен отвечать ППТР, а фактически вероятно возможна договоренность между службой Э и Дирекцией тяги относительно режима пуска в некоторых случаях, когда иначе уставку не выбрать. Наиболее опасными для контактной сети оказываются наименьшие токи коротких замыканий, поскольку они мало отличаются от максимальных токов нормального режима и их трудно обнаружить.

УДК 621.331.3

Ю. И. ЖАРКОВ, Е. П. ФИГУРНОВ (РДУШС)

Ростовський державний університет шляхів сполучення, кафедра Автоматизовані системи електропостачання, Росія, 344038, м. Ростов-на-Дону, пл. Ростовського Стрілецького Полку Народного Повстання, буд. 2, тел.: тел.: (863) 27-26-385, ел. пошта: [asel@rqups.ru](mailto:asel@rqups.ru)

## ПРОБЛЕМИ ОРГАНІЗАЦІЇ ЗАХИСТУ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ВІД КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ ПРИ ПІДВИЩЕНИХ СТРУМОВИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

У роботі широко розглянуто проблему захисту контактної підвіски від струму короткого замикання. Особливо гостро ця проблема стоїть для системи постійного струму, де пускові струми електровозів співставні зі струмами віддалених коротких замикань і відрізнити їх один від одного не завжди можливо. Розглянута проблематика «мертвих зон» і значень уставок в тяговій мережі. У реальних умовах машиністи допускають затягування режиму пуску, пускові струми знижуються, знижуються і приращення струмів при переході на паралельні з'єднання тягових двигунів і при ослабленні поля. Це дозволяє уникнути помилкових відключень швидкодіючих вимикачів при пусках і забезпечити захист від струмів КЗ в зоні «підстанція-пост». Формально режим пуску повинен відповідати ППТР, а фактично ймовірно можлива домовленість між службою Е і Дирекцією тяги щодо режиму пуску в деяких випадках, коли інакше уставку не вибрати. Найбільш небезпечними для контактної мережі виявляються найменші струми коротких замикань, оскільки вони мало відрізняються від максимальних струмів нормального режиму і їх важко виявити.

**Ключові слова:** тягова мережа, постійний струм, релейний захист, коротке замикання.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 621.331

Y. I. ZHARKOV, E. P. FIGURNOV (RSURT)

Rostov State University of Railway Transport, Department of Automated Power Supply Systems, Russia, 344038, Rostov-on-Don, Rostov Rifle Regiment of the People's Militia Square, h. 2, tel.: (863) 27-26-385, e-mail: [asel@rqups.ru](mailto:asel@rqups.ru)

## THE PROBLEMS OF ORGANIZATION THE PROTECTION OF THE DC TRACTION NETWORK FROM THE SHORT-CIRCUIT FAULTS AT THE HIGH CURRENT LOADS

In this paper, widely considered the problem of protection of overhead catenary from short-circuits currents. Particularly acute that problem is for the DC system, where the starting current of electric locomotives with remote short circuit currents and to distinguish them from each other is not always possible. The problems of «dead zones» and set values in the traction network are also considered. In the real world of real machinists sometimes delaying the start mode, the starting currents are reduced, and reduced increment currents during the transition to the parallel connection of traction motors and the weakening of the field. This avoids nuisance tripping speed circuit during start-up and provide protection against short-circuit currents in the zone "substation-post". Formally start mode must agree with PPTR but in fact probably possible agreement between the Traction and Power Supply Departments about the draw as the start mode, in some cases, when the setting is not otherwise choose. Most dangerous for the catenary are the lowest short-circuit currents, since they do not differ much from the current maximum normal and difficult to detect.

**Keywords:** traction network, direct current, relay protection, short circuit.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

© Жарков Ю. И., Фигурнов Е. П., 2014



В. М. ЛЯШУК, М. М. ГРУДЗУР (ДНУЗТ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта [lyashuk52@gmail.com](mailto:lyashuk52@gmail.com)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ДІЛЯНЦІ Л – В ПРИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ 3,3 кВ

### Постановка проблеми

В даний час зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі електрифікованих залізниць шляхом стабілізації напруги в контактній мережі є однією з важливих проблем, які на сьогодні успішно вирішуються в тягових мережах міського електротранспорту при незначних струмах навантаження. Тому створення перетворювачів (стабілізаторів) напруги з великими струмовими навантаженнями є суттєвою проблемою [1].

### Аналіз досліджень

Розглядається питання використання методу стабілізації напруги постійного струму з використанням ланки високої частоти в тягових підстанціях електричного транспорту, наводиться опис і принцип роботи стабілізатора напруги.

Живлення електричних ланцюгів електрифікованого транспорту здійснюється від повітряної контактної мережі постійного струму напругою  $3,3\text{кВ} \pm 0,5\text{кВ}$ . Номінальна напруга на виході тягової підстанції становить  $3,3\text{кВ}$ , максимальне –  $3,8\text{кВ}$ .

Проведені вимірювання напруги холостого ходу на тягових підстанціях на ділянці Лавочне - Воловець на Львівській залізниці показали, що в реальності вона піднімається до  $3,8\text{кВ}$ . Така підвищена напруга негативно позначається на дорогому комутаційному і перетворювальному електроустаткуванню рухомого складу і часто призводить до виходу його з ладу. З іншого боку, зниження напруги контактної мережі призводить до перегріву обмоток тягових двигунів. Ясно, що стабілізація напруги мережі

живлення залізничного транспорту дозволяє значною мірою підвищити якість їх роботи, безпеку, надійність та знизити витрату електроенергії.

### Постановка задачі

Досліджується модуль стабілізації напруги для тягових підстанцій, заснований на використанні ланки високої частоти, як найбільш економічний спосіб [1]. Система стабілізації напруги складається з інвертора, який перетворює постійну напругу  $3,3\text{кВ}$  в змінну з частотою  $5\text{кГц}$ , автотрансформатора, який служить для зміни амплітуди напруги з частотою  $5\text{кГц}$  [3], випрямляча на IGBT транзисторах, датчика напруги і системи управління. Структурна схема системи стабілізації напруги приведена на рис. 1.

### Основний матеріал

Силова частина системи стабілізації напруги наведена на рис. 2. У неї входить автономний інвертор, зібраний за мостовою схемою на IGBT транзисторах Z1-Z4. Інвертор перетворює постійну напругу в змінну з частотою  $5\text{кГц}$ . Навантаженням для інвертора є автотрансформатор, вторинна обмотка якого служить для отримання різних за рівнем напруг на виході. Виводи автотрансформатора підключені до випрямляча, зібраному за мостовою схемою на силових діодах D1 і D2 IGBT транзисторах Z5, Z6, які працюють у ключовому режимі. Змінюючи тривалість імпульсу напруги затвор емітера U<sub>зз</sub> IGBT транзисторів Z5, Z6 можна керувати напругою на навантаженні, тобто на контактній мережі.



Рис. 1. Структурна схема стабілізації напруги



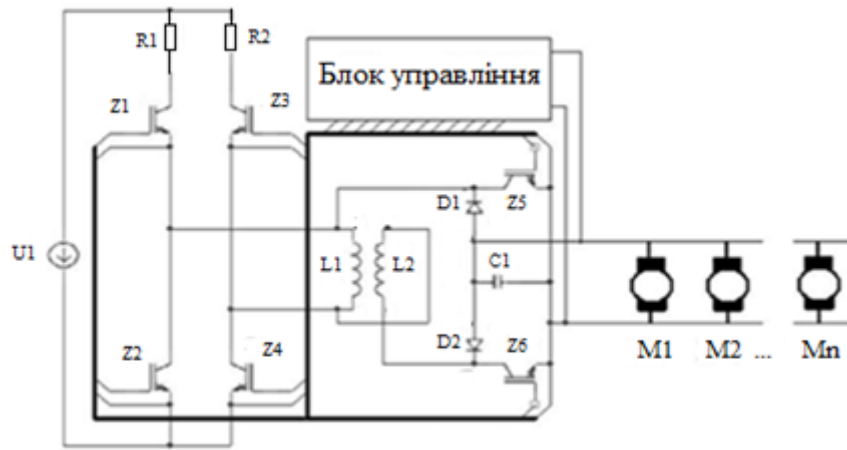


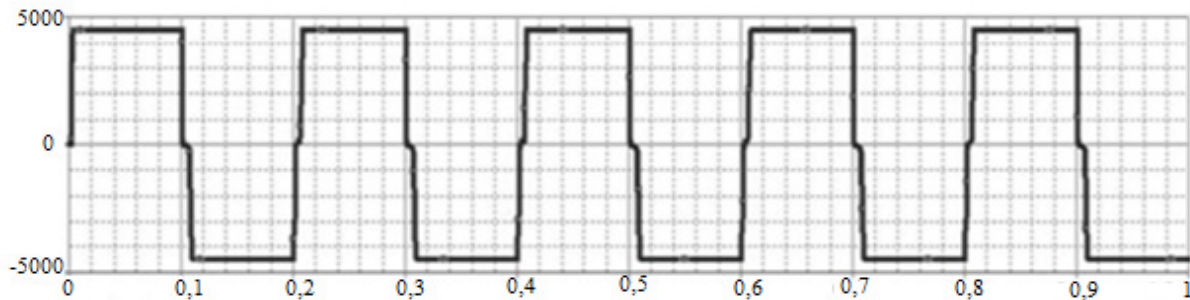
Рис. 2. Силові частини системи стабілізації

Блок управління виконує декілька функцій: управляє роботою транзисторних ключів інвертора, регулює кут відкриття транзисторів випрямляча, порівнює напругу в контактній мережі з еталонним значенням.  $M1, M2, M_n$  - тягові двигуни електротранспорту на ділянці контактної мережі.

Напруга на виході випрямного агрегату тягової підстанції (на схемі позначено  $U1$ ) подається на вхід автономного інвертора, зібраного за мостовою схемою на транзисторах  $Z1-Z4$ . У момент часу від  $0$  до  $t_1$  сигнал з блоку управ-

ління відкриває транзистори  $Z1, Z4$  і на первинну обмотку автотрансформатора подається напруга  $U1$ .

У момент часу від  $t_1$  до  $t_2$ , напруга на первинній обмотці автотрансформатора (клемми 1-4)  $U1$  змінює свій знак на протилежний, так як відкриваються транзистори  $Z2, Z3$ , а транзистори  $Z1, Z4$  закриваються. Таким чином, постійна напруга  $3,3$  кВ перетворюється в змінну напругу з частотою  $5$  кГц на первинній обмотці автотрансформатора. Залежність  $U1(t)$  наведена на рис. 3.

Рис. 3. Напруга  $U1(t)$  інвертора

Автотрансформатор складається з первинної обмотки  $L1$ , вторинної обмотки  $L2$ , феритового сердечника. Виводи вторинної обмотки автотрансформатора підключені до однофазного мостового випрямляча на діодах  $D1, D2$  IGBT модулях  $Z5, Z6$ , який підключається кабелем електроживлення до контактної мережі.

Блок управління здійснює вимірювання напруги на навантаженні, порівнюється з еталонном, і якщо напруга в контактній мережі вище норми, то на транзистори  $Z5, Z6$  подається напруга  $U_{\text{э}}$  менше, ніж у попередній момент часу. І навпаки, якщо в контактній мережі напруга нижче норми, тоді блок управління подає більшу напругу  $U_{\text{э}}$  на

транзистори  $Z5, Z6$ . Таким чином здійснюється стабілізація напруги.

Для виведення передавальної функції системи стабілізації тягової напруги розглянемо систему рівнянь тягового двигуна (рис. 4. Основні рівняння тягового двигуна (двигуна з послідовним збудженням):

$$U = e + iR_p + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

де  $U$  – напруга тягової мережі,  $i$  – струм якоря,  $R$  – опір якорного ланцюга, що включає в себе опору:

- 1) обмотки збудження  $w_e$ ,
- 2) обмотки якорного ланцюга,

- 3) щіткових контактів,  
4) регулювального реостата  $R_p$  (рис. 4);

$e$  – ЕРС обмотки якоря визначаємо за формулою:

$$e = c_e \Phi n \quad (2)$$

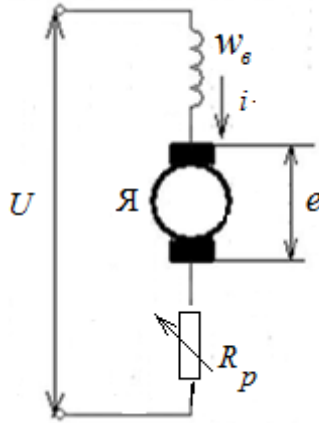


Рис. 4. Схема навантаження тягової напруги

У цій формулі  $c_e$  – обмотувальний коефіцієнт,  $\Phi$  – потік, створюваний обмоткою збудження,  $n$  – число оборотів якоря [об. / Хв.].

Обмотувальний коефіцієнт  $c_e$  дорівнює:

$$c_e = pN / a \quad (3)$$

де  $p$  – число пар полюсів двигуна,  $N$  – число провідників обмотки якоря,  $a$  – число паралельних гілок обмотки якоря. Потік збудження  $\Phi$  дорівнює:

$$T_2 = \frac{R + c_m 60k_\phi w_0}{c_m^2 60k_\phi^2 i_0^2} \quad (4)$$

Де  $\tau$  – полюсний поділ якоря, рівне  $\pi D / 2p$  ( $D$  – діаметр якоря),  $l_y$  – осьова довжина якоря,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  [Н/м] – магнітна проникність вакууму,  $k_\delta$  – зубцовий коефіцієнт, що дорівнює (1.3 ÷ 1.8),  $k_\mu$  – коефіцієнт насичення участків магнітопровода – полюси, статора і ротора (якоря) і зубців, рівний (2 ÷ 2.5),  $\delta$  – довжина зазора між якорем і полюсним наконечником;  $k_\phi$  – коефіцієнт пропорційності потоку  $\Phi$  і струму якоря  $i$ , визначається формулою (4) – зв'язок між числом оборотів  $n$  і обер-

товим моментом двигуна  $M$  визначається другим законом Ньютона для обертального руху:

$$M - M_c = I \frac{dw}{dt} \quad (5)$$

де  $M_c$  – момент опору транспортного засобу (тертя, ухилу шляху),  $I$  – момент інерції якоря, рівний:

$$w = 2\pi n / 60 \quad (6)$$

Обертаючий момент двигуна  $M$  визначається за формулою:

$$M = c_m \Phi i \quad (7)$$

Де

$$c_m = \frac{pN}{2\pi a} = c_e / 2\pi \quad (8)$$

Індуктивність  $L$  складається з індукції обмотки збудження  $L_B$  і індуктивності реакції якоря  $L_y$ . Обидві індуктивності визначаються в результаті розрахунку магнітного ланцюга двигуна.

Виключивши з рівнянь (1) – (8) проміжні величини –  $M$ ,  $E$ ,  $n$ , отримуємо:

$$k_y = \frac{I}{120c_m^2 60k_\phi^2 i_0^2} \quad (9)$$

$$I \frac{dw}{dt} - c_m k_\phi i^2 = M_c \quad (10)$$

Рівняння (9) – (10) дозволяють скласти передаточну функцію тягового двигуна. Для цього за загальноприйнятою методикою замінимо перемінні величини  $U$ ,  $i$ ,  $w$  на суму початкових значень  $U_0$ ,  $i_0$ ,  $w_0$  і інфінітезимальних перетворень  $dU$ ,  $di$ ,  $dw$ , обумовлених динамікою в керованій системі зворотного зв'язку:

$$U = U_0 + dU$$

$$i = i_0 + di \quad (11)$$

$$w = w_0 + dw$$

і підставляємо в систему (9) – (10). Отримуємо для перетворень:

$$L \frac{d\delta w}{dt} + \delta i R + c_m 60k_\phi i_0 \delta w + c_m 60k_\phi w_0 \delta i = \delta U \quad (12)$$

$$I \frac{d\delta w}{dt} - 2c_m k_\phi i_0 \delta i = 0 \quad (13)$$

Для того, щоб об'єднати обидва рівняння в одне, тобто виключити  $\delta w$ , продиференціюємо рівняння (12) за часом і підставимо з рівняння

(13) похідну  $\frac{d\delta w}{dt}$ . Після нескладних перетворень одержуємо:

$$L \frac{d^2 \delta i}{dt^2} + (R + c_m 60k_\phi w_0) \frac{d\delta i}{dt} + 2\delta i \frac{c_m^2 60k_\phi i_0}{I} = \delta U \quad (14)$$

Переходячи до операторного зображення Лапласа,

отримуємо:

$$\left[ Lp^2 + (R + c_m 60k_\phi w_0)p + 2 \frac{c_m^2 60k_\phi i_0^2}{I} \right] \delta i(p) = \delta U \quad (15)$$

де  $\delta i(p)$  – зображення  $\delta i$ .

Таким чином, передаточна функція тягового двигуна дорівнює:

$$W(p) = \frac{\delta U}{\delta i(p)} = \frac{k_y}{T_1^2 + T_2 p + 1} \quad (16)$$

Де  $k_y$  – коефіцієнт передачі, рівний

$$k_y = \frac{I}{120c_m^2 60k_\phi i_0^2} \quad (17)$$

$T_1$  і  $T_2$  – постійні часу, рівні

$$T_1 = \frac{\sqrt{LI/120}}{c_m^2 k_\phi i_0^2} \quad (18)$$

$$T_2 = \frac{R + c_m 60k_\phi w_0}{c_m^2 60k_\phi i_0^2} \quad (19)$$

### Вибір елементної бази

Базовими елементами при розробці системи були обрані сучасні IGBT - транзистори, або модулі, характеристики якого дозволяють працювати з досить великими струмами і напругами [2].

Потужнострумкові модулі з електричною ізоляцією, як правило, містять ключі, з'єднані за полу мостовою ключовою схемою або з одноключовою конфігурацією. У цих модулях діапазон номінальних струмів коливається в межах від 25 до 5000 ампер, а робоча напруга доходить до 4,0 кВ.

Привабливими рисами потужнострумкових модулів є: наявність електричної ізоляції, простота монтажу з охолоджувачем і легкість зв'язку з іншими модулями для підвищення навантаження кола. Вони також дозволяють уникнути викорис-

тання паралельного з'єднання ключів для струмів, що перевищують сотні ампер [5].

Використання приладів з вбудованими зворотними швидкодіючими діодами найбільше привабливими при розробці інверторів. У цьому випадку необхідне число силових напівпровідникових компонентів зменшується на 50 % порівняно з користуванням IGBT і діодів у вигляді окремих елементів. Перекриваються області діапазонів струмів, де використання дискретних приладів економічно переважніше в порівнянні з потужнострумівими модулями, можуть бути розширені за рахунок паралельного з'єднання окремих приладів [4].

### Моделювання в середовищі ORCAD 9.2

Для моделювання роботи системи стабілізації з програмних пакетів обрана OrCAD 9.2. Серед OrCAD 9.2 є універсальним засобом наскрізного проектування електронних систем і володіє широкими можливостями.

На рис. 5 зображена модель системи стабілізації. Як ключі обрані IGBT модулі компанії MitsubishiElectric. Залежність  $U_1(t)$  інвертора (напруга на виході) зображена на рис.3. Генераторами служать моделі джерел напруги прямокутних імпульсів  $V_{pulse}$ , вибрані з стандартних бібліотек OrCAD. Модель трансформатора взята з бібліотеки Analog, модель сердечника - з бібліотеки Magnetic. Модель IGBT модуля CM600HA - 12H теж присутня в стандартному наборі бібліотек OrCAD.

Діаграми, отримані в результаті моделювання в середовищі OrCAD 9.2 і показують роботу системи стабілізації показані на рис.6. Таким чином, випрямляч, який працює в режимі широтно-імпульсного модулятора, дозволяє стабілізувати напругу в контактній мережі тягового електротранспорту.

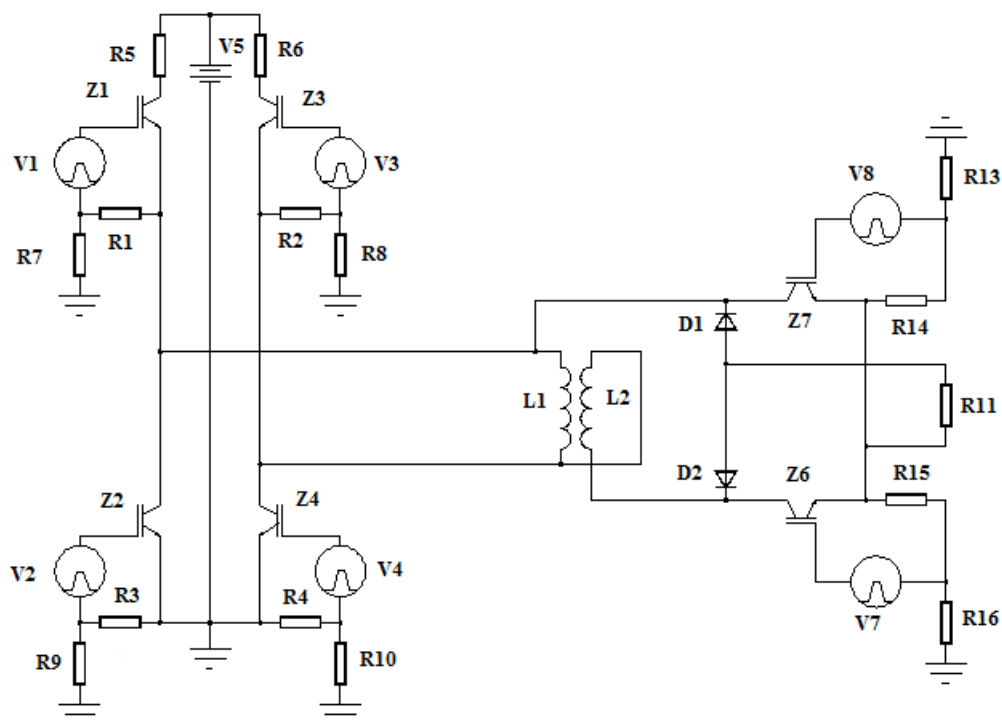


Рис. 5. Модель силової частини системи стабілізації

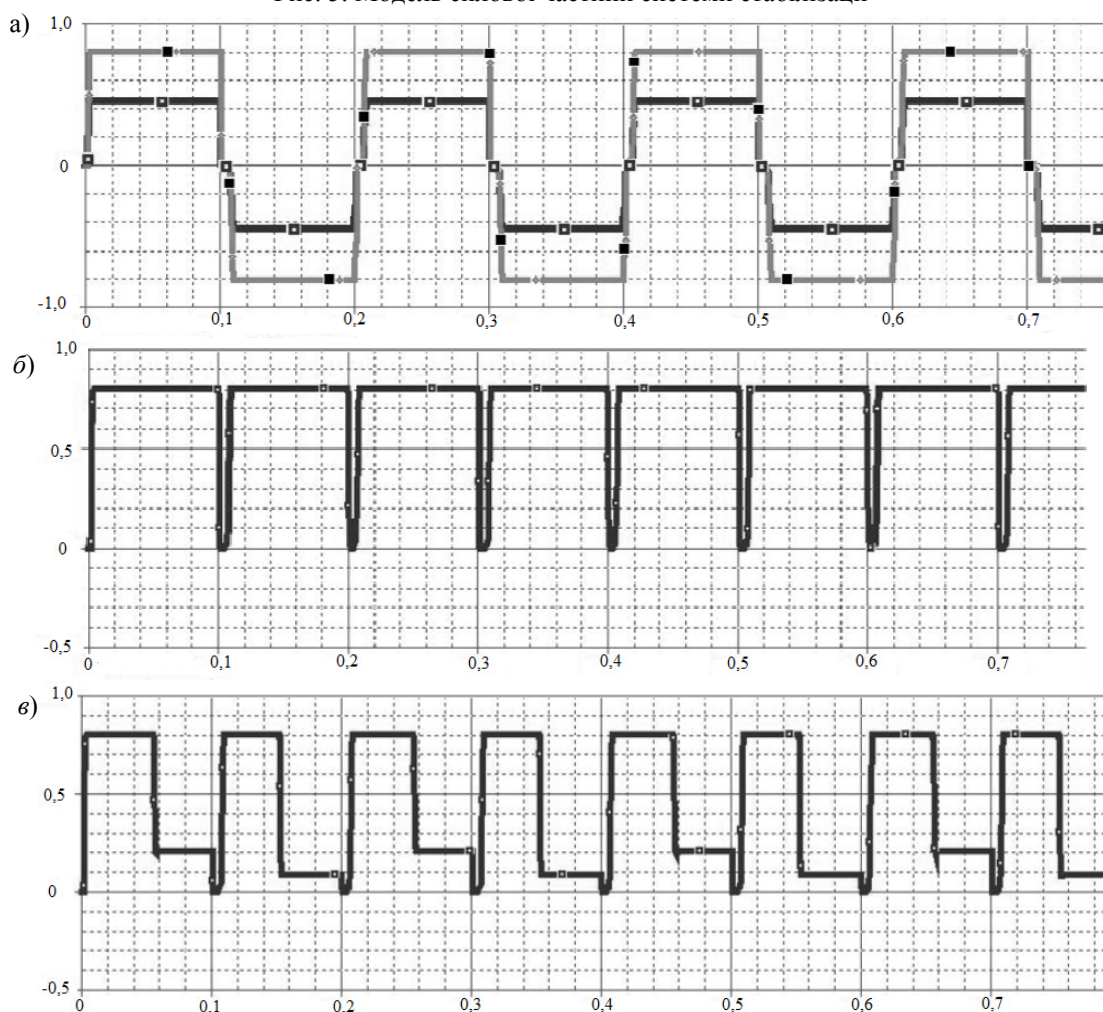


Рис. 6. Діаграми напруг при роботі системи стабілізації: а - форма напруги на вході і на виході автотрансформатора; б - форма напруги на виході випрямляча при повністю відкритих модулях Z5, Z6; в - форма напруги на виході випрямляча при відкритих на 50% модулях Z5, Z6.

© Ляшук В. М., Грудзур М. М., 2014

## Висновки

Таким чином зробивши відповідні дослідження ефективність тягового електропостачання безпосередньо залежить від стабілізації напруги, а саме від його якості електроенергії,

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проектирование стабилизированных источников электропитания радиоэлектронной аппаратуры: пособие / Л. А. Краус, Г. В. Гейман, М. М. Лапиров-Скобло, В. И. Тихонов. – М.: Энергия, 1980. – 288с.
2. Шапиро С. В. Резольвента Лагранжа и ее применение в электромеханике: науч. изд. / С. В. Шапиров. – М.: Энергоатомиздат, –2008. – 156 с.
3. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов: / С. С. Вдовин. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
4. Дьконов В. П. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах: / В. П. Дьконов. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 512 с.
5. Колпаков А. А. MELCOSIM? IPOSIM? EMISEL? О выборе и замене модулей IGBT / А. А. Колпаков / Силовая электроника. – М., 2005. – Вып. 1. – С. 43–48.
6. [http://old.ugatu.ac.ru/publish/vu/stat/ugatu-2010-1\(40\)/11.pdf](http://old.ugatu.ac.ru/publish/vu/stat/ugatu-2010-1(40)/11.pdf)

Надійшла до друку 21.05.2014.

Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

яка подається безпосередньо на електрорухомий склад залізниці.

Вирішення цієї проблеми повинне базуватися на проведенні переоснащення господарства електропостачання та його модернізації.

## REFERENCES

1. Kraus L. A., Gaiman G. V., Lapirov-Skoblo M. M., Tikhonov V. I. *Proektirovanie stabilizirovannykh istochnikov elektropitaniya radioelektronnoy apparatury* [Designing stabilized power supply of electronic equipment]. Moscow, Energiya Publ., 1980. 288p.
2. Shapiro S. V. *Rezol'venta Lagranzha i ee primeneniye v elektromekhanike* [Lagrange resolvent and its application in electromechanics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2008. 156p.
3. Vdovin S. S. *Proektirovanie impul'snykh transformatorov* [Design of pulse transformers]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1991. 208 p.
4. Diyakonov V. P. *Entsiklopediya ustroystv na polevykh tranzistorakh* [Encyclopedia FET devices]. Moscow, SOLON- R Publ., 2002. 512p.
5. Kolpakov A. A. O vybere i zamene moduley IGBT [On the choice and replacement of modules IGBT]. *Silovaya elektronika* [Power Electronics]. Moscow, 2005, issue 1, 43-48 pp.
6. [http://old.ugatu.ac.ru/publish/vu/stat/ugatu-2010-1\(40\)/11.pdf](http://old.ugatu.ac.ru/publish/vu/stat/ugatu-2010-1(40)/11.pdf)

Зовнішній рецензент Андрієнко П. Д.

В даний час зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі електрифікованих залізниць шляхом стабілізації напруги в контактній мережі є однією з важливих проблем, які на сьогодні успішно вирішуються в тягових мережах міського електротранспорту при незначних струмах навантаження. Тому створення перетворювачів (стабілізаторів) напруги з великими струмовими навантаженнями є суттєвою проблемою.

У статті розглядається питання використання методу стабілізації напруги постійного струму з використанням ланки високої частоти в тягових підстанціях електричного транспорту, наводиться опис і принцип роботи стабілізатора напруги. Внаслідок використання приладів з вбудованими зворотними швидкодіючими діодами становиться особливо кращим при розробці інверторів. У цьому випадку необхідне число силових напівпровідникових компонентів зменшується на 50 % порівняно з користуванням IGBT і діодів у вигляді окремих елементів.

**Ключові слова:** Стабілізації напруги постійного струму, тягова підстанція електричного транспорту, стабілізатор напруги, автотрансформатор, IGBT транзистор.

## УДК 621.38

В. М. ЛЯШУК, М. М. ГРУДЗУР (ДНУЖТ)

Кафедра Электроснабжение железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: [lyashuk52@gmail.com](mailto:lyashuk52@gmail.com)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА УЧАСТКЕ Л – В ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ 3,3 КВ

В настоящее время уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети электрифицированных железных дорог путем стабилизации напряжения в контактной сети является одной из важных проблем, которые сегодня успешно решаются в тяговых сетях городского электротранспорта при незначительных токах

© Ляшук В. М., Грудзур М. М., 2014



навантаження. Тому створення преобразователів (стабілізаторів) напруги з великими токовими навантаженнями є суттєвою проблемою.

В статті розглядається питання використання методу стабілізації напруги постійного струму з використанням звена високої частоти в тягових підстанціях електричного транспорту, приводиться опис і принцип роботи стабілізатора напруги. Внаслідок використання пристроїв з вбудованими зворотними швидкодіючими діодами стає особливою перевагою при розробці інверторів. В цьому випадку необхідна кількість силових напівпровідникових компонентів зменшується на 50 % порівняно з використанням IGBT і діодів у вигляді окремих елементів.

**Ключові слова:** стабілізації напруги постійного струму, тягова підстанція електричного транспорту, стабілізатор напруги, автотрансформатор, IGBT транзистор.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Андриєнко П. Д.*

**UDC 621.38**

V. M. LYASHUK, M. M. HRUDZUR (DNURT)

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazarian Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010 tel.: (056) 793-19-11, e-mail: [lyashuk52@gmail.com](mailto:lyashuk52@gmail.com)

## RESEARCH PERFORMANCE POWER SUPPLY SYSTEMS AT THE DISTANCE $L - V$ AT VOLTAGE STABILIZATION 3,3 KV

Currently, reduction of electricity losses in traction network of electrified railways by stabilizing the voltage in the contact network is one of the important problems that are successfully solved in urban electric traction networks at low currents *navantazhennya*. Besides creating converters (stabilizers) voltage high current loads is a significant problem.

The article discusses the use of the method of stabilizing the DC voltage level using high frequency electric transport traction substations, a description and the PRINCIPLE of the voltage regulator. Due to the use of devices with built-in high-speed reverse diode is particularly advantageous in the development of inverters. In this case, the required number of power semiconductor components are reduced by 50 % as compared with the IGBT and the diodes in the form of individual elements.

**Keywords:** DC voltage stabilization, traction substation electric transport, voltage stabilization, autotransformer, IGBT transistor.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

О. Н. НАЗАРОВ, Д. Е. КИРЮШИН (ВНИИЖТ)

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, Россия, 129626, г. Москва,  
ул. 3-я Мытищинская, д. 10, тел.: +7(495) 687-65-55, эл. почта: [press@vniizht.ru](mailto:press@vniizht.ru)

## НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ В РОССИИ

Запуск в эксплуатацию в 1984 году скоростного электропоезда ЭР200 стал первым значимым триумфом наших ученых, инженеров, конструкторов, строителей и эксплуатационников. С этого момента скорость движения 200 км/ч перестала быть мечтой, и появились новые задачи. За 25 лет была проделана огромная работа. С 2009 года на направлении Санкт-Петербург – Москва – Нижний Новгород запущены в ежедневную эксплуатацию высокоскоростные электропоезда серии ЭВС1 и ЭВС2 «Сапсан» с максимальной скоростью движения 250 км/ч, с 2010 г. на линии Санкт-Петербург – Хельсинки электропоезда серии Sm6 «Аллегро» развивают скорость 220 км/ч. Теперь перед нами стоят новые задачи – создать сверхвысокоскоростную транспортную систему со скоростями движения до 400 км/ч.

Решение таких масштабных задач нельзя начинать с нуля, необходимо использовать положительный опыт, имеющийся в нашей стране и за рубежом. Реализованные проекты «Сапсан» и «Аллегро», несомненно, состоялись, результаты нескольких лет эксплуатации свидетельствуют об их успешности и в коммерческом, и в технологическом плане. В рамках этих проектов научными коллективами решались достаточно сложные задачи. К участию в проекте было привлечено множество организаций, в т.ч. зарубежных, поэтому ВНИИЖТ в сотрудничестве с НИИАС, ВНИИЖГ и ВНИКТИ выполнял функции системного интегратора знаний, эксперта по применяемым технологиям и обеспечению их совместимости, головного испытательного центра и разработчика нормативных документов.

С самого начала реализации проектов была выстроена четкая система взаимодействия организаций. Принятие решений по применению технологий базировалось не на рекламных заявлениях компаний-разработчиков, а на тщательном изучении всех аспектов технических систем и их взаимодействия. Уже на первых этапах была проведена огромная исследовательская и испытательная работа, которая по-

могла снять первую волну непонимания между нашими и зарубежными специалистами, т.к. специфика построения европейской системы нормативов очень сильно отличается от российской и по форме, и по подходам, и по техническим параметрам.

В процессе работы было доказано, что предлагавшееся на первом этапе простое копирование европейских нормативов методом обложки невозможно как из соображений технической совместимости зарубежных разработок с нашей железнодорожной системой, так и из существующего законодательного окружения. Для понимания этого потребовалось проведение совместно с зарубежными специалистами десятков уникальных экспериментов. Сравнивались требования к устройствам, методы испытаний, моделировалась работа механизмов и систем в условиях, приближенных к нашим эксплуатационным нагрузкам. В этой работе с нами сотрудничали специалисты различных исследовательских организаций из Германии, Испании, Финляндии, Австрии.

Например, при исследовательских испытаниях по обеспечению токосъема проверялись 9 вариантов контактных подвесок с различными параметрами, и их взаимодействие при скоростях движения до 260 км/ч с 3 типами токоприемников, в т.ч. и тем, который был впоследствии установлен на электропоезде «Сапсан». В результате многоэтапных исследований была выбрана конструкция контактной подвески, в наибольшей мере соответствующая заданным условиям эксплуатации, были даны рекомендации по конструкции токоприемника, особенно по обеспечению его надежности в специфических зимних условиях.

В процессе сложной взаимной работы специалистов разных стран фактически были отработаны новые процессы организации и продвижения на российский рынок комплексных проектов внедрения инновационного подвижного состава. Разработанную "технология" сегодня мы позиционируем как серийный инженеринговый продукт. Практически все успеш-

© Назаров О. Н., Кирюшин Д. Е., 2014

ные международные железнодорожные проекты в области подвижного состава (Тальго, Ласточка и некоторые другие) реализуются по этой схеме. Главное в разработанной технологии – это формирование в рамках каждого проекта системы обратных связей, которая позволяет своевременно корректировать ошибочные или неоптимальные конструктивные решения,

действующие нормативно-технические документы и при необходимости разрабатывать новые. Оперативное внесение изменений в стандарты позволило добиться быстрого синергетического эффекта, т.к. новыми нормами и стандартами сразу же начинают пользоваться и отечественные разработчики подвижного состава (рис. 1).



Рис. 1. Взаимодействие ОАО ВНИИЖТ с разработчиками и изготовителями подвижного состава на этапах жизненного цикла изделия

Железнодорожный транспорт – это система технологий, тесно взаимодействующих друг с другом и функционально взаимодополняющих друг друга. Сложная функциональная система в целом должна сохранять баланс стабильности и обеспечивать безопасность. В мировой практике, прежде всего это европейский опыт, и нашими техническими регламентами принято выделять в системе железных дорог несколько основных технологических подсистем: подвижной состав, путь, электроснабжение, связь, управление движением, техническое обслуживание и ремонт (рис. 2).

Все существующие нормативы верхнего уровня решают задачу поддержания баланса между подсистемами для обеспечения безопасности перевозочного процесса. Следующий нормативный уровень обеспечивает взаимодействие функциональных групп в каждой технологической подсистеме. Учитывая, что железнодорожный транспорт – это постоянно развивающаяся технологическая система, именно

такой нормативный подход является ключевым для сохранения баланса.

При этом надо отметить, что законодательное окружение нормативной деятельности, которое базируется на системе документов и правил, в т.ч. общепромышленных стандартов, жестко регламентирует процедуры проведения работ, поэтому простое копирование зарубежных документов, как правило, приводит к противоречию с действующими смежными стандартами и правилами.

В результате планомерной работы были разработаны базовые стандарты, поддерживающие технические регламенты в области тягового подвижного состава. В ближайшее время ожидается ввод их в действие. Это верхний уровень, описывающий подвижной состав в целом как объект нормирования. В следующем нормативном уровне, включающем требования к комплектующим и методы оценки соответствия, еще есть нерешенные задачи, но работа ведется в соответствии с утвержденными планами.

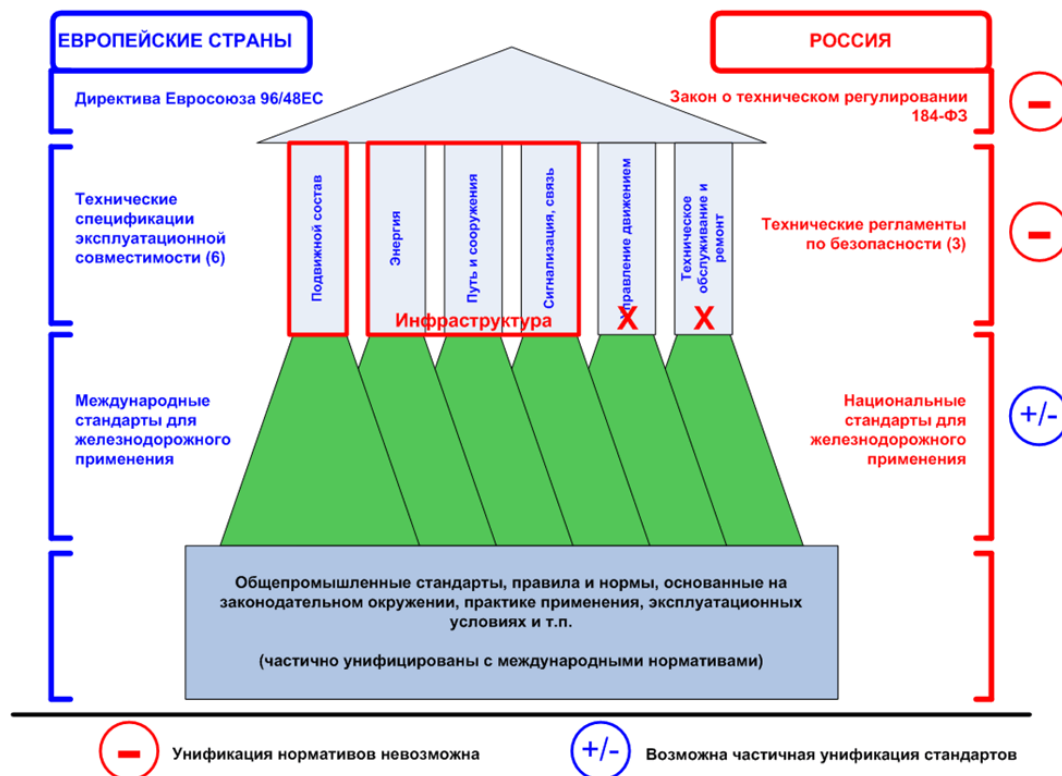


Рис. 2. Унификация российских нормативных документов с документами ЕС

В новом проекте ВСМ-2 Москва – Казань – Екатеринбург предусмотрено совмещение высокоскоростного и скоростного пассажирского движения с перевозками контейнерных грузов. Для того, чтобы при решении новых задач не потерять положительные наработки и по-новому переосмыслить те недочеты, которые неизбежно возникают в столь масштабных проектах, мы предложили проверенную временем технологию достижения успеха, учитывающую все технические и нормативные аспекты (рис. 3).

Первая и главная задача – разработка транспортных и маркетинговых моделей ВСМ и обоснование целевых и перспективных задач, в т.ч. с определением:

- маршрутов следования для поездов ВСМ, скоростных пассажирских и контейнерных, в т.ч. транзитных;
- остановочных пунктов на линии ВСМ;
- времен хода поездов на маршрутах ВСМ;
- интервалов движения;
- среднесуточного пробега высокоскоростных поездов;
- пассажиропотоков;
- ключевых показателей комфорта и перечня предоставляемых услуг (на борту и на станциях) по группам пассажиров;
- общего видения технологии обслуживания и ремонта инфраструктуры;

- схемы размещения терминальных и перегрузочных комплексов для обслуживания контейнерных поездов.

Решение этой задачи формирует базовый объем исходных данных для проработки всех подсистем и подвижного состава в частности.

Из первой вытекают задачи технологические – как обеспечить и как оптимизировать основные параметры магистрали в первую очередь на стыках всех подсистем. Важным является выбор критериев оптимизации, главными из которых, конечно, являются экономические.

Решение технологических задач должно начинаться в первую очередь с определения максимальной скорости движения на линии. От нее зависят все базовые параметры взаимодействия (мощность энергосистем и тягового привода, качество содержания пути и динамика экипажа, расстановка сигналов и тормозные пути, габариты и аэродинамика, конструкция контактной подвески и токосяем, электромагнитные излучения и радиосвязь, уровень внешнего шума).

До сих пор в документах фигурирует нечеткое определение скорости – «до 400 км/ч». Что это значит? 320, 350, 360, 380 км/ч – все попадает в категорию «до 400», но технологически транспортные системы на 320 и на 400 км/ч должны существенно отличаться друг от друга. Только этот параметр тянет за собой шлейф принятия различных базовых технологических решений во всех подсистемах.

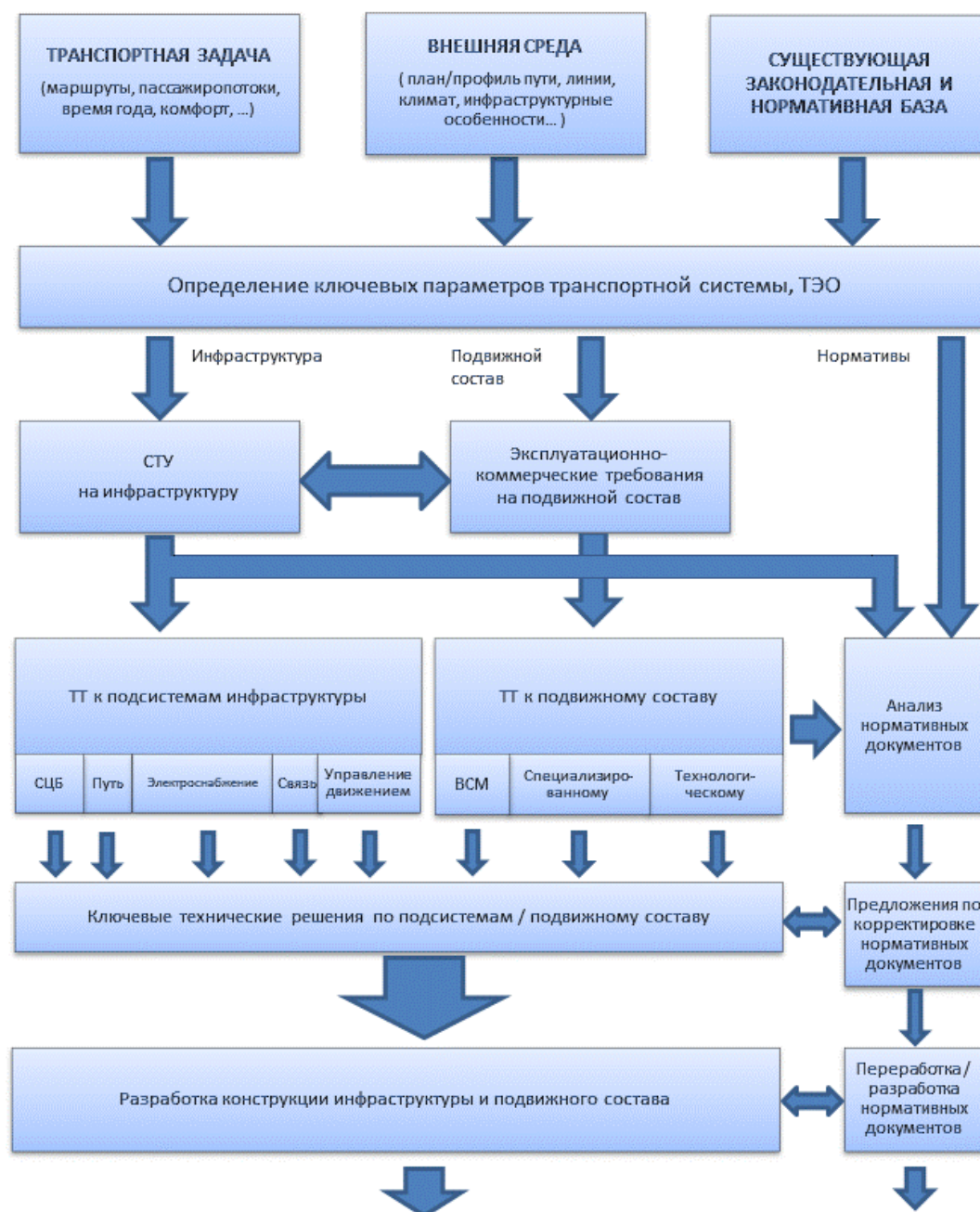


Рис. 3. Задачи научно-технического сопровождения создания ВСМ

Поэтому решение вопроса выбора максимальной скорости нельзя отложить, но и из-за того, что параметр носит ключевой характер, максимальную скорость нельзя просто административно назначить.

Для подвижного состава важными показателями, определяющими конфигурацию поезда, и вытекающие из решения маркетинговых и технологических задач, являются габаритные показатели, масса поезда, длина остановочных платформ, пассажироместность, ускорение при разгоне и замедление при торможении.

Этап распределения требований между подсистемами позволит сформировать исходные данные для разработки подробных взаимоувязанных тех-

нических требований к высокоскоростному электропоезду и всем инфраструктурным подсистемам.

Учитывая, что все задачи научных исследований должны выполняться в тесной взаимосвязи и в достаточно сжатые сроки, было принято решение объединить их в систему программных мероприятий. В сентябре 2013 года ОАО «ВНИИЖТ» совместно с отраслевыми институтами разработал «Программу научно-технического сопровождения при проектировании и строительстве высокоскоростных железнодорожных магистралей «Москва – Екатеринбург» и «Москва – Ростов-на-Дону – Адлер» с предлагаемыми сроками реализации



2013–2017 г. Основными задачами программы определены:

- обеспечение научно-технической поддержки проектирования и строительства высокоскоростной магистрали путем проведения экспертизы технических решений, определения необходимых технических показателей и характеристик подвижного состава и инфраструктуры, разработки системы приемки, испытаний и допуска элементов высокоскоростной железнодорожной системы;

- создание единой системы нормативно-технических документов, поддерживающей Технический регламент таможенного союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта», для проектирования, строительства объектов инфраструктуры высокоскоростных железнодорожных линий, разработки и изготовления высокоскоростного подвижного состава, проведения испытаний и эксплуатации.

- экспертиза и оптимизация технических решений при создании технических средств нового поколения на основе современных достижений науки, техники и технологий;

- повышение уровня технической и технологической безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств.

Выполнение программы предлагается осуществлять посредством реализации взаимосвязанных между собой программных мероприятий:

1. Формирование технических требований к подвижному составу для пассажирских и грузовых перевозок на высокоскоростной железнодорожной магистрали.

2. Формирование технических требований к высокоскоростному испытательному полигону и объектам инфраструктуры высокоскоростной железнодорожной магистрали.

3. Проведение исследований на испытательном полигоне. Выбор и апробация технических решений.

4. Разработка нормативно-технической документации на высокоскоростной подвижной состав и объекты инфраструктуры высокоскоростной железнодорожной магистрали.

5. Экспертиза технических решений на этапах проектирования и строительства высокоскоростной железнодорожной магистрали и проектирования и изготовления подвижного состава.

Для всех подсистем высокоскоростной магистрали намечено проведение научных исследований, включая математическое моделирование и проведение экспериментальных работ. Так для подсистемы электроснабжения предусмотрено проведение следующих исследований:

- разработка и верификация динамической, аэродинамической и термодинамической моделей системы токосъема с постоянным и переменным током;

- оценка влияния различных конструкций и устройств пути на качество токосъема;

- проведение сравнительных испытаний конструкций сопряжений контактной сети и изолирующих сопряжений, оценка их влияния на качество токосъема;

- проведение испытаний для проверки алгоритма прохода изолирующих сопряжений.

- моделирование для определения зависимостей между параметрами системы электроснабжения и тягово-энергетических свойств высокоскоростного поезда, профиля пути, веса поездов, межпоездных интервалов и схем организации движения с учетом характеристик сопротивления движению.

В области высокоскоростного тягового подвижного состава предусматривается:

- определение возможных конфигураций электропоезда с учетом транспортных моделей ВСМ и базовых характеристик инфраструктуры путем проведения многовариантных тяговых расчетов с учетом оптимизации технико-экономических параметров;

- исследования режимов работы различных систем высокоскоростного электропоезда (тормозных систем, систем управления и обеспечения безопасности движения, и пр.);

- разработка технических требований к отдельным подсистемам высокоскоростного электропоезда с учетом проектируемых систем управления и обеспечения безопасности движения.

Одним из ключевых этапов реализации программы являются экспериментальные исследования на опытном полигоне, результаты которых позволят провести выбор и апробацию необходимых технических решений до ввода основной линии в эксплуатацию, что позволит минимизировать возможные риски в проекте, включая в частности:

- проведение исследований на высокоскоростном подвижном составе и элементах инфраструктуры при скоростях движения на 10% превышающих конструкционную;

- апробация технологий содержания, эксплуатации и обслуживания высокоскоростного подвижного состава и элементов инфраструктуры;

- разработка, обоснование и выбор системы интервального регулирования, отработка диспетчерского и автоматизированного управления движением с учетом оценки рисков;

- организация и тестирование работы центра управления высокоскоростным движением;
- разработка положения о системе ведения хозяйства по объектам инфраструктуры, включая системы диагностики и мониторинга.

Принимая во внимание масштабность проекта строительства ВСМ, его государственную и национальную важность и при этом ограниченный период реализации программа научного сопровождения привязана к этапам строительства и запуска в эксплуатацию пилотного участка Москва – Казань (рис. 4). Завершение разработки технических требований на подвижной состав и высокоскоростной испытательный полигон запланировано на март 2014 года. Параллельно первому этапу, в 2014 году начинается этап проектирования подвижного состава, строительство испытательного полигона, анализ зарубежной и формирование требований к отечественной нормативной базе. В 2015 – 2017 годах предусмотрено проведение ис-

следований и апробация технических решений на испытательном полигоне с формированием детальных требований в нормативно-техническую документацию. Также в этот период будут отрабатываться программы и методики испытаний элементов инфраструктуры и подвижного состава. При проектировании и строительстве подвижного состава, полигона и высокоскоростной линии в 2013 – 2017 годах осуществляется научно-техническая поддержка проекта и экспертиза технических решений.

Если реализация намеченных планов начнется, как предусмотрено программой, в 2013 году, то необходимые для реализации проекта нормативно-технические и эксплуатационные документы могут быть подготовлены и проверены еще до запуска в эксплуатацию первого участка ВСМ-2 в 2018 году. В настоящее время программа установленным порядком направлена на согласование в ОАО «РЖД» и государственные организации.

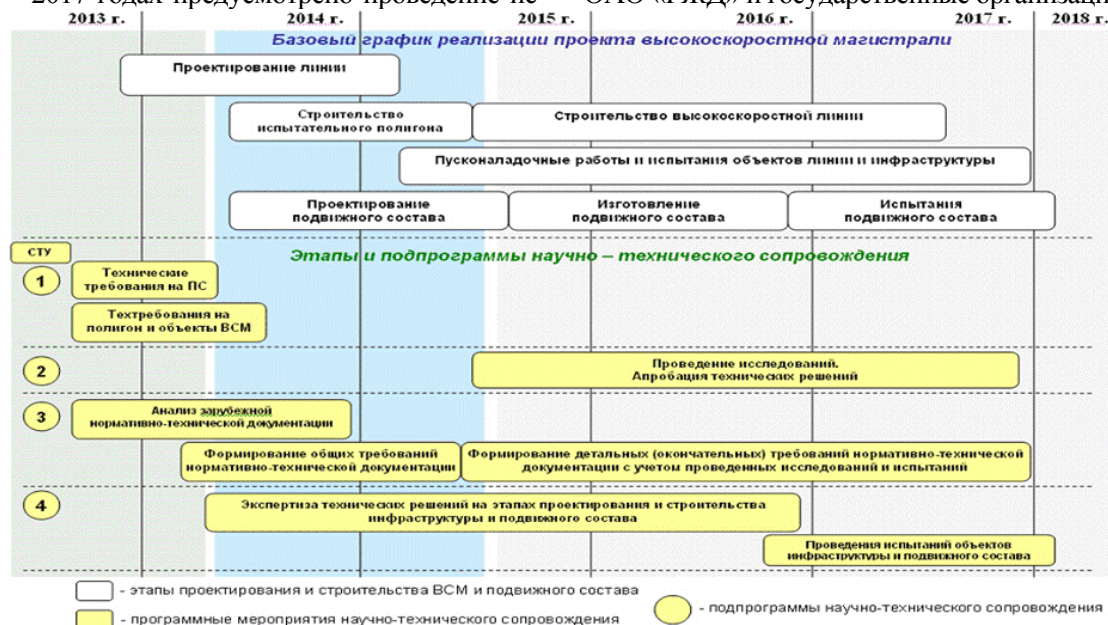


Рис. 4. График реализации программы научного сопровождения создания ВСМ

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рерберг И. Ф. История эксплуатации Московско-Нижегородской железной дороги за первые XXV лет, М., 1887.
2. Халин А. А., Московско-Нижегородская железная дорога во второй половине XIX в., ИЗ, 1984, т. 111.
3. История железнодорожного транспорта России. Т. 1: 1836-1917 - СПб, 1994.
4. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1994.

Поступила в печать 02.04.2014.

Внутренний рецензент Сыченко В. Г.

## REFERENCES

1. Rerberg I. F., Istorija jekspluatcii Mos-kovsko-Nizhegorodskoj zheleznoj dorogi za pervye XXV let [History of the Moscow-Nizhny Novgorod operation of the railway in the first years XXV], Moscow, 1887.
2. Halin A. A., Moskovsko-Nizhegorodskaja zheleznaja doroga vo vtoroj polovine XIX v. [Moscow-Nizhny Novgorod railroad in the second half of the XIX century], IZ Publ., 1984, Vol. 111.
3. Istorija zheleznodorozhnogo transporta Rossii [History of rail transport in Russia]. T. 1: 1836-1917 - SPb, 1994.
4. Zheleznodorozhnyj transport: Enciklopedija. M.: Bol'shaja Rossijskaja jenciklopedija [Trains encyclopedia, Great Russian Encyclopedia], Moscow, 1994.

Внешний рецензент Панасенко Н. В.

© Назаров О. Н., Кирюшин Д. Е., 2014

Правительством перед отраслью поставлена задача создания национальной сети высокоскоростных железнодорожных магистралей. В настоящее время обсуждаются вопросы организации проектирования и строительства пилотного участка ВСМ-2 Москва – Казань. Определение основных взаимосвязанных ключевых параметров транспортной системы, а именно инфраструктуры и подвижного состава является первым и важнейшим шагом для формирования технических требований к подсистемам ВСМ. В докладе рассматриваются новые цели и задачи связанные с разработкой, исследованиями и проектированием инфраструктуры и подвижного состава. Освещены основные вопросы взаимодействия подсистем ВСМ, требующие проведения научных исследований и испытаний. Для подвижного состава важнейшими показателями, определяющими конфигурацию поезда, и вытекающие из решения маркетинговых и технологических задач, являются габаритные показатели, масса поезда, длина остановочных платформ, пассажироместимость, ускорение при разгоне и замедление при торможении. Если реализация намеченных планов начнется, как предусмотрено программой, в 2013 году, то необходимые для реализации проекта нормативно-технические и эксплуатационные документы могут быть подготовлены и проверены еще до запуска в эксплуатацию первого участка ВСМ-2 в 2018 году. В настоящее время программа установленным порядком направлена на согласование в ОАО «РЖД» и государственные организации.

**Ключевые слова:** высокоскоростное движение, нормативная база, технологические решения.

УДК 621.331.3

О. М. НАЗАРОВ, Д. Є. КІРЮШИН (ВНІЗЖТ)

Науково-дослідний інститут залізничного транспорту, Росія, 129626, м. Москва, вул. 3-я Митищинська, буд. 10, тел.: +7(495) 687-65-55, ел. пошта: [press@vniizht.ru](mailto:press@vniizht.ru)

## НАУКОВЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗРОБКИ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО РУХУ В РОСІЇ

Урядом перед галуззю поставлено завдання створення національної мережі високошвидкісних залізничних магістралей. В даний час обговорюються питання організації проектування та будівництва пилотного ділянки ВСМ-2 Москва - Казань. Визначення основних взаємопов'язаних ключових параметрів транспортної системи, а саме інфраструктури та рухомого складу є першим і найважливішим кроком для формування технічних вимог до підсистем ВСМ. У доповіді розглядаються нові цілі і завдання пов'язані з розробкою, дослідженнями та проектуванням інфраструктури та рухомого складу. Висвітлено основні питання взаємодії підсистем ВСМ, що вимагають проведення наукових досліджень і випробувань. Для рухомого складу найважливішими показниками, що визначають конфігурацію поїзда, і які з вирішення маркетингових і технологічних задач, є габаритні показники, маса поїзда, довжина зупиночних платформ, пасажиромісткість, прискорення при розгоні і уповільнення при гальмуванні. Якщо реалізація намічених планів розпочнеться, як передбачено програмою, в 2013 році, то необхідні для реалізації проекту нормативно-технічні та експлуатаційні документи можуть бути підготовлені і перевірені ще до запуску в експлуатацію першої ділянки ВСМ-2 в 2018 році. В даний час програма встановленим порядком спрямована на узгодження в БАТ «РЖД» і державні організації.

**Ключові слова:** високошвидкісний рух, нормативна база, технологічні рішення.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 621.331.3

O. N. NAZAROV, D. E. KIRYUSHIN (VNIIZHT)

Railway Research Institute, Russia, 129626, Moscow, 3rd Mytischinskaya Street, h. 10, tel.: +7(495) 687-65-55, e-mail: [press@vniizht.ru](mailto:press@vniizht.ru)

## THE SCIENTIFIC SUPPORT OF THE DEVELOPMENT OF THE REGULATORY FRAMEWORK AND SOLUTIONS FOR THE HIGH-SPEED TRAFFIC IN RUSSIA

Government of the industry set the task of creating a national network of high-speed railways. Currently, the organization discusses the design and construction of the pilot site BCM-2 Moscow - Kazan. Determination of the main interrelated key parameters of the transport system, namely infrastructure and rolling stock is the first and crucial step in establishing the technical requirements for the subsystems SCM. The report looks at new objectives and tasks related to the development, research and design of infrastructure and rolling stock. Highlight key issues of interaction of subsystems SCM requiring research and testing. For rolling important determinant of the configuration of the train, and the resulting solutions marketing and technological challenges are, dimensions, weight train, length stops platforms, passenger capacity, acceleration during acceleration and deceleration under braking. If the implementation of these plans will begin as provided by the program, in 2013, the requirements for project technical standards and operational documents can be prepared and tested prior to commissioning of the first portion of SCM-2 in 2018. The program is currently established procedures aimed at harmonization of JSC "Russian Railways" and government organizations.

**Keywords:** high speed movement, normative base, technological solutions.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

© Назаров О. Н., Кирюшин Д. Е., 2014

О. І. САБЛІН, В. Г. КУЗНЕЦОВ, О. І. БОНДАР, В. В. АРТЕМЧУК (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, тел. (056) 793-19-11, ел. пошта: [olegsss@i.ua](mailto:olegsss@i.ua)

# МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ В РЕЖИМІ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ СИСТЕМОЮ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

## Вступ

Одним з перспективних напрямів розвитку системи електричного транспорту є впровадження розосередженого тягового електропостачання та збільшення обсягів рекуперації електроенергії до потенційного рівня. Децентралізація системи тягового електропостачання (СТЕ) із застосуванням відновлювальних джерел енергії дає можливість за рахунок розподілу тягового навантаження між всіма локальними пунктами живлення зменшити встановлену потужність силового обладнання СТЕ, втрати енергії в тяговій мережі та підвищити стабільність напруги на струмоприймачах електрорухомого складу (ЕРС).

## Огляд літератури

На сьогодні існує два принципових напрями децентралізації тягового електропостачання, перший з яких полягає у використанні уніфікованих пунктів живлення (ПП) (рис. 1, б), розподілених уздовж всієї міжпідстанційної зони і приєднаних до високовольтної лінії (постійного або змінного струмів), яка живиться через тягові підстанції (ТП) від системи зовнішнього електропостачання (СЗЕ) [1].

В схемі заміщення такої розосередженої СТЕ з живлячою трифазною лінією (рис. 1, в) пункти живлення та тягова мережа представлені еквівалентним опором  $r_{tm}$  і еквівалентним питомим опором  $\rho_{пп}$ , високовольтна живляча лінія – питомими опорами  $\rho_{пл}$ , а ТП – джерелами напруги з внутрішніми питомими опорами  $\rho_{тп}$ , що визначаються аналітично за параметрами силового обладнання.

Іншим варіантом розосередженого тягового електропостачання є спільне використання централізованого електропостачання зі вставками локальних пунктів живлення від відновлювальних джерел електроенергії, тип і розташування яких визначаються у відповідності до регіональних кліматичних особливостей та розмірів руху поїздів на ділянці. В [2] досліджена

можливість безпосереднього приєднання до СТЕ локальних пунктів живлення з вітроенергетичними установками (рис. 2, а), що дозволяє зменшити кількість приєднань ТП до СЗЕ.

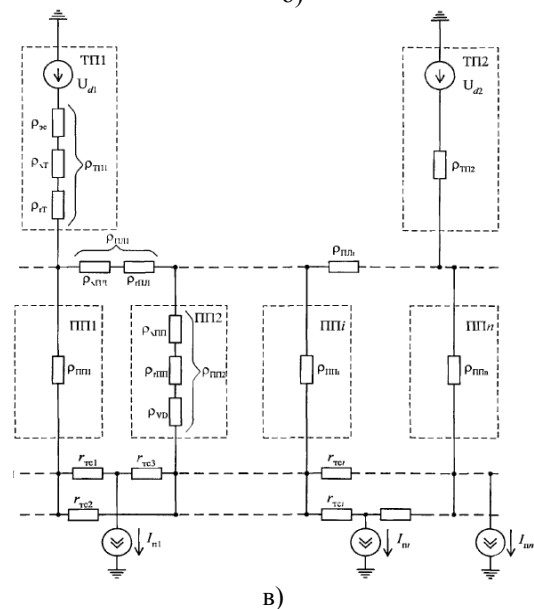
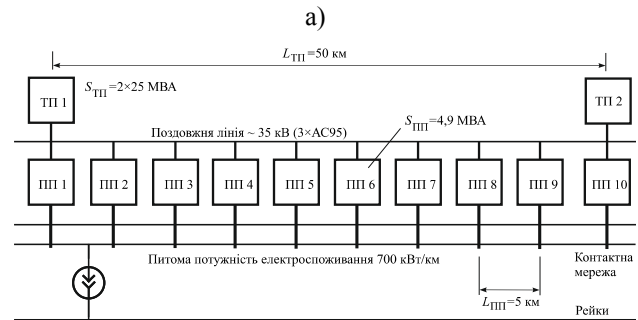


Рис. 1. Принципові схеми централізованої СТЕ 3,3 кВ (а), розосередженої СТЕ з високовольтною живлячою лінією і перетворювальними пунктами живлення (б) і схема заміщення розосередженої СТЕ (в)



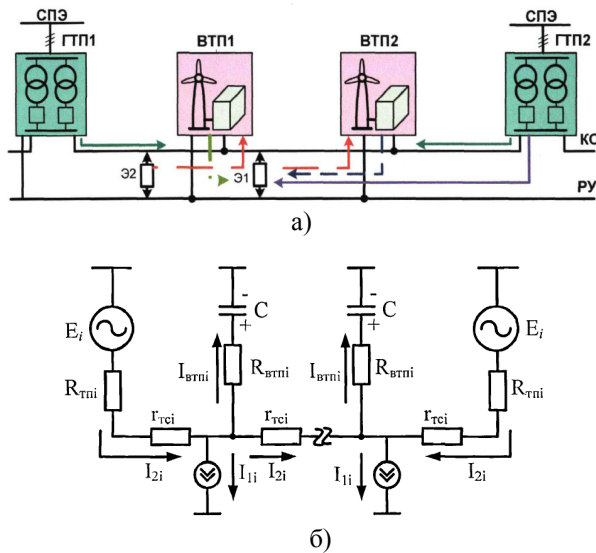


Рис. 2. Принципова схема розосередженої СТЕ (27,5 кВ, 50 Гц) з використанням локальних пунктів живлення з вітрогенераторними установками (а) та схема її заміщення в режимі заряду накопичувачів від ТП з централізованим живленням (б)

Треба зазначити, що за рахунок імовірнісної природи миттєвої потужності відновлювальних джерел режими роботи такої розподіленої СТЕ у порівнянні з попередньою є більш складними, тому для їх аналізу застосовують переважно статистичні та нечіткі методи.

Для забезпечення стабільного електропостачання ЕРС в періоди зниження активності відновлювальної енергії (сонячної радіації або вітрових потоків) локальні ТП з відновлювальними джерелами повинні бути обладнані накопичувачами енергії (механічними, індуктивними, ємнісними тощо). В такому випадку виділяються наступні основні режими роботи локальних ТП [2]:

- заряд накопичувача через контактну мережу від ТП, що приєднані до зовнішньої енергосистеми (або від суміжних ТП з вітрогенераторами) при низькому рівні вітрового та тягового навантаження (рис. 2, б);
- заряд накопичувача через контактну мережу від рекуперуючого ЕРС при тих же умовах;
- живлення ЕРС від потужності вітрогенератора (при незначних тягових навантаженнях);
- живлення ЕРС від потужності вітрогенератора з одночасним підживленням від накопичувача (при пікових тягових навантаженнях). У разі дефіциту потужності відновлювальних джерел основне навантаження покладається на ТП, що приєднані до зовнішньої енергосистеми.

Підвищення ефективності використання рекуперативної електроенергії в таких СТЕ пе-

редбачається за рахунок використання накопичувачів, але при повному заряді накопичувача енергією відновлювального джерела проблема використання надлишкової рекуперації залишається невирішеною.

Моделювання режимів навантаження як централізованих, так і розосереджених СТЕ при русі поїздів на ділянках виконують за допомогою багатоваріантних тягових розрахунків, за якими розраховують криву зміни швидкості та струму в функції часу та координати поїздів. Навантаження СТЕ в тягових та рекуперативних режимах, як правило, задаються у вигляді джерел постійного струму.

Визначення розподілу енергій в розосередженій СТЕ та рівня завантаження окремих ТП виконується шляхом моделювання усталених енергетичних режимів СТЕ, що частіше реалізують на базі методу рівномірного перетину графіка руху поїздів [3], за яким миттєві схеми розташування поїздів визначаються з відомого графіка руху через рівні інтервали часу. Якщо вважати тягову мережу, як лінійну систему, тоді розрахунок усталених режимів миттєвих схем СТЕ можна виконувати за допомогою спрощеної системи лінійних рівнянь в матричній формі, зокрема вузлових потенціалів [2-4], яка має вигляд

$$\mathbf{AG}^{(n)} \mathbf{A}^T \mathbf{V} = \mathbf{AJ}^{(n)} - \mathbf{AG}^{(n)} \mathbf{E}^{(n)} \quad (1)$$

де  $\mathbf{A}$  – матриця з'єднань (вузлова матриця);

$\mathbf{G}^{(n)}$  – діагональна матриця провідностей віток;

$\mathbf{V}$  – матриця вузлових потенціалів;

$\mathbf{J}^{(n)}$  – матриця заданих струмів віток;

$\mathbf{E}^{(n)}$  – матриця заданих ЕРС віток.

В такому випадку математичний аналіз усталених режимів СТЕ зводиться до складання та розв'язку вказаних лінійних рівнянь, що являють собою математичну модель усталеного режиму СТЕ, в результаті чого визначається струмовий розподіл в елементах СТЕ.

Треба зауважити, що стабілізація напруги на струмоприймачах ЕРС за рахунок переходу до розподіленої СТЕ може ускладнити та погіршити умови рекуперації електроенергії при гальмуваннях ЕРС, які суттєво залежать від режиму напруги в контактній мережі. В існуючих роботах по розосередженому тяговому електропостачанню нажалі ці питання в достатній мірі не досліджені. Вирішення проблем надлишкової рекуперативної енергії за рахунок її експорту до первинної енергосистеми представляє певні труднощі [5], зокрема, у зв'язку з ни-



зкими показники якості енергії рекуперації [6] і ускладненням її передачі до первинної енергосистеми у моменти зниження рівня її завантаження. Для усунення цих недоліків в роботі [4] досліджено питання локалізації надлишку рекуперативної енергії в централізованій СТЕ та розроблено рекомендації щодо раціонального діапазону зниження напруг холостого ходу на шинах живлячих ТП в залежності від інтенсивності використання рекуперативного гальмування та розмірів руху поїздів, що створює сприятливі умови для перетоку надлишкової енергії рекуперації до віддалених поїздів на суміжних фідерних зонах.

На останок зазначимо, що масове обладнання СТЕ на ділянках з інтенсивною рекуперацією енергоємними накопичувачами, як найбільш простий і дорогий захід підвищення ефективності використання рекуперації електроенергії, потребує значних витрат на модернізацію і в найближчій перспективі не буде реалізовано.

### Постановка проблеми

Розосереджена СТЕ на сьогодні є найсучаснішою системою енергоживлення електротранспорту, оскільки дозволяє значно покращити режим напруги на струмоприймачах ЕРС та енергетичні показники системи електричної тяги в цілому. Однак аналіз праць показує, що недослідженими залишаються питання впливу режимів розосередженого електропостачання ЕРС на ефективність рекуперації електроенергії. Стабілізація напруги на струмоприймачі, що досягається наявними алгоритмами регулювання напруги на шинах ТП [7] не повною мірою забезпечує повне споживання рекуперативної енергії поїздами, а в деяких випадках ускладнює та погіршує процес рекуперації. Тому виникає необхідність дослідити взаємодію розосередженої СТЕ з ЕРС в режимі рекуперації.

### Мета роботи

Дослідження взаємодії ЕРС в режимі рекуперації з розосередженою СТЕ, оцінка ефективності використання рекуперативної енергії та визначення факторів, що впливають на ефективність процесу рекуперації електроенергії.

### Основний матеріал

Як відомо, для передачі енергії від ЕРС при електричному гальмуванні до контактної мережі у централізованій і розосередженій СТЕ необхідне виконання відомої умови

$$U_{\text{км}}(t) < U_{\text{с}}(t) < U_{\text{км}}^{\text{max}} \quad (2)$$

де  $U_{\text{км}}(t)$ ,  $U_{\text{с}}(t)$ ,  $U_{\text{км}}^{\text{max}}$  – відповідно напруги в контактній мережі, на струмоприймачі рекуперуючого ЕРС і граничне значення напруги в контактній мережі.

Виконання умови (2) за нижньою границею забезпечується відповідними регулюваннями у силовому колі ЕРС і залежить від параметрів гальмування, а виконання верхньої границі визначається рівнем тягового навантаження СТЕ в зоні рекуперації, тобто (2) за верхньою границею виконується в першу чергу при

$$I_{\text{тяг}}(t) \geq I_{\text{рек}}(t) \quad (3)$$

де  $I_{\text{тяг}}(t)$ ,  $I_{\text{рек}}(t)$  – відповідно струм тягового навантаження в зоні рекуперації та струм рекуперації ЕРС.

При порушенні умови (3) відбувається зростання напруги на струмоприймачі рекуперуючого ЕРС, тому для обов'язкового виконання лівої границі (2) повернення електроенергії в контактну мережу припиняється (відбувається так званий «зрив» рекуперації), і для збереження надійного електричного гальмування ЕРС переходить на режим реостатного гальмування, де надлишкова енергія рекуперації утилізується у гальмівних реостатах, що суттєво знижує енергетичну ефективність системи електричної тяги за рахунок зростання втрат в гальмах.

Основним шляхом дослідження ефективності рекуперації електроенергії в розосередженій СТЕ є моделювання процесу взаємодії ЕРС в режимі рекуперації з СТЕ та визначення факторів, що впливають на ефективність цього процесу. Для цього потрібно вдосконалити та уточнити модель системи електричної тяги при розосередженому живленні, яка складається з наступних елементів [8]:

- схема заміщення ЕРС в режимі тяги і рекуперації;
- схема заміщення розподіленої СТЕ;
- аналітичні вирази, що пов'язують між собою електричні параметри СТЕ.

Одним з допущень при побудові моделі буде те, що розподіл потоків енергії рекуперації в системі електричної тяги з розосередженою СТЕ вважатиметься усталеним енергетичним процесом, який визначається інерційними режиму руху поїздів, тобто електричні перехідні процеси не враховуються.

Режим рекуперації електроенергії на ЕРС має свої особливості, які полягають у тому, що ЕРС при рекуперації є специфічним джерелом нестабільної енергії що рухається в просторі, тому на відміну від моделей джерел, що розг-

© Саблін О. І. та ін., 2014

лядаються в класичній теорії кіл, побудова адекватної моделі ЕРС в режимі рекуперації вимагає врахування таких факторів як параметри руху ЕРС (режим гальмування), рівень тягового навантаження на фідерній зоні і напруга на шинах ТП.

При побудові моделі ЕРС в режимі рекуперативного гальмування необхідно виділити два характерних випадки рекуперації електроенергії:

- гальмування з метою обмеження швидкості руху на затяжному уклоні (при сталій швидкості), коли переважно реалізується потенціальна енергія поїзда і генерація є достатньо тривалою;

- гальмування для зупинки, зниження або стабілізації швидкості, коли реалізується кінетична енергія поїзда при короткочасній рекуперації.

У першому випадку процес генерації енергії є достатньо стійким, а рекуперована енергія в часі стабільною, що властиво для магістрального ЕРС при підгальмовуванні на затяжних спусках, де в залежності від їх довжини та швидкості руху рекуперація може тривати 2...20 хв. В другому випадку генерована енергія має явно виражений імпульсний характер, що переважно зустрічається при гальмуванні ЕРС циклічної дії для зупинки (електропоїзда, метрополітени, тролейбуси, трамваї), або коли рекуперація використовується для підтримки заданої швидкості руху поїзда з автоматичним переходом з режиму тяги на рекуперацію і навпаки (при зміні профілю шляху), де генерація триває близько 0,05...1,5 хв.

На сучасному ЕРС з плавним регулюванням потужності при гальмуванні у діапазоні швидкостей  $v_p < v < v_{\max}$  в режимі рекуперації система автоматики для забезпечення сталості гальмівного зусилля підтримує постійну потужність рекуперації (рис. 3, б) [9]. При коливаннях напруги у контактній мережі в межах допустимих значень  $U_{\text{км}}^{\min} \dots U_{\text{км}}^{\max}$  буде відбуватися коливання рекуперативного струму

$$I_{\text{рек}} = P_{\text{рек}} / U_{\text{км}} = f(U_{\text{км}}), \quad (4)$$

тому в кожен момент часу струм рекуперації є функцією напруги на струмоприймачі ЕРС. В такому разі, строго кажучи, поїзне навантаження є нелінійним і повинно моделюватися у ви-

гляді джерела сталої потужності, або джерела струму, що керується напругою.

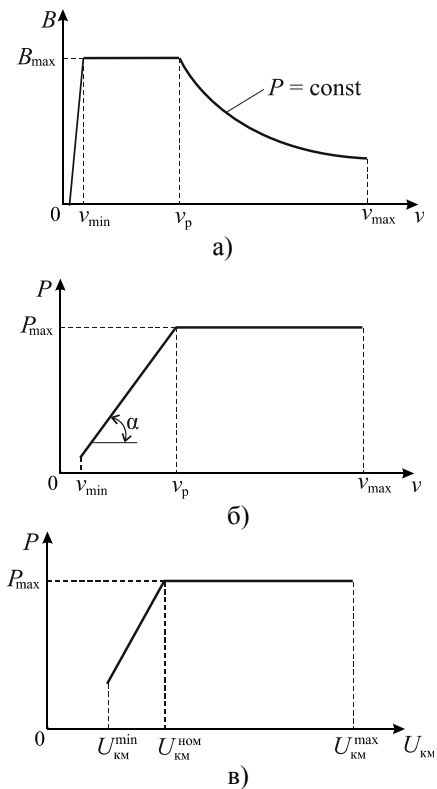


Рис. 3. Характеристики ЕРС з плавним регулюванням потужності в режимі рекуперації

Якщо ж діапазон коливань напруги на струмоприймачі є незначним, то ЕРС в режимі рекуперації з достатньою точністю можна вважати ідеальним джерелом струму. На ЕРС постійного струму з дискретним регулюванням потужності для стабілізації струму в режимі рекуперації використовується система протизбудження збудника сумісно із системою автоматичного управління рекуперативним гальмуванням, тому у діапазоні швидкостей  $v_p < v < v_{\max}$  ЕРС даного типу також можна розглядати у вигляді ідеального джерела струму.

При рекуперації енергії зі зниженням швидкості руху в діапазоні  $v_{\min} < v < v_p$  кінетична енергія поїзда, а отже і генерована потужність зменшуються пропорційно швидкості, а при  $v < v_{\min}$  рекуперація в мережу припиняється, тому при даному режимі ЕРС представляє собою джерело струму, умовно кероване швидкістю руху, що є специфічною особливістю рухомого джерела електроенергії. В такому разі згідно розглянутих особливостей ЕРС в режимі рекуперації відносно системи електропостачання

чання може замінюватися наступним джерелом струму

$$I = \begin{cases} I_{\text{рек}}(v) = \text{const}, \text{ при } v_p < v < v_{\text{max}}, \\ I_{\text{рек}}(v) = v \cdot \text{tg } \alpha, \text{ при } v < v_p. \end{cases} \quad (5)$$

Також варто зазначити, що при зниженні напруги в контактній мережі рекуперативна потужність ЕРС за умовами струмового обмеження по нагріву обладнання також автоматично зменшується (рис. 3, в).

В якості прикладу розглянемо розподіл енергетичних потоків в розосередженій СТЕ постійного струму 3,3 кВ що містить дві ТП з централізованим живленням, між якими знаходиться один локальний пункт живлення з вітрогенератором ВТП. Нехай на ділянці знаходяться два поїзди, один з яких перебуває в режимі рекуперації, а інший в режимі тяги. Схема живлення ділянки та миттєва схема заміщення для цього випадку приведені на рис. 4.

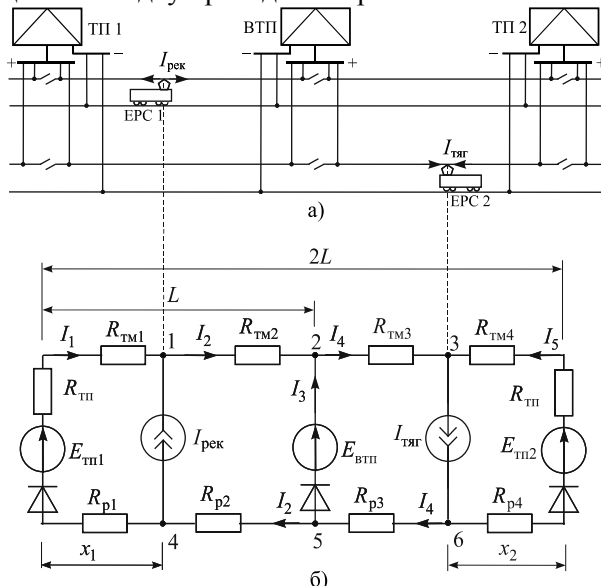


Рис. 4. Схема живлення ділянки розосередженої СТЕ (а) та її миттєва схема заміщення (б)

Параметри ділянки наступні: контактна підвіска М120+2МФ100 з питомим опором тягової мережі  $r_{\text{км}} = 0,056$  Ом/км; рейки Р65 з питомим опором рейкової мережі  $r_{\text{рм}} = 0,0155$  Ом/км; напруги холостого ходу на шинах ТП 1, ТП 3 та вітроустановки ВТП прийняті однаковими  $E_{\text{ТП1}} = E_{\text{ТП2}} = E_{\text{ВУ}} = 3,3$  кВ; внутрішні опори тягових підстанцій з централізованим живленням однакові і становлять (включаючи опри живлячих і відсмоктуючих фідерів)  $R_{\text{ТП1}} = R_{\text{ТП2}} = 0,042$  Ом; ТП з вітрогенератором вважається ідеальним джерелом напруги, адже в таких джерелах в робочому діапазоні

потужностей передбачений режим стабілізації вихідної напруги ( $R_{\text{ВТП}} = 0$ ); довжина міжпідстанційних зон  $L = 15$  км.

Будемо вважати, що всі ТП не обладнані пристроями прийому надлишкової енергії рекуперації (інверторами, накопичувачами), що притаманно більшості електрифікованих ділянок, а струм рекуперації ЕРС 1 замикається лише через коло ЕРС 2 (в зоні рекуперації інших поїздів в режимі тяги немає). В такому випадку, за рахунок однобічної провідності віток з ТП дане миттєве коло є нелінійним, тому його розрахунок виконувався чисельним методом.

В даній роботі на базі багатоваріантних розрахунків миттєвої схеми ділянки електричної тяги з розподіленим електропостачанням (рис. 4, б) було отримано розподіл струмів живлячих ТП при різних положеннях ЕРС в тяговому та рекуперативному режимах та величинах їх струмів. Для оцінки ефективності використання енергії рекуперації було введено коефіцієнт використання струму рекуперації  $k_{\text{рек}}$ , що визначає в даний момент часу можливість реалізації струму рекуперації по відношенню до струму тягового споживання на ділянці

$$k_{\text{рек}} = I_{\text{рек}} / I_{\text{тяг}}, \quad (6)$$

де  $I_{\text{рек}}$ ,  $I_{\text{тяг}}$  – відповідно струми рекуперації та тяги ЕРС.

Для СТЕ, що не обладнані пристроями прийому надлишкової енергії рекуперації, згідно умови (3) величина  $k_{\text{рек}}$  знаходиться в діапазоні  $0 \leq k_{\text{рек}} \leq 1$ . Але навіть при можливості СТЕ здійснювати процес реверсу надлишкової рекупераційної енергії до первинної енергосистеми неможна стверджувати що  $k_{\text{рек}} \geq 1$ , оскільки на ефективність цього процесу суттєво впливає рівень завантаження системи зовнішнього електропостачання у вузлі приєднання СТЕ.

При моделюванні різних відстаней між поїздами були визначені залежності напруги на струмоприймачах ЕРС в режимі рекуперації  $U_{\text{с}}^{\text{рек}}(k_{\text{рек}})$  та тяги  $U_{\text{с}}^{\text{тяг}}(k_{\text{рек}})$  (рис. 5, а), з яких витікає очевидний факт, що при збільшенні відстані між ЕРС зменшується ефективність використання рекупераційної енергії, оскільки суттєво зростає напруга на струмоприймачі рекупераційного ЕРС  $U_{\text{с}}^{\text{рек}}$ . Так при відстані між поїздами

15 км рекуперація енергії в мережу стає вже неможливою при струмі, що складає близько 80 % від тягового струму ЕРС 2, тому для утилізації надлишкового рекуперативного струму на ЕРС 1 необхідне застосування паралельної схеми реостатного гальмування. В той же час встановлено, що функція  $U_c^{тяг}(k_{рек})$  від відстані між ЕРС не залежить.

Також в результаті моделювання була визначена ефективна зона рекуперації  $L_{рек}$  в функції  $k_{рек}$  (рис. 5, б), під якою розуміється відстань між поїздами в режимі тяги і рекуперації

$$L_{рек} = 2L - x_1 - x_2, \quad (7)$$

при якій забезпечується стійкий генераторний струм ЕРС та виконання умови (2) за правою границею у всьому діапазоні значень  $k_{рек}$ . В результаті встановлено, що на відстані між поїздами  $2L$  за рахунок значного опору тягової мережі при великому віддаленні поїздів в мережу можливо рекуперувати струм лише трохи більше 30 % від струму поїзда в режимі тяги, що знаходиться на суміжній фідерній зоні.

Для наведеного прикладу встановлено, що при відстані між поїздами  $L_{рек} < 9,75$  км є можливість реалізувати рекуперацію з будь-яким струмом в межах умови (3), тому таку відстань можна вважати ефективною зоною рекуперації з прийнятними втратами енергії.

Одним з можливих шляхів розширення ефективної зони рекуперації є плавне регулювання напруги на шинах ТП, що забезпечує стійкий режим рекуперації ЕРС з підтриманням напруги на його струмоприймачі 3950 В. На рис. 5, в, приведена залежність  $k_{рек}(U_{ТП2})$  при відстані між поїздами 18 км, з якої видно діапазон можливого регулювання напруги на шинах ТП 2 за умови мінімально допустимої напруги на струмоприймачі ЕРС, що знаходиться на ділянці в тяговому режимі ( $U_c^{тяг} \geq 2,2$  кВ). Таким чином, можна виділити основні фактори, що впливають на ефективність використання рекуперативної енергії в розосередженій СТЕ:

- співвідношення струмів поїздів, що перебувають на фідерній зоні в режимі тяги та рекуперації (умова (3));
- відстань між ЕРС в тяговому та рекуперативному режимах;

- можливість плавного регулювання напруги на шинах ТП у залежності від  $k_{рек}$ .

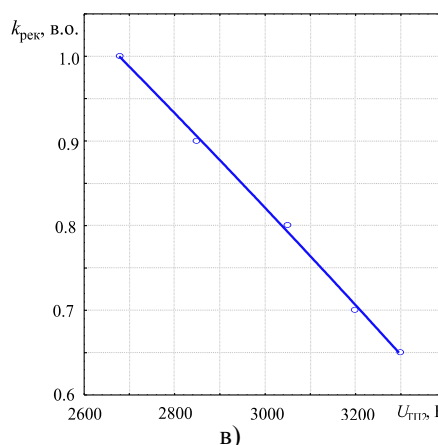
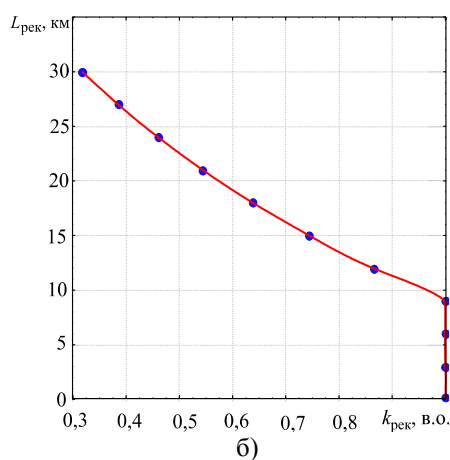
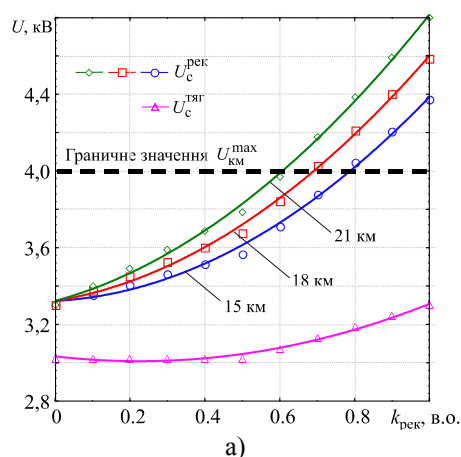


Рис. 5. Залежності напруги на струмоприймачах (а) та ефективної зони рекуперації (б) від відносного струму рекуперації

На сам кінець зазначимо, що для покращення умов рекуперації електроенергії в розосередженій СТЕ необхідна розробка ефективних принципів розподілення генерації між паралельно працюючими ТП і ЕРС в режимі рекуперації, в першу чергу за рахунок оптимальних алгоритмів регулювання напруги на шинах ТП,



що забезпечує перетік надлишкового струму рекуперації до віддалених поїздів та дозволяє знизити імовірність зрывів рекуперації.

### Висновки

В результаті проведеного моделювання взаємодії ЕРС в режимі рекуперації з системою розосередженого електропостачання на базі багатоваріантних розрахунків миттєвої схеми СТЕ визначено ефективну зону рекуперації

$L_{\text{рек}}$ , що являє собою відстань між поїздами в режимі тяги та рекуперації, при якій за умовами допустимих напруг на струмоприймачах ЕРС може бути реалізовано любий струм рекуперації в межах умови (3), що не потребує регулювання напруги на шинах ТП. При перевищенні даної відстані для ефективного використання рекуперативної енергії від ЕРС 2 необхідно плавне зниження напруги на шинах ТП 2 в межах допустимих значень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Смирнов, Д. Б. Совершенствование методики расчета распределенной системы тягового электроснабжения: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Д. Б. Смирнов; [ПГУПС]. – С.-Петербург, 2010. – 22 с.
2. Жуматова, А. А. Проблема использования возобновляемых источников энергии для системы тягового электроснабжения: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.14.02 / А. А. Жуматова; [МГУПС]. – Москва, 2010. – 24 с.
3. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
4. Тарута, П. В. Повышение эффективности использования энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения постоянного тока: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / П. В. Тарута; [ОмГУПС]. – Омск, 2004. – 24 с.
5. Бурков В. М. Варенцов А. Н. Марикин А.Т. Сберегающие технологии тягового электроснабжения с рекуперацией энергии торможения поездов // Тезисы докладов: 2-ая Евроазиатская конференция по транспорту. – С.-Петербург: ЦНИИТ СЭТ, 2000. – С. 93.
6. Саблин, О. И. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта / О. И. Саблин // Вестник НТУ«ХПИ». – Харьков, 2013. – Вип. 38. – С. 186-189.
7. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2010. – 176 с.
8. Кузнецов, В. Г. Развитие теоретических основ энергосбережения в системах электропостачания тяги поїздів постійного струму: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.22.09 / В. Г. Кузнецов; [ДНУЗТ]. – Дніпропетровськ, 2012. – 35 с.
9. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – 456 с.

Надійшла до друку 23.06.2014.

Внутрішній рецензент Гетьман Г. К.

### REFERENCES

1. Smirnov, D. B. *Sovershenstvovanie metodiki rascheta raspredelennoy sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya*. Authoref. Kand, Diss. [Improvement of calculation methods of the distributed system of traction electric supply. Authoref. Cand. Sci. Diss.] S.-Peterburg, 2010. – 22 p.
2. Zhumatova, A. A. *Problema ispolzovaniya vozobnovlyаемых istochnikov energii dlya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya*. Authoref. Kand, Diss. [The problem of using renewable energy sources for the system of traction electric supply. Authoref. Cand. Sci. Diss.] – Moscow, 2010. – 24 p.
3. Markvardt, K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* [Electricity electrified Railways] – Moscow, 1982. – 582 p.
4. Taruta, P. V. *Povyishenie effektivnosti ispolzovaniya energii rekuperatsii v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka*. Authoref. Kand, Diss. [The efficiency of energy recovery in the system of traction electric supply DC. Authoref. Cand. Sci. Diss.] – Omsk, 2004. – 24 p.
5. Burkov V. M. Varentsov A. N. Marikin A.T. *Sberegayushchie tehnologii tyagovogo elektrosnabzheniya s rekuperatsiey energii tormozheniya poezdov* [Saving technologies traction power supply with energy recovery from braking trains] – S.- Peterburg. 2000. – pp. 93.
6. Sablin, O. I. *Analiz kachestva rekuperiruemoy elektroenergii v sisteme elektricheskogo transporta* [Analysis of the quality recuperated energy in the system of electric transport] – Harkov, 2013. – pp. 186-189.
7. Arzhannikov, B. A. *Sistema upravlyаемого elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog postoyannogo toka* [The system of controlled power electric Railways DC] – Ekaterinburg, 2010. – 176 p.
8. Kuznetsov, V. G. *Rozvitok teoretichnykh osnov energosberezheniya v sistemah elektropostachannya tyagi poyizdiv postynogo strumu*. Authoref. Doct, Diss. [Development of theoretical bases of energy saving in the systems of power supply of traction of trains DC. Authoref. Dokt. Sci. Diss.] – DnIpropetrovsk, 2012. – 35 p.
9. Getman, G. K. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction] Dnipropetrovsk, 2011. 456 p.

Зовнішній рецензент Саєнко Ю. Л.

© Саблін О. І. та ін., 2014



Пріоритетними напрямками розвитку електротранспорту є децентралізація системи його електропостачання та підвищення обсягів рекуперації електроенергії при гальмуваннях. Жорстка стабілізація напруги на струмоприймачах електротранспорту, що досягається розосередженим електропостачанням, може призводити до погіршення умов рекуперації електроенергії електротранспорту, оскільки цей режим суттєво залежить від рівня напруги в контактній мережі.

В результаті проведеного в роботі моделювання взаємодії ЕРС в режимі рекуперації з системою розосередженого електропостачання на базі багатоваріантних розрахунків миттєвої схеми СТЕ визначено ефективну зону рекуперації при якій може бути реалізовано любий струм рекуперації в межах допустимої напруги на струмоприймачі ЕРС, що не потребує регулювання напруги на шинах ТП. При перевищенні даної відстані для ефективного використання рекуперативної енергії необхідно плавне зниження напруги на шинах ТП в межах допустимих значень.

**Ключові слова:** Електротранспорт, рекуперація електроенергії, розосереджене електропостачання, зона рекуперації, напруга на струмоприймачі.

**УДК 629.423.1**

О. И. САБЛИН, В. Г. КУЗНЕЦОВ, О. И. БОНДАРЬ, В. В. АРТЕМЧУК (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 49010, г. Днепропетровск, ул. Лазаряна, 2, тел. (056) 793-19-11 эл. почта: [olegsss@i.ua](mailto:olegsss@i.ua)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С РАССРЕДОТОЧЕННОЙ СИСТЕМОЙ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Пріоритетними напрямками розвитку електротранспорту є децентралізація системи його електропостачання та підвищення обсягів рекуперації електроенергії при гальмуваннях. Жесткая стабилизация напряжения на токоприемниках электротранспорта, достигаемая рассредоточенным электропостачанием, может приводить к ухудшению условий рекуперации электроэнергии электротранспорта, поскольку этот режим существенно зависит от уровня напряжения в контактной сети.

В результате проведенного в работе моделирования взаимодействия ЭПС в режиме рекуперации с системой рассредоточенного электропостачания на базе многовариантных расчетов мгновенной схемы СТЭ определено эффективную зону рекуперации при которой может быть реализован любой ток рекуперации в пределах допустимого напряжения на токоприемнике ЭПС, что не требует регулирования напряжения на шинах ТП. При превышении данного расстояния для эффективного использования рекуперативной энергии необходимо плавное снижение напряжения на шинах ТП в пределах допустимых значений.

**Ключевые слова:** электротранспорт, рекуперация электроэнергии, рассредоточенное электропостачание, зона рекуперации, напряжение на токоприемнике.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

**UDC 629.423.1**

O. I. SABLIN, V. G. KUZNETSOV, O. I. BONDAR, V. V. ARTEMCHUK (DNURT)

Dnepropetrovsk national University of railway transport named after academician V. Lazaryan, 49010, Dnipropetrovsk, 2 Lazaryan Street, phone (056) 793-19-11, e-mail: [olegsss@i.ua](mailto:olegsss@i.ua)

## SIMULATION OF INTERACTION OF ELECTRIC ROLLING STOCK IN THE REGENERATING POWER WITH A DISPERSED SYSTEM OF TRACTION ELECTRIC SUPPLY

Priority directions of development of electric transport is decentralization of the system of his power and increase the recovery of energy when braking. Strict voltage regulation on pantographs of the electric transport, achieved dispersed supply leads to deterioration of the conditions of recuperation of electricity electric transport, since this mode depends on the level of voltage in the contact network.

As a result of the work of the simulation of the interaction of electric transport in recovery mode with a dispersed system of power supply on the basis of multi-variant calculations instant schema systems electric transport the effective zone recovery. In this zone can be implemented by any current recovery electric transport within the allowable voltage at the poles. It does not require regulation bus bar voltage substations. If you exceed this distance for the effective use of regenerative energy, gradual reduction of the bus bar voltage substations within the allowed values.

**Keywords:** Electric transport, power recuperation, dispersed power supply, zone recovery, the voltage at the poles.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Saenko Y. L.*

© Саблін О. І. та ін., 2014

Institute of Industrial Electrical Engineering and Technical Information Technologies E-1 Department of Traction and Operation Control E-12, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Cracow University of Technology, [ichrabaszcz@pk.edu.pl](mailto:ichrabaszcz@pk.edu.pl), [jprusak@pk.edu.pl](mailto:jprusak@pk.edu.pl), [marekdudzik@pk.edu.pl](mailto:marekdudzik@pk.edu.pl)

## TRAMWAY TRACTION SUBSTATION MINIATURIZATION. SELECTED ISSUES

### Introduction

Electric rail transportation (trams), for over a century, has been an efficient mean of passenger transport in both bigger and smaller metropolitan areas in Poland. Currently Poland [1] has 14 tram networks that are being used by 16 entrepreneurs (in Łódź there are three providers present), trams operate in 11 voivodeships. On the streets of Krakow, electric trams appeared on March 16<sup>th</sup> 1901.

From a technical point of view the main advantage of trams [2] is their low demand for energy as compared to other mechanical means of transport (especially passenger motor cars). Ecological factors present themselves in an especially favorable light. Trams in their place of operation do not pollute the atmosphere with any exhaust fumes (e.g. CO<sub>2</sub>). Additionally, which isn't without significance, this mean of transport operates based on national energy resources (the operation of power plants is based on lignite and bituminous coal) and for that reason the operational costs are less susceptible to the fluctuations in oil prices on global markets. What's specific about this mean of transport is that trams (as well as other vehicles of electric traction) require a constant supply of energy provided from a specialized power system. This is caused by the fact that they are non-autonomous as vehicles, as they don't possess their own energy source.

### Power supply of electric railway transportation

Traction substations constitute the most basic element of the tramway system power supply. These are road structures equipped with conversion devices which adapt the voltage parameters of the national power system to the requirements of the railway rolling stock.

Traction substations are powered from a power system, through overhead and cable transmission lines of voltages ranging from 6 to 110 kV. Tramway system substations are most commonly powered by cables of a voltage between 6 and 15kV [5].

In tramway systems a one-directional power supply system is most commonly used. [3],[4],[5]. This means that the substation power supply is divided into a sequence of sections, where each one is powered by a separate cable (power supply) from the traction substation.

Fig. 1 presents an existing area of power supply of a tramway system „Reja” substation in the center of Krakow [6].

The dimensions of a traction substation building depend, among others, on the power of conversion devices installed in them. For a presented „Reja” substation, it is the power of over 3MW. The decrease of the installed power should translate into the decrease of the substation size.

Fig. 2 shows the proposed method of the power supply of the contact line system by smaller power tram traction substation. It is assumed that every power supply (power supply cable) will be connected with a separate mini-substation.

### Results of Calculations

The selection of rectifier units for mini substations was based on traction electricity runs in the power supply cables (power supplies) that were obtained through simulation using a method of so-called theoretical passage [7].

To evaluate the possibility of the power supply of the contact line system from miniaturized tram traction substation in the analyzed area there should be carried out simulations of changes of each power supply (power cable) from analyzed tram traction substation.

To do this, was performed the theoretical rides for all trams moving on the power supplied analyzed area of in directions consistent with their true route taking into account the constraints resulting from:

- route
  - hills and arcs which increase the vehicles resistance movement,
  - tramway stops, on which the vehicles stop,
  - speed limits in the city,
- used vehicles
  - maximum accelerations and decelerations.

Results presented in the article (traction load currents were simulated for the real power supply parameters)

Below in Fig. 3 is presented a simplified algorithm for calculation carried out in order to determine the possibilities of applicability of power supply the area under study from miniaturized hypothetical tram traction substations.

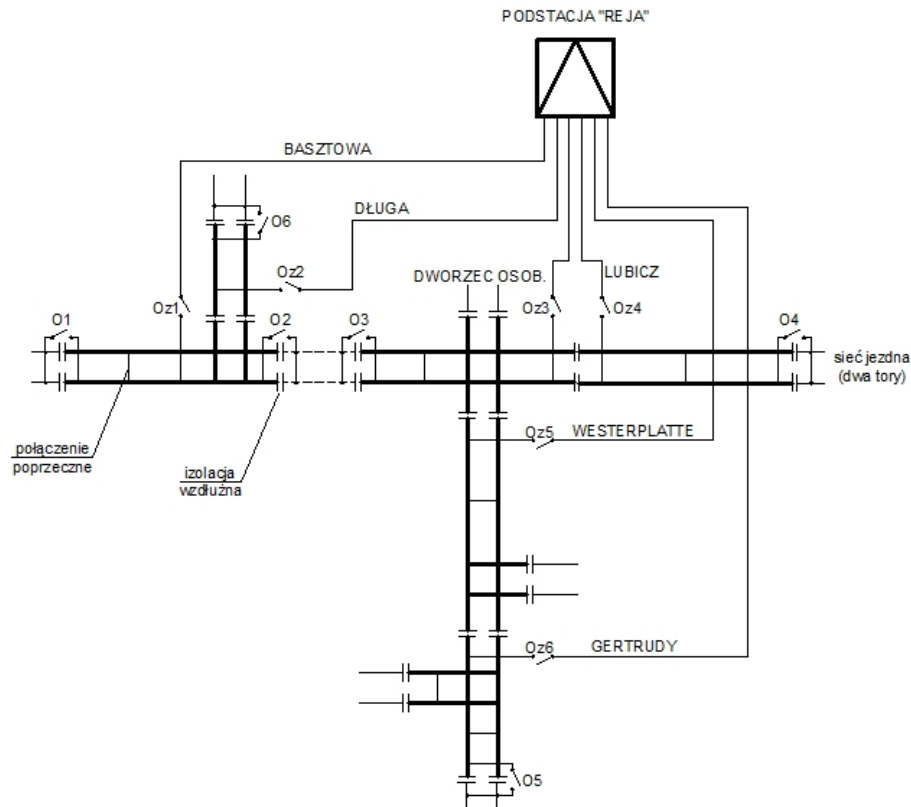


Fig. 1. Schematics of connection between tramway system substations direct current system with the traction network based on an existing „Reja” substation  
(Oz1,...,Oz6 – isolating switches for power supply, O1,...,O6 – section isolating switches)

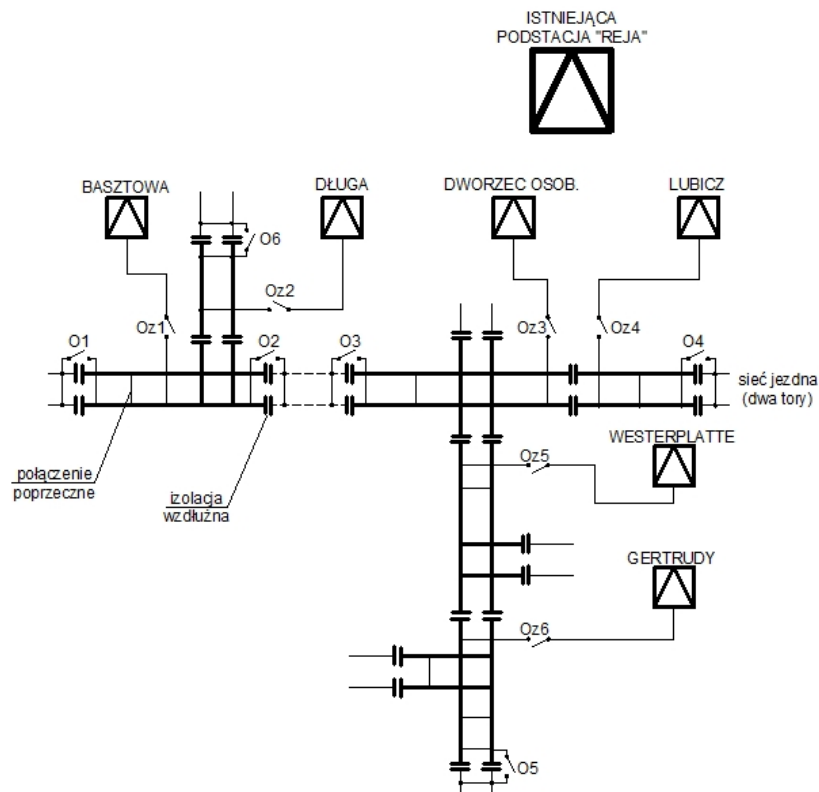


Fig. 2. Connection schematics of hypothetical tramway system direct current mini-substations with the traction network based on an example of the existing „Reja” substation’s power supply area  
(Oz1,...,Oz6 – isolating switches for power supply, O1,...,O6 – section isolating switches)

Figure 4 presents the current of power supply load – "Basztowa", and figure 5 the current of power supply load – "Długa". Figure 6 shows the

traction load at the output of the existing "Reja" tram traction substation.

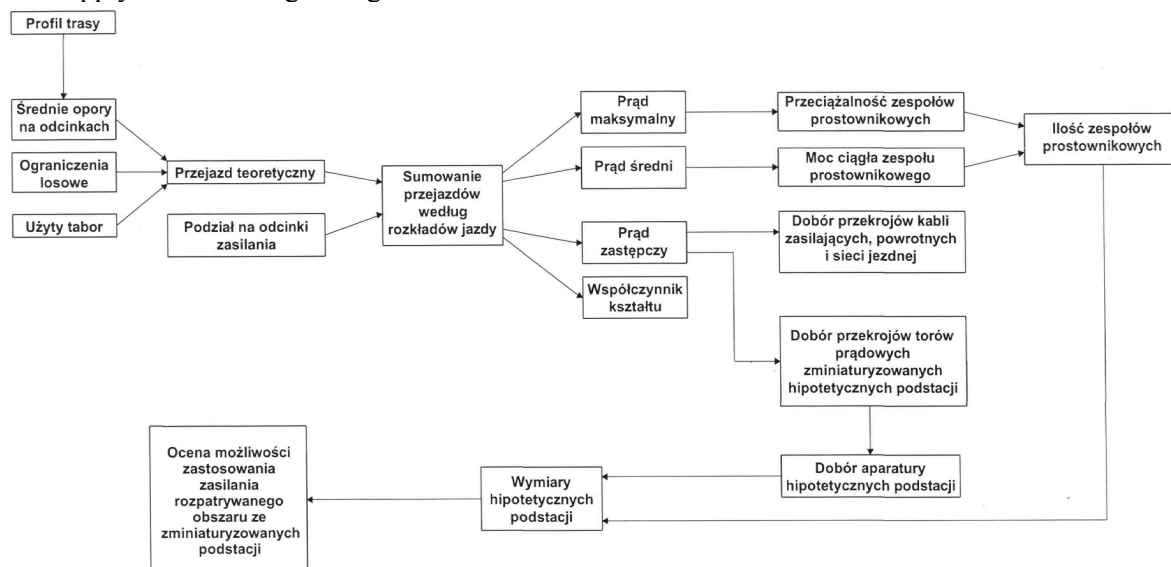


Fig. 3. Simplified algorithm for calculation carried out in order to determine the possibilities of applicability of power supply the area under study from miniaturized hypothetical tram traction substations

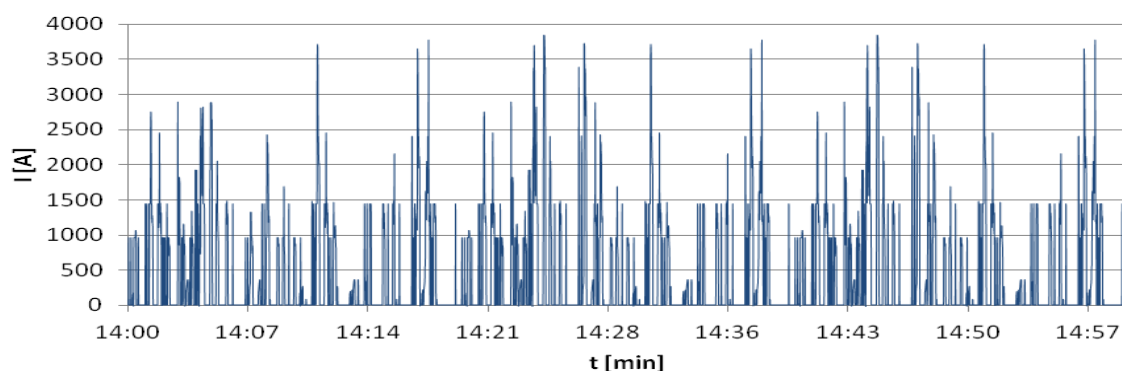


Fig. 4. "Basztowa" power supply: current of load

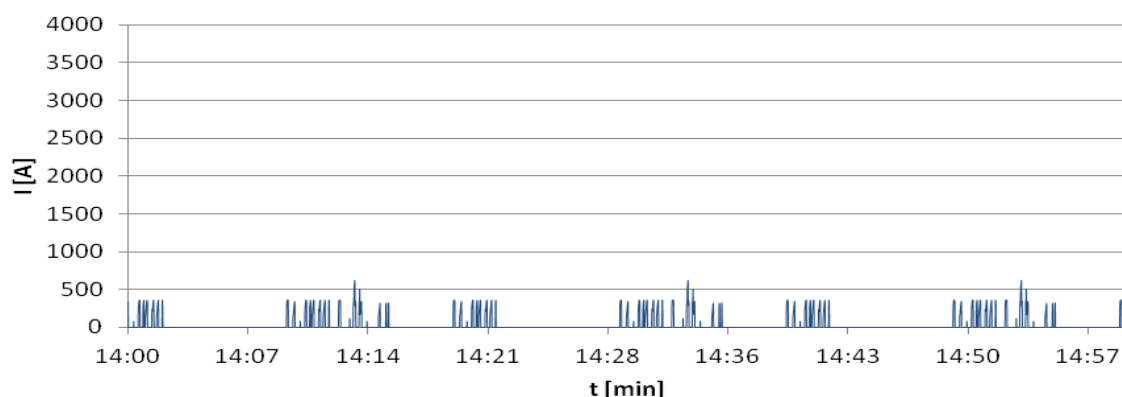


Fig. 5. "Długa" power supply: current of load

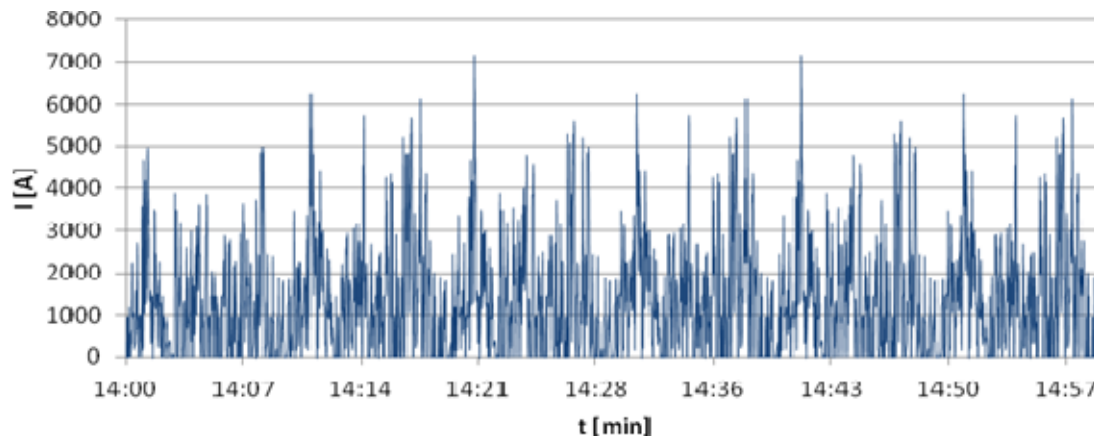


Fig. 6. Traction load at the output of the existing "Reja" tram traction substation

In the above figures (fig. 4 and 5), significant differences between the loads of presented power supplies are conspicuous. This remark pertains to remaining power supplies within reasonable supply area. This variation is a result of a frequency of tram communication, their traction characteristics, line profiles and distances between stops.

On hypothetical mini substations rectifier units (explanation: „transformer with rectifiers) in the fifth class of overload capacity could be used. Such groups are used at modernized tram substations. Rated current of such group on the side of direct current – 660 V equals 1200 A with the V class of overload capacity. [8], [9]. The amounts of overload in this class equal:

- 100% - permanent load (1200 A),
- 150% - 2-hour load (1800 A),

200% - 1-minute load (2400 A).

The selection of the amount of rectifier sets is based on the comparison of their permanent current-carrying capacity, with the permanent load of the substation and the temporary current-carrying capacity that stems from the class of the rectifier sets with the maximum instantaneous current of the substation [5].

From the calculated amounts of rectifier sets (under different loads), the highest is being picked and rounded up to an integer. The result is the amount of necessary rectifier sets –  $n$  for a given mini substation.

Table 1 presents the results of calculations of rectifier units amount on hypothetical, reduced in size tram substations as well as for the existing "Reja" tram traction substation [7].

Table 1

**Determining the amount of rectifier units on hypothetical substations**

Miniaturized hypothetical tram traction substation	$I_{max}$ [A]	$I_{1m-prost}$ [A]	$n_{1m}$	$I_{c-podst}$ [A]	$I_{c-prost}$ [A]	$n_c$	$n$
"Lubicz"	1922	2400	0,80	107	1200	0,089	1
"Basztowa"	3840	2400	1,6	353	1200	0,29	2
"Dworzec Osob."	2880	2400	1,2	261	1200	0,22	2
"Westerplatte"	2880	2400	1,2	252	1200	0,21	2
"Gertrudy"	1825	2400	0,76	132	1200	0,11	1
"Długa"	617	2400	0,26	27	1200	0,02	1
Existing "Reja" tram traction substation							
Substation "Reja"	7119	2400	2,97	1308	1200	1,09	3

Where:

$I_{c-podst}$  – average substation constant current,  
 $I_{c-prost}$  – rectifier set constant current,  
 $I_{max}$  – maximum substation instantaneous current,

$I_{1m-prost}$  – 1-minute overload current of rectifier set,

$n_{1m}$  – number of installed rectifier units resulting from overload,

$n_c$  – number of rectifier units resulting from continuous traction load



Currently on "Reja" traction substation are installed four rectifier units with power 800kW each, in the fifth overload class and with nominal current 1200A [3].

As may be noted from Table 1, the number of currently used rectifier units in the 'Reja' traction substation is one greater than the amount resulting from the calculation.

A large variability in traffic and different other situations which causes derogation from timetables may result in an increase of the maximum instantaneous current in relation to the value that was calculated (calculations were performed for strictly defined circumstances).

Therefore, it seems reasonable to apply four rectifier units on the existing "Reja" traction substation.

### Closing Remarks

Possible advantages of use of power supply from miniaturized traction substations [7]:

- reducing the length of power cables and return cables;
- increase the amount of return points – stray currents reduction;
- smaller substations can be easier integrated into the urban environment;
- smaller amount of space necessary to locate a traction substation.

Disadvantages resulting from the use of miniaturized substation [7]:

- medium voltage network needs to be brought to each substation;
- difficulties in locating of new substations in city centers due to existing underground infrastructure;

▪ In the concerned power supply area for the conception of miniaturized substations the greater amount of substation devices is needed than for the case of a single substation.

This subject requires further work and analysis

### REFERENCES

1. Wojcieszak J.: *Komunikacja tramwajowa w Polsce*. TTS Technika Transportu Szynowego, nr 9/2003, str. 31 – 50.
2. Verkehr auf Schienen: *Herausforderungen an die Elektrotechnik*, Siemens – Aktiengesellschaft – Berlin, Muenchen 1979.
3. Mierzejewski L., Szeląg A., Gałuszewski M.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.
4. Chrabąszcz I., Prusak J., Drapik S.: *Trakcja elektryczna prądu stałego. Układy zasilania*, Podręcznik INPE dla elektryków, zeszyt nr 27, Bełchatów 2009.
5. Kałuża E., Bartodziej G., Ginalski Z.: *Układy zasilania i podstacje trakcyjne*. Politechnika Śląska, Skrypty uczelniane nr 1220, Gliwice 1985.
6. *Dokumentacja obszaru zasilania prostownikowej podstacji trakcyjnej, „Reja”*. ZIKiT w Krakowie.
7. Stec W.: *Ocena wartości prądów obciążenia kabli zasilaczy i kabli powrotnych tramwajowych podstacji trakcyjnych w aspekcie miniaturyzacji tych podstacji*. Praca magisterska. Politechnika Krakowska 2011.
8. *Rysunek ofertowy prostownika PD-12/08k firmy Woltan*.
9. *Zespół prostownikowy 12-pulsowy. Prospekt firmy Enika*.

Received 20.05.2014.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Vasyak I.*

The article addresses—based on an existing section of a tram line—the evaluation of the capability to substitute an existing tram substation (as a civil structure) with several smaller ones. Replacement of the central tramway substations by smaller ones, situated along the tram line in the shorter distances would allow to enter the two-sided power supply of the catenary, ensuring alignment substation loads, reducing the voltage drop on the contact line system and thus the power loss [10].

The article highlights some of the issues that are associated with the selection of the amount of rectifier units for the miniaturized tram traction substations.

Results presented in the article – traction load currents were simulated for the real power supply parameter.

**Keywords:** tram, traction, substations, rectifier, miniaturization.

УДК 621.331

І. ХРАБОНЩЧ, М. ДУДЗИК, Я. ПРУСАК, В. СТЕЦЬ

Інститут промислової електротехніки та технічних інформаційних технологій Е-1 Департаменту тяги і експлуатаційного управління Е-12, факультет електротехніки та обчислювальної техніки, Краків, Технологічний університет, [ichrabaszcz@pk.edu.pl](mailto:ichrabaszcz@pk.edu.pl), [jprusak@pk.edu.pl](mailto:jprusak@pk.edu.pl), [marekdudzik@pk.edu.pl](mailto:marekdudzik@pk.edu.pl)

## МІНІАТЮРИЗАЦІЯ ПІДСТАНЦІ МІСЬКОГО ТРАМВАЙНОГО ТРАНСПОРТУ. ОКРЕМІ ПИТАННЯ

Перевезення міським електричним транспортом (трамваями), протягом понад століття, були ефективним засобом пасажирського транспорту в великих і маленьких міських районах Польщі. В даний час Польща має 14 трамвайних мереж, які експлуатуються 16-ма підприємствами, трамваї працюють в 11 воєводствах. На вулицях Кракова, електричні трамваї з'явилися 16 березня 1901.

З технічної точки зору головна перевага трамваїв є їх низький попит на енергію у порівнянні з іншими механічними транспортними засобами (особливо для пасажирських легкових автомобілів). Екологічні фактори проявляють себе в особливо вигідному світлі. Трамваї у місті не забруднюють атмосферу будь-якими вихлопними газами (наприклад CO<sub>2</sub>). Крім того, цей вид транспорту працює на основі національних енергетичних ресурсів (робота електростанцій на основі бурого вугілля і кам'яного вугілля) і з цієї причини експлуатаційні витрати менш чутливі до коливань цін на нафту на світовому ринку. Особливістю цього виду транспорту є те, що трамваї (а також інші транспортні засоби на електротязі) вимагають постійної подачі енергії, що надається із спеціалізованої системи живлення. Це викликано тим, що вони не є автономними, як звичайні транспортні засоби, оскільки не володіють власним джерелом енергії.

**Ключові слова:** трамвай, тяга, підстанція, випрямляч, мініатюризація.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Васяк І.*

УДК 621.331.3

І. ХРАБОНЩЧ, М. ДУДЗИК, Я. ПРУСАК, В. СТЕЦЬ

Інститут промышленной электротехники и технических информационных технологий Е-1 Департамента тяги и эксплуатационного управления Е-12, факультет электротехники и вычислительной техники, Краков, Технологический университет, [ichrabaszcz@pk.edu.pl](mailto:ichrabaszcz@pk.edu.pl), [jprusak@pk.edu.pl](mailto:jprusak@pk.edu.pl), [marekdudzik@pk.edu.pl](mailto:marekdudzik@pk.edu.pl)

## МИНИАТЮРИЗАЦИЯ ПОДСТАНЦИИ ГОРОДСКОГО ТРАМВАЙНОГО ТРАНСПОРТА. ОТДЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Перевозки городским электрическим транспортом (трамваями), на протяжении более века, были эффективным средством пассажирского транспорта в больших и маленьких городских районах Польши. В настоящее время Польша имеет 14 трамвайных сетей, эксплуатируемых 16-ю предприятиями, трамваи работают в 11 воеводствах. На улицах Кракова, электрические трамваи появились 16 марта 1901.

С технической точки зрения главное преимущество трамваев заключается в их низком спросе на энергию по сравнению с другими механическими транспортными средствами (особенно для пассажирских легковых автомобилей). Экологические факторы проявляют себя в особенно выгодном свете. Трамваи в городе не загрязняют атмосферу любыми выхлопными газами (например CO<sub>2</sub>). Кроме того, этот вид транспорта работает на основе национальных энергетических ресурсов (работа электростанций на основе бурого угля и каменного угля) и по этой причине эксплуатационные расходы менее чувствительны к колебаниям цен на нефть на мировом рынке. Особенностью этого вида транспорта является то, что трамваи (а также другие транспортные средства на электротяге) требуют постоянной подачи энергии, предоставляемой из специализированной системы питания. Это вызвано тем, что они не являются автономными, как обычные транспортные средства, поскольку не обладают собственным источником энергии.

**Ключевые слова:** трамвай, тяга, подстанция, выпрямитель, миниатюризация.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Васяк И.*

В. Г. ЯГУП (ХНУГХ), Е. В. ЯГУП (УКРГАЖТ)

Кафедра электроснабжения городов, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, ул. Революции, 12, Харьков, Украина, 61002, эл. почта: [Yagup\\_Walery@mail.ru](mailto:Yagup_Walery@mail.ru)

Кафедра автоматизации систем электрического транспорта, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, пл. Фейербаха, 7, Харьков, Украина, 61050, эл. почта: [Kate.Yag@rambler.ru](mailto:Kate.Yag@rambler.ru)

## КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТЯГОВОЙ СИСТЕМЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### Постановка проблемы

Электрификация железных дорог является естественным процессом, связанным с повышением показателей качества обслуживания пассажирских и грузовых перевозок. При этом обеспечиваются высокие показатели в отношении скорости, пропускной способности, экологии и комфорта пассажиров. Статистика показывает, что большая часть электрифицированных железных дорог работает с системами электроснабжения на переменном токе промышленной частоты 50 Гц при напряжении 25 кВ [1]. Являясь мощными потребителями электроэнергии, тяговые системы железнодорожного транспорта оказывают существенное влияние на питающую сеть. Это влияние оказывается негативным, так как снижает такие показатели, как коэффициенты симметрии и мощности. Основной схемой питания тяговой нагрузки на железной дороге является схема питания от трехфазной сети через трансформатор. Первичная обмотка трансформатора соединяется в звезду, а вторичная – в треугольник. Питание тягового электропривода осуществляется от одной из сторон вторичного треугольника по схеме однофазной нагрузки [2]. Таким образом, системы электроснабжения переменного тока характеризуются существенной несимметрией нагрузки. Это в свою очередь приводит к появлению в системе реактивной мощности.

### Анализ последних публикаций и выделение нерешённых проблем

Частичное ослабление влияния несимметрии пытаются достичь использованием схемы так называемого «винта» [2]. В этом случае для нескольких подстанций переменного тока изменяются точки подключения и фазировка тяговой нагрузки. Но эти мероприятия в полной мере не позволяют решить проблему несимметрии тяговой нагрузки и появления реактивной мощности. Всё это приводит к увеличению потерь и снижению коэффициента полезного действия.

В последние годы резко возрос интерес к вопросам симметрирования и компенсации реак-

тивной мощности в сетях электроснабжения железных дорог [3,4], однако в указанных работах отсутствует детальный анализ режимов оборудования, в том числе трансформаторного, а также точное определение параметров симметрирующих и компенсирующих элементов. Поэтому представляется актуальным поиск методов снижения несимметрии и компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения железнодорожной тяговой однофазной.

Целью исследования является поиск возможных условий, при которых обеспечивается полная компенсация реактивной мощности в системе электроснабжения на переменном токе тяговой железнодорожной нагрузки. Для этого необходимо проанализировать режимы и электромагнитные процессы в системе питания тяговой нагрузки переменного тока, найти параметры симметрирующего устройства (СКУ) на реактивных элементах, при которых минимизируются реактивная мощность и несимметрия в системе; а также убедиться в том, что оптимизированный режим действительно имеет более высокие показатели по условиям работы оборудования системы электроснабжения.

### Изложение основного материала статьи

Рассматривается система электроснабжения железнодорожной тяги на переменном токе с однофазной нагрузкой в виде одного состава на линии. Это соответствует случаю наиболее резко выраженной несимметрии в системе электроснабжения. Расчетная схема изображена на рис.1.

Здесь источники синусоидального напряжения имитируют питающую сеть неограниченной мощности, каковой можно считать в целом энергосистему, от которой питается тяговая подстанция. Элементы  $L_0$  и  $r_0$  отображают сопротивления линий электропередачи к тяговому трансформатору. Первичные обмотки этого трансформатора соединены в звезду, а вторичные – в треугольник (по схеме 11 группы соединения). Выводы вторичной обмотки  $a$ ,  $b$ ,  $c$  используются для питания тяговых нагрузок.

© Ягуп В. Г., Ягуп Е. В., 2014

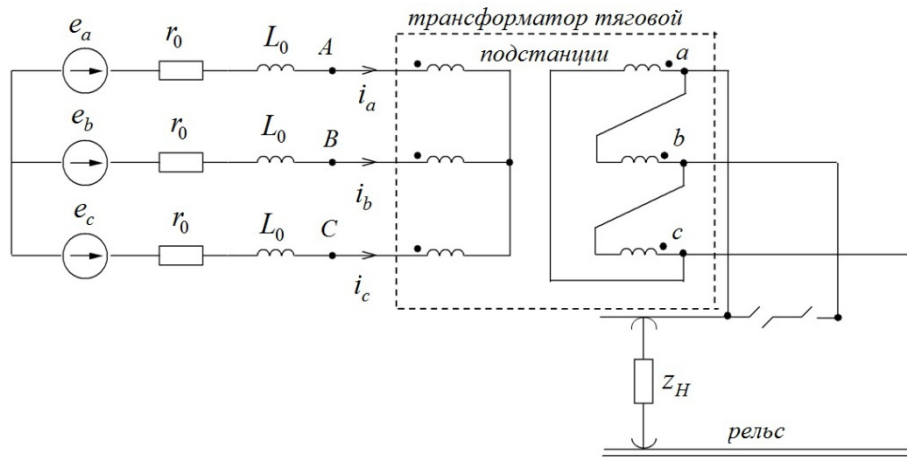


Рис. 1. Схема питания переменным током железнодорожной тяговой нагрузки

Фаза *C* заведена на рельс, а фаза *A* – на контактный провод.

Сопротивление  $Z_H$  отображает тяговую нагрузку, для которой будем полагать общепринятое значение  $\cos \varphi = 0,8$ .

Будем рассматривать реальный случай питания тяговой нагрузки от тягового трансформатора типа ТДНЖ – 25000/110, параметры которого (паспортные данные) следующие:

Номинальная мощность 25 мВА, напряжение первичной стороны 110 кВ, напряжение вторичной стороны 27,5 кВ. Частота питающего напряжения 50 Гц. Напряжение короткого замыкания составляет 10,5%, потери короткого замыкания 120 кВт. Ток холостого хода составляет 0,7%, потери холостого хода 30 кВт.

Расчет параметров эквивалентной схемы замещения для визуальной модели привел к следующим результатам:

Активное сопротивление первичной обмотки 1,1616 Ом.

Индуктивность рассеивания первичной обмотки 0,080798 Гн.

Активное сопротивление вторичной обмотки 0,0726 Ом.

Индуктивность рассеивания вторичной обмотки 0,00505 Гн.

Индуктивность намагничивания 223,316 Гн.

Сопротивление, отражающее потери на перемагничивание, включаемое параллельно индуктивности намагничивания 403078,81 Ом.

Эти параметры используются в дальнейшем в свойствах визуальной модели трехфазного трансформатора, питающего тяговую нагрузку. Для определенности будем рассматривать токовую нагрузку порядка 180 А, соответствующую средней степени нагрузки, обеспечивающей движение одного состава. При необходимости может быть рассчитан любой иной вариант тяговой нагрузки.

Моделирование процессов осуществляем на визуальной Simulink-модели (рис. 2).

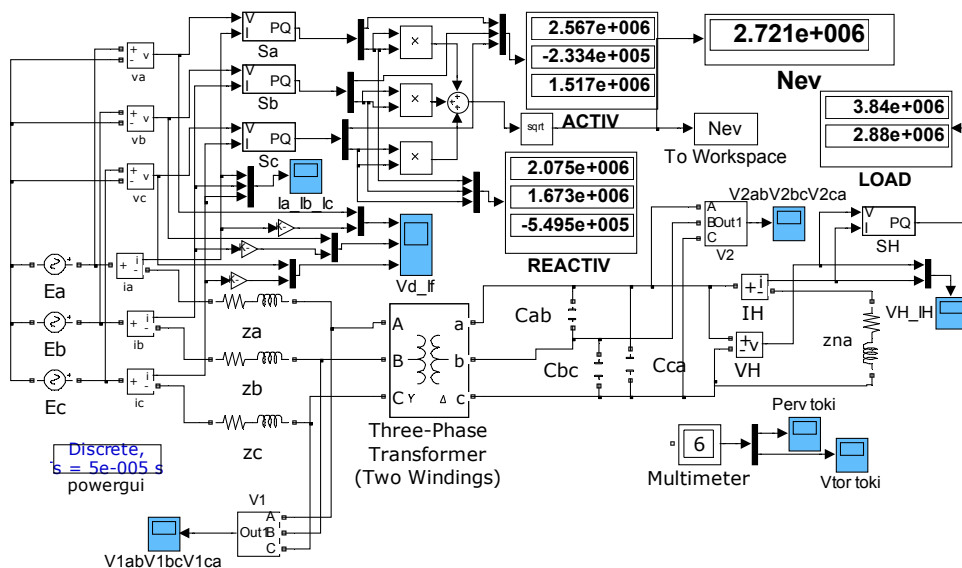


Рис. 2. Модель системы электроснабжения переменным током

Параметры линии электропередачи и нагрузки следующие:  $r_0=1$  Ом;  $L_0=0,01$  Гн;  $R_n=(121+90,75j)$  Ом.

При работе модели используется метод дискретных моделей элементов, обеспечивающий преодоление явления жесткости системы дифференциальных уравнений. Шаг интегрирования принят равным 0,00005 с.

При моделировании на виртуальные осциллографы выводятся токи в линиях электропередачи (они же являются токами в источниках электроэнергии и первичных обмотках трансформатора), напряжения на зажимах трансформатора, а также токи и напряжения нагрузки. С помощью виртуальных измерительных приборов фиксируются активные и реактивные мощности, отдаваемые каждым источником электроэнергии с передачей этих значений на цифровые измерители.

Результаты моделирования установившегося процесса при несимметричной нагрузке приведены на рис.3.

Диаграммы свидетельствуют о весьма неблагоприятных условиях работы электрооборудования при несимметричной нагрузке на вторичных обмотках тягового трансформатора. На

рис. 3,а приведены напряжения каждого источника совместно с током этого источника (масштаб по токам увеличен в 1000 раз для улучшения наглядности). Здесь видно, что от фазы А отбирается отстающий ток, соответствующий индуктивному характеру нагрузки на эту фазу. Виртуальный измеритель мощностей показывает, что полная мощность, отдаваемая фазой А, имеет значение  $S_A=2.567E6+j2.075E6$ . Для фазы В значение полной мощности  $S_B=-2.334E5+j1.673E6$ , и диаграммы напряжения и тока (рис.3,а средняя) свидетельствуют о том, что источник фазы В работает в режиме потребления мощности. В фазе С (рис.3,а нижняя диаграмма) ток несколько опережает напряжение, что говорит о емкостном характере отдаваемой мощности, и значение полной мощности  $S_C=1.517E6-j5.495E5$ . Из значений реактивных мощностей сконструирован среднеквадратичный функционал, значение которого для несимметричного режима составляет величину  $N_{ev}=2.721E6$  ВАр. В дальнейшем этот функционал будет приниматься в качестве целевой функции при проведении поисковой оптимизации.

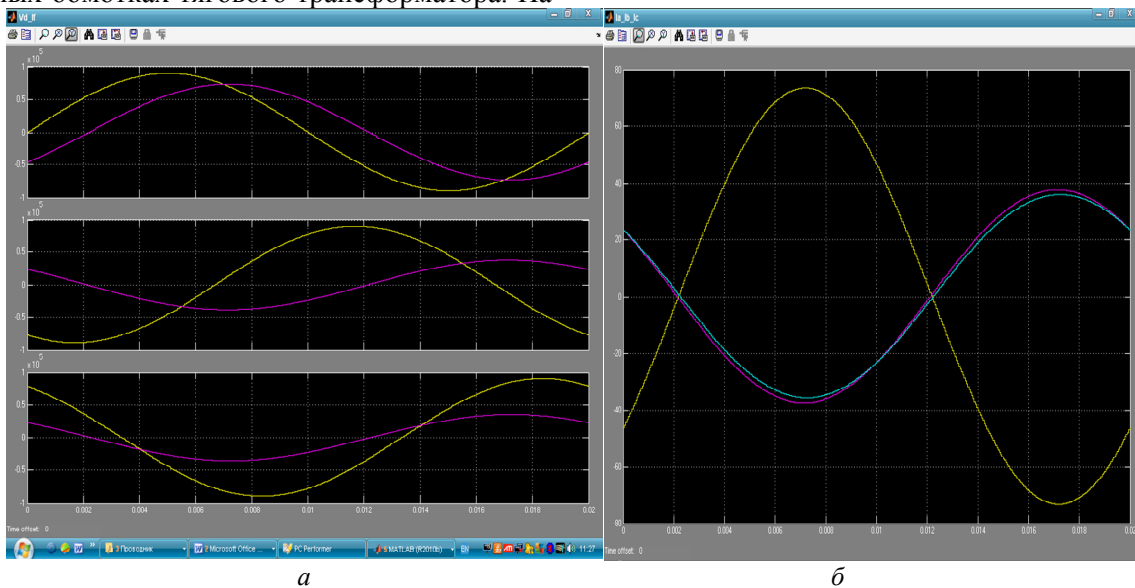


Рис. 3. Диаграммы для несимметричного режима:

а) токи и напряжения источников; б) токи в линиях электропередачи

На диаграмме рис.3,б изображены токи в линиях электропередачи (они же токи в первичных обмотках трансформатора). Амплитуда тока фазы А составляет величину 73,492 А, а токи в фазах В и С почти совпадают – их амплитуды равны соответственно 35,89 А и 37,614 А. Т В такой же пропорции отличаются и токи вторичных обмоток трансформатора – 167,94 А, 83,97 А. и 83,97 А. Это показывает, что обмотки стержня фазы А перегружены, а

остальные недогружены, и трансформатор работает с большим перекосом токов обмоток. Это в свою очередь обуславливает и несимметрию напряжений между выводами трансформатора: первичная сторона трансформатора – амплитуды наложений равны 15520, 15556 и 15540 В, вторичная сторона трансформатора – амплитуды напряжений равны 38305, 39057 и 38102 В. Полная мощность на тяговой нагрузке составляет величину  $S_H=3.84E6+j2.88E6$ . Мож-

© Ягуп В. Г., Ягуп Е. В., 2014



но сделать вывод, что каждый элемент электрооборудования системы электроснабжения работает при резкой несимметрии в весьма нерациональном режиме.

Поиск параметров компенсатора реактивной мощности осуществляется с помощью поисковой оптимизации на основе алгоритма метода деформируемого многогранника [5], реализуемого в системе MATLAB совместно с Simulink-моделью [6]. Методика организации такого поиска обоснована и разработана авторами применительно к обобщенной трёхфазной системе электроснабжения в [7].

В исследуемом случае параметрами оптимизации принимаются величины параметров элементов, подключаемых для симметрирования режима и компенсации реактивной мощности в рассматриваемой системе электроснабжения. В качестве СКУ выбрана схема из трёх реактивных элементов, включаемых по схеме треугольника к выводам вторичной обмотки тягового трансформатора. Поскольку заранее неизвестно, какой именно элемент должен быть подключен в схеме СКУ, включаем в каждую сторону треугольника СКУ конденсаторы. Это реализуется установкой соответствующего варианта с помощью раскрывающегося списка в окне свойств каждого элемента. Такой выбор вполне обоснован, поскольку нагрузка имеет индуктивный характер, и, как показал опыт исследования подобной схемы в [7], три конденсатора в СКУ способны симметрировать линейные токи и полностью компенсировать ре-

активную мощность в системе электроснабжения переменного тока. Однако, в данном случае решение не привело к ожидаемому эффекту. В действительности в процессе проведения поисковой оптимизации целевая функция после некоторого количества циклов перестала уменьшаться, и величина емкости конденсатора  $C_{bc}$  стала уменьшаться и стремиться достичь бесконечно малой величины. Это послужило сигналом для изменения в СКУ соответствующего конденсатора на дуальный элемент – индуктивность. После этого целевая функция свелась к величине, близкой к нулю. Это означает, что в системе реактивная мощность полностью скомпенсирована, и при этом линейные токи образовали совершенно симметричную систему.

На рис.4 приведена модель системы электроснабжения после окончания процесса поисковой оптимизации. Этот режим достигнут при следующих параметрах СКУ:  $C_{ab}=1.0031113E-05$  Ф;  $L_{bc}=1.0767185$  Гн;  $C_{ca}=1.2937435E-05$  Ф.

При этом значение целевой функции чрезвычайно мало -  $N_{ev}=4.226E-6$ . Приборы показывают отсутствие в системе реактивной мощности, и каждый из источников отдает лишь активную мощность  $1.332E6$  Вт. Полная мощность в нагрузке определяется значением  $S_H=3.996E6+j2.996E6$ , что означает увеличение активной мощности на тяговой нагрузке по сравнению с несимметричным режимом при отсутствии СКУ.

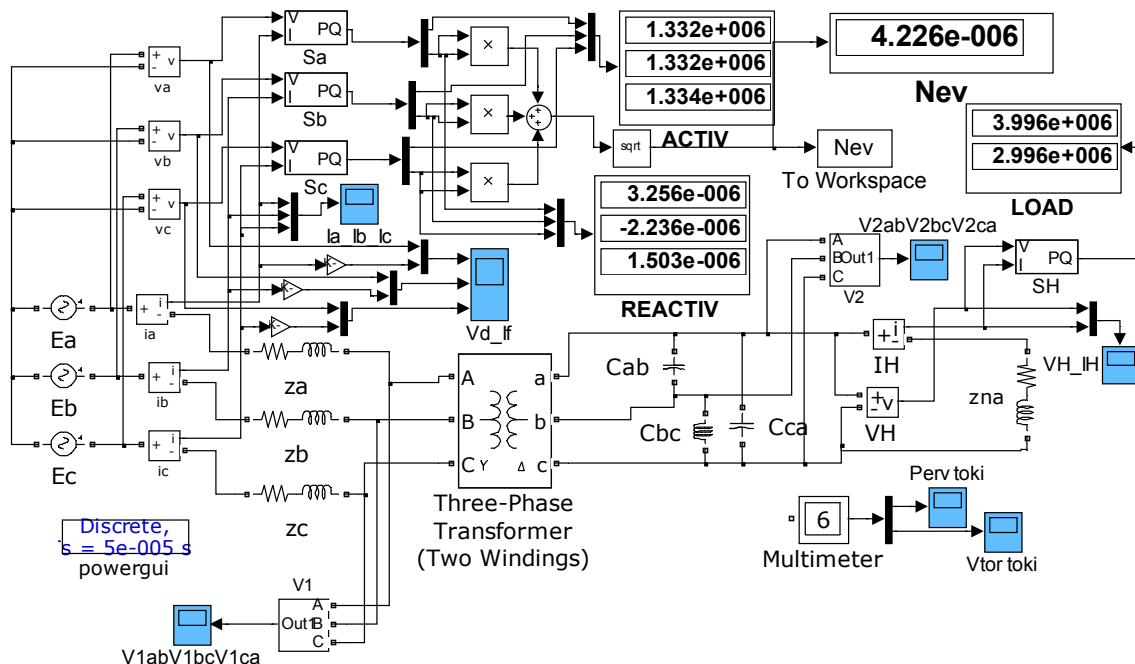


Рис. 4. Модель системы после нахождения параметров СКУ

На рис. 5 приведены диаграммы токов и напряжений, упомянутых и идентичных рис.3, но соответствующих симметричному режиму с компенсацией реактивной мощности. Из рис. 5,а видно, что токи в источниках питания совершенно совпадают по фазе с их задающими напряжениями. Из рис. 5,б видно, что и линия, и трансформатор нагружаются токами совершенно равномерно. Линейные напряжения на

первичной и вторичной стороне уравнились и имеют амплитуды соответственно 155510 и 38865 В. Аналогично уравнились и токи трансформатора и линии электроснабжения, амплитуды которых равны соответственно 29,68 и 68,63 А. Эти значения намного меньше соответствующих для несимметричного исходного режима.

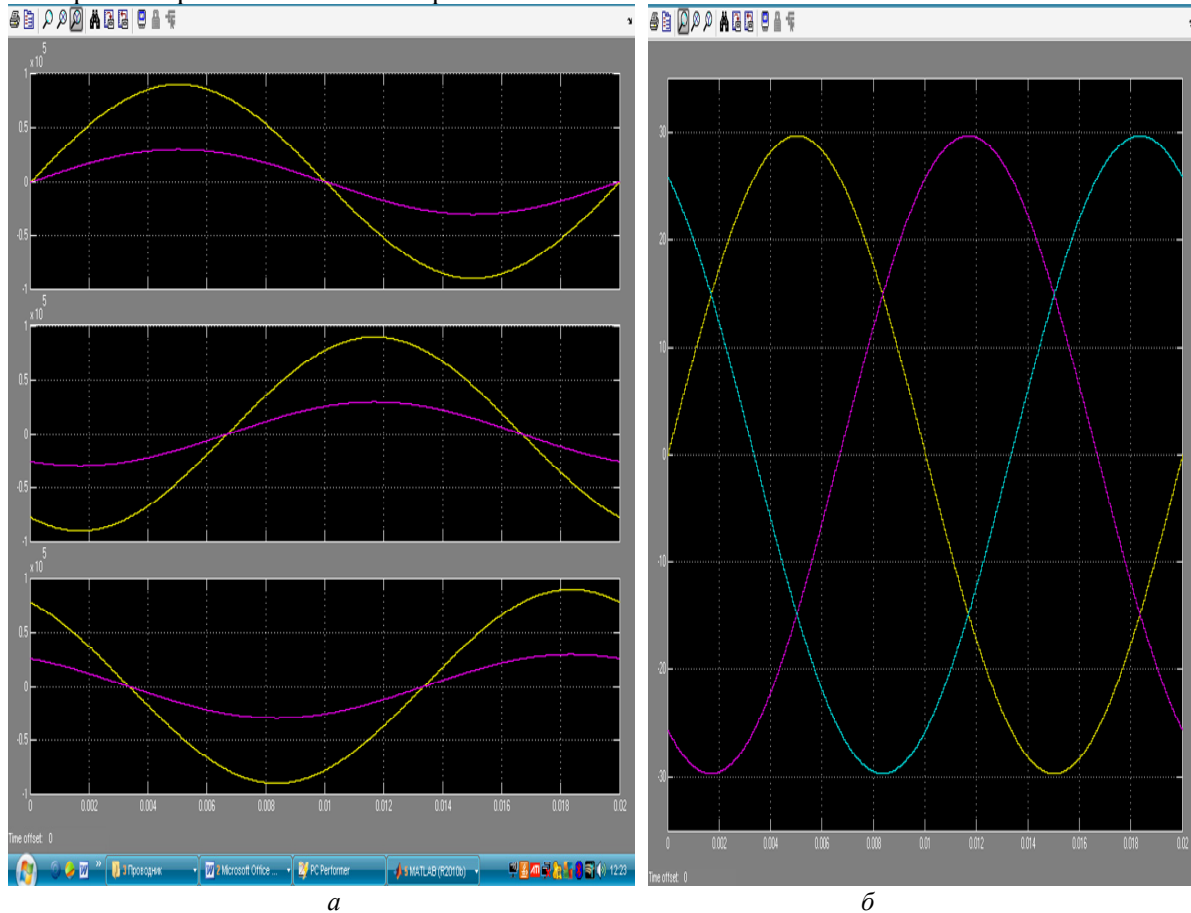


Рис. 5. Диаграммы для симметричного режима с полной компенсацией реактивной мощности:  
а) токи и напряжения источников; б) токи в линиях электропередачи;

Уменьшения токов линии электропередачи по фазам *A, B, C* означает уменьшение потерь в линиях электропередачи, которое соответствует квадратичной зависимости от токов. Это обеспечивает экономию электроэнергии, а кроме того тяговый трансформатор при этом работает в совершенно симметричном режиме. Это доказывает возможность энергосбережения на железной дороге путем оптимизации режимов тяговых подстанций переменного тока с помощью относительно простого дополнительного электрооборудования СКУ.

#### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Возникающий в традиционной системе электроснабжения железных дорог на перемен-

ном токе несимметричный режим характеризуется значительными уровнями реактивной мощности в системе и несимметрией как токов, так и напряжений. Использование разработанной визуальной модели и предложенного метода поисковой оптимизации позволяет определить параметры симметро-компенсирующего устройства для реального случая. В процессе поисковой оптимизации представляется возможным выяснить тип каждого реактивного элемента, который должен включаться в состав симметро-компенсирующего устройства для полной компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения. Подключение симметро-компенсирующего устройства с найденными в процессе исследования параметрами обеспечивает полное симметрирование систе-

© Ягуп В. Г., Ягуп Е. В., 2014

мы и компенсацию реактивной мощности в ней. Это существенно улучшает условия работы основного оборудования тяговой подстанции переменного тока и повышает коэффициент полезного действия системы в целом. Перспективной дальнейшего исследования может

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хворост Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития/ Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Электротехніка і електромеханіка. – 2003. - №4. – С.104-113.
2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст]. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
3. Закарукин, В. П., Крюков, А. В., Иванова, Е. С. Анализ схем симметрирования на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока. – Электрифікація транспорту, - №6. – 2013. – С. 26-33.
4. Бардушко, В. Д. Параметрический синтез систем параллельных емкостных компенсирующих устройств в тяговой сети в современных условиях. – Электрифікація транспорту, - №6. – 2013. – С. 8-13.
5. Nelder, J.A., Mead, R. A Simplex Method for Function Minimization [Текст]. – Computer J. – 1965. – №7. – p.308 – 313.
6. Дьяконов, В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя [Текст]. – М.: СОЛОН-Пресс. – 2002. – 768 с.
7. Ягуп, В. Г. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации [Текст] // В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – вип. 11(186). – С.449-454.

быть расчет параметров СКУ для ряда значений тяговой нагрузки, в том числе и рассмотрение вариантов нагрузки системы электроснабжения от нескольких потребителей, подключаемых на обе рабочие фазы вторичных обмоток силового трансформатора.

#### REFERENCES

1. Khvorost N.V. Electric railways: stages and evolution perspectives / N.V. Khvorost, N. V. Panasenko // Electrical engineering and electromechanics. – 2003. - №4. – P. 104-113.
2. Markvardt, K. G. (1982). Electricity electrified railways. Moscow, Transport Publ., 528.
3. Zakarukin, V. P., Kryukov, A. V., Ivanova, E. S. Analysis of balancing schemes for railway AC traction substations. – Transport electrification. 2013. №6. – P. 26-33.
4. Bardushko, V. D. Parametric synthesis of the system of parallel capacitive compensating devices in traction network in modern conditions. Transport electrification. 2013. №6. – P. 8-13.
5. Nelder, J. A., Mead, R. A Simplex Method for Function Minimization // – Computer J. – 1965. – №7. – p.308 – 313.
6. Diakonov, V. P. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Usage basics. Full user's handbook. – Moscow. SOLON-Press. 2002. – 768 p.
7. Yagup, V.G., Yagup, K.V. The calculation of mode of reactive power compensation in asymmetrical power supply system with searching optimization method. – Scientific works of the Donetsk national technical university. Series "Electrical and power engineering". – Donetsk. 2011; v.11(186).. 449-454.

Поступила в печать 26.06.2014.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

Рассматривается тяговая подстанция с соединением обмоток трансформатора по общепринятой схеме звезда-треугольник. Анализируется реальный вариант питания системы тягового электроснабжения от тягового трансформатора типа ТДНЖ 25000/110. Питание тяговой нагрузки осуществляется от одной из сторон треугольника на вторичной стороне трансформатора, что создает несимметрию в системе электроснабжения. В свою очередь несимметрия токов и напряжений уменьшает коэффициент мощности для источников питания в каждой фазе и увеличивает потери в линии электропередачи. Проведенное с помощью разработанной визуальной модели исследование электромагнитных процессов подтвердило наличие существенной несимметрии в системе. С помощью визуальной модели и поисковой оптимизации на основе метода Нелдера-Мида найдены параметры симметрирующего устройства, состоящего из реактивных элементов. При этом выравниваются токи в линии и обмотках трансформатора и полностью компенсируется реактивная мощность в системе электроснабжения. Благодаря совершенному симметрированию и полной компенсации реактивной мощности потери в системе становятся минимальными.

**Ключевые слова:** симметрирование, реактивная мощность, визуальное моделирование, поисковая оптимизация.

УДК 621.311

В. Г. ЯГУП (ХНУМГ), К. В. ЯГУП (УКРДАЗТ)

Кафедра електропостачання міст, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, вул. Революції, 12, Харків, Україна, 61002, ел. пошта: [Yagup\\_Walery@mail.ru](mailto:Yagup_Walery@mail.ru)

Кафедра автоматизації систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, пл. Фейербаха, 7, Харків, Україна, 61050, ел. пошта: [Kate.Yag@rambler.ru](mailto:Kate.Yag@rambler.ru)

## КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ТЯГОВІЙ СИСТЕМІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Розглядається тягова підстанція зі з'єднанням обмоток за загально прийнятою схемою зірка-трикутник. Аналізується реальний варіант живлення системи тягового електропостачання від тягового трансформатора типу ТДНЖ 25000/110. живлення тягового навантаження здійснюється від однієї із сторін трикутника на вторинній стороні трансформатора, що створює несиметрію в системі електропостачання. В свою чергу несиметрія струмів і напруг зменшує коефіцієнт потужності для джерел живлення в кожній фазі та збільшує втрати в лінії електропередавання. Проведене за допомогою розробленої візуальної моделі дослідження електромагнітних процесів підтвердило наявність суттєвої несиметрії в системі. За допомогою візуальної моделі та пошукової оптимізації на основі метода Нелдера-Міда знайдені параметри симетруючого пристрою, що він складається з реактивних елементів. При цьому вирівнюються струми в лінії та обмотках трансформатора та повністю компенсується реактивна потужність в системі електропостачання. Завдяки довершеному симетруванню і цілковитій компенсації реактивної потужності втрати в системі стають мінімальними.

**Ключові слова:** симетрування, реактивна потужність, візуальне моделювання, пошукова оптимізація.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.311

V. G. YAGUP (KNUME), E. V. YAGUP (USART)

Department of Municipal Power Supply, Kharkiv National University of Municipal Economy, Revolution str., 12, Kharkov, Ukraine, 61002, e-mail: [Yagup\\_Walery@mail.ru](mailto:Yagup_Walery@mail.ru)

Department of Electrical Transport System Automation, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Feyerbakh sq. 7, Kharkov, Ukraine, 61050, e-mail: [Kate.Yag@rambler.ru](mailto:Kate.Yag@rambler.ru)

## REACTIVE POWER COMPENSATION IN ALTERNATIVE CURRENT TRACTION SYSTEM

The alternative current traction substation is considered when primary transformer's windings are connected in a star and secondary windings connected in delta. Real case, when system is supplied from traction transformer of type TDNG 25000/110 is considered. A traction load is supplied from one side of delta connection. This creates asymmetrical mode in power supply, decreases power factor and increases copper losses in the system. Simulation of electromagnetic processes on visual model shows a considerable asymmetry in voltages and currents of transformer. Searching optimization based on Nelder-Mead algorithm is implemented on Simulink all at the same time with visual model of traction substation on SimPowerSystem. As searching optimization result are found parameters of simmetrizing device, which provides balanced voltages and currents on transformer's windings. Reactive power in system is completely compensated and copper losses in supply system are minimized.

**Keywords:** symmetrization, reactive power, visual simulation, searching optimization.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisjuk S. P.*

В. Н. ЯНДОВИЧ (ОДЖД), В. Г. СЫЧЕНКО, А. В. АНТОНОВ (ДНУЖТ)

Помошняянская дистанция электроснабжения, Одесская железная дорога, ул. Энергетиков 1, г. Помошная, Кировоградская обл., Украина, 27030, тел.: (052) 532-72-35

Кафедра Электроснабжение железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: [elsnz@mail.ru](mailto:elsnz@mail.ru), [a.v.antonov91@gmail.com](mailto:a.v.antonov91@gmail.com)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ ПОДВЕСОК В СТРАНАХ ЕВРОСОЮЗА И УКРАИНЫ: ОРГАНИЗАЦИЯ НАДЕЖНОГО ТОКОСЪЕМА

### Введение

Для обеспечения высокоскоростного движения на железных дорогах Европы разработаны технические спецификации по эксплуатационной совместимости различных систем (TSI) и несколько европейских стандартов.

Максимальная скорость движения на электрифицированных линиях переменного тока в последние годы возросла до 300 км/ч; для некоторых новых участков планируется скорость до 350 км/ч. Максимальная скорость на линиях постоянного тока достигает 250 км/ч. Мощность, необходимая для современного высокоскоростного подвижного состава, требует повышения тяговых токов до 2000 А на переменном токе и до 4000 А на постоянном. Передача таких токов по контактными проводам и через контактные накладки токоприемников, контактная поверхность которых составляет всего лишь несколько квадратных миллиметров, при высокой скорости движения является сложной задачей, решение которой требует соответствующего качества контактной сети и, в большинстве случаев, нескольких токоприемников на одном поезде.

Все компоненты системы передачи мощности должны соответствовать предъявляемым требованиям и подлежат тщательной проверке и испытаниям.

Требования к контактными сетям высокоскоростных линий изложены в спецификации TSI Energie и стандарте DIN EN 50119. В соответствии с этими требованиями они должны обладать мощностными характеристиками, обеспечивающими их совместимость с другими системами и соответствие требованиям в отношении усилий нажатия в контакте и частоты образования электрической дуги. Так, максимальное ветровое отклонение контактного провода на прямых участках не должно превышать 400 мм. Эластичность контактного провода в середине пролета должна быть меньше

© Яндович В. Н. и др., 2014

0,5 мм/Н, а ее равномерность, в зависимости от конструкции цепной контактной подвески, должна составлять от 10 до 40 %. При этом эксплуатационная скорость не должна превышать 70 % скорости распространения волны по подвеске.

Скользкий вдоль контактного провода токоприемник вызывает возникновение поперечных (вертикальных) импульсов, которые распространяются по контактному проводу со скоростью движения волн и отражаются от точек сосредоточения масс, а также от конечных точек. Для достижения необходимой разности между скоростью распространения волн и скоростью движения поезда необходимы большие усилия натяжения и высокая прочность контактного провода (от 420 до 520 Н/мм<sup>2</sup>), а также несущий трос с соответствующими прочностными характеристиками. Кроме того, необходимо также выполнение следующих условий:

- соответствие характеристик всех компонентов контактной сети предъявляемым требованиям;
- максимально равномерная эластичность контактной подвески и минимальные отклонения высоты расположения нижней поверхности контактного провода, которая является направляющей для скольжения контактных накладок или вставок токоприемников;
- высокая устойчивость к вибрациям компонентов контактной подвески, подвергающихся динамическим нагрузкам, таких, например, как струны;
- соблюдение допусков по положению контактного провода как при монтаже, так и в эксплуатации;
- проверка новых контактных сетей путем измерения высоты расположения и зигзага контактного провода и определения сил прижатия токоприемников с использованием современной измерительной техники и технологий, предусмотренных стандартом EN 50317;



- использование средств технической диагностики, позволяющих своевременно устанавливать любые отклонения от заданных параметров.

В соответствии с директивой ЕС 96/48 страны-члены Европейского союза согласились гармонизировать технические средства своих высокоскоростных железнодорожных линий, чтобы обеспечить их эксплуатационную совместимость в международных сообщениях. В разработанных соответствующими инстанциями ЕС Технических спецификациях интероперабельности (Technical Specifications for Interoperability, TSI) [1] определены связанные с этим основные требования к инфраструктуре и подвижному составу. Страны-члены ЕС должны ввести требования TSI в национальное законодательство, чтобы проектируемые и строящиеся высокоскоростные линии соответствовали этим требованиям. В числе прочих, решением ЕС 2002/733, утверждены спецификации на системы тягового электроснабжения (TSI Energy), в том числе на контактную сеть. В рамках ЕС созданы так называемые уполномоченные органы (notified bodies) для оценки и сертификации технических средств железнодорожного транспорта в контексте TSI.

Развитие скоростного движения на железных дорогах, предъявляющего жесткие требования к качеству токопровода, явилось катализатором научных и практических поисков конструктивов контактной подвески, на основе которых можно значительно улучшить свойства существующих подвесок при их модернизации.

Интересно, что надежный токопровод при высоких скоростях движения, как показывает опыт рекордных скоростных поездок во Франции (515,3 км/ч в 1990 г.), Японии (443 км/ч в 1996 г.), Германии (407 км/ч в 1988 г.), может быть обеспечен при обычных цепных рессорных компенсированных контактных подвесках путем значительного (в 2-3 раза) повышения натяжения контактного провода и несущего троса. Это требует создания высокопрочных проводов и тросов, рассчитанных на натяжение 20÷30 кН, без снижения их износо- и термостойкости и повышения электрического сопротивления, что может быть достигнуто легированием (серебро, хром, цирконий) материала провода или переходом на биметаллические контактные провода (сталь-алюминий, сталь-медь). За рубежом существует много модификаций таких проводов. Начаты их разработка и освоение в России.

Повышение натяжения проводов и тросов не только обеспечивает улучшение качества токопровода, но и дает возможность совершенствовать конструкцию контактной сети в целом: строительная высота подвески может быть уменьшена до 1,4 м при длине пролетов до 70 м. Это позволяет уменьшить высоту опор контактной сети и расход материалов на изготовление струн и облегчает размещение контактных подвесок в искусственных сооружениях.

В целом, система тягового электроснабжения XXI века по техническому оснащению и технологиям работы будет саморегулируемой, интеллектуализированной, обеспечивающей оптимальный процесс энергообеспечения тяги и взаимосогласованную работу всех тяговых подстанций, линий и находящегося на ней электроподвижного состава.

Целью данной статьи является оценка технических возможностей существующих контактных подвесок, применяемых на железных дорогах Украины, для обеспечения надежного токопровода при внедрении скоростного движения.

#### **Проблемные вопросы высокоскоростных контактных подвесок**

Для обеспечения нормальных условий токопровода требуется наличие постоянного надежного контакта между токоприёмником и контактным проводом.

Выдержать это условие при небольших скоростях движения электропоездов не представляет труда. При больших скоростях, когда сильно возрастает влияние инерции токоприёмника и контактной подвески, давление токоприёмника на провод изменяется в значительных пределах. В отдельные моменты движения давление токоприёмника может сильно повышаться, что вызывает увеличение отжатия контактного провода и может привести к механическим повреждениям контактной сети (подбой фиксаторов, врезных изоляторов на воздушных промежутках и т. п.). В другие моменты, наоборот, давление токоприёмника на провод может значительно снижаться, доходя в отдельных случаях до нуля. При этом происходят отрывы токоприёмника от провода, сильное искрение и, как следствие этого, поджоги провода и усиленный его износ.

Давление токоприёмника вызывает отжим (подъём) контактного провода. Величина отжима контактного провода зависит от величины давления токоприёмника и от конструкции самой подвески (типа подвески), количества

проводов, их натяжения, длины пролёта, а также от положения токоприёмника в пролёте.

Высокоскоростное движение накладывает особые требования на надёжность систем передачи энергии, главным образом в контексте повышенных скоростных и мощностных параметров. Так, при движении высокоскоростного электроподвижного состава в целях обеспечения надёжного токосъёма зачастую поднимают два токоприёмника.

Наилучшие условия токосъёма получаются в том случае, когда токоприёмник при его движении вдоль провода сохраняет одно и то же положение по высоте, причём давление его на провод остаётся всё время постоянным. Для этого контактная подвеска должна удовлетворять следующим требованиям:

- контактная подвеска должна обладать возможно более равномерной эластичностью, т. е. одно и то же давление токоприёмника должно вызывать во всех точках пролёта одинаковые отжимы контактных проводов, в подвеске не должно быть отдельных точек, где эластичность контактного провода нарушается («жёсткие» точки);

- контактные провода должны располагаться на всём протяжении по возможности на одной и той же высоте от головки рельса, изменения высоты контактных проводов в пролёте должны быть по возможности меньшими (в отдельных случаях, изменение высоты контактных проводов в пролёте может быть увязано с изменением эластичности контактной подвески);

- контактная подвеска должна обладать достаточной стабильностью по отношению к токоприёмнику, т. е. перемещения (отжимы) подвески под действием на неё токоприёмника должны быть относительно небольшими, равномерными по длине пролёта, для этого масса подвески и, в частности, масса частей подвески, непосредственно связанных с контактным проводом, должна быть достаточно велика, и натяжение проводов, входящих в подвеску, должно быть возможно большим.

#### **Анализ и сравнение нормативной базы Евросоюза и Украины по вопросам строительства контактных подвесок высокоскоростных железнодорожных линий**

Комиссия Европейского Сообщества на выполнение Директивы 96/48/ЕС от 23 июля 1996 года, решением Комиссии от 6 марта 2008 г. (2008/57/ЕС) утвердила TSI Energie - «Технические спецификации интероперабельности» подсистемы «Энергия» для высокоскоростной же-

лезнодорожной системы (далее TSI Energie). Данный документ распространяется на проектирование новых линий или модернизацию существующих. Эта TSI не навязывает использование конкретных технологий или технических решений, за исключением, когда это необходимо для совместимости трансевропейской высокоскоростной железнодорожной системы. Для поощрения инновационной деятельности в сфере принятия новых технических решений TSI подлежат периодической ревизии и пересмотру.

В соответствии с Приложением I Директивы 2008/57/ЕС высокоскоростные железнодорожные линии классифицированы следующим образом:

I категория - специально построенные высокоскоростные линии оборудованные для обращения со скоростью 250 км/ч и более;

II категория - специально модернизированные высокоскоростные линии, оборудованные для движения со скоростью порядка 200 км/ч;

III категория - специально модернизированные высокоскоростные линии или линии специально построенные для высокой скорости, которые имеют особые характеристики, как результат топографических, экологических, рельефных или градостроительных ограничений на которых скорость должна быть адаптирована индивидуально [1].

В Украине аналогичного TSI документа нет, поскольку проблемы интероперабельности железнодорожного транспорта на постсоветском пространстве в силу исторических причин развития, в целом не существовало. Однако, существует межгосударственный документ, который регламентирует вопросы строительства контактной сети скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий. Это памятка ОСЖД Р610-7 «Общие технические требования к системам тягового электроснабжения постоянного и переменного тока скоростных и высокоскоростных линий» [2]. Для анализа возьмем TSI Energie, Р610-7 и основной нормативный документ, касающийся контактных подвесок: «Правила устройства и технического обслуживания контактной сети электрифицированных железных дорог» ЦЕ-0023, утвержденные приказом Укрзалізничниці от 20.11.2007 г. № 546Ц [3].

В нормативном документе ОСЖД Р610-7 участки железных дорог классифицируются следующим образом (см. табл.1). В основу классификации положены исходные данные по "Параметрам объектов инфраструктуры на наиболее

важных с международной точки зрения железно-дорожных линиях" (документ МСЖД ECE /TRANS/63 page 85 Приложение II).

Сравнивая категории скоростных линий в TSI Energie и P610-7 можно сделать вывод, что 1 категории ТСИ соответствует категория В1 ОСЖД, соответственно 2 категории – В2, 3 ка-

тегории - А2. Соответственно, подход в Украине для определения высокоскоростных и скоростных линий, в целом, соответствует TSI Energie.

Сравнение параметров габаритов контактных подвесок приведено в табл. 2.

Таблица 1

**Классификация электрифицированных магистралей линий и участков железных дорог скоростного и высокоскоростного движения**

Условия создания скоростной линии		Существующие линии, А		Новые линии, В	
		A1	A2	B1	B2
		С ограниченными возможностями модернизации под скоростное движение	С технико-экономической обоснованной возможностью модернизации под скоростное движение	Предназначены исключительно для пассажирских перевозок	Предназначены для смешанных пассажирских и грузовых перевозок
Расчетная (номинальная) скорость, км/ч		160	200	300	250
Максимальная скорость движения (на отдельных участках)		180	220	350	280
Класс линий		Скоростная (СМ)		Высокоскоростная (ВСМ)	
Рекомендуемая система тягового электро-снабжения	Действующие ж. д линии:	Существующая система (переменный, постоянный ток) Переменный ток 25 кВ 50Гц			
	а)электрифицированные; б)электрифицируемые				
	Вновь сооружаемые			Переменный ток 25 кВ 50 Гц, 2х25 кВ	

Таблица 2

**Сравнение параметров габаритов контактных подвесок**

Наименование	Категория 1	Категория 2	Категория 3	В Украине
Номинальная высота к/провода (мм)	5080 -5300	5000 - 5500	AC 5000-5750 DC 5000-5600	5750-6800
Мин. высота к/провода (мм)	-----	AC - 4950 DC - 4900		AC- 5675 DC - 5550
Макс. высота к/провода (мм)	-----	AC - 6000 DC - 6200		6800
Уклон к/провода	Нет уклонов		<0,001	<0,001
Отклонение	< 0,4 м			< 0,5 м

Как видно из сравнительной таблицы, габариты высоты контактного провода стран ЕС немного меньше чем в Украине, в связи с отличиями в габаритах подвижного состава и габаритов приближения строений. Но все же, по номинальному значению высота контактного провода приблизительно согласуется со значениями TSI. По другим основным параметрам: допустимому уклону контактного провода, отклонению контактного провода от оси пути требования TSI более жесткие.

**Основные типы контактных подвесок используемых в высокоскоростном движении стран-членов Европейского сообщества**

Для общеевропейской сети совместимых между собой железных дорог необходима контактная сеть, удовлетворяющая требованиям Директивы 2008/57/ЕС и спецификаций по технико-эксплуатационной совместимости TSI Energy различных систем. Контактная сеть типов SICAT S1.0 и SICAT H1.0 была создана и испытана согласно указанным документам и сопутствующим европейским стандартам EN, а

© Яндович В. Н. и др., 2014

также в расчете на совместную работу с разными системами тягового электроснабжения, в разных условиях окружающей среды и с учетом соответствия разным проектным нормативам. Опыт эксплуатации контактной сети этих типов показал их применимость [4].

Конструкции контактной сети указанных выше типов были созданы компанией Siemens Transportation Systems с использованием программ математического моделирования, описывающих взаимодействие между токоприемниками и контактным проводом и позволяющих, в частности, оценить силовые параметры этого взаимодействия. Одной из целей в ходе проектирования была минимизация затрат как

на изготовление конструктивных элементов и монтаж контактной сети, так и на ее техническое обслуживание и ремонт, т. е. суммарных затрат жизненного цикла.

Контактная сеть двух указанных типов должна быть приспособлена к использованию на открытых участках линий, в тоннелях, а также при всех системах электроснабжения переменного тока. Кроме того, спецификации TSI Energy и связанный с ними европейский стандарт EN 50367 регламентируют требования совместимости контактной сети с электроподвижным составом (конкретнее - с токоприемниками), применяемым на железных дорогах сопредельных стран.

Таблица 3

Технические требования к контактной сети типов SICAT S1.0 и SICAT H1.0

Параметр	SICAT S1.0	SICAT H1.0
Напряжение переменного тока, кВ	15 или 25	
Ток, А	600	850
Максимальная скорость движения поездов, км/ч	230	350
Сила прижатия, токоприемника Н	Согласно статье 4.2.15 спецификаций TSI Energy	
Тип токоприемника	Euro, DB	
Эластичность, мм/Н	1,0	0,5
Постоянство эластичности, %	20	15
Максимальное поперечное смещение, мм	550	400
Скорость распространения волны, км/ч	330	500
Номинальная высота подвешивания контактного провода над УГР, мм	5000-5500	5080-5300
Усредненная сила прижатия, Н	120	170

Так как положения спецификаций TSI Energie относятся только к условиям движения поездов со скоростью порядка 320 км/ч, именно это значение максимальной скорости было принято в качестве критериального для контактной сети типа SICAT H1.0, хотя ее конструкция подходит и для скорости до 350 км/ч. Конструкция контактной сети типа SICAT S1.0 разработана применительно к линиям со скоростью движения поездов до 230 км/ч, что соответствует скоростным параметрам линий категории 2, но контактную сеть этого типа можно использовать и на линиях категории 3.

Кроме этих подвесок, широко применяемыми типами контактных подвесок для скоростного движения (160 км/ч и выше) являются подвески Re 160, Re 200, Re 250, Re 330.

В табл. 4 дано сравнение параметров подвесок SICAT H 1.0 и Re 330 на открытых участках и для подвесок в тоннелях.

Из вышеприведенного видно, что при повышении проектной скорости подвесок необходимо:

1. Увеличить натяжение контактного провода, для ликвидации стрелы провеса, со значений 10 кН у подвесок Re 160, 200 до 15 кН Re 250 и 21кН подвесок Re 330, SICAT H 1.0. Соответственно, для этого необходимо увеличить сечение со 100 мм<sup>2</sup> до 150 мм<sup>2</sup> и марку контактного провода с медного (Re 160, 200) до низколегированных серебром (Re 250), магнием (Re 330, SICAT H1.0).

2. Уменьшить пролет с 80 м (Re 160, 200) до 65 м (Re 250, Re 330, SICAT H1.0).

3. Увеличить натяжение несущего троса с 10 кН (Re 160, 200) до 15 кН (Re 250), до 21 кН (Re 330,

SICAT H1.0), увеличить сечение несущего троса (50-120 мм<sup>2</sup>) в зависимости от токовых нагрузок.

4. Увеличить длину и натяжение рессорного троса с 12 м, 2кН (Re 160) до 18м и натяжением 2,3- 3,5 кН (Re 250, Re 330, SICAT H1.0).

Таблица 4

**Сравнение параметров подвесок SICAT S1.0 и Re 330 на открытых участках и в туннелях**

Параметр	Тип подвески		Тип подвески в туннелях	
	SICAT H 1.0	Re 330	SICATH1.0	Re 330
Контактный провод				
Состав, марка	CuMg0,7, RiM 120			
Натяжение контактного провода, кН	27			
Высота расположения, м	5,3			
Зигзаг, м	± 0,3			
Несущий трос				
Марка	Bz II 120			
Сила натяжения, кН	21			
Рессорный трос				
Марка	Bz II 35		нет	
Сила натяжения, кН	3,5		нет	
Длина, м	22	18	нет	
Общие данные				
Длина пролетов, м	70	65	50	50
Конструктивная высота, м	1,6	1,8	1,5	
Максимальная длина анкерного участка, м	1 400	1 250	1 400	1 250
Сопряжение анкерных участков	Трехпролетное	Пятипролетное	Пятипролетное	
Длина пролетов в сопряжении, м	3 * 70	2 * 60 + 51 + 2 * 60	5 * 50	
Материал крепежной арматуры	Оцинкованная сталь St37/St52	Алюминиевый сплав F 31	Оцинкованная сталь St37/52	Алюминиевый сплав F 31
Материал консоли	F 31			
Опоры	центрифугированные бетонные типа NB		-----	
Фундаменты	С внутренней или наружной трубой	С внутренней трубой	-----	

Согласно п. 3 ОСЖД Р610-7 общие требования к контактным подвескам следующие:

- достижение равно эластичности подвески по всей длине пролета;

- повышенное натяжение контактных проводов, несущих и рессорных тросов;

- повышенные термо- и износостойкость, механическая прочность контактных проводов и тросов;

- минимизация по массе всех конструктивных элементов, непосредственно связанных с подвеской при повышенных требованиях к их прочности и долговечности; надежная защита этих элементов от всех видов коррозии на полный срок эксплуатации;

- строгое выдерживание всех проектных геометрических параметров подвески (высота, зигзаг и др.) при монтаже, наладке и в процессе всего периода эксплуатации.

За базовую для скоростного и высокоскоростного движения рекомендуется цепная полностью компенсированная контактная подвеска с повышенным натяжением контактных проводов и тросов, основные технические характеристики которой должны соответствовать данным таблицы 5. Допускается применение и других типов подвесок, обеспечивающих требуемые параметры скоростного токосяема.

**Допустимые пределы нажатия токоприемника на контактный провод при высокоскоростном движении**

TSI подсистемы Energie пунктами 4.2.14, 4.2.15 в соответствии с EN 50206-1 нормирует статические силы нажатия токоприемника на контактный провод. Проведем сравнение параметров нажатий, указанных в TSI, табл 6.



Таблица 5

Базовые параметры контактных подвесок для высокоскоростного движения согласно памятки

№ п/п	Параметр	КС-160	КС-200	КС-250	КС-300
1.	Базовая контактная подвеска: а) на перегонах и главных путях станций;	Компенсированная цепная контактная подвеска с удлиненным рессорным тросом			
	б) на станциях действующих электрифицированных линий	Допускается полукompенсированная контактная подвеска		_____	
2.	Номинальное натяжение, кН:				
	а) контактного провода;	10,0	12,0	15,0 20,0	15,0 20,0
	б) несущего троса;	16,0	18,0	3,5-4,0	3,5-4,0
	в) рессорного троса	2,5-3,0	3,0-4,0		
3.	Максимальная длина пролета, м	70,0	65,0	60	60
4.	Наибольшая длина анкерного участка, м	1500	1400	1300	1200
5.	Длина рессорного троса, м	16,0	18,0	18-20	20,0
6.	Сопряжение анкерных участков:	3-х	3-х	4-х	4-х
	а) не изолирующие;	пролетн.	пролетн.	пролетн.	пролетн.
	б) изолирующие;	4-х	4-х	5-ти	5-ти
		пролетн.	пролетн.	пролетн.	пролетн.
7.	Эластичность, мм/Н (не более):				
	а) под опорой;	0,5	0,3	0,2	0,15
	б) в середине пролета	0,6	0,4	0,3	0,2
8.	Коэффициент неравномерности эластичности (не более)	1,30	1,20	1,15	1,10
9.	Допуск на вертикальную регулировку высоты подвешивания контактного провода (не более), мм	±20	±15	±10	±5
10.	Допустимые основные уклоны контактного провода при изменении высоты его подвешивания (с переходными 2-3 участками с уклоном 0,5 от указанных)	0,003	0,002	0,001	0,001
11.	Максимальное отклонение высоты подвеса контактного провода от номинального, мм	±350	±250	±150	±150

Таблица 6

Параметры нажатий токоприемников

Система эл. снабжения	Номинальное значение, Н	Диапазон применения, Н
АС 25 kV, 50 Hz; 15 kV, 16,7 Hz	70	60-90
DC 3 kV	110	90-120
DC 1,5 kV	90	70-110

Для токоприемников, принятых в Украине, допустимые диапазоны применения статических сил нажатия (70-120 Н) целиком согласуются с принятыми в TSI.

Динамические параметры для системы тягового электроснабжения также установлены технической спецификацией TSI Energie. Они определены в соответствии с теоретическими кривыми для средней силы контактного нажатия и ее стандартного отклонения при максимальной скорости движения (рис.1).

Кроме того, в TSI Energie содержатся допуски, регламентирующие частоту возникновения электрической дуги на токоприемнике. В то же время, в документе не приведены предельные значения сил контактного нажатия в местах с дефектами контактного провода.

© Яндович В. Н. и др., 2014

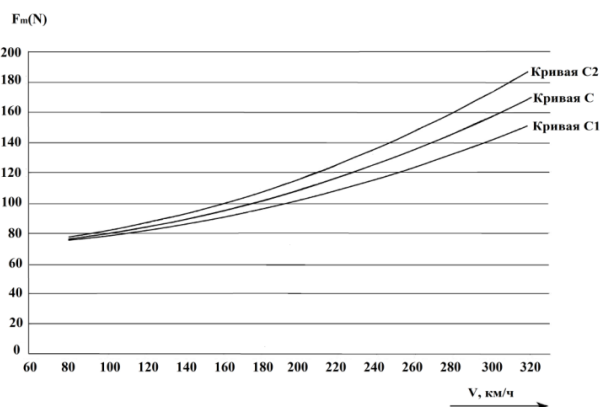


Рис. 1. Кривые для определения средней силы контактного нажатия и ее стандартного отклонения при максимальной скорости движения для АС-системы

В ходе приемки использовали предельные значения, известные из опыта эксплуатации других высокоскоростных линий. Измерения контактного нажатия проводили с учетом допустимой величины отжима контактного провода, регламентированной европейским стандартом EN 50317 и TSI Energie. Например для подвески Sicat HA в 2002 г. спецификацией TSI Energie была установлена предельная величина отжима, равная 100 мм. В более поздней редакции эта величина была снижена до 80 мм.

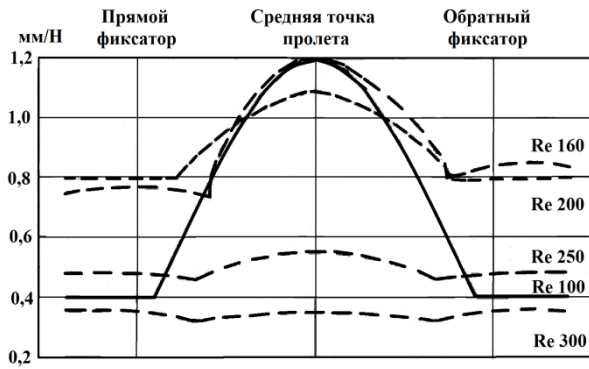


Рис. 2. Коэффициент эластичности стандартных контактных подвесок

Для контактных подвесок применяемых в Украине приблизительно соответствует кривая Re 100. Диапазон среднего значения силы контакта  $F_m$  для различных систем п. 4.2.15 [1].

Методы испытаний относятся к EN 50317:2002 и EN 50318:2002.  $S_0$  рассчитывается, при моделировании или измерении подвеса

контактной сети в постоянных условиях с одним или несколькими пантографами со средней силой контакта  $F_m$  при максимальной скорости линии. Конструкция контактной сети, рассчитана на прием максимальной и минимальной равнодействующих сил взаимодействия между токоприемником и контактным проводом с учетом аэродинамических эффектов, которые происходят на максимально допустимой скорости подвижного состава, следует заметить, что минимальная сила контакта всегда должна быть положительной, с целью исключения потери контакта токоприемника и контактного провода. Расчетные значения силы контакта между контактным проводом и токоприемником приведены в табл. 9.

Также пунктом 5.2.1.5 TSI Energie нормирована скорость распространения волны в контактом проводе при движении электроподвижного состава. Поскольку волны под действием сил давления пантографа на контактный провод при движении, имеют определенную скорость распространения, скорость работы линии должна быть не менее 70 % от скорости распространения волны.

В силу многих причин токоприемники на подвижном составе разных европейских стран имеют полозья разной длины: в Германии, Австрии и Испании 1950 мм, в Великобритании 1600 мм, во Франции и Швейцарии 1450 мм.

Таблица 7

Силы контакта для разных систем электроснабжения

Система электроснабжения	$F_m$ для скорости более 200 км/ч
AC	$60 \text{ Н} < F_m < 0,00047 \cdot v^2 + 90 \text{ Н}$
DC 3 kV	$90 \text{ Н} < F_m < 0,00097 \cdot v^2 + 110 \text{ Н}$
DC 1,5 kV	$70 \text{ Н} < F_m < 0,00097 \cdot v^2 + 140 \text{ Н}$

Примечание:  $F_m$ - среднее значение силы контакта,  $v$ - скорость движения

Таблица 8

Требования для динамических характеристик и качества контактных подвесок

Наименование	Категория 1	Категория 2	Категория 3
Space for steady arm uplift. Пространство для устойчивого подъема	$2 S_0$		
Mean contact force $F_m$ Среднее значение контактной силы $F_m$	See 4.2.15. Согласно п. 4.2.15		
Стандартное отклонение линии при максимальной скорости $\sigma_{max}$ (N)	$0,3 F_m$		
Процент искрения при максимальной скорости на линии, NQ (%) (минимальная продолжительность дуги 5 мс)	$\leq 0,2$	$\leq 0,1$ for AC systems $\leq 0,2$ for DC systems	$\leq 0,1$

Расчетные значения сил контакта между контактным проводом и токоприемником

Система	Скорость, км/ч	Контактное нажатие	
		максимальное, Н	минимальное, Н
AC	> 200	300	положительное
AC	>200	350	положительное
DC	>200	300	положительное
DC	> 200	400	положительное

Таблица 10

Зависимость бокового отклонения контактного провода от длины полоза токоприемника

Длина полоза токоприемника, (мм)	Максимальное боковое отклонение контактного провода от оси пути, (м)
1600	0,40
1950	0,55

Важным моментом является принятие единого профиля полоза для токоприемников переменного тока (рис. 3).

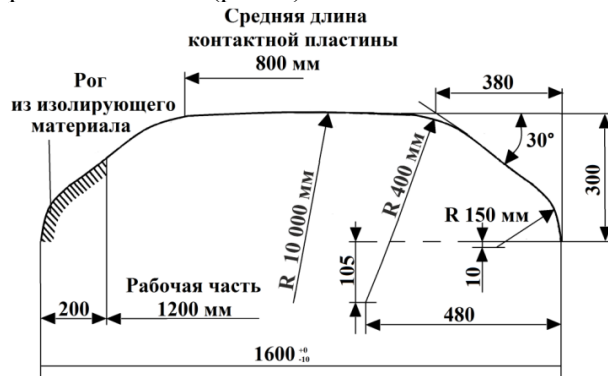


Рис. 3. Единый профиль токоприемника для европейских линий, электрифицированных на переменном токе

Содержащиеся в документе рекомендации в отношении конструкций контактных подвесок и токоприемников разработаны с учетом современного уровня техники и опыта эксплуатации высокоскоростных линий, накопленного в разных странах.

Предложенный документ является основой для всех новых разработок в рамках TSI. Разработаны также дополняющие его документы, основанные на нормах ЕС. В их рамках рабочей группой WGC9 созданы правила, содержащие технические критерии, которые используются для оценки взаимодействия токоприемников с контактными подвесками.

Дальнейшее развитие конструкций контактной сети для высокоскоростных железнодорожных линий получит развитие, ориентируясь на технические спецификации нового европантографа. Соответственно, максимальное бо-

вое отклонение контактного провода от оси пути следует принимать согласно п. 4.2.13.3 [1].

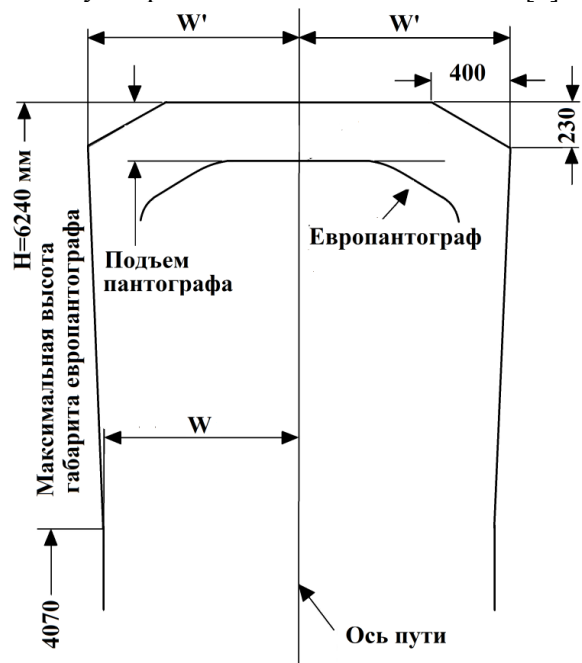


Рис. 4. Габарит европантографа и рабочей зоны

## Выводы

Проведенный сравнительный анализ показывает:

1. Существующий в Украине подход для определения высокоскоростных и скоростных линий, в целом, соответствует европейской практике. Следует отметить, что габариты высоты контактного провода стран ЕС немного меньше чем в Украине, в связи с отличиями в габаритах подвижного состава и габаритов приближения строений. Однако, по номинальному значению высота контактного провода приблизительно согласуется со значениями

TSI. По другим основным параметрам: допустимому уклону контактного провода, отклонению контактного провода от оси пути требования TSI более жесткие.

2. Для улучшения качества токосъема необходимо увеличить натяжение контактного провода для минимизации его стрелы провеса, увеличить натяжение несущего троса, увеличить длину и натяжение рессорного троса. При этом надежный токосъем при высоких скоростях движения может быть обеспечен при обычных цепных рессорных компенсированных контактных подвесках с применением высокопрочных проводов и тросов, рассчитанных на натяжение 20÷30 кН, без снижения их износо- и термостойкости и повышения электрического

сопротивления, что может быть достигнуто легированием (серебро, хром, цирконий) материала провода или переходом на биметаллические контактные провода (сталь-алюминий, сталь-медь).

3. Для токоприемников, принятых в Украине, допустимые диапазоны применения статических сил нажатия (70-120 Н) целиком согласуются с принятыми в TSI.

4. Дальнейшее развитие конструкций контактной сети для высокоскоростных железнодорожных линий должно быть ориентировано на применение единого габарита токоприемника с использованием современных токосъемных элементов.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Concerning a technical specification for interoperability relating to the 'energy' sub-system of the trans-European high-speed rail system и (notified under document number C(2008) 807) (Text with EEA relevance) (2008/284/CE).
2. ОСЖД Р610-8 «Общие технические требования к системам тягового электроснабжения постоянного и переменного тока скоростных и высокоскоростных линий».
3. Правила устройства и технического обслуживания контактной сети электрифицированных железных дорог, ЦЕ-0023, утвержденных Приказом Укрзалізничці от 20.11.2007г. №546 Ц.
4. Kießling, R. Puschmann, A. Schmieder: Contact lines for Electric Railways, Planning, Design and Implementation, 820 pages, MCC-Verlag, Erlangen 2001.

## REFERENCES

1. Concerning a technical specification for interoperability relating to the 'energy' sub-system of the trans-European high-speed rail system и (notified under document number C(2008) 807) (Text with EEA relevance) (2008/284/CE).
2. OSZhD R610-8 «Obshchie tekhnicheskie trebovaniya k sistemam tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo i peremennogo toka skorostnykh i vysokoskorostnykh liniy».
3. Pravila ustroystva i tekhnicheskogo obsluzhivaniya kontaktnoy seti elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog» TsYe-0023, utverzhdenykh Prikazom Ukrzaliznytsi ot 20.11.2007g. №546 C.
4. Kießling, R. Puschmann, A. Schmieder: Contact lines for Electric Railways, Planning, Design and Implementation, 820 pages, MCC-Verlag, Erlangen 2001.

Поступила в печать 17.06.2014.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

Внедрение скоростного и высокоскоростного движения требует решения целого ряда научно-технических проблем. В тяговом электроснабжении это создание новой контактной подвески, обеспечение условий надежного токосъема, обеспечение совместимости систем при организации скоростных транспортных коридоров и другое. В статье проведен сравнительный анализ применения контактных подвесок на скоростных магистралях Европы и Украины. Исследование выполнено по двум направлениям: технический анализ конструктивных параметров и сравнение существующей нормативной базы. Проанализированы характерные особенности контактных подвесок в странах ЕС и Украине, выявлены принципиальные различия и определены направления для дальнейшего развития конструкций контактной сети скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий. Произведена оценка технических возможностей существующих контактных подвесок для обеспечения надежного токосъема при внедрении скоростного движения. Основным акцент сделан на возможность обеспечения надежного токосъема. Показано, что существующая контактная подвеска, применяемая на железных дорогах Украины может использоваться для внедрения скоростного движения после проведения соответствующей модернизации. В то же время, для обеспечения условий интероперабельности, необходимо проводить работы по унификации отечественных токоприемников и токосъемных вставок. Для внедрения высокоскоростного движения технические возможности существующих контактных подвесок Украины недостаточны и необходимо проведение необходимого комплекса научно-конструкторских исследований, в том числе направленных на повышение качества токосъема.

**Ключевые слова:** контактная сеть, токосъем, высокоскоростное движение, интероперабельность, европантограф.

УДК 621.336

В. М. ЯНДОВИЧ (ОДЕСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ), В. Г. СИЧЕНКО, А. В. АНТОНОВ (ДНУЗТ)

Помічянська дистанція електропостачання, Одеська залізниця, вул. Енергетиків, 1, м. Помічна, Кіровоградської обл., Україна, 27030, тел.: (052) 532-72-35

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: [elsnz@mail.ru](mailto:elsnz@mail.ru), [a.v.antonov91@gmail.com](mailto:a.v.antonov91@gmail.com)

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОНТАКТНИХ ПІДВІСОК В КРАЇНАХ ЄВРОСОЮЗУ ТА УКРАЇНИ: ОРГАНІЗАЦІЯ НАДІЙНОГО СТРУМОЗНІМАННЯ

Впровадження швидкісного і високошвидкісного руху потребує вирішення цілого ряду науково-технічних проблем. В тяговому електропостачанні це створення нової контактної підвіски, забезпечення умов надійного струмознімання, забезпечення сумісності систем при організації швидкісних транспортних коридорів та інше. У статті проведено порівняльний аналіз застосування контактних підвісок на швидкісних магістралях Європи та України. Дослідження виконано за двома напрямками: технічний аналіз конструктивних параметрів і порівняння існуючої нормативної бази. Проаналізовано характерні особливості контактних підвісок в країнах ЄС і Україні, виявлені принципові відмінності і визначені напрямки для подальшого розвитку конструкцій контактної мережі швидкісних і високошвидкісних залізничних ліній. Зроблено оцінку технічних можливостей існуючих контактних підвісок для забезпечення надійного струмознімання при впровадженні швидкісного руху. Основний акцент зроблений на можливість забезпечення надійного струмознімання. Показано, що існуюча контактна підвіска, застосовувана на залізницях України може використовуватися для впровадження швидкісного руху після проведення відповідної модернізації. У той же час, для забезпечення умов інтероперабельності, необхідно проводити роботи по уніфікації вітчизняних струмоприймачів і струмознімальних вставок. Для впровадження високошвидкісного руху технічні можливості існуючих контактних підвісок України недостатні і необхідне проведення необхідного комплексу науково-конструкторських досліджень, у тому числі спрямованих на підвищення якості струмознімання.

**Ключові слова:** контактна мережа, струмознімання, високошвидкісний рух, інтероперабельність, європантограф.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.336

V. M. YANDOVICH (ODESKA RAILWAY), V. G. SICHENKO, A. V. ANTONOV (DNURT)

Pomichna Distance of Power Supply, Odeska Railway, 1 Energetics Street, Pomichna, Kirovograd region, Ukraine, 27030, tel.: (052) 532-72-35

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: [elsnz@mail.ru](mailto:elsnz@mail.ru), [a.v.antonov91@gmail.com](mailto:a.v.antonov91@gmail.com)

## THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE CATENARIES IN THE EUROPEAN UNION AND UKRAINE: THE ORGANIZATION OF A RELIABLE CURRENT COLLECTION

Introduction speed and high speed in railways is demanded solving a lot of scientific problems. There are creating a new contact line, providing reliability traction friction and compatibility systems for organization high speed in traction power supply. Comparing analyzes of using contact lines in countries of European Union and Ukraine are done in article. Study is provided in two areas. There are technical analysis of the design parameters and compare the existing regulatory framework. Characteristic features of contact lines in in countries of European Union and Ukraine was analyzed. Principal differences were founded and areas for further development were identified. Evaluation of the technical capabilities of existing contact lines to provide reliable traction friction in introduction high speed in railways was done. Existing contact lines which using in Ukrainian railways can be using for introduction high speed in railways after conducting the appropriate modernization. At the same time, we have to carry out work on the unification of domestic current collectors and current collectors elements to provide conditions for interoperability. Technical capabilities of the existing contact lines of Ukraine are insufficient for introduction high speed in railways. We have to do the necessary complex scientific and engineering research which will contribute improving the quality of traction friction.

**Keywords:** contact network, traction friction, high-speed motion, interoperability, europantograph.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

© Яндович В. Н. и др., 2014



## АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ИНФРАСТРУКТУРЫ НА УЧАСТКАХ С ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

### Введение

Мировой опыт показывает, что на участках с высокоскоростными и тяжеловесными поездами с достаточно большим электропотреблением применяется система тягового электроснабжения переменного тока 27,5 кВ, которая имеет очень широкую возможность маневра энергетической эффективностью в зависимости от размеров движения. Так в сравнении с обычной системой электротяги 27,5 кВ система с усиливающими и экранирующими проводами (ЭУП) повышает провозную способность в 1,4 раза, автотрансформаторная система 2х25 кВ – в 1,8 - 1,9 раза. В США, Канаде, ЮАР применяется нетрадиционная система 50 кВ, обеспечивающая при длине межподстанционной зоны 60 км и 10-минутном интервале весовые нормы поездов до 20 тыс. тонн. Дальнейшее увеличение провозной способности может быть достигнуто повышением уровня напряжения питающего провода выше традиционного напряжения 25 кВ – 35, 65, 94, 110 кВ. Возможность реализации систем с нетрадиционным повышенным напряжением в питающем проводе, а также автотрансформаторной системы 2х50 кВ практически полностью снимает ограничения пропускной способности по условиям электроснабжения.

Известно также, что одним из направлений повышения надёжности и эффективности тяговой сети переменного тока является её усиление, так как недостаточность сечения проводов приводит к увеличению потерь энергии и напряжения и связанное с последним показателем снижение скорости движения поездов. В настоящее время наибольшее распространение получили способы усиления тяговой сети за счет включения усиливающих и экранирующих проводов (ЭУП). Определённый эффект даёт также применение устройств ёмкостной компенсации.

Существуют несколько способов повышение энергетической эффективности электрической тяги постоянного тока [1]. Один из них -

это усиление системы тягового электроснабжения постоянного тока 3 кВ с помощью фидера постоянного тока повышенного напряжения 24 кВ и пунктов питания контактной сети на перегоне 24/3 кВ. При этом на тяговой подстанции устанавливается дополнительная выпрямительная установка 24 кВ. На пункте питания устанавливается преобразовательный модуль 24/3 кВ, состоящий из автономного инвертора и выпрямительного агрегата 3 кВ, а питающая линия прокладывается по опорам контактной сети

Резко повысить пропускную способность и эффективность электрической тяги постоянного тока позволяет уровень напряжения в тяговой сети постоянного тока 24 кВ [1, 2]. В том числе значительно увеличить расстояние между подстанциями, снизить сечение проводов тяговой сети, уменьшить потери электроэнергии в устройствах электроснабжения, полностью устранить несимметрию питающего напряжения. Всё это и отсутствие индуктивных потерь при постоянном токе может превзойти по эффективности все системы переменного тока.

Очередной виток научно-технического прогресса обусловлен бурным развитием силовой электроники и компьютерных технологий. Совершенствование системы электрической тяги и перспективы её развития предопределены необратимым процессом обновления всей системы преобразования энергии, затрачиваемой на перевозочный процесс. Применение преобразователей постоянного тока в трехфазный переменный ток, тиристорных преобразователей уровня напряжения постоянного тока, создание высокоэкономичных алгоритмов компьютерного управления преобразованием электроэнергии, замена коллекторных двигателей постоянного тока на бесколлекторные асинхронные трехфазного тока составляют основное направление технического перевооружения систем электрической тяги и в настоящее время широко используются в ряде промышленно развитых стран.

## Основная часть

Новые системы тягового электроснабжения требуют прокладки дополнительных проводов и использования многопроводных линий, поэтому очень важно создать методику расчета распространения электромагнитных колебаний вдоль многопроводных линий тягового электроснабжения, что позволит с высокой степенью точности обосновать их электромагнитную совместимость со смежными коммуникациями связи и устройствами железнодорожной автоматики.

Электромагнитная связь линий имеет место при наличии одновременного электрического и магнитного влияний между двумя или несколькими электрически длинными линиями. В электрически длинных линиях напряжения и токи не могут рассматриваться независимыми друг от друга. Они связаны друг с другом через волновое сопротивление соответствующей линии (подобно тому, как электрические и магнитные поля электромагнитных волн связаны друг с другом через волновое сопротивление пространства).

Является ли линия электрически длинной или короткой, определяется во временной и частотной областях по разным критериям [1]: во временной области линия считается электрически длинной, если время нарастания передаваемых по ней импульсов имеет один порядок с временем распространения импульса вдоль линии или даже меньше его, и тем самым напряжение и ток линии зависят от места, т.е.  $u = u(t, x)$  и  $i = i(t, x)$ ; в частотной области линия считается электрически длинной, если комплексные амплитуды импульсов напряжения и

тока зависят от расположения на линии, т.е.  $U = U(x)$  и  $I = I(x)$ . Этот эффект имеет место, если длина волны имеет один порядок с длиной линии или даже меньше ее.

Математическое описание электромагнитной связи в многопроводных системах зависит от очень многих условий, поэтому принципиальный подход вначале проиллюстрируем на двухпроводной системе. Затем формально этот подход распространим на  $(n+1)$  - проводную систему.

На рис. 1 показаны полевая и цепочечная модели двух параллельных линий с общим обратным проводом. Переменное магнитное поле  $H(x, t)$ , связанное с линейным током активного проводящего контура 1 (полезный сигнал), вернее, его поток, пронизывает пассивный соседний проводящий контур 2 и индуцирует там напряжение, которое вызывает в этом контуре индуктивный паразитный ток. Вследствие имеющейся между обеими линиями разности потенциалов существует переменное электрическое поле  $E(x, t)$  которое наводит в пассивной линии емкостный паразитный ток.

Отличие от чисто индуктивной и емкостной связей состоит в том, что при электромагнитной связи величины  $u$ ,  $i$ , а также  $E$  и  $H$  являются функциями места и времени и, кроме того, связаны между собой волновым сопротивлением соответствующей системы.

При выводе дифференциальных уравнений для напряжений и токов в связанных линиях рассмотрим вначале электрически короткий участок линий длиной  $\Delta x$  (рис. 1, б). Индуцирующее действие магнитного поля мешающей системы моделируется в схеме замещения взаимной индуктивностью  $L'_{12}\Delta x$ , действие электрического поля – емкостью связи  $C'_{12}\Delta x$ .

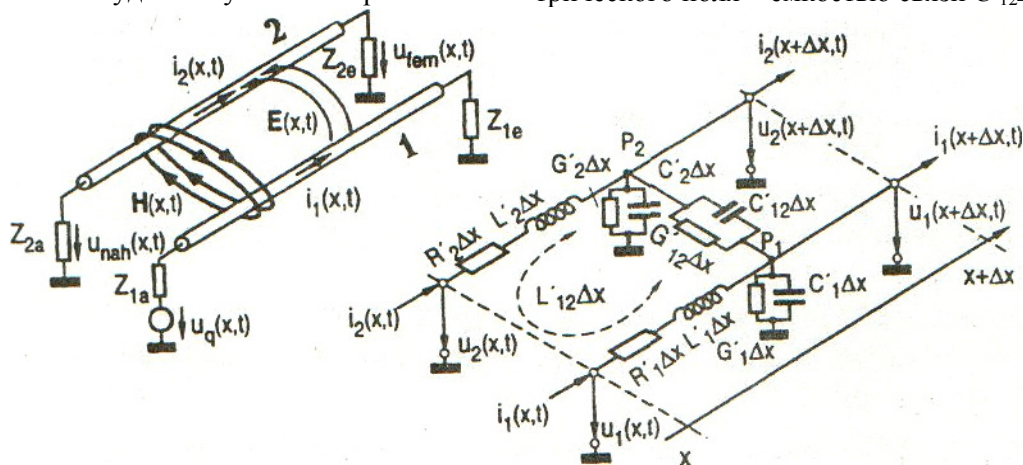


Рис. 1. Полевая (а) и цепочечная модель (б) электромагнитносвязанной двухпроводной системы с общим обратным проводом; 1 - линия, создающая помехи; 2 - линия, воспринимающая помехи;  
 $R' = R/l$ ,  $L' = L/l$ ,  $C' = C/l$ ,  $G' = G/l$  - удельные параметры линий

Применение второго закона Кирхгофа  $\sum u = 0$  к контуру, образованному каждой линией с ее обратным проводом, последующее деление на  $\Delta x$  и, наконец, осуществление предельного перехода  $\Delta x \rightarrow 0$  [1] дают:

для линии 1

$$-\frac{\partial u_1(x,t)}{\partial x} = R'_1 i_1(x,t) + L'_1 \frac{\partial i_1(x,t)}{\partial t} + L'_{12} \frac{\partial i_2(x,t)}{\partial t},$$

а для линии 2

$$-\frac{\partial u_2(x,t)}{\partial x} = R'_2 i_2(x,t) + L'_2 \frac{\partial i_2(x,t)}{\partial t} + L'_{21} \frac{\partial i_1(x,t)}{\partial t}, \quad (1)$$

Аналогично этому, применяя первый закон Кирхгофа к узлам  $P_1$  и  $P_2$ , получаем для линии 1 и для линии 2 соответственно:

$$-\frac{\partial i_1(x,t)}{\partial x} = (G'_1 + G'_{12}) u_1(x,t) + (G'_1 + G'_{12}) \frac{\partial u_1(x,t)}{\partial t} - G'_{12} u_2(x,t) - C'_{12} \frac{\partial u_2(x,t)}{\partial t},$$

$$-\frac{\partial i_2(x,t)}{\partial x} = (G'_2 + G'_{21}) u_2(x,t) + (G'_2 + G'_{21}) \frac{\partial u_2(x,t)}{\partial t} - G'_{21} u_1(x,t) - C'_{21} \frac{\partial u_1(x,t)}{\partial t}.$$

В этих уравнениях появляются частные производные, как по координате, так и по времени. Переходом из временной области в частотную. То есть, ограничением синусоидальных возбуждений и переходом к комплексным амплитудам, которые содержат коэффициент  $e^{j\omega t}$ , временная зависимость может быть исключена с помощью подстановок

$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow j\omega; \quad \frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \frac{d}{dx};$$

$$u_i(x,t) \rightarrow \dot{U}_i; \quad i_i(x,t) \rightarrow \dot{I}_i,$$

получаем системы обыкновенных дифференциальных уравнений в частной области:

для линии 1

$$-\frac{d}{dx} \dot{U}_1 = (R'_1 + j\omega L'_1) \dot{I}_1 + j\omega L'_{12} \dot{I}_2;$$

для линии 2

$$-\frac{d}{dx} \dot{U}_2 = j\omega L'_{21} \dot{I}_1 + (R'_2 + j\omega L'_2) \dot{I}_2; \quad (2)$$

или для линии 1

$$-\frac{d}{dx} \dot{I}_1 = [G'_1 + G'_{12} + j\omega(C'_1 + C'_{12})] \dot{U}_1 - (G'_{12} + j\omega C'_{12}) \dot{U}_2$$

для линии 2

$$-\frac{d}{dx} \dot{I}_2 = (G'_{21} + j\omega C'_{21}) \dot{U}_1 + [G'_2 + G'_{21} + j\omega(C'_2 + C'_{21})] \dot{U}_2 \quad (3)$$

Переходя к матричной записи, можно компактно записать при одновременном сохранении наглядности:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R'_1 + j\omega L'_1) & j\omega L'_{12} \\ j\omega L'_{21} & (R'_2 + j\omega L'_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G'_1 + G'_{12} + j\omega(C'_1 + C'_{12}) & -(G'_{12} + j\omega C'_{12}) \\ -(G'_{21} + j\omega C'_{21}) & G'_2 + G'_{21} + j\omega(C'_2 + C'_{21}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}$$

Матрица коэффициентов

$$\begin{bmatrix} (R'_1 + j\omega L'_1) & j\omega L'_{12} \\ j\omega L'_{21} & (R'_2 + j\omega L'_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

называется матрицей удельных сопротивлений  $[Z']$ , матрица коэффициентов

$$\begin{bmatrix} G'_1 + G'_{12} + j\omega(C'_1 + C'_{12}) & -(G'_{12} + j\omega C'_{12}) \\ -(G'_{21} + j\omega C'_{21}) & G'_2 + G'_{21} + j\omega(C'_2 + C'_{21}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

— матрицей полных удельных проводимостей  $[Y']$ .

При помощи этих сокращений системы линейных дифференциальных

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}' \\ \dot{Y}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix} \quad (7)$$

уравнений (4) могут быть еще более упрощены:

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}' \\ \dot{Z}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Повторное дифференцирование по координате и взаимная подстановка приводят к обыкновенным дифференциальным уравнениям 2-го порядка для напряжений  $U$  и токов  $I$ ,

$$\frac{d^2}{dx^2} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}' \\ \dot{Y}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y}' \\ \dot{Z}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} \\ \dot{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ \dot{I} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}' \\ \dot{Z}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z}' \\ \dot{Y}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{A} \\ \dot{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{U} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

После подстановки соответствующих величин и граничных условий по этим уравнениям могут быть определены напряжения и токи в любой точке, в частности, в начале и в конце обеих линий в частотной области [1].

Для многопроводной системы с  $n$  параллельными прямыми проводами и одним общим обратным матрицы удельных полных сопро-

© Бадер М. П., 2014

тивлений и проводимостей вышеприведенных систем дифференциальных уравнений (9) и (10) могут быть формально записаны в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R'_{11} + j\omega L'_{11}) & j\omega L'_{12} & \dots & j\omega L'_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ j\omega L'_{n1} & j\omega L'_{n2} & \dots & (R'_{nn} + j\omega L'_{nn}) \end{bmatrix}$$

и

$$\begin{bmatrix} \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (G'_{1k} + j\omega C'_{1k}) & \dots & -(G'_{n1} + j\omega C'_{n1}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -(G'_{n1} + j\omega C'_{n1}) & \dots & \sum_{i=1}^n (G'_{nk} + j\omega C'_{nk}) \end{bmatrix}$$

Электромагнитная связь отображается в матрицах  $[A]$  и  $[B]$ . Они, как правило, не являются диагональными матрицами, так что напряжение и ток одной линии зависят от напряжений и токов всех других линий. Разделение дифференциальных уравнений возможно с помощью модального анализа. Этот подход демонстрируется для уравнения (9). В предположении существования матрицы преобразования  $[T]$  линейным преобразованием с условием:

$$\begin{bmatrix} \dot{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{W} \end{bmatrix} \quad (11)$$

получают новые, друг от друга линейно независимые напряжения

$$\begin{bmatrix} \dot{W} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \dot{W}_1(x), \dots, \dot{W}_n(x) \end{bmatrix},$$

для которых справедливы известные уравнения [1] простой линии

$$\frac{d^2}{dx^2} \begin{bmatrix} \dot{W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Gamma}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{W} \end{bmatrix} \quad (12)$$

с диагональной матрицей

$$\begin{bmatrix} \dot{\Gamma}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\gamma}_1^2 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \dot{\gamma}_n^2 \end{bmatrix}.$$

Величины  $\gamma_1$  представляют собой известные из теории простой линии комплексные постоянные распространения. Если ввести в (9) преобразование, то получим:

$$\frac{d^2}{dx^2} \begin{bmatrix} \dot{W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{W} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

При этом должны соблюдаться соотношения

$$\begin{bmatrix} \dot{T} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Gamma}^2 \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \dot{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\Gamma}^2 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

что непосредственно следует из сравнения (12) и (13). Для определения элементов неизвестной матрицы преобразования  $[T]$  прежде всего нужно определить собственные значения матрицы  $[A]$  из характеристического уравнения

$$\text{Del} \left( \begin{bmatrix} \dot{A} \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} E \end{bmatrix} \right) = 0.$$

Матрица  $[E]$  представляет собой единичную матрицу.

Решение характеристического уравнения приводит к линейному уравнению  $n$ -ой степени, решения которого  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ , называются собственными значениями матрицы  $[A]$  и идентичны с квадратами постоянных распространения  $\gamma_1$ . Элементы матрицы преобразования  $[T]$  получают, например, путем применения правила Крамера [1].

Таким образом, с помощью модального анализа получают  $n$  новых волн напряжения, которые независимо друг от друга с принадлежащими им постоянными распространения движутся по проводной системе. Эти волны называют собственными волнами или модами системы. Продемонстрированный выше подход может быть применен и к (10). Таким образом, каждое состояние связанной проводной системы по напряжению и току может быть представлено наложением ее собственных волн.

Так как для каждой собственной волны справедливо волновое уравнение, то, как и для простой линии, система дифференциальных уравнений (12) может быть решена по экспоненциальному закону Даламбера для каждой собственной волны отдельно:

$$\begin{bmatrix} \dot{W} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-\gamma x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{K} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e^{+\gamma x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{K}_0 \end{bmatrix}$$

После определения векторов-столбцов прямой волны  $[K]$  и обратной волны  $[K_0]$  из граничных условий в началах линий получают путем несколько более длинных вычислений напряжения и тока в любом месте многопро-



водной системы в зависимости от напряжений и токов в началах линий,

$$\begin{aligned} \dot{U}(x) &= \frac{1}{2} \left[ \dot{T} \right] \left\{ \left[ e^{-\gamma x} \right] \left( \left[ \dot{T} \right]^{-1} \left[ \dot{U}(0) \right] + \left[ \dot{G} \right]^{-1} \left[ \dot{T} \right]^{-1} \left[ \dot{Z} \right] \left[ \dot{I}(0) \right] \right) + \right. \\ &+ \left. \left[ e^{+\gamma x} \right] \left( \left[ \dot{T} \right]^{-1} \left[ \dot{U}(0) \right] + \left[ \dot{G} \right]^{-1} \left[ \dot{T} \right]^{-1} \left[ \dot{Z} \right] \left[ \dot{I}(0) \right] \right) \right\}, \\ \dot{I}(x) &= \frac{1}{2} \left[ \dot{Z} \right]^{-1} \left[ \dot{T} \right] \left\{ \left[ e^{-\gamma x} \right] \left( \left[ \dot{T} \right]^{-1} \left[ \dot{U}(0) \right] + \left[ \dot{G} \right]^{-1} \left[ \dot{T} \right]^{-1} \left[ \dot{Z} \right] \left[ \dot{I}(0) \right] \right) - \right. \\ &- \left. \left[ e^{+\gamma x} \right] \left( \left[ \dot{T} \right]^{-1} \left[ \dot{U}(0) \right] + \left[ \dot{G} \right]^{-1} \left[ \dot{T} \right]^{-1} \left[ \dot{Z} \right] \left[ \dot{I}(0) \right] \right) \right\}. \end{aligned}$$

Эти уравнения называются также обобщенными телеграфными уравнениями  $(n + 1)$ -проводной системы. Первый член описывает бегущие по проводной системе, второй - обратные волны. Из наложения бегущих и обратных волн напряжения и тока получаются напряжения и токи в любом месте проводной системы.

При учете условий соединений в начале и конце линий из телеграфных уравнений при двух линиях могут быть определены возникающие на концах линии напряжения связи. Рассмотрение связанных многопроводных систем во временной области математически получается более сложным. По данному вопросу имеется обширная специальная литература, приведенная в [1].

В исходные данные вносятся расчетная схема замещения. Определяются для данной схемы конкретные значения параметров ветвей нагрузки и источников напряжения, а также характеристики проводов линий: тяговой сети; двухпроводной линии связи; трехфазной трехпроводной линии продольного электроснабжения напряжением 10 кВ; трехфазных фильтров.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость. Учебник для вузов / М. П. Бадер. М.: Транспорт, 2002. – 640 с.
2. Бадер М. П. О повышении энергетической эффективности преобразовательного оборудования тяговых подстанций / М. П. Бадер, Ю. М. Иньков // Электричество, 2008, № 2. – С. 60-65.

Поступила в печать 20.05.2014.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Так как к линиям продольного электроснабжения 10 кВ подключается большое количество однофазных потребителей, как правило, малой мощности (например, освещение переездов, электроснабжение линейно-путевых зданий на перегонах и остановочных пунктах, резервное питание сигнальных точек автоблокировки и ряд других потребителей), то на схеме замещения нагрузка может быть задана средними значениями элементов активно-индуктивного характера  $R_H$ ,  $L_H$  и условно приложенная в конце фидерного участка.

Зная токи и напряжения в любой заданной точке многопроводной линии тягового электроснабжения определяются наведенные напряжения в смежной линии и электромагнитное влияние тяговой сети и линий продольного электроснабжения на коммуникации связи и цепи железнодорожной автоматики.

## Заключение

Предложена методика расчета электромагнитных процессов в многопроводных линиях тягового электроснабжения. Выполненные исследования и проведенный анализ показали возможность моделирования распространения электромагнитных колебаний вдоль многопроводных линий тягового электроснабжения, которые позволяют определять не только токи и напряжения в любой заданной точке многопроводной линии, но и одновременно наведенные напряжения в смежной линии. Всё это позволяет с высокой степенью точности проводить обоснование электромагнитной совместимости тяговой сети и линий продольного электроснабжения с коммуникации связи и цепями железнодорожной автоматики.

## REFERENCES

1. Bader M. P. Elektromagnitnaja sovместimost' [Electromagnetic compatibility]. Moscow, Transport Publ., 2002. P. 640.
2. Bader M. P., In'kov Ju. M. O povыshenii jenergeticheskoy jeffektivnosti preobrazovatel'nogo oborudovaniya tјagovyh podstancij [On increasing the energy efficiency of the converter traction substations]. Elektrichestvo – Electricity, 2008, № 2, pp. 60-65.

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

Сформулированы требования и рассмотрена методика обоснования электромагнитной совместимости многопроводных линий тягового электроснабжения и элементов инфраструктуры на участках с высокоскоростным движением. Методика позволяет определять токи и напряжения в любой точке многопроводных линий тяговой сети. Проанализирована и показана возможность моделирования распространения электромагнитных колебаний вдоль многопроводных линий тягового электроснабжения, что позволяет с высокой степенью точности проводить обоснование электромагнитной совместимости тяговой сети и линий продольного электроснабжения с коммуникации связи и цепями железнодорожной автоматики.

© Бадер М. П., 2014



**Ключевые слова:** система тягового электроснабжения, высокоскоростное движение, энергоэффективность, электромагнитная совместимость, потери электроэнергии, элементы инфраструктуры, линии продольного электроснабжения, наведенные напряжения, коммуникации связи, цепи железнодорожной автоматики.

УДК 621.332

М. П. БАДЬОР (МІІТ)

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

## АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ІНФРАСТРУКТУРИ НА ДІЛЯНКАХ З ВИСОКОШВИДКІСНИМ РУХОМ

Сформульовані вимоги і розглянута методика обґрунтування електромагнітної сумісності багатопровідних ліній тягового електропостачання та елементів інфраструктури на ділянках з високошвидкісним рухом. Методика дозволяє визначати струми і напруги в будь-якій точці багатопровідних ліній тягової мережі. Проаналізована і показана можливість моделювання поширення електромагнітних коливань уздовж багатопровідних ліній тягового електропостачання, що дозволяє з високим ступенем точності проводити обґрунтування електромагнітної сумісності тягової мережі і ліній поздовжнього електропостачання з комунікації зв'язку і ланцюгами залізничної автоматики

**Ключові слова:** система тягового електропостачання, високошвидкісний рух, енергоефективність, електромагнітна сумісність, втрати електроенергії, елементи інфраструктури, лінії поздовжнього електропостачання, наведеної напруги, комунікації зв'язку, ланцюги залізничної автоматики.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Саєнко Ю. Л.*

UDC 621.332

M. P. BADER (MIIT)

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

## THE ANALYSIS AND THE SYNTHESIS OF THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF THE TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM AND INFRASTRUCTURE IN THE DISTRICTS WITH THE HIGH-SPEED TRAFFIC

The article defines the requirements and discusses the methodology justification electromagnetic compatibility of multiconductor lines of traction power supply and infrastructure in areas with high-speed. The methodology allows determining the currents and voltages at any point multiconductor lines traction network. Analyzed and the possibility of modeling of electromagnetic waves along the multi-lane line traction power supply that allows a high degree of accuracy, we justify the EMC traction network and power supply with longitudinal lines of communication links and chains of railway automatics.

**Keywords:** traction power supply system, high-speed, electromagnetic compatibility, loss of electricity, elements of infrastructure, lines of longitudinal power supply, induced voltage, communication of connection, chain of railway automatics.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Saenko Y. L.*

В. П. ЗАКАРЮКИН, А. В. КРЮКОВ (ИРГУПС)

Иркутский государственный университет путей сообщения, Кафедра электроснабжения железнодорожного транспорта, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия, 664074, тел./факс: (3952) 638345, эл. почта: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

## КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ «ДВА ПРОВОДА – РЕЛЬС»

### Введение

Системы электроснабжения железных дорог переменного тока обладают рядом особенностей, отрицательно влияющих на показатели качества электрической энергии. Эти особенности заключаются в следующем:

- нестационарный, резкопеременный характер тяговых нагрузок, приводящий к значительным отклонениям и колебаниям напряжения на шинах 6-10-35 кВ обмоток тяговых подстанций (ТП), питающих нетяговых и нетранспортных потребителей;
- несимметрия напряжения на шинах ТП за счет однофазного характера тяговой нагрузки;
- значительная генерация выпрямительными электровозами высших гармоник, усугубляемая однофазностью этих генераторов, при которой не подавляются гармоники, кратные трем;
- конструктивная несимметрия технологических ЛЭП, выполненных по схеме «два провода – рельс»;
- электромагнитное влияние контактной сети на смежные линии электропередачи; при этом магнитное влияние существенно проявляется на высших гармониках.

В статье рассматривается в основном последнее обстоятельство, имеющее существенное значение для линий «провод – рельс» (ПР) и «два провода – рельс» (ДПР).

### Постановка задачи

Линии автоблокировки и продольного электроснабжения подвержены электрическому и магнитному влияниям контактной сети (КС) переменного тока [1]. Электрическое влияние создает напряжение нулевой последовательности на проводах линий 6-10-35 кВ, искажает учет электрической энергии (ЭЭ) на головных участках технологических ЛЭП, выполненных по схемам ПР и ДПР [2], но не приводит к увеличению доли высших гармоник. Существенное возрастание уровня несинусоидальности в смежных линиях ПР и ДПР возможно из-за пропорциональности наводимого напряжения магнитного влияния частоте влияющего тока.

Первичную оценку вклада последнего фактора можно сделать следующим образом. Напряжение магнитного влияния тока  $I_v$  с частотой  $\omega = 2\pi f$  определяется законом электромагнитной индукции с учетом экранирующего действия рельсов [1]:

$$U_v = \omega M I_v \ell s_p,$$

$$\text{где } M_v = 10^{-4} \ln \left( \ell + \frac{6 \cdot 10^5}{a^2 \sigma f} \right), \text{ Гн/км – вза-}$$

имная индуктивность 1 км смежного провода и контактной сети, рассчитанная для гармоники с номером  $v$ ;  $a$  – ширина сближения, м,  $\sigma$  – удельная проводимость земли, См/м;  $\ell$  – длина смежного провода, км;  $s_p$  – коэффициент экранирования рельсами, в первом приближении равный 0.5.

Если аппроксимировать тяговый ток прямоугольными импульсами с амплитудой  $I_m$ , то для тока нечетной гармоники с номером  $v$  можно записать [1]

$$I_v = \frac{4I_m}{v\pi}$$

Эффективное напряжение, наводимое высшими гармониками, при этом равно

$$U_E = \sqrt{\sum_{v=3}^n U_v^2} = \frac{4I_m \omega \ell s_p}{\pi} \sqrt{\sum_{v=3,5,7,\dots}^n M_v^2} \quad (1)$$

В формуле (1) суммирование проводится только по нечетным гармоникам, а величина  $n$  не превосходит 21 из-за необходимости учета на более высоких гармониках эффектов распределенности параметров.

Из анализа (1) видно, что напряжение  $U_E$  сопоставимо с напряжением, наводимым током основной частоты. Кроме того, нужно ожидать серьезного различия уровней несинусоидальности линейных напряжений  $\dot{U}_{AC}$  и  $\dot{U}_{BC}$  между проводами и заземленной фазой С по сравнению с напряжением  $\dot{U}_{AB}$  между парой незазем-

© Закарюкин В. П., Крюков А. В., 2014

ленных проводов. Оценка несинусоидальности по формуле (1) при токе 300 А, длине линии 25 км, ширине сближения 7 м и проводимости земли 0.01 См/м дает значение коэффициента искажения кривой синусоидальности напряжения  $k_U = 13\%$ .

Обычно используется двухстороннее питание тяговой сети (ТС), приводящее к компенсации влияний отдельных участков ТС, кроме того, амплитуда токов гармоник падает с частотой несколько быстрее, чем обратная пропорциональность частоте. Эти соображения приводят к выводу о том, что  $k_U = 13\%$  является несколько завышенным значением. С другой стороны, несинусоидальность напряжений ДПР возникает как из-за гальванической связи с контактной сетью через шины 27.5 кВ подстанции, так и из-за магнитного влияния. Ввиду наличия двух причин несинусоидальности можно ожидать серьезно повышенного уровня гармоник в фазах линии ДПР.

### Методика моделирования

Уточненный анализ влияния КС на уровень высших гармоник в линиях ДПР можно провести с использованием разработанных в ИрГУПСе методов моделирования систем электроснабжения железных дорог [2...12] и программного комплекса Fazonord-Качество [13]. Комплекс позволяет проводить имитационное моделирование режимов СТЭ переменного тока (1×25 кВ, 2×25 кВ и новых типов) с одновременным расчетом высших гармоник, генерируемых электровозами и другими источниками несинусоидальности. Рассчитываемая электрическая система может включать в свой состав воздушные линии и контактные сети различной конфигурации, однофазные и многофазные трансформаторы с любым приемлемым на практике соединением обмоток, источники тока и ЭДС, балансирующие узлы, нагрузки в узлах сети и между ними. Токи гармоник электровоза при эффективном токе 150 А являются исходными данными при расчетах, которые проводятся с использованием визуальных компонент из набора элементов.

Методика расчетов мгновенных схем, позволяющая учесть однофазные источники тока гармоник и определить искажения синусоидальности напряжений на шинах потребителей, включает следующие положения:

- первоначальные расчеты проводятся на основной частоте с представлением нагрузок

величинами активных и реактивных мощностей;

- при определении режимов на высших гармониках нелинейные нагрузки моделируются источниками тока с заданием амплитуд в соответствии с правилами [14] и определением начальных фаз через фазу первой гармоники  $\psi_v = v\psi$ .

- в случае линий, имеющих заземленные тоководящие части (рельсы), а также при длине линии, превышающей 300/k (км), где  $k$  – номер гармоники, производится учет распределенности параметров путем составления цепочечных схем [2];

- активные и реактивные сопротивления рассеяния катушек трансформаторов пересчитываются пропорционально частоте;

- нагрузки для режимов высших гармоник замещаются последовательно соединенными резистором и индуктивным элементом с пересчетом реактивного сопротивления пропорционально частоте.

Представленный подход позволяет производить расчеты режимов систем электроснабжения железных дорог на основной частоте и частотах высших гармоник с учетом динамики движения поездов и взаимных электромагнитных влияний проводов многопроводных систем.

### Результаты моделирования и их обсуждение

Анализ влияния КС на качество ЭЭ проводился применительно к двухпутному участку железной дороги с электрификацией по системе 1х25 кВ (рис. 1). Межподстанционная зона (МПЗ) длиной 54 км между подстанциями ТП-Ч и ТП-Б получает питание по двухцепной ЛЭП 220 кВ от подстанций III типа по фазировке. Опорная тяговая подстанция ТП-Ч расположена вблизи подстанции энергосистемы 500/220 кВ. Продольное электроснабжение осуществляется по линии ДПР со стандартным расположением проводов. Один трансформатор 27,5/0,4 кВ подключен у поста секционирования на расстоянии 33,3 км от ТП-Ч, другой – в конце межподстанционной зоны. Подстанция ТП-Б характеризуется значительным энергопотреблением, в связи с чем в контактной сети протекает достаточно большой уравнивающий ток (около 60 А). Узлы 84, 85 отвечают точкам подключения двух контактных подвесок, узлы 116, 117 – ЛЭП ДПР, узел 135 – четырем объединенным рельсам. Расчеты проводились в двух вариантах: для консольного питания тяго-

вой сети со стороны ТП-Ч и для двустороннего питания МПЗ.

Для выявления влияния КС рассматривалась поездная ситуация с движением от подстанции ТП-Ч к ТП-Б только одного четного поезда массой 5000 т. Токовый профиль поезда при движении на МПЗ ТП Ч – ТП Б показан на рис. 2. МПЗ ТП Ч – ТП Б поезд проходит в интервале времени 93...150 мин.

На рис. 3 показано изменение напряжения на токоприемнике поезда при движении по

МПЗ с консольным питанием; напряжение понижается при удалении от питающей подстанции ТП-Ч.

Тяговая нагрузка консольной МПЗ приводит к значительным отклонениям напряжения на подстанциях ДПР. На рис. 4 показана динамика изменения фазных напряжений на шинах 0.4 кВ подстанции ТП ДПР 1, при отсутствии нагрузки на этой подстанции.

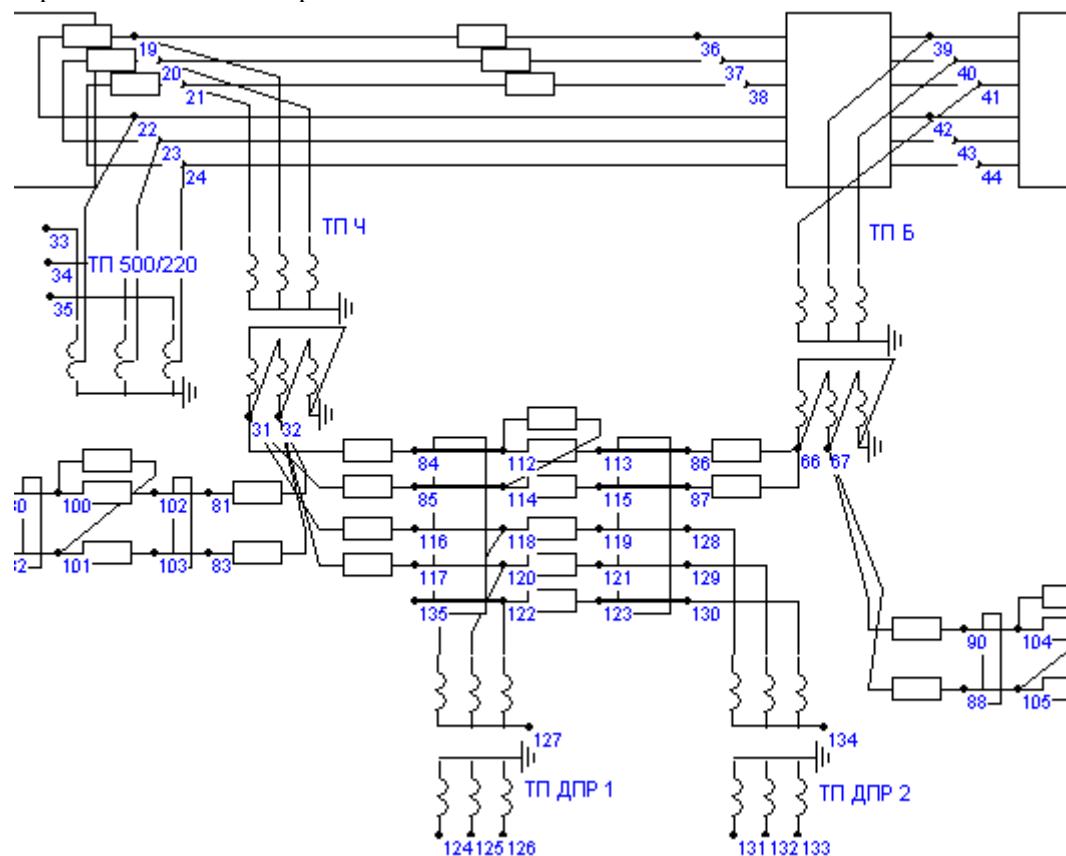


Рис. 1. Часть расчетной схемы участка

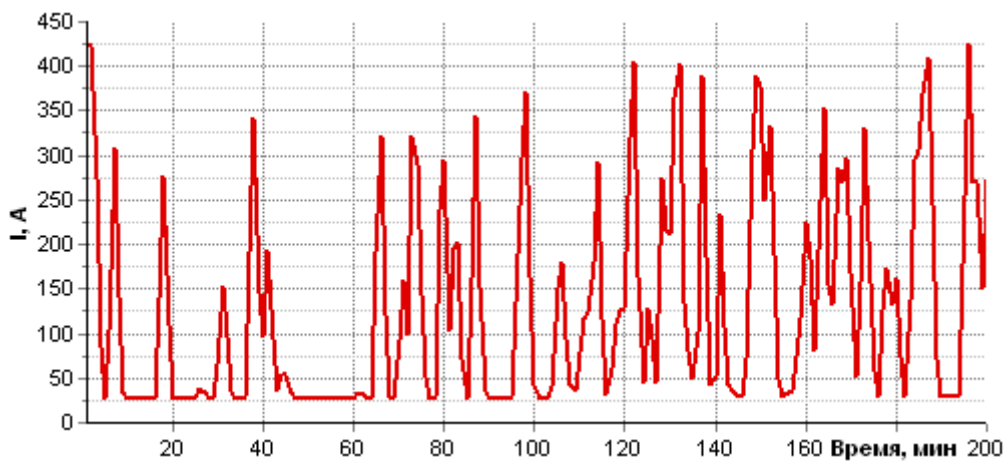


Рис. 2. Токовый профиль поезда

Наибольшее отклонение наблюдается для напряжения  $U_A$ , синфазного с напряжением, питающим тяговую нагрузку. Основной причиной отклонений является магнитное влияние КС, поскольку напряжение фазы А подстанции ДПР снижается на 12 %, в то время как напряжение фазы А тягового плеча ТП-Ч уменьшается только на 5 %. Отклонения напряжений  $U_B$  и  $U_C$  менее существенны. Значительные изменения напряже-

ний начинают проявляться ранее времени входа поезда на МПЗ (на 93-й минуте) из-за связи со смежной межподстанционной зоной через тяговый трансформатор.

Разные отклонения фазных напряжений приводят к существенной несимметрии. На рис. 5, 6 показана динамика изменения коэффициента несимметрии по обратной последовательности для подстанций, подключенных к ЛЭП ДПР.

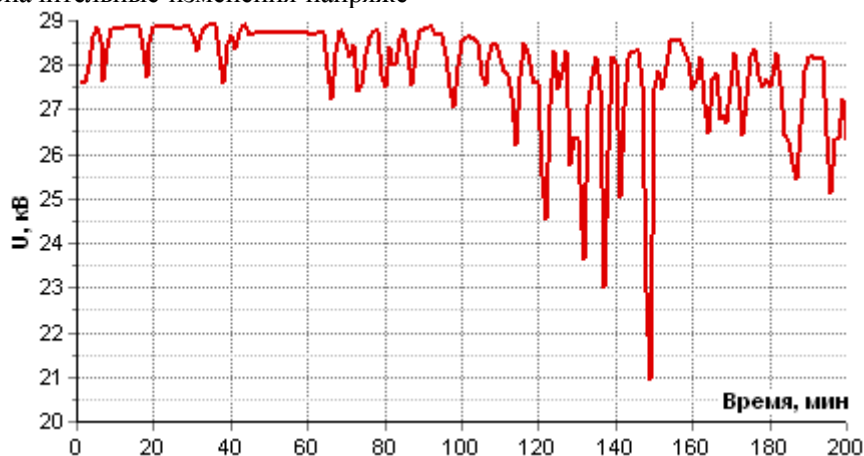


Рис. 3. Напряжение на токоприемнике поезда

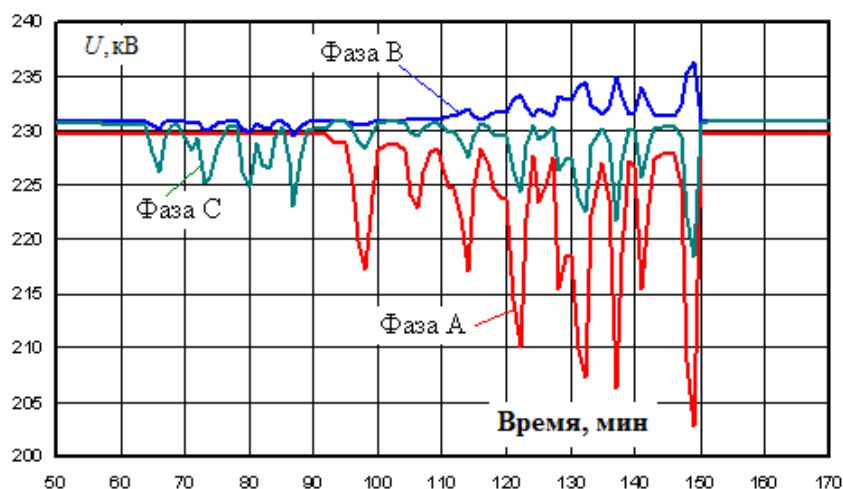


Рис. 4. Напряжение 0.4 кВ подстанции ТП-ДПР2

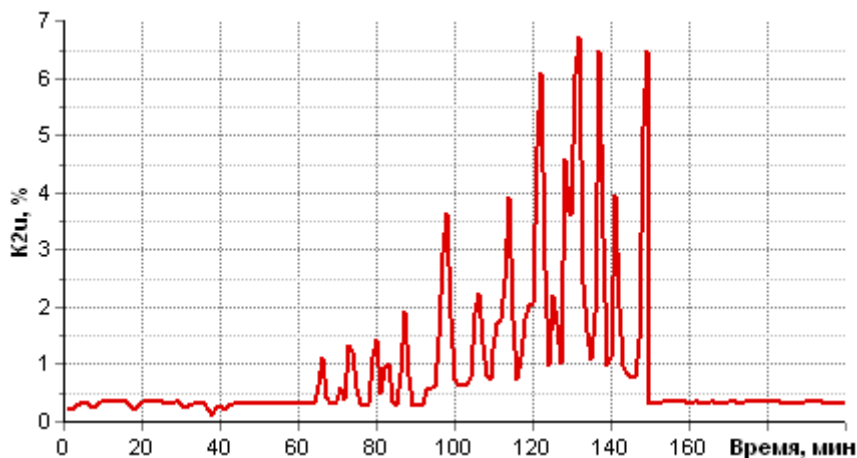


Рис. 5. Коэффициент несимметрии напряжения 0.4 кВ подстанции ТП-ДПР1



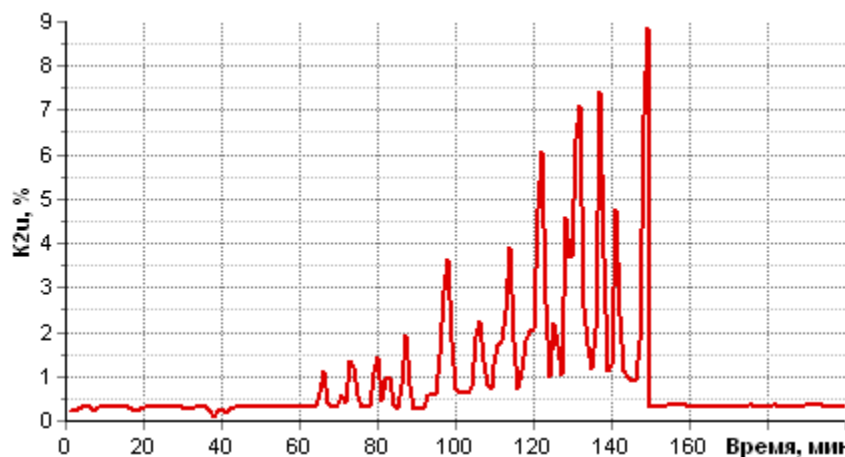


Рис. 6. Коэффициент несимметрии напряжения 0.4 кВ подстанции ТП-ДПР2

Увеличение доли высших гармоник при магнитном влиянии приводит к серьезному повышению несинусоидальности напряжений в линии ДПР. При консольном питании МПЗ коэффициент несинусоидальности фазы А достигает 17%, а фазы В – 8% (рис. 7). Значительная несинусоидальность кривой напряжения  $U_A$  связана с питанием от загруженной фазы трансформатора и синфазностью падения напряжения и наведенного напряжения от гармоник тока электровоза.

На рис. 8 показана динамика изменения коэффициентов несинусоидальности для фаз А и В в точке подключения ЛЭП ДПР к ТП-Ч. Наблюдается разница в максимумах  $k_U$  в начале и конце ЛЭП ДПР (11% для фазы А), вызванная вкладом магнитного влияния тяговой сети при токе 400 А.

Наличие нагрузки на линии ДПР незначительно снижает несинусоидальность напряжений на стороне 27,5 кВ и приводит к некоторо-

му выравниванию коэффициентов несинусоидальности по фазам на шинах 0,4 кВ.

При двустороннем питании тяговой сети МПЗ несинусоидальность снижается до 3,4% в максимуме, значительно уменьшаются отклонения напряжения и несимметрия.

### Выводы

Качество электрической энергии потребителей, питающихся от линий «два провода – рельс», в значительной степени зависит от схемы питания тяговой сети межподстанционной зоны. При консольном питании МПЗ и токах поезда до 450 А за счет магнитного влияния контактной сети отклонения напряжения достигают 12 %, коэффициент несимметрии – 9 %, а коэффициент несинусоидальности – 17 %. По этим причинам консольное питание МПЗ является нежелательным. При двустороннем питании МПЗ максимальная несинусоидальность снижается до 3...4 %, значительно уменьшаются отклонения напряжения и несимметрия.

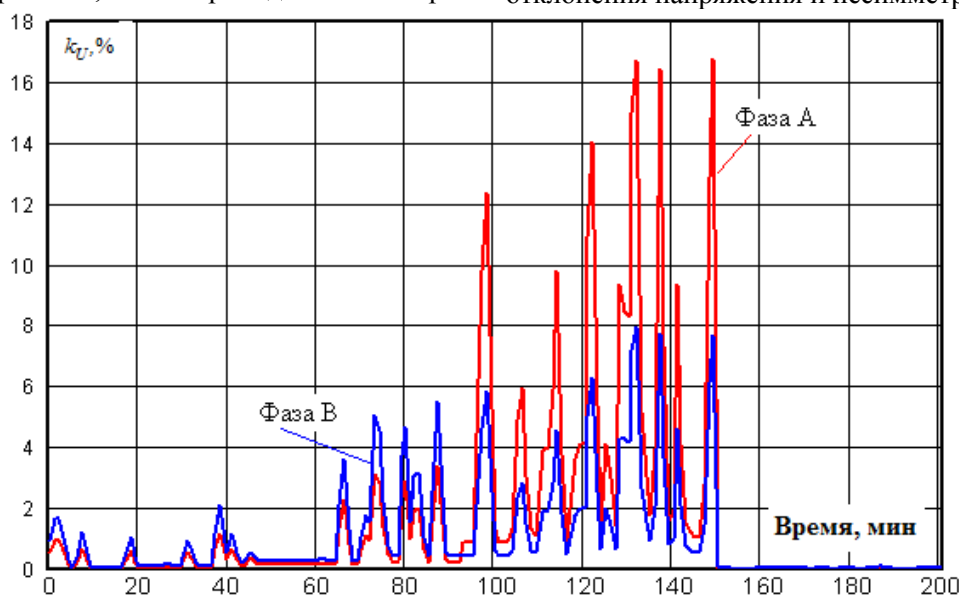


Рис. 7. Коэффициент искажения синусоидальности напряжения на шинах 27,5 кВ ТП-ДПР2

© Закарюкин В. П., Крюков А. В., 2014

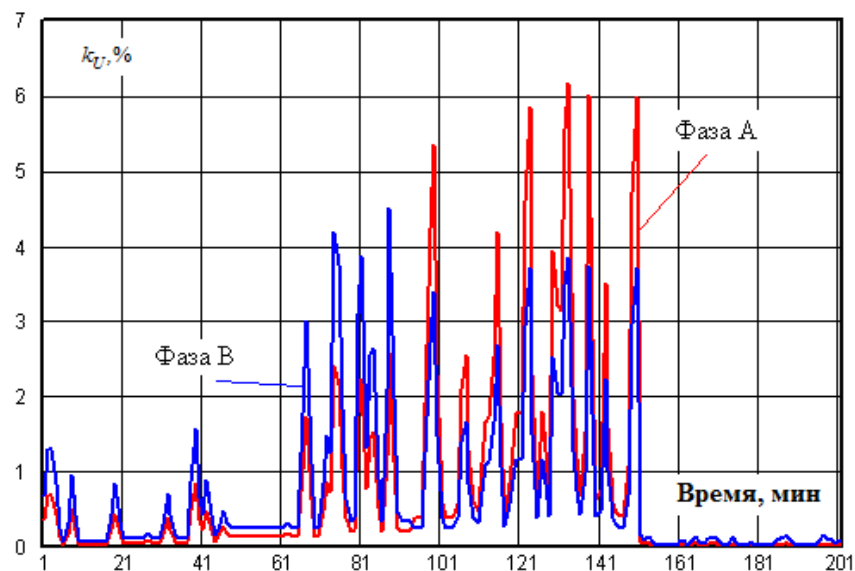


Рис. 8. Коэффициент искажения синусоидальности напряжения фаз А и В в точке подключения ЛЭП ДПР к ТП-Ч

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость [Текст] / М.П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем [Текст] / В.П.Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. – 273 с.
3. Крюков А.В. Управление режимами систем тягового электроснабжения [Текст] / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, С.М. Асташин. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения. 2009. – 124 с.
4. Крюков А.В. Моделирование электромагнитных влияний на смежные ЛЭП на основе расчета режимов энергосистемы в фазных координатах. [Текст] / А.В.Крюков, В.П. Закарюкин – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения, 2009. – 120 с.
5. Крюков А.В. Ситуационное управление режимами систем тягового электроснабжения [Текст] / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, Н.А. Абрамов – Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2010. – 123 с.
6. Крюков А.В. Моделирование систем электроснабжения с мощными токопроводами [Текст] / А.В. Крюков, В.П.Закарюкин, В.Ю. Соколов. – Иркутск: ИргУПС, 2010. – 80 с.
7. Крюков А.В. Электромагнитная обстановка на объектах железнодорожного транспорта [Текст] / А.В.Крюков, В.П.Закарюкин, Н.В. Буякова – Иркутск: ИргУПС, 2011. – 130 с.
8. Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: ИргУПС, 2011. – 170 с.
9. Крюков А.В. Математические модели для определения взаимных электромагнитных влияний в системах тягового электроснабжения [Текст] / А.В.Крюков, В.П.Закарюкин, Д.А.Кобычев. – Иркутск: ИргУПС, 2011. – 110 с.
10. Крюков А.В. Предельные режимы элек-

© Закарюкин В. П., Крюков А. В., 2014

## REFERENCES

1. Bader M.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost'* [Electromagnetic compatibility]. – Moscow, UMK MPS Publ, 2002. 638 p.
2. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhno-nesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem* [It is difficult to single-ended mode of electrical systems]. – Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2005. 273 p.
3. Kryukov A.V., V.P. Zakaryukin, S.M. Astashin. *Upravlenie rezhimami sistem tyagovogo elektrosnabzheniya* [Mode control systems, traction power supply]. – Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2009. 124 p.
4. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. *Modelirovanie elektromagnitnykh vliyaniy na smezhnye LEP na osnove rascheta rezhimov energosistemy v faznykh koordinatakh*. [Modeling of electromagnetic effects on adjacent transmission lines based on the operating conditions of the power system in the phase coordinates.] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2009. 120 p.
5. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Abramov N.A. *Situatsionnoe upravlenie rezhimami sistem tyagovogo elektrosnabzheniya* [Contingency management modes of traction power supply] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2010. 123 p.
6. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Sokolov V.Yu. *Modelirovanie sistem elektrosnabzheniya s moshchnymi tokoprovodami* [Modeling of power supply systems with powerful electrical conductors] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2010. 80 p.
7. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Buyakova N.V. *Elektromagnitnaya obstanovka na ob"ektakh zhelezнодорожного транспорта* [The electromagnetic conditions at the facilities of Railway Transport] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2011. 130 p.
8. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka*. [Methods of co-simulation of traction and external power supply AC railways.] Irkutsk, Irkutsk

троэнергетических систем [Текст] / А.В. Крюков. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 236 с.

11. Закарюкин В.П., Параметрическая идентификация линий электропередачи и трансформаторов [Текст] / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, М.С. Шульгин. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 96 с.

12. Оперативное управление в системах электро-снабжения железных дорог [Текст] / под ред. В.П. Закарюкин. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 129 с.

13. Пат. 2007612771 Fazonord-Качество – Расчеты показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения в фазных координатах с учетом движения поездов: Свидет. об офиц. регистр. программы для ЭВМ / Закарюкин В.П., Крюков А.В.; Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – Заре-гистр. 28.06.2007.

14. Правила защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети электрифицированных железных дорог переменного тока. М.: Транспорт, 1989. – 134 с.

Поступила в печать 24.03.2014.

Univ. Publ. 2011. 170 p.

9. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Kobychiev D.A. *Matematicheskie modeli dlya opredeleniya vzaimnykh elektromagnitnykh vliyaniy v sistemakh tyagovogo el-ektrosnabzheniya* [Mathematical models for determin- ing the mutual electromagnetic influences in traction power supply systems] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2011. 110 p.

10. Kryukov A.V. *Predel'nye rezhimy elektroener- geticheskikh system* [Limiting operating electric power systems] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2012. 236 p.

11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Shul'gin M.S. *Parametricheskaya identifikatsiya liniy el- ektoperedachi i transformatorov* [Parametric identifica- tion of lines and transformers] Irkutsk, Irkutsk Univ. Publ. 2012. 96 p.

12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ushakov V.A., Alekseenko V.A. *Operativnoe upravlenie v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Operational man- agement systems of railway power supply] Irkutsk, Ir- kutsk Univ. Publ. 2012. 129 p.

13. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Fazonord- Kachestvo – Raschety pokazateley kachestva elektroen- ergii v sistemakh elektrosnabzheniya v faznykh koordi- natak s uchetom dvizheniya poezdov* [Fazonord- Quality - The Quality of electricity supply systems in the phase coordinates with the movement of trains]. Patent, no 2007612771

14. *Pravila zashchity ustroystv provodnoy svyazi i provodnogo veshchaniya ot vliyaniya tyagovoy seti el- ektrifi-tsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka* [Terms protection devices wired and wire broadcasting from the influence of traction network elektrifi-fied rail- ways AC] Moscow, Transport Publ. 1989. 134 p.

Внутренний рецензент Сыченко В. Г.

Внешний рецензент Саенко Ю. Л.

Проведен численный и аналитический расчет влияния контактной сети на уровень высших гармоник в линиях «два провода – рельс (ДПР)». Показано, что качество электрической энергии потребителей, пита- ющихся от линий ДПР, в значительной степени зависит от схемы питания межподстанционной зоны. При консольном питании и токах контактной сети до 450 А за счет магнитного влияния контактной сети отклю- нения напряжения достигают 12 %, коэффициент несимметрии – 9 %, а коэффициент несинусоидальности – 17 % (при токах контактной сети, равных 300...400 А). При двустороннем питании межподстанцион- ных зон максимальная несинусоидальность снижается до 3...4 %, значительно уменьшаются отклонения напряжения и несимметрия.

**Ключевые слова:** системы тягового электроснабжения, линии «два провода-рельс», качество электриче- ской энергии.

УДК 621.331

В. П. ЗАКАРЮКІН, А. В. КРЮКОВ (ІРГУПС)

Іркутський державний університет шляхів сполучення, Кафедра електропостачання залізничного транспорту, вул. Чернишевського, 15, Іркутськ, Росія, 664074, тел./факс: (3952) 638345, ел. пошта: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

## ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ «ДВА ПРОВОДИ – РЕЙКА»

Проведений чисельний і аналітичний аналіз впливу контактної мережі на рівень вищих гармонік в лініях «два дроти – рейка (ДПР)». Показано, що якість електричної енергії споживачів, що харчуються від ліній ДПР, в значній мірі залежить від схеми живлення зони міжпідстанції.

При консольному живленні за рахунок магнітного впливу контактної мережі відхилення напруги досягають 12 %, коефіцієнт несиметрії – 9 %, а коефіцієнт несинусоїдальності – 17 % (при струмах контактної мережі, рівних 300...400 А). При двосторонньому живленні зон міжпідстанцій максимальна несинусоїдальність знижується до 3...4 %, значно зменшуються відхилення напруги і несиметрія.

**Ключові слова:** системи тягового електропостачання, лінії «два дроти-рейка», якість електричної енергії.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Саєнко Ю. Л.*

UDC 621.331

V. P. ZAKARYUKIN, A. V. KRYUKOV (IRSURT)

Irkutsk State Transport University, Department of railway transport power supply, 15 Chernyshevskaya Street, Irkutsk, Russia, 664074, phone/fax: (3952) 638345, e-mail: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

## THE ELECTRIC POWER QUALITY IN THE POWER LINES "TWO WIRES – RAIL"

The numerical and analytical approach of contact network influence on high harmonics level in the lines "two wires-rail (TWR)" is carried out. It is shown that quality of electric energy of TWR lines consumers substantially depends on a power supply of an railway zone. At console scheme due to contact network magnetic influence voltage deviations reach 12 %, asymmetry coefficient – 9%, and THD – 17% (at the current of a contact network equals 300...400 A). At bilateral scheme of railway zone the maximum level of harmonious distortions decreases to 3...4%, considerably decrease voltage deviations and asymmetry.

**Keywords:** traction power supply systems, "two wires – rail" line, electric energy quality.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Saenko Y. L.*

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ЭКОНОМИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Отрицательное влияние некачественной электроэнергии на эксплуатационные показатели электроустановок хорошо изучено [1, 2, 3]. Так известно, что при наличии искажений питающего напряжения особое внимание следует уделять системам электроприводов, поскольку это приводит к снижению их надежности и эффективности и, как следствие, к существенному снижению технико-экономических показателей многих производств. При снижении качества электроэнергии происходит увеличение потерь мощности в асинхронных двигателях (АД), что обуславливает их повышенный нагрев. А это, в свою очередь, способствует интенсивному старению изоляции и, в конечном итоге, ее пробоем.

Внезапный отказ электродвигателя, находящегося в технологической линии, может также привести к значительному экономическому ущербу. Кроме того, высшие гармоники и несимметричные режимы обуславливают недоиспользование средств компенсации реактивной мощности (батарей конденсаторов и синхронных компенсаторов), что приводит к снижению коэффициента мощности предприятия. Кроме того, даже при существующих тарифах, существенно увеличивается оплата электроэнергии, являющаяся доминирующей составляющей в общей сумме капитальных и эксплуатационных затрат большинства используемого на производстве электрооборудования [4].

Так в течение года электромашинный преобразователь малой и средней мощности потребляет объем электроэнергии, которая в 3-5 раз дороже самого двигателя. Вместе с тем, до 75% электроэнергии на производстве потребляется именно АД такой мощности (до 75 кВт) [5]. Поэтому снижение КПД двигателя вследствие того, что он питается некачественной электроэнергией даже на один процент, означает существенный экономический ущерб для любого предприятия.

В настоящее время показатели качества электроэнергии (ПКЭ) в сетях промышленных предприятий, такие как уровень напряжения, его частота, симметрия и синусоидальность нормируются

ГОСТом [6]. Несмотря на это, как показано в [7], отдельные ПКЭ, например, коэффициенты гармонических составляющих, во многих случаях существенно превышают предельно-допустимые величины (ПДВ).

Исходя из вышеизложенного у инженерно-технического персонала предприятий возникает необходимость использования средств по снижению отрицательного влияния некачественной электроэнергии на энергоэффективность производства. Возможными путями решения этой проблемы являются: применение «индивидуальных» LC-фильтров [8] для защиты особо ответственных электроприводов; применение «групповых» устройств для компенсации влияния некачественности питающего напряжения на уровне цеха, таких как силовые активные выпрямители, с возможной их интеграцией в существующие преобразователи для регулируемого электропривода; подавление искажений питающего напряжения в местах их возникновения, т.е. защита сети от первопричины. Допускается и отказ от принятия каких-либо мер, не считаясь с существенным уменьшением ресурса двигателя.

Каждый из указанных вариантов характеризуется конкретными стоимостью внедрения и ожидаемым экономическим эффектом. Тем не менее, несмотря на актуальность рассматриваемой проблемы, в Украине до сих пор нет единой методики принятия экономически обоснованных решений по уменьшению отрицательного воздействия некачественной электроэнергии на энергоэффективность производства.

Решить указанную проблему предлагается с помощью вычислительных методов, реализуемых на модели, которая по текущим показателям качества электроэнергии, зависящим от характера и мощности подключаемых к сети электропотребителей, значениям технических параметров и стоимости рассматриваемой электромеханической системы, позволяет спрогнозировать величину суммарного ущерба от эксплуатации последней в конкретных условиях. При этом вычисляются также капитальные и текущие затраты

© Кузнецов В. В., 2014



на реализацию всех технически возможных в данном случае мер защиты. Затем величина ущерба сопоставляется с затратами, что и позволяет определить экономически наиболее целесообразную из рассмотренных мер.

Препятствием на пути реализации такого алгоритма является сложность оценки электромагнитной (энергетической), тепловой и технологической составляющих указанного ущерба в условиях меняющихся ПКЭ. При этом известно, что последняя из них зависит не только от стоимости используемого на предприятии оборудования и вероятностных характеристик отказов АД, но и от многих других факторов [1].

В целом же технологический ущерб, связанный с уменьшением производительности и снижением качества выпускаемой продукции, полностью определяется спецификой производства и подлежит, при необходимости его учета, оценке по индивидуальным методикам. Учитывая же, что наиболее распространенные приводы насосных, компрессорных и вентиляционных систем приводят обычно к незначительному технологическому ущербу, остановимся только на их рассмотрении.

Оценка же электромагнитной составляющей ущерба менее проблематична, поскольку она связана с расчетом стоимости дополнительно потребляемой двигателем электроэнергии. Но и в этом случае методики определения ущерба довольно противоречивы. Так в соответствии с наиболее распространенной из них [1] дополнительные мощности, потребляемые АД вследствие несимметрии питающего напряжения и несинусоидальности потребляемого тока, рассчитываются по следующим зависимостям:

$$\Delta P_{\text{нсим}} = 2,41 \cdot k_n^2 \cdot \Delta P_{\text{ном}} \cdot \varepsilon_2^2 \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{нсин}} = \Delta P_{\text{ном}} \cdot k_n^2 \sum_v \left( \frac{U_v^2}{v} \right) (\sqrt{v} + \sqrt{v \pm 1}), \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{ном}}$  - потери в электродвигателе при допустимых ПКЭ;  $k_n$  - кратность пускового тока;  $\varepsilon_2$  - коэффициент обратной последовательности;  $U_v$  - напряжение v-й гармонической составляющей.

Здесь не учитывается то, что причиной увеличения потерь при питании электродвигателя несимметричной системой напряжений является наличие в токах составляющих не только обратной, но и нулевой (при соединении обмоток в треугольник) последовательности, не образующей вращающего момента. В то же время токи

этих последовательностей вызывают дополнительные нагрев обмоток и пульсации магнитного потока, которые приводят к потерям за счет перемагничивания стали магнитопроводов и вихревых токов в них. При этом считается, что при нормально допустимых значениях ПКЭ дополнительные потери равны нулю.

Известен и другой метод расчета энергетических параметров асинхронного электродвигателя при его работе в условиях некачественной электроэнергии [2, 8, 9], основой которого является модель АД, предполагающая использование произвольной формы питающее напряжение. В качестве примера на рис.1 приведено сопоставление результатов расчета электромагнитного ущерба от работы электродвигателя мощностью 45 кВт (асинхронный короткозамкнутый двигатель типа АИР 250М8, номинальное напряжение – 380 В, привод центробежного насоса), выполненного по формулам (1), (2) и на основе указанной модели.

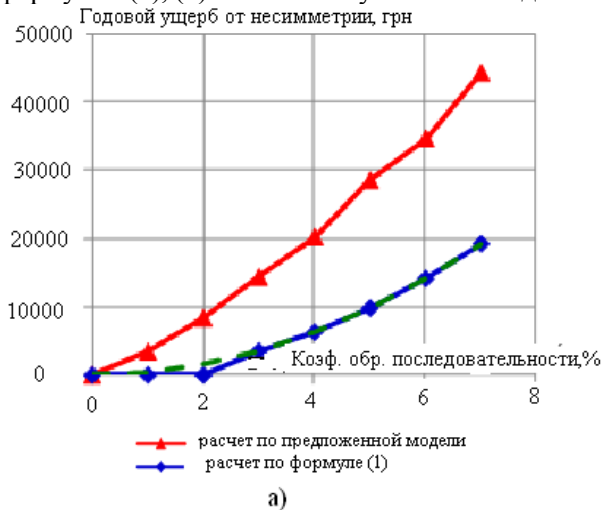


Рис. 1. Сопоставление электромагнитной составляющей ущерба, обусловленного несимметрией пита-

ющего напряжения (а) и его несинусоидальностью (б) для двигателя 45 кВт

Суть указанного подхода заключается в комбинированном использовании двух моделей: модели асинхронного двигателя, позволяющей рассчитать энергетические показатели АД в текущий момент времени при заданной форме питающего напряжения [2], и его динамической тепловой модели [10]. Основой последней является зависимость, позволяющая прогнозировать срок службы изоляции при периодически изменяющемся превышении температуры изоляции обмоток:

$$T = \Delta t \cdot \sum_{k=1}^M e^{-\beta \cdot \Delta \tau_k} \quad (3)$$

Здесь  $\beta = \frac{\ln 2}{\Delta \theta}$ ;  $M = \frac{T_H}{\Delta t}$ , где  $T$  и  $T_H$  – сроки службы изоляции при заданной и допустимой температурах, соответственно;  $\Delta \tau_k$  – превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды в  $k$ -м интервале времени  $\Delta t$ ;  $\Delta \theta$  – коэффициент, зависящий от класса изоляции. Так, например, для изоляции класса F –  $\Delta \theta = 10^\circ \text{C}$ , для H –  $\Delta \theta = 12^\circ \text{C}$  [11].

Очевидно, при отсутствии превышения допустимой температуры АД ( $\Delta \tau_k = 0$ ) на всех временных участках  $K = \overline{1, M}$  значение суммы в формуле (3) будет равно  $M$ , а  $\Delta t \cdot M = T_H$ , т.е. срок службы соответствует номинальному. Представленная методика апробирована экспериментально [12].

В результате получена совокупность программно-реализованных математических моделей, которую можно рассматривать как технико-экономическую модель двигателя, предназначенную для принятия решений о выборе средств защиты последнего от влияния некачественной электроэнергии.

Расчет технико-экономических показателей, связанных с применением указанных выше средств защиты АД, рассмотрен на примере упомянутого электродвигателя мощностью 45 кВт. Последний работает в длительном режиме (S1), годовой фонд его рабочего времени – 7200 часов, тариф на электроэнергию – 0,8232 грн/кВт\*час, стоимость АД – 14,5 тыс. грн. Двигатель эксплуатируется в условиях некачественной электроэнергии: коэффициент искажения синусоидальности – 10% (нормально допустимое значение для сетей 0,4 кВ – 8%), коэффициент обратной последовательности –

3% (нормально допустимое значение – 2%). Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Пример сопоставления экономических показателей вариантов технических решений**

Показатель	Ед. изм.	Варианты			
		1	2	3	4
Коэффициент искажения синусоидальности	%	10,0	0,1	4,0	1,5
Коэффициент обратной последовательности	%	3,0	0,1	0,1	3,0
Годовой ущерб, причиненный несинусоидальностью	тыс. грн	14,0	0,3	2,1	3,3
Годовой ущерб, причиненный несимметрией	тыс. грн	14,3	0,3	0,3	14,3
Ущерб от сокращения срока службы электродвигателя	тыс. грн	7,25	0,145	0,725	1,45
ИТОГО Суммарный ущерб	тыс. грн	35,6	0,8	3,2	19,1
Стоимость технического решения	тыс. грн	0	48,6	12,6	8,2
Срок окупаемости технического решения	тыс. грн	0	1,4	0,4	0,5

Примечания: 1 – отказ; 2 – активный фильтр; 3 – фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) + симметрирующее устройство; 4 – индивидуальный LC-фильтр.

Анализ представленных данных указывает на значительную величину годового ущерба, вызванного эксплуатацией АД без применения средств защиты (вариант 1). Она практически втрое превышает стоимость самого двигателя. Последняя же соизмерима со стоимостью годовых ущербов по каждой составляющей в отдельности. Использование активных фильтров (вариант 2), цена которых сопоставима со стоимостью преобразователей частоты, является наиболее затратным, хотя последние имеют дополнительные существенные преимущества по сравнению с фильтрами. Несмотря на это срок окупаемости первого варианта является приемлемым.

Групповые методы коррекции ПКЭ (вариант 3), хотя и имеют большую суммарную стоимость ФКУ и симметрирующих устройств по сравнению со средствами индивидуальной защиты в виде LC – фильтров (вариант 4), обеспечивают наименьший срок окупаемости. В

© Кузнецов В. В., 2014

данном случае они являются экономически предпочтительными, хотя при других условиях эксплуатации рассматриваемого двигателя или для других типов и мощностей АД предпочтительными могут оказаться и другие варианты.

### Вывод

Предложенная методика выбора средств защиты электродвигателя, работающего в усло-

виях некачественной электроэнергии, представляющая собой вычислительный алгоритм, реализованный на основе электромагнитной и тепловой модели АД, позволяет определить экономически целесообразный вариант их технически реализуемых решений. Она может использоваться как инструмент службы энергоменеджмента промышленного предприятия.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2000.
2. Качан Ю. Г. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: – 2009. – № 3. – С. 56 – 58.
3. Качан Ю. Г. О технико-экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип. 80. – Дніпропетровськ: 2008. – С. 58 – 62.
4. United States Industrial Motor Systems Market Opportunities Assessment, report by Xenergy for Oak Ridge National Laboratory and the U.S. Department of Energy, 1998. – Режим доступу: [www.oit.doe.gov/bestpractices/pdfs/mtrmkt.pdf](http://www.oit.doe.gov/bestpractices/pdfs/mtrmkt.pdf).
5. Energy distribution annual report 2009, U.S. Department of Energy data storage and statistic service. – Режим доступу: [www.doe.gov/stat/enreport 2009](http://www.doe.gov/stat/enreport 2009)
6. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения: ГОСТ 13109-97. – ИПК. – М.: Изд-во стандартов, – 1998. – 15 с.
7. Качан Ю. Г. О количественной оценке качества электрической энергии в сетях промышленных предприятий [Текст] / Ю. Г. Качан А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип. 84. – Дніпропетровськ: – 2010. – С. 9 – 16.
8. Качан Ю. Г. О влиянии гармонического состава питающего напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип. 83. – Дніпропетровськ: 2009. – С. 113 – 117.
9. Качан Ю. Г. Оценка адекватности математической модели асинхронного двигателя в условиях некачественного питания [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – № 3. – с. 70 – 74.
10. Качан Ю. Г. Тепловая составляющая эконо-

### REFERENCES

1. Zhezhelenko I.V. Vyisshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatiy [The Highest Harmonics in Systems of Power Supply of Industrial Enterprises], 2000, Moscow, Russian Federation.
2. Kachan Yu.G., Nikolenko A.V., and Kuznetsov V.V. Realizatsiya modeli asinhronnogo dvigatelya dlya usloviy nekachestvennogo pitaniya [Realization of Model of Asynchronous Engine for the Terms of off-grade Feed], 2009, *Visnik Kremenchutskogo derzhavnogo polltehnichnogo unlvrsitetu*, Kremenchug, Ukraine, No. 3, pp. 56 – 58.
3. Kachan Yu.G. O tehniko-ekonomicheskoy tselesoobraznosti raboty asinhronnyih dvigateley v setyah s nekachestvennoy elektroenergiy [About technique-economic Expediency of work of Asynchronous Engines in Networks with off-grade Electric Power], 2008, *Girnichia Elektromehanika ta Avtomatika: Nauk.-tehn. Zb.*, Dnipropetrovsk, Ukraine, Vip.80, pp. 58 – 62.
4. United States Industrial Motor Systems Market Opportunities Assessment, report by Xenergy for Oak Ridge National Laboratory and the U.S. Department of Energy, 1998. – Rezhim dostupu: [www.oit.doe.gov/bestpractices/pdfs/mtrmkt.pdf](http://www.oit.doe.gov/bestpractices/pdfs/mtrmkt.pdf).
5. Energy distribution annual report 2009, U.S. Department of Energy data storage and statistic service. – Rezhim dostupu: [www.doe.gov/stat/enreport 2009](http://www.doe.gov/stat/enreport 2009).
6. Elektricheskaya energiya. Trebovaniya k kachestvu elektricheskoy energii v elektricheskikh setyah obshchego naznacheniya: GOST 13109-97 [Electric energy. Requirements to quality of electric energy in the electric networks of general-purpose], (1998), Moscow, Russian Federation.
7. Kachan Yu.G. O kolichestvennoy otsenke kachestva elektricheskoy energii v setyah promyshlennyih predpriyatiy [About the Quantitative Estimation of Quality of Electric Energy in the Networks of Industrial Enterprises], 2010 *Girnichia Elektromehanika ta Avtomatika: Nauk.-tehn. Zb.*, Dnipropetrovsk, Ukraine, Vip.84, pp. 9 – 16.
8. Kachan Yu.G. O vliyaniy garmonicheskogo sostava pitayushchego napryazheniya na energeticheskie pokazateli asinhronnogo dvigatelya [About Influence of Harmonic Composition of feed-in Tension on the Power Indexes of Asynchronous Engine], 2009, *Girnichia Elektromehanika ta Avtomatika: Nauk.-tehn. Zb.*, Dnipropetrovsk, Ukraine, Vip.83, pp.113 – 117.
9. Kachan Yu.G., Nikolenko A.V., and Kuznetsov

мического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии [Текст] / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Гірничі електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – Вип. 85. – Дніпропетровськ: 2010. – С.113 – 118.

11. Жежеленко И.В. Влияние качества электрической энергии на надежность асинхронных двигателей [Текст] / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, А.В. Горпинич // Промислова енергетика та електротехніка. – Київ: 2004. – №1. – С.15 – 21.

12. Качан Ю.Г. Идентификация параметров и проверка адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии [Текст] / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Кузнецов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: 2011. – № 1. – С.56-59.

V.V. Otsenka adekvatnosti matematicheskoy modeli asinhronnogo dvigatelya v usloviyah nekachestvennogo pitaniya [Estimation of Adequacy of Mathematical Model of Asynchronous Engine in the Conditions of off-grade feed], 2009, *Integrovani Tehnologiyi ta Energo-zberezheniya. Shokvartalniy Naukovo-praktichniy Zhurnal*, No. 3, Kharkov, Ukraine, pp. 70 – 74.

10. Качан Ю.Г., Николенко А.В., and Кузнецов В.В. Teplovaya sostavlyayushaya ekonomicheskogo uscherba ot raboty asinhronnogo dvigatelya v usloviyah nekachestvennoy elektroenergii [Thermal constituent of economic damage from work of asynchronous engine in the conditions of off-grade electric power], 2010, *Girnichia Elektromehnika ta Avtomatika: Nauk.-tehn. Zb.*, Dnipropetrovsk, Ukraine, Vip.85, pp.113 – 118.

11. Zhezhelenko I.V. Vliyanie kachestva elektricheskoy energii na nadezhnost asinhronnykh dvigateley [Influence of quality of electric energy on reliability of asynchronous engines], 2004, *Promislova energetika ta elektrotehnika*, Kyiv, Ukraine, No.1, pp.15 – 21.

12. Качан Ю.Г., Николенко А.В., and Кузнецов В.В. Identifikatsiya parametrov i proverka adekvatnosti teplovooy modeli asinhronnogo dvigatelya, rabotayushchego v usloviyah nekachestvennoy elektroenergii [Authentication of parameters and verification of adequacy of thermal model of asynchronous engine working in the conditions of off-grade electric power], 2011, *Visnik Kremenchutskogo derzhavnogo politehnichnogo universitetu*, Kremenchug, Ukraine, No. 1, pp. 56-59.

Поступила в печать 15.06.2014.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

В статье рассмотрена методика обоснования технически возможных мер по повышению технико-экономических показателей асинхронного двигателя при его работе в условиях некачественной электроэнергии. Приведены расчетные алгоритмы для оценки электромагнитной и тепловой составляющих, образующегося при этом экономического ущерба. Выполнена апробация предложенной методики на конкретном примере. Анализ представленных данных указывает на значительную величину годового ущерба, вызванного эксплуатацией АД без применения средств защиты. Она практически втрое превышает стоимость самого двигателя. Последняя же соизмерима со стоимостью годовых ущербов по каждой составляющей в отдельности. Использование активных фильтров, цена которых сопоставима со стоимостью преобразователей частоты, является наиболее затратным, хотя последние имеют дополнительные существенные преимущества по сравнению с фильтрами. Несмотря на это срок окупаемости первого варианта является приемлемым. Групповые методы коррекции ПКЭ, хотя и имеют большую суммарную стоимость ФКУ и симметрирующих устройств по сравнению со средствами индивидуальной защиты в виде LC – фильтров, обеспечивают наименьший срок окупаемости. В данном случае они являются экономически предпочтительными, хотя при других условиях эксплуатации рассматриваемого двигателя или для других типов и мощностей АД предпочтительными могут оказаться и другие варианты. Предложенная методика выбора средств защиты электродвигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии, представляющая собой вычислительный алгоритм, реализованный на основе электромагнитной и тепловой модели АД, позволяет определить экономически целесообразный вариант их технически реализуемых решений. Она может использоваться как инструмент службы энергоменеджмента промышленного предприятия.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, показатели качества электроэнергии, электромагнитная и тепловая составляющие экономического ущерба.



УДК 621.31

В. В. КУЗНЕЦОВ (НМЕТАУ)

Кафедра електротехніки і електроприводу Національної металургійної академії України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна, тел.: (056) 374-84-46, ел. пошта: [wit\\_jane2000@mail.ru](mailto:wit_jane2000@mail.ru)

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ВИБОРУ ЕКОНОМІЧНО ДОЦІЛЬНИХ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ, ПРАЦЮЮЧИХ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У статті розглянута методика обґрунтування технічно можливих заходів щодо підвищення техніко-економічних показників асинхронного двигуна при його роботі в умовах неякісної електроенергії. Наведено розрахункові алгоритми для оцінки електромагнітної і теплової складових, що утворюється при цьому економічного збитку. Виконана апробація запропонованої методики на конкретному прикладі. Аналіз представлених даних вказує на значну величину річного збитку, викликаного експлуатацією АД без застосування засобів захисту. Вона практично втричі перевищує вартість самого двигуна. Остання ж порівняння з вартістю річних збитків по кожній складовій окремо. Використання активних фільтрів, ціна яких порівнянна з вартістю перетворювачів частоти, є найбільш витратним, хоча останні мають додаткові істотні переваги в порівнянні з фільтрами. Незважаючи на це термін окупності першого варіанту є прийнятним. Групові методи корекції ПKE, хоча і мають велику сумарну вартість ФКУ і симетрувальних пристроїв в порівнянні з засобами індивідуального захисту у вигляді LC - фільтрів, забезпечують найменший термін окупності. В даному випадку вони є економічно кращими, хоча за інших умов експлуатації розглянутого двигуна або для інших типів і потужностей АД переважними можуть опинитися й інші варіанти. Запропонована методика вибору засобів захисту електродвигуна, що працює в умовах неякісної електроенергії, що представляє собою обчислювальний алгоритм, реалізований на основі електромагнітної і теплової моделі АД, дозволяє визначити економічно доцільний варіант їх технічно реалізованих рішень. Вона може використовуватися як інструмент служби енергоменеджменту промислового підприємства.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, показники якості електроенергії, електромагнітна та теплова складові економічного збитку.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Саєнко Ю. Л.*

UDC 621.31

V. V. KUZNETSOV (NMETAU)

The department of electrical engineering and the National Metallurgical Academy of Ukraine, 4 Gagarina Ave, Dnepropetrovsk, 49600, Ukraine, tel.: (056) 374-84-46, e-mail: [wit\\_jane2000@mail.ru](mailto:wit_jane2000@mail.ru)

## METHODOLOGICAL BASES OF CHOICE ECONOMICALLY AND EXPEDIENT FACILITIES OF DEFENCE OF ASYNCHRONOUS ENGINES, WORKING IN THE CONDITIONS OF OFF-GRADE ELECTRIC POWER

The article discusses the methodology of study is technically possible measures to improve the technical and economic parameters of the induction motor when it is operating in conditions of poor-quality electricity. The calculated algorithms to assess the electromagnetic and thermal components formed during this economic loss. Performed validation of the proposed method on a concrete example. Analysis of the data indicates a significant amount of the annual damage caused by the operation of blood pressure without the use of protective equipment. It is almost three times the cost of the engine. The latter is comparable to the cost of annual damages for each component separately. The use of active filters, the price of which is comparable with the value of frequency converters, is most costly, even though the latter have a further significant advantage over filters. Despite it's payback time the first option is acceptable. Group methods of correction of the SCE, although they have a greater total cost of PKU and baluns compared with the means of indi-term protection in the form of LC - filter, provide the lowest payback period. In this case, they are economically preferred, although other operating conditions of the engine under consideration, or for other types and capacities BP may be preferred and other embodiments. The proposed method of choice of means of protection of the motor, operating under conditions of poor-quality electricity, which is a computational algorithm is implemented on the basis of the electromagnetic and thermal model of AD to determine economically viable option for their technically feasible solutions. It can be used as an instrument of service energy management of an industrial enterprise.

**Keywords:** asynchronous engine, indicators of electric power quality, electromagnetic and thermal constituents of economic damage.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Saenko Y. L.*

© Кузнецов В. В., 2014



Д. О. БОСИЙ, О. М. СИНЬОГІНА (ДНУЗТ)

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

## ОБЛІК ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СУЧАСНИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ЛІЧИЛЬНИКАМИ В УМОВАХ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ

### Вступ

Взаємовідносини між продавцем і покупцем будуються в першу чергу на кількісній, якійсній та вартісній оцінці товару. Електрична енергія, що постачається енергопостачальними організаціями, виступає як товар, що характеризується збігом у часі процесів виробництва, транспортування і споживання. Разом з тим до електроенергії, як до товару будь-якого виду, застосовуються категорії «кількість» і «якість». Таким чином, зростаючі вимоги до точності обліку кількості електричної енергії при необхідній якості базуються на економічній основі.

У реальних умовах виробництва, перетворення, розподілу і споживання електроенергії виникають спотворення форми синусоїдного струму і напруги. Ці спотворення виникають при генерації електроенергії, її передачі мережею і, головним чином, при споживанні, пов'язаному з випрямленням чи інвертуванням.

Основними джерелами спотворення струмів і напруг у системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць є перетворювальні агрегати тягових підстанцій постійного струму та перетворювальні пристрої електровозів однофазного змінного струму [1]. При цьому, лінії зовнішнього електропостачання, елементи тягової мережі, розподільчі лінії поздовжнього електропостачання і автоблокування, володіючи певними частотними характеристиками вносять свої корективи у гармонійний склад напруг та струмів.

Все це негативно впливає на роботу приладів обліку електричної енергії та піднімає проблему електромагнітної сумісності засобів обліку з факторами, що впливають на точність обліку.

В даний час зі зміною виробничо-економічної ситуації в країні, зміною структури ринку електричної енергії загострюються проблеми обліку електричної енергії, зростають вимоги до систем електропостачання.

Широко застосовувані нині лічильники електричної енергії розроблюються і проходять перевірку виходячи з припущення, що напруга в

мережі є синусоїдною, і вміст вищих гармонік в струмі навантаження не перевищує 10 %. На цьому ґрунтуються застосовувані в лічильниках матеріали та алгоритми обліку електроенергії.

Однак, більшість споживачів є нелінійними, і при включенні таких електроприймачів в мережу в споживаному струмі і функції живлячої напруги з'являються значний вміст вищих гармонік. І очевидно, що цей факт буде впливати на похибку приладу, призначеного для роботи в колах з практично синусоїдальними сигналами.

Метою даної роботи є виявлення похибки вимірювання потужності в колі з нелінійним навантаженням електронними приладами обліку електричної енергії та визначення критичного значення спотворення синусоїдності, при якому прилад обліку буде працювати поза межами встановленого класу точності.

### Історія розвитку лічильників електроенергії

Першою областю масового застосування електрики стало освітлення. Коли цей новий продукт – електроенергію – почали продавати, виникла необхідність визначити ціну. Однак було неясно, у яких одиницях слід вести облік і які принципи виміру були б найбільш зручними.

Першим електролічильником став лічильник годин роботи лампи Самюеля Гардинера, запатентований у 1872 році. Він вимірював час, за який електроенергія подавалася в точку навантаження, при цьому всі лампи, підключені до цього лічильника, контролювалися одним вимикачем. З появою електричної лампи Едісона почали практикувати розгалужені кола освітлення і такий лічильник вийшов із вжитку.

За ним слідував винахід електролітичного лічильника Томаса Едісона у 1881 р., який базувався на електрохімічному ефекті електричного струму. Він мав електролітичну комірку, в яку, на початку розрахункового періоду, вміщувалась точно зважена пластина міді. Струм, що проходив через електроліт, викликав осадження міді. У кінці розрахункового періоду,

© Босий Д. О., Синьогіна О. М., 2014

мідну пластинку зважували знову, і різниця у вазі відображала кількість електрики, яка пройшла крізь неї. Цей лічильник був відкалібрований таким чином, що рахунки можна було виставляти в кубічних футах газу.

Ще одним з можливих принципів конструкції лічильників було створення деякого руху - коливання або обертання – пропорційного енергії, яка, в свою чергу, могла б запустити лічильний механізм для відображення показів лічильника.

Принцип роботи маятникового лічильника був описаний Вільямом Едвардом Ейртоном і Джоном Перрі в 1881 році. У 1884 році, не знаючи про їх винаходи, Германн Арон сконструював маятниковий лічильник.

У більш удосконаленій моделі цього лічильника було два маятники з котушками на кожному, підключеними до джерела напруги. Під маятниками розміщались дві струмові котушки з протилежним намотуванням. Завдяки взаємодії котушок один з маятників рухався повільніше, а інший швидше, ніж без електричного навантаження. Ця різниця ходу передавалася лічильному механізму лічильника. Маятники змінювалися ролями кожен хвилину, щоб компенсувати різницю у вихідній частоті коливальності. У цей же момент заводився годинниковий механізм.

Іншою альтернативою для створення електrolічильника було використання двигуна. У таких лічильниках обертальний момент двигуна пропорційний навантаженню і врівноважується протидіючим моментом таким чином, що частота обертання ротора пропорційна навантаженню, тоді як моменти перебувають у рівновазі. У 1889 році Еліху Томсон розробив свій «самописний ватметр». Це був двигун з якорем без металевго осердя, який запускався від електричної напруги, що проходить через котушку і резистор за допомогою колектора. Статор приводився в рух струмом, і тому обертальний момент був пропорційний добутку напруги і сили струму. Гальмівний момент забезпечувався постійним електромагнітом, який впливав на алюмінієвий диск, прикріплений до якоря. Такий лічильник використовувався переважно для постійного струму.

У 1884 році Люсьєн Голар і Джон Діксон Гіббс винайшли «вторинний генератор», попередник сучасного трансформатора. Завдяки цьому з'явилась можливість застосування електричних систем змінного струму. Починаючи з 20-го століття, вони поступово змінили системи постійного струму.

Для обліку електроенергії знадобилось вирішити нове завдання – вимірювання електроенергії змінного струму. У 1885 році Галілео Ферраріс зробив важливе відкриття, що два поля змінного струму, які не збігаються по фазі можуть змусити обертатися суцільний ротор, такий як диск або циліндр.

У 1888 році незалежно від нього Нікола Тесла теж виявив обертове електричне поле. Шелленбергер також, випадково, відкрив ефект обертових полів в 1888 році і розробив лічильник кількості електрики для змінного струму. Протидіючий момент створювався гвинтовим механізмом. У такому лічильнику відсутній елемент напруги, щоб врахувати коефіцієнт потужності, тому він не підходив для роботи з електродвигунами. Ці відкриття послужили основою для створення індукційних двигунів і відкрили шлях індукційним лічильникам [2].

До чергового сторіччя, були розроблені трифазні індукційні лічильники, які використовують дві або три системи виміру, встановлені на одному, двох або трьох дисках. У міру поширення електрики, швидко з'явилася концепція багатотарифного електролічильника з локальним або дистанційним управлінням, лічильника максимального навантаження, лічильника попередньо оплаченої електроенергії.

Електронні технології не знаходили застосування в обліку електроенергії до тих пір, поки в 1970-х роках не з'явилися перші аналогові і цифрові інтегральні мікросхеми. Нова технологія дала новий поштовх до розвитку електричних лічильників. Спочатку були розроблені точні стаціонарні лічильники, які головним чином використовують принцип часоімпульсного множення.

Ідея зчитування показань лічильників на відстані з'явилася в 1960-х роках. Спочатку використовувалась дистанційна імпульсна передача, але поступово замість неї стали використовувати різні протоколи і засоби передачі даних. В даний час лічильники з розвиненими функціональними можливостями ґрунтуються на новітніх електронних технологіях, із застосуванням цифрової обробки сигналів, причому більшість функцій передбачені вбудованим програмним забезпеченням.

### Аналіз типів лічильників

Всі лічильники електричної енергії [3] можна класифікувати за типом підключення, вимірюваними величинами та конструкцією (рис.1).

В індукційних лічильниках магнітне поле нерухомих струмопровідних котушок впливає

на рухомий елемент з провідного матеріалу. Рухомий елемент являє собою диск, по якому протікають струми, індуковані магнітним по-

лем котушок. Кількість спожитої електроенергії, в цьому випадку, прямо пропорційна числу обертів диска.

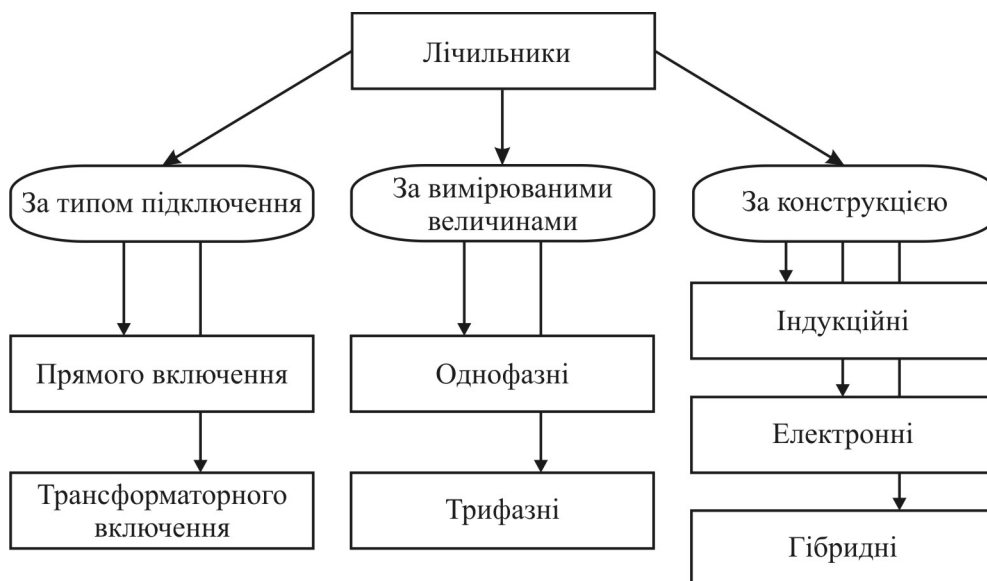


Рис. 1. Класифікація лічильників електричної енергії

Електронний лічильник представляє собою перетворювач аналогового сигналу в частоту проходження імпульсів, підрахунок яких дає кількість споживаної енергії, при чому відпадає необхідність застосування обертових елементів. Електронні лічильники забезпечують більш широкий інтервал входних напруг, дозволяють легко організувати багатотарифні системи обліку, мають режим ретроспективи чим дозволяють визначити кількість спожитої енергії за будь-який період; вимірюють споживану потужність, вписуються в конфігурацію систем автоматизованого комерційного обліку електричної енергії (АСКОЕ) та володіють додатковими сервісними функціями [4].

У цифрових системах обліку досяжний практично будь-який клас точності, при виборі відповідної елементної бази й алгоритмів обробки інформації. Відсутність механічних частин значно підвищує надійність. Обробка інформації в цифровому вигляді дозволяє одночасно підраховувати як активну, так і реактивну складові потужності, це є важливим, наприклад, при обліку енергії в трифазних мережах [5].

Гібридні лічильники електроенергії – проміжний варіант з цифровим інтерфейсом, вимірювальною частиною індукційного або електронного типу та механічним обчислювальним пристроєм.

У господарстві електрифікованих залізниць України на приєднаннях комерційного обліку застосовуються лише сучасні електронні лічильники з класом точності 0,5. Для сторонніх та

побутових споживачів невеликої потужності, як правило, використовуються гібридні лічильники з електронною вимірювальною частиною та подальшим механічним обчисленням з класом точності до 1,0. У випадку наявності потужних нетягових споживачів для обліку електроенергії застосовуються електронні лічильники з класом точності 0,5 та підключенням до системи АСКОЕ. В якості технічного обліку у мережах власних потреб можуть використовуватись і застарілі індукційні лічильники з класом точності до 2,0.

Окрім основної мети застосування обліку електроенергії, отриману достовірну інформацію про кількість виробленої електроенергії та потужності, її передачу, розподіл та споживання на оптовому і роздрібному ринку споживання можна використати і для вирішення наступних техніко-економічних завдань на всіх рівнях управління в енергетиці [6], тобто для:

- фінансових розрахунків за електроенергію і потужність між суб'єктами оптового і роздрібного ринку споживання;
- управління режимами електроспоживання;
- визначення та прогнозування складових балансу електроенергії;
- визначення вартості і собівартості виробництва, передачі, розподілу електроенергії та потужності;
- контролю технічного стану та відповідності вимогам нормативно-технічних докумен-

тив систем обліку електроенергії в електроустановках.

Типовий електронний лічильник має будову, блок-схема якої приведена на рис.2. Вхідні сигнали подаються через відповідні трансформаторні датчики на входи мікросхеми-перетворювача. З її виходу знімається частотний сигнал, що надходить на вхід мікроконтролера. Мікроконтролер складає кількість імпульсів, перетворюючи сигнал для одержання кількості енергії у Вт-год. По мірі накопичення кожної одиниці, значення накопиченої енергії виводиться на індикатор і записується до FLASH-пам'яті.

Серцем електронного лічильника є мікроконтролер, на який покладено виконання практично всіх функцій. В основному використовується в якості аналогово-цифрового перетворювача вхідного сигналу з трансформатора струму, виконує його математичну обробку і виводить результат на дисплей. Мікроконтролер також приймає команди від органів управління і здійснює управління інтерфейсними виходами. Можливості, якими володіє мікроконтролер, залежать від його програмного забезпечення, а різноманітність сервісних функцій і виконуваних завдань залежить від того, яке технічне завдання було поставлено перед розробкою програмного забезпечення.

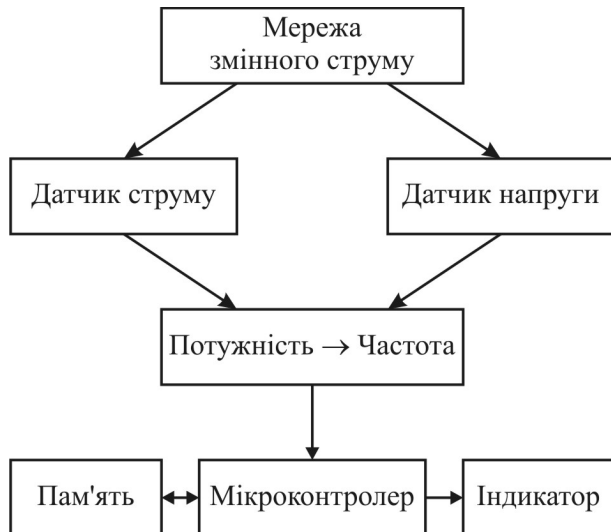


Рис. 2. Блок-схема будови електронного лічильника електроенергії

Електронні лічильники після випуску проходять заводську параметризацію, де встановлюються стандартні варіанти тарифікації. Перед установкою на конкретний об'єкт, вони проходять в обов'язковому порядку параметризацію в лабораторії АСКОЕ Енергозбуту, де в електrolічильник встановлюються параметри

відповідно до проектної документації і вноситься пароль захисту від несанкціонованого доступу.

### Експериментальні вимірювання похибок електронних лічильників

Згідно з [7] повірці підлягають засоби вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, випускаються з серійного виробництва, ремонту та у продаж, на які поширюється державний метрологічний нагляд. Повірку засобів вимірювальної техніки під час експлуатації та випуску з виробництва проводять метрологічні центри та територіальні органи, в яких зберігаються відповідні еталони. Засоби вимірювальної техніки визначають придатними до застосування, якщо результати повірки підтверджують їх відповідність метрологічним і технічним вимогам до цих засобів вимірювальної техніки, встановленим у нормативних чи експлуатаційних документах.

При проведенні повірки лічильників виконують наступні операції перевірки:

- зовнішнього огляду;
- електричної міцності ізоляції;
- роботи лічильного механізму;
- порогу чутливості;
- відсутності самоходу;
- метрологічних характеристик в режимі несиметричного навантаження.

При виконанні повірки клас точності встановлюється при дотриманні наступних нормальних умов роботи лічильника, а саме:

- 1) температура навколишнього середовища  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- 2) відносна вологість повітря 30...80 %;
- 3) атмосферний тиск 630...795 мм. рт. ст.;
- 4) відсутність зовнішніх магнітних полів (не більше 0.5 мТл);
- 5) номінальна частота  $50 \pm 0,5$  ( $60 \pm 0,6$ ) Гц;
- 6) пряме чергування фаз;
- 7) рівномірність і симетричність навантаження;
- 8) синусоїдність кривої струму та напруги з коефіцієнтом несинусоїдності не більше 5%;
- 9) відхилення значення фазної або лінійної напруги від номінального значення  $\pm 1\%$ ;
- 10) відхилення значення сили струму в кожній фазі від середнього значення  $\pm 1\%$ ;
- 11) відхилення від вертикального розташування лічильника по вертикалі не більше 1 %.

Кількісне значення основної відносної похибки лічильника  $\delta_c$ , % розраховують для кожного з режимів перевірки за наступною формулою



$$\delta_c = \frac{C_c \cdot N_c - C_y \cdot N_e}{C_y \cdot N_e} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $C_c$  – постійна лічильника, що підлягає повірці, виражається у ват-годинах на імпульс;

$C_y$  – коефіцієнт перетворення еталонних засобів вимірювання повірочної установки;

$N_c$ ,  $N_e$  – число імпульсів, що надходять з вихідного пристрою до лічильника, що перевіряється та еталонного лічильника відповідно.

Результати повірки можна вважати прийнятними, якщо отримані значення основної відносної похибки при всіх точках навантаження не перевищують значення меж допустимої основної відносної похибки. Наприклад, для лічильника з класом точності 1,0 (для активної енергії) значення меж допустимої основної відносної похибки, відповідно до [8], складає  $\delta_c = \pm 1,5\%$ , а для класу точності 2,0 (реактивної енергії)  $\delta_c = \pm 2,5\%$ .

З метою перевірки обліку електричної енергії у несинусоїдному режимі в учбовій лабораторії навмисно створені умови, які відрізняють-

ся від вимог стандарту стосовно допустимих значень синусоїдності напруги та струму.

Схема для вимірювання лічильниками спожитої електроенергії приведена на рис.3, яка складається з 2 частин:

1) перша частина призначена для живлення обмоток напруги лічильників з використанням ЛАТРу, до вторинної обмотки якого підключаються відповідні обмотки кожного лічильника;

2) друга частина являє собою фізичний макет компенсації реактивної потужності з плавним тиристорним регулюванням і складається з:

- батареї конденсаторів увімкнених послідовно з реактором, утворюючи *LC*-фільтр налаштований на 3 гармоніку (компенсуючий контур);
- послідовно з'єднаних реактора та зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів (декомпенсуючий контур);
- підключеного індуктивного навантаження, у якості якого використовується двигун увімкнений через підвищуючий трансформатор.

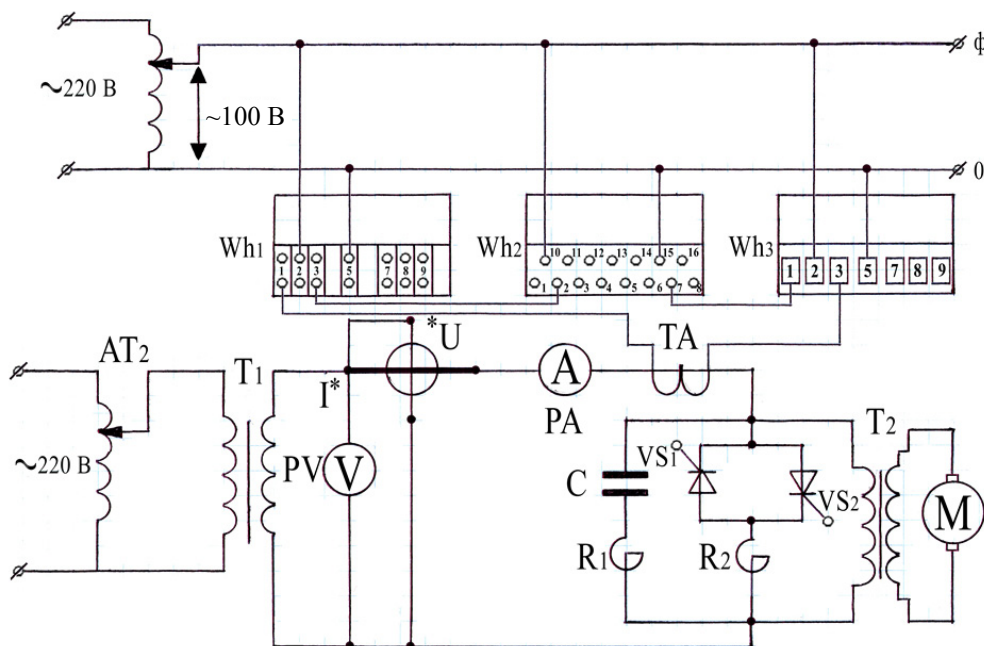


Рис. 3. Схема підключення приладів обліку та навантаження

Лічильники у першій частині схеми було обрано одного класу точності (1,0) різних типів, які для уникнення можливих претензій свідомо не вказуються.

Для досягнення поставленої задачі у якості еталонного приладу застосовано аналізатор

якості електричної енергії EDL-175 SATEC з класом точності 0,2. Прилад SATEC має 2 режими вимірювання реактивної потужності:

1) за миттєвими значеннями струму та напруги розраховується активна та повна потуж-



ності, а реактивна потужність є їх функцією,  $Q = f(S, P)$ ;

2) за діючими значеннями струму та напруги, а також за кутом між ними розраховуються активна та реактивна потужності, а повна потужність є їх функцією,  $S = f(Q, P)$ .

Вимірювання проводились одночасно і лічильником, і еталонним приладом, з налаштуваннями спочатку на один, а потім на інший другий режим вимірювання потужності.

Знімання показів приладів відбувалось з кожною зміною характеру навантаження. Реєструвались такі показники: активна та реактивна потужності, струм навантаження, коефіцієнт спотворення форми струму, фіксувались осцилограми струму і напруги.

Режими зміни навантаження, використані у даному експерименті можна умовно поділити на три частини:

1) режим, при якому відсутня реактивна потужність основної гармоніки,  $\varphi_1 = 0$ ;

2) режим недокомпенсації реактивної потужності при недорегулюванні компенсації реактивної потужності за допомогою тиристорів;

3) режим перекомпенсації, за якого відсутнє регулювання тиристорним декомпенсатором.

Результати експериментальних вимірювань похибок лічильника зведені до табл. 1.

Таблиця 1

Результати вимірювань похибок лічильника

Дослідний			Еталонний			
$P$ , Вт	$Q$ , вар	$I_{THD}$ , %	$I$ , А	$P$ , Вт	$Q$ , вар	
					1	2
184	-382	2,2	4,35	181	-393	-390
178	-351	5,2	4,06	179	-361	-371
172	-316	10,6	3,7	174	-320	-336
170	-283	14,8	3,47	168	-290	-288
170	-236	20,6	3,09	169	-243	-251
174	-171	31,1	2,68	172	-176	-185
180	-123	37,5	2,47	178	-126	-160
225	-10	53,1	2,591	224	-13	-113
233	9	52,3	2,7	230	8	-106
305	148	40,5	3,72	304	146	216
395	262	30,2	5,07	393	268	297

Примітка: 1 –  $Q = f(S, P)$ ; 2 –  $S = f(P, Q)$ .

На рис. 4 – 6 представлені характерні осцилограми струмів і напруги в окремих режимах навантаження.

Отримані значення сили струму, коефіцієнта спотворення форми кривої струму та кути зсуву фаз під час проведення експерименту в лабораторних умовах дають можливість відтворити форми кривих струму за допомогою програмного забезпечення WinSAM (рис. 7) універсальної системи для перевірки трифазних лічиль-  
© Босий Д. О., Синьогіна О. М., 2014

ників електричної енергії MTS 320 виробництва Zera в умовах сертифікованої лабораторії.

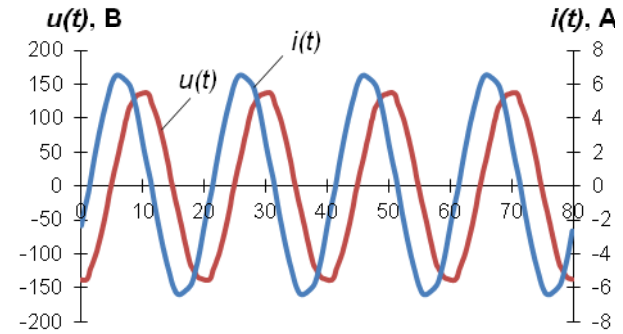


Рис. 4. Осцилограми напруги і струму в режимі перекомпенсації реактивної потужності при відсутності регулювання ( $I = 4,35$  А,  $\varphi_1 = -64,2^\circ$ ,  $I_{THD} = 2,2$  %)

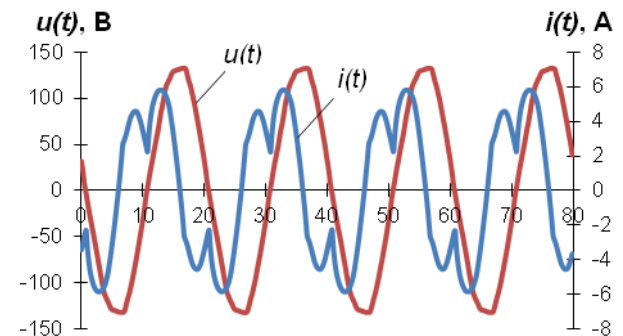


Рис. 5. Осцилограми напруги і струму при початку регулювання струму декомпенсації ( $I = 5,07$  А,  $\varphi = -34,3^\circ$ ,  $I_{THD} = 30,2$  %)

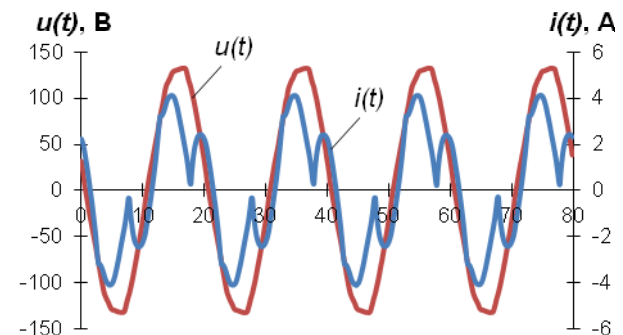


Рис. 6. Осцилограми напруги та струму у режимі, при якому відсутня реактивна потужність основної гармоніки ( $I = 2,591$  А,  $\varphi_1 = 0^\circ$ ,  $I_{THD} = 53,1$  %)

Під час повторення експерименту в умовах сертифікованої лабораторії були використані ті ж самі типи електронних лічильників.

### Аналіз отриманих результатів

При обробці результатів, отриманих під час виконання експериментальних дослідів, отримано залежність похибки електронного лічильника від коефіцієнта спотворення струму (рис. 8), яка відображає, що при значеннях  $I_{THD}$  більше 25 %, дослідний лічильник виходить за клас точності.

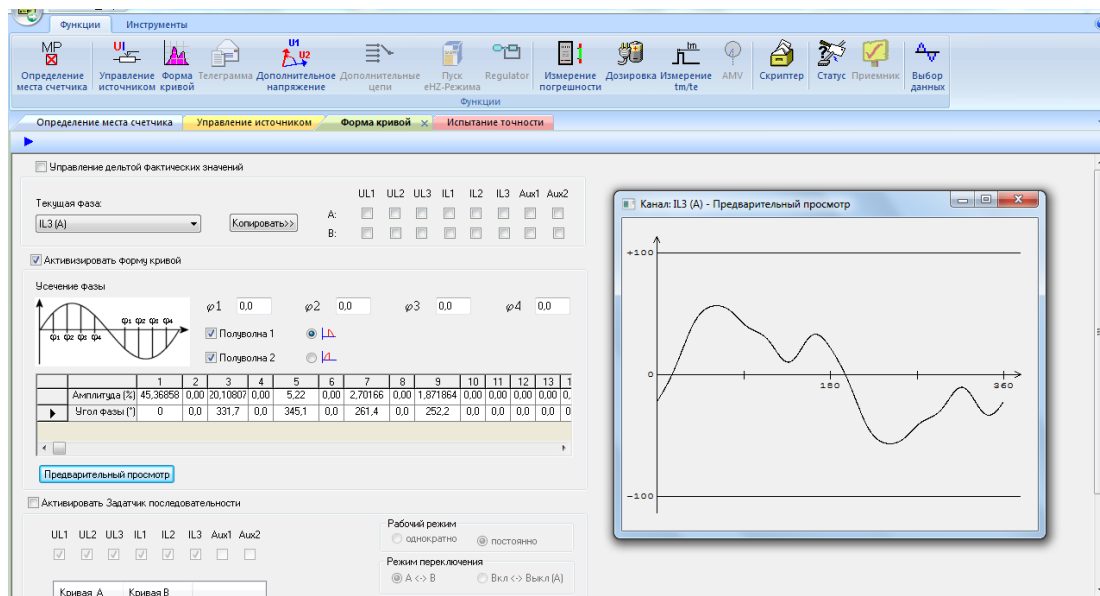


Рис. 7. Скріншот програми WinSAM при уведенні параметрів для отримання кривої форми струму з нульовим кутом зсуву фаз за основною гармонікою

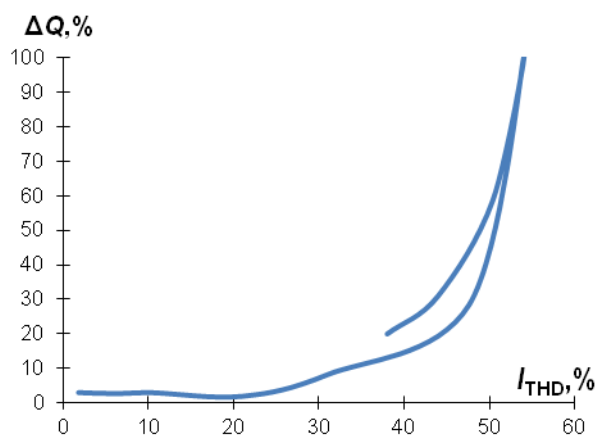


Рис. 8. Похибка електронного лічильника в залежності від коефіцієнта спотворення струму

Зіставляючи результати вимірювань реактивної потужності для двох приладів та двох режимів роботи еталонного приладу, отримана залежність (рис. 9), з якої видно, що для малих значень коефіцієнта спотворення струму реактивні потужності для двох методів розрахунку практично не відрізняються. При збільшенні спотворень струму збільшується різниця між цими величинами. Особливим є те, що за наявності спотворень реактивна потужність за концепцією Фризе змінює знак при зміні характеру навантаження, при цьому не дорівнюючи нулю.

Отримані результати свідчать про те, що при вимірюванні активної потужності (за умов, що не відповідають повірочним аспектам – нелінійне навантаження, підвищений рівень несинусоїдності напруги) основна відносна похибка відповідає допустимим класу точності значенням, а при вимірюванні реактивної потужності (за тих самих умов) основна відносна похибка

відповідає допустимим класу точності значенням лише для реактивної потужності першої гармоніки та при коефіцієнті спотворення форми струму не більше ніж 25%, а для інших значень – не відповідає.

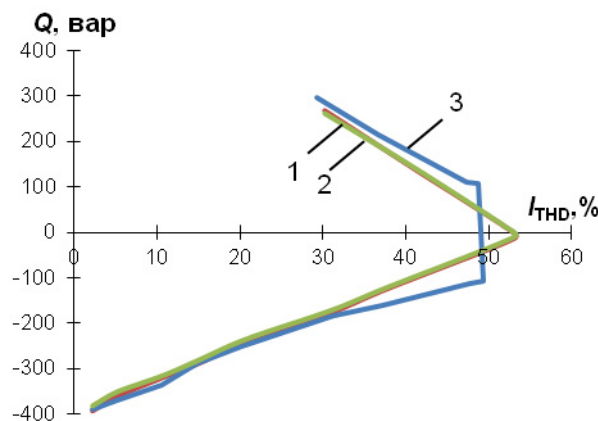


Рис. 9. Реактивні потужності в залежності від коефіцієнта спотворення струму: 1 – основної гармоніки за лічильником; 2 – основної гармоніки за еталонним приладом; 3 – потужність Фризе за еталонним приладом

При проведенні дослідів в умовах сертифікованої лабораторії за допомогою системи для повірки лічильників були отримані чисельні результати, які приведені в табл. 2.

Як видно з табл. 2, лічильники 1 та 3 не виходять за межі своїх класів точності за умов, що не відповідають повірочним аспектам, а лічильник типу 2 – виходить. Також, аналізуючи покази дослідних та зразкового лічильників, можна стверджувати, що розрахунок реактивної потужності ведеться за основною гармонікою 50 Гц, а можливі потоки потужностей інших гармонік не враховуються.

© Босий Д. О., Синьогіна О. М., 2014

Таблиця 2

**Значення похибок, отриманих з модуля вимірювання похибок лічильників**

Прилад	Похибка $\delta_c$ , % за умов		
	$\varphi_1 = 0$	$\varphi > 0$	$\varphi < 0$
Лічильник 1	$\infty$	-0,171	0,26
Лічильник 2	100	-5,151	3,883
Лічильник 3	0	-0,098	-0,123

**Висновки**

Цифрові системи обліку можна побудувати для будь-якого класу точності при відповідному виборі елементної бази та алгоритмів обробки інформації.

Електронні прилади обліку електричної енергії можуть мати декілька алгоритмів визначення реактивної потужності, які базуються на

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Siczenko W. G. Badanie liczników różnych typów pod niezerównoważonym obciążeniu / W. G. Siczenko, O. P. Koszmak // Infrastruktura transportu. – 2013. – № 1. – P. 46-48.
2. Джиезо Кмети История электросчетчика // Электронный журнал энергосервисной компании Экологические системы [URL: [http://ecosys.narod.ru/2007\\_2/art146.htm](http://ecosys.narod.ru/2007_2/art146.htm)]. – № 2. – 2007.
3. ГОСТ 30207-94 Статистические счетчики Ватт-часов активной энергии переменного тока (классы точности 1 и 2). – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – 54 с.
4. Гуртовцев, А. Электронные счетчики. Доверяют или проверяют? / А. Гуртовцев, В. Бордаев, В. Чижонков // Электронный журнал «Новости Электротехники». – 2005. – № 1(31), 2(32).
5. Тонкаль, В. Е. Баланс энергий в электрических цепях / В. Е. Тонкаль, В. А. Новосельцев, С. П. Денисюк. – К.: Наук. Думка, 1992. – 312 с.
6. Тубинис, В. В. Европа принимает общие технические требования к приборам учета топливных энергетических ресурсов / В. В. Тубинис, О. В. Балашов // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2005. – № 1. – С. 47-51.
7. ДСТУ 2708:2006. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення.
8. ГОСТ 8.401-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования. – Взамен ГОСТ 13600-68; Введ. 01.07.81.
9. Босий Д. О. Особливості роботи електронних лічильників у несинусоїдних режимах тягових підстанцій електричного транспорту / Д. О. Босий // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – №9 (115). – С.29-37.

відомих теоретичних підходах до визначення неактивних складових повної потужності.

Приведені результати досліджень показують, що при виборі типу комерційних приладів обліку для нелінійних навантажень, зокрема для тягових підстанцій постійного та змінного струму, необхідно звертати увагу на результати випробувань при заниженій якості електричної енергії.

За результатами вимірювань встановлено, що при вимірюванні активної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням, а при вимірюванні реактивної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням лише для реактивної потужності першої гармоніки та при коефіцієнті спотворення форми струму не більше за 25%

**REFERENCES**

1. Siczenko W. G. Badanie liczników różnych typów pod niezerównoważonym obciążeniu / W. G. Siczenko, O. P. Koszmak // Infrastruktura transportu. – 2013. – № 1. – P. 46-48.
2. Dzhiezo Kmeti Istorija elektroschetchika [History of the meter] // Electronic Journal of the energy service company Environmental Systems [URL: [http://ecosys.narod.ru/2007\\_2/art146.htm](http://ecosys.narod.ru/2007_2/art146.htm)]. – № 2. – 2007.
3. GOST 30207-94 Statistical watt-hour meters for active energy alternating current, Moscow, Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1996, 54 p.
4. Gurtovtsev A., Borodaev V., Chizhonok V. *Elektronnie schetchiki. Dovyat' ili provyatyat'* [Electronic meters. Trust or check?] // Electronic journal "News of Electrical Engineering", 2005, № 1(31), № 2(32).
5. Tonkal' V. E., Novoseltsev V. A., Denisyuk S. P. *Balans energiy v elektricheskikh tsepyah* [The energy balance in electrical circuits], Kiev, Scientific Thought Publ., 1992, 312 p.
6. Tubinis V. V., Bapashov O. V. *Evropa prinimaet obshchie tehnicheckie trebovaniya k priboram ucheta toplivnykh energeticheskikh resursov* [Europe takes the general technical requirements for metering devices of fuel and energy resources] // Electro. Electrical Engineering. Electric power industry. Electrical industry, 2005, №1, pp. 47-51.
7. DSTU 2708:2006. *Povirka zasobiv vymiruval'noyi tehniki. Organizatsiya ta porydok provedennya* [Verification of measuring instruments. Organization and procedures].
8. GOST 8.401-80. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Klassi tochnosti* [State system for ensuring the uniformity of measurements. Accuracy classes of measuring instruments], Moscow, Stand. Publ., 1981.
9. Bosiy D. O. *Osoblyvosti roboty elektronnykh lichil'nykh u nesinusoidnykh rezhimakh tyagovykh pid-*

Надійшла до друку 12.05.2014.

*stantsiy elektrichnogo transportu* [Features of electronic meters in nonsinusoidal modes of traction substations of electric transport] // Energy saving. Energetics. Energy audit, 2013, № 9(115), pp. 29-37.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

В статті розглядається питання виникнення похибок електронних лічильників унаслідок спотворення синусоїдності напруги і струму на тягових підстанціях електрифікованих залізниць. Проаналізовано область застосування, необхідність створення та основні етапи розвитку лічильників електроенергії. Запропоновано експериментальним шляхом визначити похибку електронного лічильника при невідповідності однієї з нормальних умов роботи, а саме наявності гармонійних спотворень у кривих струму та напруги. Виконані експериментальні дослідження в умовах учбової та сертифікованої лабораторії, які показали збіжні результати для широкого діапазону зміни коефіцієнта спотворення синусоїдності струму. Встановлено, що дослідні типи лічильників у своїй роботі налаштовані на класичне уявлення визначення реактивної потужності. Практичну цінність складає отримане в результаті досліджень критичне значення коефіцієнта спотворення, при якому лічильник виходить за межі, регламентовані класом точності.

**Ключові слова:** тягова підстанція, гармонійні спотворення, лічильник, електроенергія, похибка.

УДК 621.331.3

Д. А. БОСЬЙ, О. Н. СИНЕГИНА (ДНУЖТ)

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

## УЧЕТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СОВРЕМЕННЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ СЧЕТЧИКАМИ В УСЛОВИЯХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

В статье рассматривается вопрос возникновения погрешностей электронных счетчиков вследствие искажения синусоидальности напряжений и токов на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог. Проанализирована область применения, необходимость создания и основные этапы развития счетчиков электроэнергии. Предложено экспериментальным путем определить погрешность электронного счетчика при несоответствии одного из нормальных условий работы, а именно наличие гармонических искажений в кривых напряжений и токов. Выполнены экспериментальные исследования в условиях учебной и сертифицированной лаборатории, которые показали согласующиеся результаты для широкого диапазона изменения коэффициента искажения синусоидальности тока. Установлено, что исследуемые типы счетчиков в своей работе настроены на классическое представление определения реактивной мощности. Практическую ценность составляет полученное в результате исследований критическое значение коэффициента искажения, при котором счетчик выходит за пределы, регламентированные классом точности.

**Ключевые слова:** тяговая подстанция, гармонические искажения, счетчик, электроэнергия, погрешность.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.331.3

D. O. BOSIY, O. M. SINYOGINA (DNURT)

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

## THE ENERGY METERING OF THE MODERN ELECTRONIC METERS IN A HARMONIC DISTORTION CONDITION

The article discusses the occurrence of errors due to electronic meters harmonic distortion of voltages and currents in the traction substations of the electrified railways. The field of application, the need to create and the main stages of electric power meters development is analyzed. The accuracy of the electronic meter for non-compliance of one of the normal operating conditions, namely the presence of harmonic distortion in the voltage and current curves, invited to determine experimentally. Experimental researches in terms of educational and certified laboratory performed for a wide range of variation of total harmonic distortion of the current. Researches have shown consistent results. It has been established that the investigated types of meters in their work set to the classical concept of the definition of reactive power. Practical value is obtained as a result of research in critical distortion factor value at which the meter is outside the range which regulated by the class accuracy.

**Keywords:** traction substation, harmonic distortion, meter, electric energy, error, accuracy class.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

© Босий Д. О., Синьогіна О. М., 2014



УДК 656.224.022.846

С. В. АРПУЛЬ (ДНУЖТ)

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

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ И УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

### Введение

Необходимость обновления парка пассажирских электровазозов Укрзалізнички вызвана не только морально и физически устаревшим парком тягового подвижного состава, но и необходимостью освоения возрастающих объемов пассажирских перевозок, запланированным на перспективу повышением скоростей движения поездов, введением в эксплуатацию ускоренных и скоростных пассажирских поездов.

В связи с этим перед Укрзалізничкой возникает задача по выбору основных параметров перспективных электровазозов, использование которых обеспечит высокие значения показателей эксплуатационной работы.

Проблема выбора параметров номинального режима тяговых средств находилась в поле зрения отраслевой науки практически в течение всей истории внедрения и эксплуатации железнодорожного транспорта. И в этой области получен ряд самых важных решений известными учеными железнодорожниками [1-3].

Следует отметить, что названные выше исследования посвящены грузовым электровазозам.

Вместе с тем для пассажирских перевозок эта важная проблема исследована недостаточно.

Хотя в подходах к решению задачи определения основных параметров номинального режима грузовых и пассажирских электровазозов много общего, следует указать и на имеющие место отличия. Основное из них состоит в следующем.

Ряд важнейших показателей эксплуатационной работы грузового парка определяется не только мощностью номинального режима, но и параметрами, так называемого, расчетного режима – расчетной силой тяги и расчетной скоростью движения, поскольку эти параметры определяют важнейшие показатели перевозочного процесса – критическую массу поезда и скорость движения по расчетному подъему.

Для пассажирских электровазозов показатели расчетного режима не устанавливаются, поскольку

лькy составность пассажирских поездов определяется из условий освоения заданного объема перевозок при известном времени хода и минимальных издержках. Вместе с тем важными эксплуатационными параметрами пассажирского электровазоза являются пусковая сила тяги и так называемая пусковая скорость. Если сила тяги расчетного режима грузового электровазоза определяет критическую массу поезда для заданного расчетного подъема, то пусковая сила тяги пассажирского электровазоза и его пусковая скорость определяют ускорение поезда в период разгона и достижимый уровень технической скорости движения.

В связи с изложенным, основной целью настоящего исследования является определение рационального значения скорости номинального режима пассажирских электровазозов для повышения эффективности перевозок на железных дорогах Украины за счет снижения расхода энергоресурсов на тягу поездов.

### Формулировка задачи оптимизации мощностного ряда пассажирских электровазозов

Мощность номинального режима тяговых средств определяют два параметра – скорость движения и сила тяги. Поэтому решение задачи об определении параметров номинального режима электровазоза, в общем случае должно содержать рекомендации по выбору обоих названных выше параметров.

Однако при использовании предложенной в [4] методики учета массы электровазоза и расчета области определения управляющих параметров в уравнении движения поезда, задача определения оптимальной скорости движения номинального режима может рассматриваться как самостоятельная задача. Чтобы подтвердить сказанное, рассмотрим подробнее постановку задачи об определении параметров номинального режима.

В качестве показателей рациональности выбора мощностного ряда пассажирских локомо-



тивов целесообразно принять минимум затрат энергоресурсов на тягу поездов, суммарной мощности потребного локомотивного парка и кратности тяги, поскольку снижение численных значений этих показателей ведет к уменьшению капитальных вложений на обновление локомотивного парка и снижению эксплуатационных затрат, а следовательно обуславливает повышение рентабельности пассажирских перевозок. Последнее обстоятельство в настоящее время приобретает особую значимость, так как в современных экономических условиях для рынка транспортных услуг характерна жесткая конкуренция между различными видами транспорта.

Подробное обоснование названных выше критериев оптимизации изложено в исследовании [3] для решения задачи выбора оптимальных параметров грузовых электровозов.

С учетом условий, изложенных при определении предельных тяговых характеристик в [4], задачу определения оптимального мощностного ряда пассажирских электровозов сформулируем следующим образом.

Для заданных:

–значений технической скорости движения пассажирских поездов  $v_T$ ;

–характеристик профиля пути  $i(s)$ ;

–составности пассажирских поездов  $n$

найти такое сочетание параметров номинального режима мощностного ряда

$$\begin{aligned} &\{N_{n1}, v_{n1}, F_{кн1}\}; \\ &\{N_{n2}, v_{n2}, F_{кн2}\}; \\ &\dots; \\ &\{N_{nn}, v_{nn}, F_{кнn}\}, \end{aligned}$$

которые обеспечили бы освоение заданного пассажиропотока при минимальных значениях:

–затрат электроэнергии на тягу поездов  $a$ ;

–избыточной мощности потребного инвентарного парка  $y_N$ ;

–кратности тяги, необходимой для ведения поездов реальной составности  $y_k$ ,

т.е. чтобы

$$\left. \begin{matrix} a \\ y_N \\ y_k \end{matrix} \right\} \rightarrow \min$$

при выполнении условий:

– минимальное ускорение поезда при разгоне

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{0 \leq v \leq v_{п}} \geq a_{пз} \quad (1)$$

– ускорение при конструкционной скорости

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{v=v_{к}, i=0} \geq a_{о3} \quad (2)$$

– максимальная скорость движения на участке

$$v \leq v_{\max};$$

– максимальная сила тяги

$$F_{кп} \leq F_{сц};$$

– температура обмоток тяговых двигателей

$$\tau \leq \tau_{доп};$$

Заметим, что рассматриваемая задача от сформулированной в [3] задачи выбора оптимального мощностного ряда грузовых электровозов существенно отличается присутствием ограничений (1) и (2).

Сформулированная задача является задачей векторной оптимизации с числом показателей равным трем. Как показано в [5], при таком числе показателей оптимальности весьма трудоемок процесс алгоритмизации решения и интерпретации полученных результатов.

Прежде, чем приступить к решению сформулированной задачи, рассмотрим возможные пути ее упрощения. Для этого установим параметры, определяющие удельный расход электроэнергии на тягу поездов.

Как следует из [4], при принятом подходе к определению координат предельной тяговой характеристики, т.е. в случае, когда масса локомотива определяется из условия полного использования сил сцепления и обеспечения заданной величины пускового ускорения  $a_{пв}$ , предельная величина удельной силы тяги не является функцией массы состава, а определяется величиной пусковой (или номинальной) скорости движения.

Это значит, что при фиксированной скорости номинального режима сила тяги электровоза пропорциональна массе состава, и в то же время величина удельной силы тяги и удельного сопротивления движению остаются одинаковыми. Сказанное иллюстрируют графики

$F_K(v)$ ,  $W_K(v)$  и  $f_K(v)$ ,  $w_K(v)$ , показанные на рис. 1 и 2.

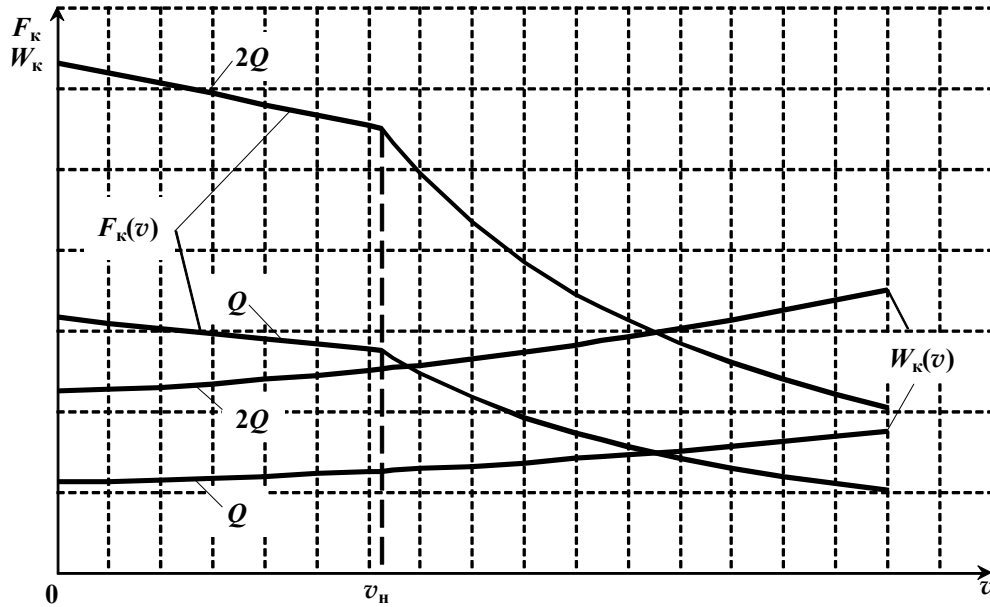


Рис. 1. Зависимость силы тяги электровоза  $F_K$  и сопротивления движению поезда  $W_K$  от массы состава  $Q$

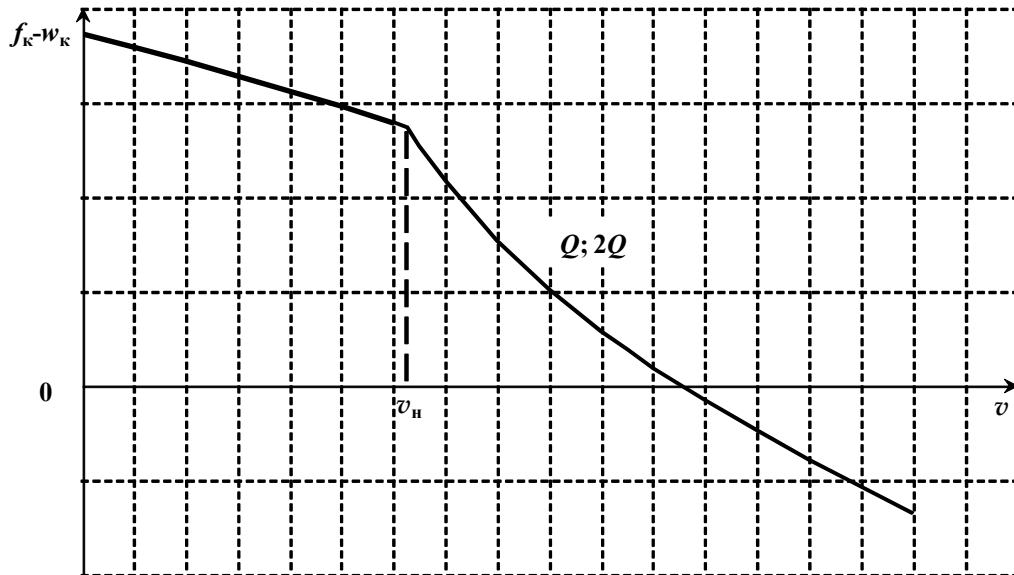


Рис. 2. Зависимость удельной ускоряющей силы от скорости движения поезда

Из изложенного факта следует важный вывод о том, что при используемом подходе к определению массы электровоза, при фиксированном значении скорости движения номинального режима, управление в режиме тяги, соответствующее минимальному расходу электроэнергии, будет одним и тем же для поездов различной составности и определяется единственным параметром – пусковой скоростью (или скоростью движения в номинальном режиме).

Правомерность выше сказанного очевидна из выражения

$$a = \frac{2,725(1+k_p)}{(s_K - s_H)} \int_{s_H}^{s_K} \frac{f_K(s)}{\eta(s)} ds, \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{т}\cdot\text{км} \quad (3)$$

где  $k_p$  – коэффициент, который представляет долю массы локомотива в массе состава;

$f_K(s)$  – удельная сила тяги электровоза;

$s_H, s_K$  – начальное и конечное значения

пути;

$\eta$  – к.п.д. электровоза.

Из выражения (3) следует, что удельный расход электроэнергии при заданном законе управления  $f_k(s)$  не зависит от массы состава.

Таким образом, трехкритериальная задача оптимизации, сформулированная выше, распадается на две самостоятельные задачи:

– определение скорости номинального режима  $v_{n(opt)}$  из условия

$$a(v_{n(opt)}, v_T) \rightarrow \min \quad (4)$$

при соблюдении сформулированных выше ограничений;

– определение оптимальной мощности электровоза, обеспечивающего при скорости номинального режима  $v_{n(opt)}$ , выполнение требования

$$\left. \begin{matrix} y_N \\ y_k \end{matrix} \right\} \rightarrow \min \quad (5)$$

В данной работе остановимся на решении первой из двух вышеназванных задач.

#### Методика определения оптимальной скорости движения номинального режима

Как показано в [4], скорость номинального режима практически однозначно определяется пусковой скоростью. Поэтому далее, краткости

для режима тяги 
$$w_0(v) = \frac{k_p w'_0(v) + [w''_0(v) + w_{пг}(v)]}{1 + k_p},$$

для режима выбега 
$$w_{ox}(v) = \frac{k_p w_x(v) + [w''_0(v) + w_{пг}(v)]}{1 + k_p},$$

где  $w'_0(v)$  и  $w_x(v)$  – удельное основное сопротивление движению электровоза в режиме тяги и выбега соответственно;

$w''_0(v)$  – удельное основное сопротивление движению состава;

$w_{пг}(v)$  – удельное сопротивление движению состава от подвагонных генераторов.

Режиму торможения соответствует условие  $u < 0$ , причем  $u$  определяется по  $b_k = 1000 \mathcal{G}_p \varphi_{кр}$ , где  $\mathcal{G}_p$  – расчетный тормозной коэффициент, определяемый действующими тормозными нормативами;  $\varphi_{кр}$  – расчетный коэффициент трения тормозных колодок.

Из приведенного выше следует, что используемая методика установления области опреде-

ради, будем говорить об определении именно этой скорости.

Оптимальное значение пусковой скорости, согласно (4), соответствует минимуму затрат электроэнергии на тягу поездов.

В [3] предложена методика решения задачи определения скорости расчетного режима грузовых электровозов из условия минимизации расхода электроэнергии. Проанализируем, в какой степени указанная методика может быть использована применительно к определению пусковой скорости пассажирских электровозов.

Рассмотрим задачу о движении поезда на некотором участке пути, то есть при условии, что  $i(s)$  задано для  $s \in [s_H, s_K]$ . Уравнение движения поезда представим в виде

$$v \frac{dv}{ds} = \xi [u - w_0(v) - i(s)] \quad (6)$$

где  $u$  – параметр управления.

При  $u > 0$  имеет место режим тяги, причем  $u=f(v)$  определяется выражениями, приведенными в [4].

В режиме холостого хода  $u = 0$  и в (6)  $w_0(v)$  должно быть заменено на  $w_{ox}(v)$ .

Основное сопротивление движению пассажирского поезда на основании получим в виде:

ления допустимых управлений в уравнении (6), позволяет для каждого заданного значения пусковой скорости  $v_{п}$  рассчитать допустимые управления  $u(s)$  и расход электроэнергии на тягу поездов.

Таким образом, предложенная в [3] методика определения скорости грузовых электровозов концептуально может быть использована для решения задачи об установлении параметров номинального режима пассажирских электровозов. Суть этой методики для рассматриваемой здесь задачи можно изложить следующим образом.

Каждому значению пусковой скорости  $v_{п}$  соответствует множество допустимых управлений  $u(s)$ , и соответствующих им кривых скорости  $v(s)$ , которые есть решениями уравнения

движения при существующих граничных условиях, ограничениях скорости и заданном времени хода. Решением сформулированной выше задачи есть такое управление  $u(s)$  которым соответствует минимальный расход электроэнергии при заданном времени хода по участку.

Варьируя время хода по участку и ставя в соответствие каждому его значению минимальный расход электроэнергии, получим некоторую кривую  $a_{\min}(t)$ , подобную показан-

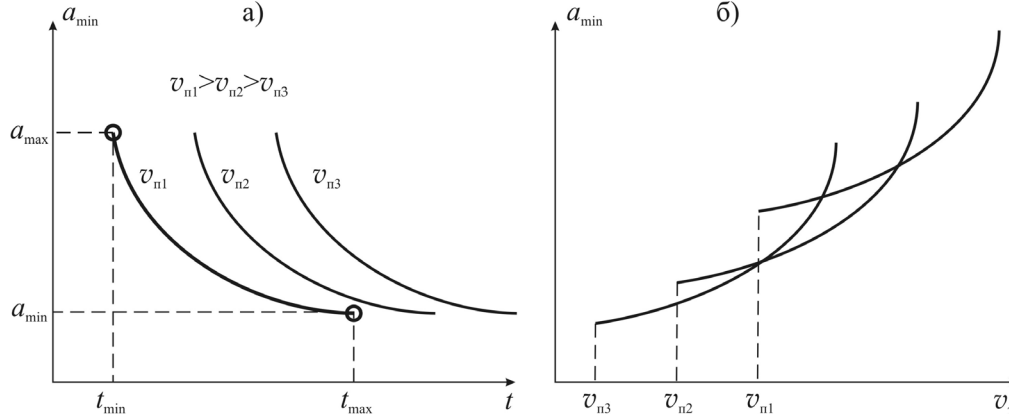


Рис. 3. Зависимость минимального расхода электроэнергии от времени (а) и технической скорости (б)

При решении задачи в качестве  $t_{\max}$  можно принять время хода с некоторой постоянной скоростью движения, например  $v=v_{\Pi}$ .

Каждому значению пусковой скорости будет соответствовать своя кривая  $a_{\min}(t)$ . Однако время хода зависит не только от скорости движения, но и от протяженности участка. Поэтому при решении поставленной задачи удобнее вместо кривых  $a_{\min}(t)$  использовать зависимости  $a_{\min}(v_T)$ , где  $v_T$  – техническая скорость движения поезда. Они будут иметь вид графиков, показанных на рис. 3б.

Каждому значению  $v_{\Pi}$  соответствует зависимость  $a(v_{\Pi}, v_T)$ , причем она характеризует данный участок независимо от составности поезда и его длины.

Варьируя значения пусковых скоростей, получим семейство кривых  $a_{\min}(v_T)$  как показано на рис. 3а, и затем зависимость

ной на рис. 3а. Точка кривой  $a_{\min}(t)$  с координатами  $(a_{\max}, t_{\min})$  соответствует минимально возможному времени хода на данном участке, т.е. управлению по быстрдействию. Наибольшее время хода по участку  $t_{\max}$  и минимальный расход электроэнергии  $a_{\min}$  соответствует движению с некоторой более низкой скоростью.

$$a_{opt}(t) = \min_{v_{\Pi} \in V_{\Pi}} a(v_T, v_{\Pi}) \quad (7)$$

где  $v_{\Pi}$  – множество допустимых значений пусковых скоростей.

Для заданного участка эта зависимость определяет пусковую скорость  $v_{\Pi(opt)}$  при которой заданная техническая скорость движения  $v_T$  может быть реализована при минимальном удельном расходе энергоресурсов.

Полученная изложенным способом зависимость  $v_{\Pi(opt)}(v_T)$  (рис. 4а) может быть рекомендована для выбора пусковой скорости электровозов, предназначенных для вождения поездов на данном направлении.

Зависимость  $v_{\Pi(opt)}(v_T)$  однозначно определяет удельную мощность электровоза, которую можно представить в виде, Вт/т

$$N_{y(opt)} = \frac{2,725}{k_f k_v} \left[ 1 + k_p (v_{\Pi(opt)}(v_T)) \right] \left[ w_{оп} (v_{\Pi(opt)}(v_T)) + i + 102 a_{\Pi} (1 + \gamma) \right] v_{\Pi(opt)}(v_T). \quad (8)$$

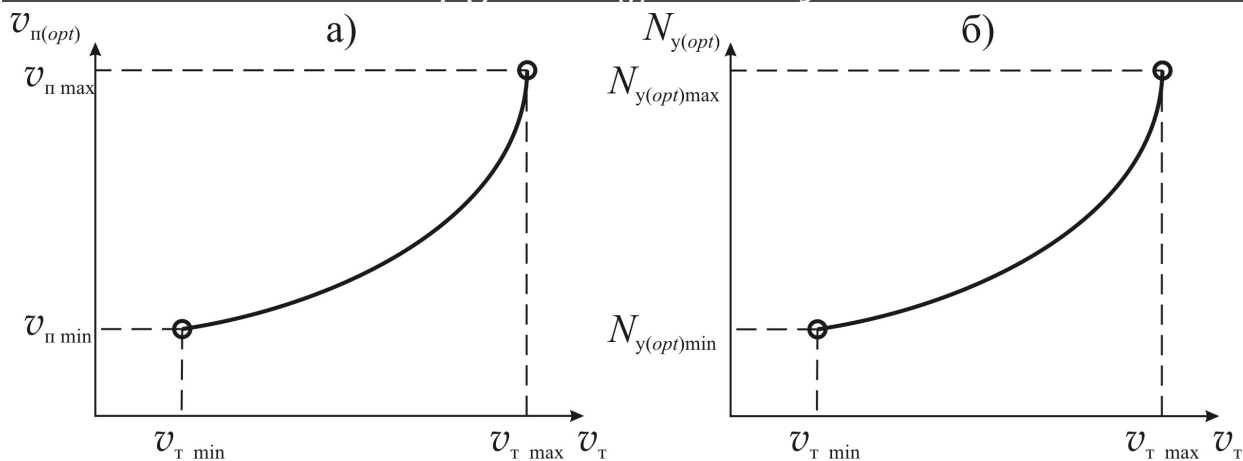


Рис. 4. Характер зависимости оптимальной пусковой скорости (а) и номинальной удельной мощности (б) от технической скорости

## Выводы

Приведенные зависимости  $v_{n(opt)}(v_T)$  и  $N_{y(opt)}(v_T)$  дают возможность, по заданным значениям массы состава и технической скорости

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сломянский А. В. Выбор типов магистральных локомотивов / А. В. Сломянский // Тр. ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат, 1960. – № 184. – 164 с.
2. Гетьман Г. К. Моделирование ограничений области допустимых управлений уравнения движения поезда в задачах тягового обеспечения / Г. К. Гетьман // Вісник Харківського державного політехнічного університету: зб. наук.пр. – Харків: ХДПУ, 1999. – № 85. – С.44-51.
3. Гетьман Г. К. Определение оптимальной по минимуму расхода энергии на движение поезда мощности локомотива // Транспорт. Математичне моделювання в інженерних та економічних задачах транспорту: Зб. наук.пр. / Ред. кол.: Босов А. А. / гол. ред./ та ін. – Дніпропетровськ: Січ, 1999. – С. 177–182.
4. Арпуль С. В. Моделирование области допустимых управлений уравнения движения пассажирского поезда / С. В. Арпуль // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2004. – № 4. – С.17-22.
5. Гетьман Г. К. Применение методов векторной оптимизации для решения задач тяговых расчетов / Г. К. Гетьман // Вісник Харківського державного політехнічного університету: зб. наук. пр. – Харків: ХДПУ, 1999. – № 62. – С.12-19.

Поступила в печать 12.06.2014.

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

сти движения (времени движения поезда), определить параметры номинального режима пассажирского электровоза, при которых перевозки могут быть осуществлены с минимальными энергозатратами.

## REFERENCES

1. Slomyanskiy A. V. *Vybor tipov magistralnykh lokomotivov* [Selection of the locomotive types] / A. V. Slomyanskiy // Tr. VNIIZhTa. – M.: Transzheldorizdat, 1960. – № 184. – 164 p.
2. Getman G. K. *Modelirovanie ogranicheniy oblasti dopustimyykh upravleniy uravneniya dvizheniya poezda v zadachakh tyagovogo obespecheniya* [Modeling of the limitations of the tolerance departments of the equations of motion of the train in the tasks of traction ensure] / G. K. Getman // Visnik Kharkivskogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu: zb. nauk.pr. – Kharkiv: KhDPU, 1999. – № 85. – pp. 44-51.
3. Getman G. K. *Opreделение optimalnoy po minimumu raskhoda energii na dvizhenie poezda moshchnosti lokomotiva* [Determination of optimal on a minimum consumption of energy for the movement of the trains of the locomotive power] // Transport. Matematichne modelyuvannya v inzhenernikh ta ekonomichnikh zadachakh transportu: Zb. nauk.pr. / Red. kol.: Bosov A. A. / gol. red./ ta in. – Dnipropetrovsk: Sich, 1999. – pp. 177–182.
4. Arpul S. V. *Modelirovanie oblasti dopustimyykh upravleniy uravneniya dvizheniya passazhirskogo poezda* [Modeling of the feasible region of the departments of the equations of motion a passenger train] / S/ V/ Arpul // Visnik Dnipropetrovskogo natsionalnogo universitetu zaliznichnogo transportu imeni akademika V.Lazariana. – 2004. – № 4. – С.17-22.
5. Getman G. K. *Primenenie metodov vektornoj` optimizatsii dlia resheniya zadach tiagovy`kh raschetov* [The use of the vector optimization methods for solving problems of traction calculation] / G. K. Getman // Visnik Kharkivskogo derzhavnogo politekhnichnogo universitetu: zb. nauk.pr. – Kharkiv: KhDPU, 1999. – № 62. – С.12-19.

Внешний рецензент Андриенко П. Д.

© Арпуль С. В., 2014



Проанализированы основные работы и методики определения параметров номинального режима грузовых электровозов и внесены соответствующие корректировки в методику определения номинальных скорости и мощности пассажирских электровозов.

Установлены основные критерии определяющие оптимальные значения параметров электровозов для пассажирского движения, а также рациональные значения мощностного ряда электровозов.

Показано, что при используемом подходе к определению массы электровоза, при фиксированном значении скорости движения номинального режима, управление в режиме тяги, соответствующее минимальному расходу электроэнергии, будет одним и тем же для поездов различной составности и определяется единственным параметром – пусковой скоростью (или скоростью движения в номинальном режиме).

Изложена методика определения оптимальной пусковой скорости пассажирских электровозов и удельной мощности номинального режима.

**Ключевые слова:** скорость номинального режима, ускоряющая сила, удельная номинальная мощность, основное удельное сопротивление движению, масса поезда.

УДК 656.224.022.846

С. В. АРПУЛЬ (ДНУЗТ)

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

## ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ТА ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ НОМІНАЛЬНОГО РЕЖИМА ПАСАЖИРСЬКИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Проаналізовано основні роботи та методики визначення параметрів номінального режиму вантажних електровозів і внесені відповідні коригування в методику визначення номінальних швидкості та потужності пасажирських електровозів.

Встановлені основні критерії, що визначають оптимальні значення параметрів електровозів для пасажирського руху, а також раціональні значення ряду потужностей електровозів.

Показано, що при використуваному підході до визначення маси електровоза, при фіксованому значенні швидкості руху номінального режиму, керуванні в режимі тяги, що відповідає мінімальній витраті електроенергії, буде однаковим для поїздів різної маси і визначається єдиним параметром – пусковою швидкістю (або швидкістю руху в номінальному режимі).

Викладена методика визначення оптимальної пускової швидкості пасажирських електровозів і питомої потужності номінального режиму.

**Ключові слова:** швидкість номінального режиму, прискорююча сила, питома номінальна потужність, основний питомий опір руху, маса поїзда.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

UDC 656.224.022.846

S. V. ARPUL (DNURT)

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

## THE DEFINITION OF SPEED AND POWER DENSITY NOMINAL MODE OF PASSENGER ELECTRIC LOCOMOTIVES

Analyze the core of the work and methods of definition of parameters nominal mode of freight locomotives and made appropriate adjustments to the method of determination of rated speed and power passenger locomotives.

The main criteria determining the optimum values of parameters of electric locomotives for passenger traffic, as well as rational values of the cardinality of a number of electric locomotives.

It is shown that when used the approach to determining the weight of electric locomotive, at the fixed value of speed of movement of the nominal mode, control mode draught corresponding to the minimum consumption of electricity, will be the same for different trains and is determined only parameter is the starting rate (or rate movements in the nominal mode).

Methodology of determining the optimal starting speed passenger electric locomotives and power density of the nominal mode.

**Keywords:** speed rated mode, accelerating power unit rated power of the main specific resistance movement, weight train.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

© Арпуль С. В., 2014

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЖТ)

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

## АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ИСТОЧНИКОВ МОЩНОСТИ СИСТЕМ ВЗАИМНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН

### Введение

Требования соответствующих стандартов и правил ремонта тягового и моторвагонного подвижного состава предусматривают проведение приёмо-сдаточных испытаний каждой вновь изготовленной или вышедшей из ремонта тяговой электромашины. Эти испытания представляют собой важную и неотъемлемую часть технологического процесса изготовления или ремонта тяговой электромашины, материальные затраты на которую входят в себестоимость конечной продукции [1,2].

Высокую энергетическую эффективность испытаний при относительно невысокой суммарной мощности источников питания обеспечивают системы взаимного нагружения, в которых происходит энергообмен между испытуемыми электромашинами. Источники внешнего питания в таких системах нагружения требуются для покрытия потерь мощности в испытуемых электромашинах [3].

Необходимость в модернизации существующих станций для испытания тяговых электрических машин в настоящий момент является очевидной. Однако вопрос о том, какой из вариантов системы нагружения будет наиболее рациональным для определённого типа испытуемых электромашин остаётся актуальным и до настоящего времени. Одним из весомых факторов, определяющих энергетическую эффективность систем взаимного нагружения и капитальные затраты на модернизацию испытательных станций, является структура источников питания системы.

В известных вариантах схемного решения системы взаимного нагружения тяговых электромашин используются источники электрической и механической мощности: источник напряжения; источник тока; источник момента; источник угловой скорости [4]. Каждый тип источников мощности имеет ряд преимуществ и недостатков. Причем, рациональность выбора одного из типов источников будет определять-

ся, в том числе, и принятым вариантом схемы взаимного нагружения тяговых электромашин.

### 1 Источники электрической мощности

К источникам электрической мощности, которые рассматриваются при синтезе систем взаимного нагружения, относятся источники напряжения и источники тока. Под источником напряжения подразумевается источник электрической мощности, напряжение на выходе которого стабилизировано или изменяется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от тока нагрузки). Под источником тока подразумевается источник электрической мощности, сила тока которого стабилизирована или изменяется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от напряжения на нагрузке).

Схемные решения реальных источников напряжения и тока одинаковы в силовой части и отличаются, как правило, только структурой системы стабилизации. Обратная связь системы управления источником напряжения выполняется по напряжению, а источника тока – по силе тока. В одном случае используются датчики напряжения, в другом – датчики тока.

#### 1.1 Статические источники напряжения

Опыт проектирования силовых преобразователей показывает, что структура статического источника напряжения для систем взаимного нагружения может иметь целый ряд вариантов, рациональность которых будет определяться мощностью источника, уровнем и допустимыми пульсациями напряжения на его выходе [5].

Наиболее приемлемым для питания систем взаимного нагружения будут варианты источника напряжения, структурные схемы которых представлены на рис. 1-5.

Вариант 1 (рис. 1) характерен тем, что источник напряжения ИН (объединен пунктиром) включает в себя соединенные последовательно трёхфазный трансформатор Т и управляемый трёхфазный выпрямитель УВ. Вход трансформатора Т является входом источника ИН и со-

© Афанасов А. М., 2014

единён с сетью С, а выход выпрямителя УВ является выходом источника ИН, к которому и подключена система взаимного нагружения СВН. Регулирование выходного напряжения  $U_{и}$  осуществляется управляемым выпрямителем УВ.

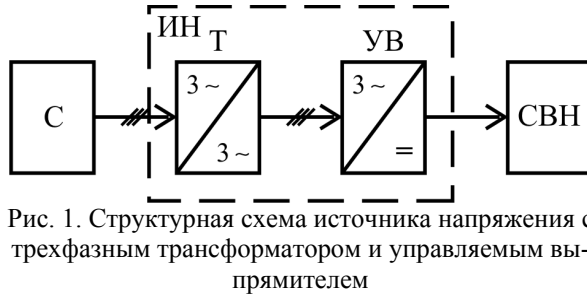


Рис. 1. Структурная схема источника напряжения с трехфазным трансформатором и управляемым выпрямителем

В варианте 2 (рис. 2) в отличие от варианта 1 отсутствует трехфазный трансформатор и управляемый трехфазный выпрямитель УВ подключен к сети С непосредственно.

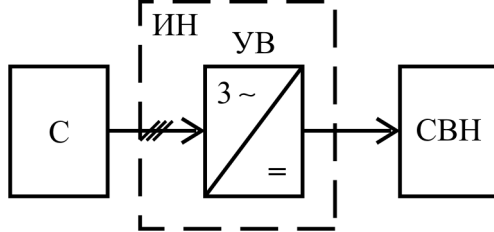


Рис. 2. Структурная схема источника напряжения с трехфазным управляемым выпрямителем

Вариант 3 (рис. 3) представляет собой структуру, содержащую последовательно соединенные трехфазный трансформатор Т, нерегулируемый трёхфазный выпрямитель НВ и импульсный регулятор ИР. Регулирование выходного напряжения  $U_{и}$  в данном варианте схемы осуществляется импульсным регулятором ИР.

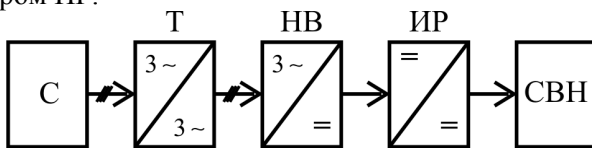


Рис. 3. Структурная схема источника напряжения с трехфазным трансформатором, выпрямителем и импульсным регулятором

В варианте 4 (рис. 4) в отличие от варианта 3 отсутствует трехфазный трансформатор, а неуправляемый трехфазный выпрямитель НВ подключен непосредственно к сети С.

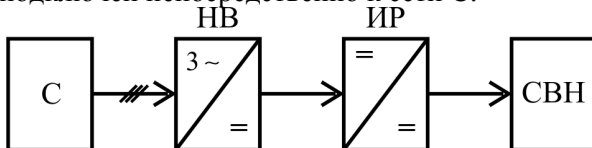


Рис. 4. Структурная схема источника напряжения с трехфазным выпрямителем и импульсным регулятором

Вариант 5 (рис. 5) представляет собой достаточно распространенную в настоящее время структуру, включающую в себя промежуточное звено переменного тока высокой частоты. Схема содержит трёхфазный выпрямитель (управляемый УВ или неуправляемый НВ), высокочастотный инвертор напряжения ИН, высокочастотный трансформатор Т и высокочастотный выпрямитель (неуправляемый НВ или управляемый УВ).

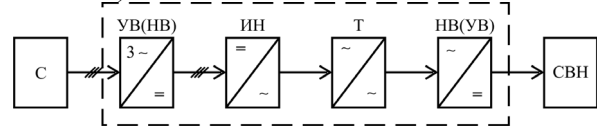


Рис. 5. Структурная схема источника напряжения с промежуточным звеном переменного тока высокой частоты

Одним из наиболее важных параметров, определяющих и структуру и характеристики статического источника напряжения ИН, является отношение выходного напряжения источника к входному напряжению сети [5]. Величина этого отношения определяет необходимость (или отсутствие таковой) использования трансформатора Т в структуре источника ИН и скважность импульсов импульсного регулятора ИР. Трёхфазный трансформатор является дополнительным преобразователем, наличие которого повышает себестоимость источника и снижает его коэффициент полезного действия.

Скважность импульсов регулятора ИР влияет на степень пульсации тока источника, определяет параметры силового ключа регулятора и его выходного фильтра, которые, в свою очередь, влияют на себестоимость всего источника напряжения ИН.

## 1.2 Электромашинные источники напряжения

Под электромашинными источниками напряжения будем понимать агрегированные приводной двигатель и электрический генератор [6]. В связи с тем, что базовым источником энергии является трёхфазная сеть переменного тока, в качестве приводного двигателя будем рассматривать только асинхронные электромашины промышленного назначения. Это могут быть асинхронные двигатели, как с короткозамкнутым, так и фазным ротором. В качестве генератора будем рассматривать наиболее подходящие варианты: генератор постоянного напряжения с независимым возбуждением и синхронный трёхфазный генератор с трёхфазным нерегулируемым выпрямителем. Схема

электромашинного преобразователя с генератором постоянного тока приведена на рис 6.

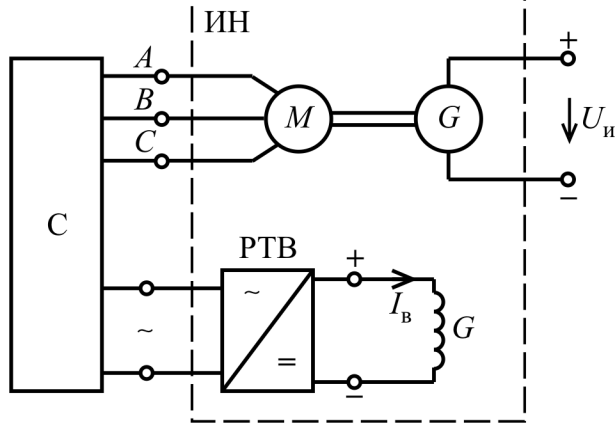


Рис. 6. Схема электромашинного преобразователя с генератором постоянного тока

Асинхронный двигатель М подключен к сети трёхфазного напряжения. его вал соединен с валом генератора постоянного напряжения G, обмотка возбуждения которого питается от регулятора тока возбуждения РТВ.

Регулятор тока возбуждения РТВ питается от сети трёхфазным либо однофазным переменным напряжением. Данное устройство, как правило, представляет собой трёхфазный либо однофазный управляемый выпрямитель.

Такая схема источника напряжения в настоящее время является наиболее распространенной в системах взаимного нагружения.

К преимуществам данной схемы компоновки источника относятся:

- относительная простота силовой части;
- высокая перегрузочная способность.

- Недостатками данного варианта являются:
- повышенная шумность;

относительная сложность подбора типа генератора с соответствующими номинальными данными.

Опыт использования такой компоновки источников напряжения на испытательных станциях показывает, что последний из недостатков настолько существенный, что является определяющим при сравнении электромашинных преобразователей со статическими. Невозможность подбора генератора с требуемыми номинальными параметрами вынуждает использовать в системах взаимного нагружения в качестве источников питания электромашин, однотипные с испытуемыми. Такая ситуация, в конечном счёте, приводит к многократному завышению суммарной мощности всех вспомогательных электромашин и к существенному

снижению энергетической эффективности испытательного стенда.

Из-за использования в качестве генераторов тяговых электромашин последовательного возбуждения источники питания их обмоток возбуждения выполняются низковольтными и сильноточными.

Схема электромашинного преобразователя с синхронным генератором приведена на рис. 7. Асинхронный двигатель М, подключенный к сети С, своим валом соединен с валом синхронного генератора G, к выходу которого подключен трехфазный неуправляемый выпрямитель. Обмотка возбуждения генератора G питается от регулятора тока возбуждения РТВ, который подключен к сети С.

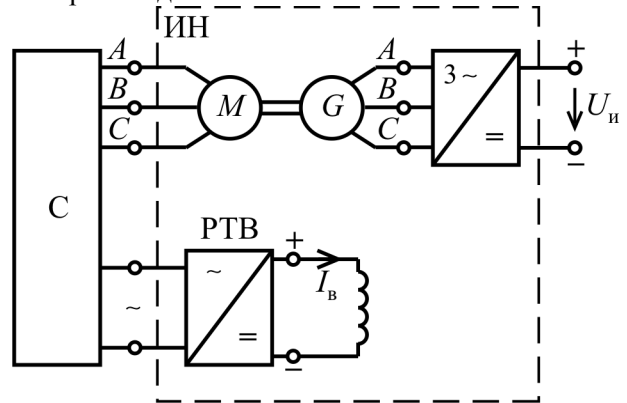


Рис. 7. Схема электромашинного преобразователя с синхронным генератором

К преимуществам такой схемы компоновки источника напряжения относятся:

- относительная простота силовой части;
- использование бесколлекторных электромашин.

- Недостатками данного варианта являются:
- невысокая перегрузочная способность;

- повышенная шумность;

относительная сложность подбора типа генератора с требуемыми номинальными данными.

Общим недостатком всех вариантов электромашинных преобразователей является существенное снижение их к. п. д. при сильно заниженной нагрузке, что затрудняет унификацию испытательного стенда.

Тем не менее, при точном подборе номинальных параметров генератора электромашинные преобразователи могут быть конкурентоспособными в сравнении со статическими. Их высокая перегрузочная способность является очень существенным преимуществом в сравнении с полупроводниковыми источниками питания.



Проблема, связанная со сложностью подбора типа генератора по номинальным параметрам может быть решена путем организации производства специальных электромашин.

## 2 Источники механической мощности

К источникам механической мощности, рассматриваемым при синтезе систем взаимного нагружения, относятся источники момента и источники угловой скорости.

Под источником момента подразумевается источник механической мощности, момент на валу которого стабилизирован или меняется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от угловой скорости вала).

Под источником угловой скорости понимается источник механической мощности, угловая скорость вала которого стабилизирована или меняется в достаточно узком заданном диапазоне (не зависит от момента на валу).

Практически источником механической мощности являются двигатели. В дальнейшем будем рассматривать только электрические двигатели, как наиболее приемлемые для использования на промышленных предприятиях [6].

То, в качестве какого источника механической мощности будет работать электрический двигатель, зависит от его механической характеристики  $M = f(\omega)$ , которая может быть сформулирована системой управления путём соответствующего регулирования входными параметрами.

Для получения источника момента необходимо формирование абсолютно мягкой механической характеристики ( $M = \text{const}$ ), а для получения источника угловой скорости – абсолютно жёсткой ( $\omega = \text{const}$ ).

Учитывая то, что источник угловой скорости (добавка угловой скорости) в соответствии со схемой компоновки системы взаимного нагружения должен иметь два вала (входной и выходной), конструктивно он будет существенно отличаться от источника момента. Рассмотрим данные источники механической мощности отдельно.

### 2.1 Источники механического момента

Структура источника момента, как и источника напряжения, может иметь целый ряд вариантов компоновки, рациональность которых будет определяться потребной выходной мощностью, угловой скоростью и моментом на валу.

Наиболее приемлемыми для систем взаимного нагружения будут варианты компоновки

источника момента, приведенные на рис. 8-10. В них используются электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения и асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым либо фазным ротором.

Вариант 1 (рис. 8) характерен тем, что в нём использован электродвигатель независимого возбуждения М, обмотка якоря которого подключена к сети С через регулятор напряжения РН (например, управляемый трёхфазный выпрямитель), а обмотка возбуждения – через регулятор тока возбуждения РТВ. Вал якоря двигателя и есть выходом источника, к которому присоединена система взаимного нагружения СВН. Регулятор напряжения РН в данном варианте может быть заменен на неуправляемый выпрямитель. Регулирование момента при этом может осуществляться регулятором тока возбуждения РТВ.

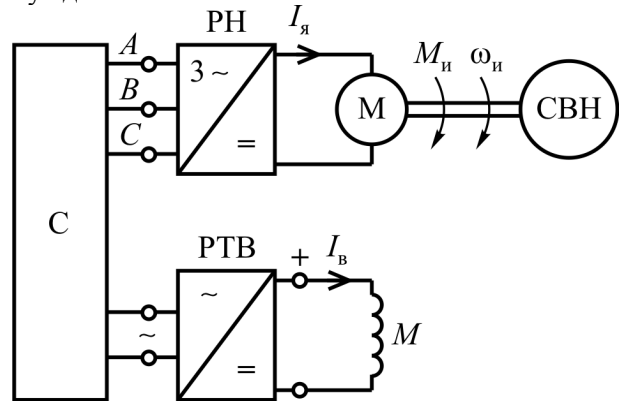


Рис. 8. Схема источника момента с двигателем постоянного тока независимого возбуждения

Вариант 2 (рис. 9) отличается тем, что в нём использован трехфазный асинхронный двигатель, который питается от сети трехфазного тока через регулятор частоты и напряжения РЧН. По существу – это частотно-управляемый асинхронный привод с соответствующим алгоритмом регулирования момента  $M_и$  и изменением частоты и амплитуды фазного напряжения на выходе регулятора РЧН [6].

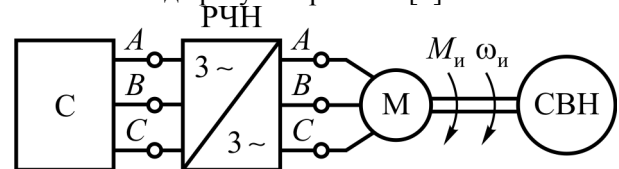


Рис. 9. Схема источника момента с частотно-управляемым асинхронным приводом

Вариант 3 (рис. 10) отличается от варианта 2 отсутствием регулятора частоты и напряжения и наличием редуктора Р, с помощью которого можно регулировать момент  $M_и$  на выходе



источника. Такое регулирование может быть как ступенчатым, так и главным (при использовании вариатора).

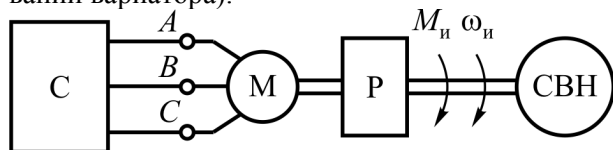


Рис. 10. Схема источника момента с асинхронным двигателем и редуктором

Преимуществом вариантов 1 и 2 является возможность широкого плавного регулирования величины момента  $M_{и}$ . Недостатком данных схем является наличие в источнике двух преобразователей мощности: регулятора напряжения и самого электродвигателя. И регулятор, и двигатель должен быть рассчитан на полную потребную мощность механического источника. Преобразование мощности в источнике – двойное.

Преимуществом варианта 3 является то, что асинхронный двигатель М питается от трехфазной сети непосредственно, без предварительного преобразования электрической мощности. Наличие дополнительного механического преобразователя (редуктора или вариатора) не умоляет данного преимущества, так как он намного дешевле электрического и, кроме того, может быть составляющей частью механического преобразователя момента (частоты) испытуемого двигателя в системах с таким способом создания небалансной электромагнитной мощности.

Недостатком варианта 3 является сложность широкого плавного регулирования выходного момента  $M_{и}$  и, возможно, необходимость в реостатном пуске асинхронного двигателя М. Он для этого должен быть с фазным ротором.

Здесь необходимо отметить, что использование в качестве приводного двигателя асинхронной электромашины с жёсткой механической характеристикой обеспечивает приемлемую стабилизацию частоты вращения испытуемых электромашин, а при стабилизации тока нагрузки – и величины напряжения на них. При проведении испытаний на нагрев регулирования передаточного отношения редуктора Р не требуется. Проверка же коммутации в соответствии с ГОСТ 2582-81 требует наличия еще двух значений испытательной частоты вращения, а следовательно и передаточного отношения редуктора. Использование ременных вариаторов позволит решить данную проблему при

испытании вспомогательных электромашин относительно невысокой мощности.

При испытании тяговых электромашин большой мощности для получения трех фиксированных значений передаточного отношения может быть использована коробка передач.

## 2.2 Источники угловой скорости

Предварительно необходимо отметить, что устройства данного типа в промышленных установках практически не используются. Причиной тому является как сложность технической реализации, так и отсутствие явной потребности в устройстве. Тем не менее, существование источника угловой скорости теоретически также обосновано, как и существование источника тока [4]. Как известно, угловая скорость является механическим аналогом силы тока. Кинематическая схема, поясняющая принцип работы источника угловой скорости, приведена на рис. 11.

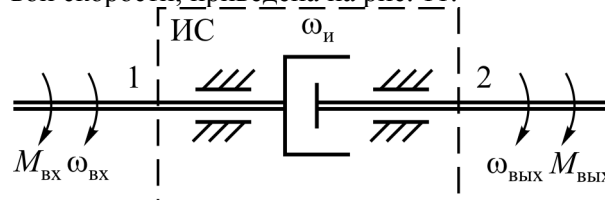


Рис. 11. Кинематическая схема источника угловой скорости

Устройство имеет два вала, один из которых условно назовём входным (вал 1), а другой (вал 2) – выходным. Отметим, что деление валов на входной и выходной также условно, как и разделение клемм электрического источника (источника тока) на положительную и отрицательную. Момент  $M_{вх}$  с входного вала 1 передаётся на выходной вал 2 за счёт внутренних сил взаимодействия двух частей устройства, соединённых с валами 1 и 2. Если данное устройство электромагнитной природы, то это, по существу, могут быть силы взаимодействия вращающегося индуктора с вращающимся якорем [6]. В результате такого взаимодействия возникает разность угловых скоростей вала 1 и вала 2 (добавка скорости  $\omega_{и}$ ).

$$\omega_{и} = \omega_{вых} - \omega_{вх}$$

где  $\omega_{вых}$  и  $\omega_{вх}$  – угловые скорости валов 2 и 1 соответственно.

Так как силы взаимодействия двух частей источника скорости (индуктора и якоря) являются внутренними реакциями, моменты на валах 1 и 2 равны между собой.

$$M_{\text{ВЫХ}} = M_{\text{ВХ}} = M_{\text{ИС}}$$

Любой электродвигатель со стабилизированной частотой вращения вала может рассматриваться как частный случай источника угловой скорости, входной вал которого «заземлен». Такой вариант источника скорости не может быть использован при передаче механической мощности от двигателя к генератору в системе взаимного нагружения из-за отсутствия возможности его включения между валами испытываемых электромашин.

Выходная мощность источника угловой скорости может быть представлена в виде

$$P_{\text{ИС}} = M_{\text{ИС}} \cdot \omega_{\text{И}}$$

При  $\omega_{\text{И}} = 0$  устройство представляет собой электромагнитную муфту, которая не является, в отличие от источника скорости, источником мощности ( $P_{\text{ИС}} = 0$ ).

Электромагнитная система источника скорости конструктивно может быть выполнена по принципу электромашин постоянного тока, асинхронной или синхронной электромашин.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. [Текст] / Государственный стандарт СССР. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 50 с.
2. Правила ремонту электричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063 [Текст]. – К.: Видавничий дім «САМ», 2003. – 286 с.
3. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
4. Афанасов, А. М. Системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока: монография / А. М. Афанасов. – Д.: Изд-во Маковецкий, 2012. – 248 с.
5. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
6. Автоматизированный электропривод / под ред. И. Ф. Ильинского. – М.: Энергоиздат, 1990. – 544 с.

Поступила в печать 03.06.2014.

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

Внешний рецензент Лежнюк П. Д.

Рассмотрены вопросы выбора рациональных схемных решений источников электрической и механической мощности для питания систем взаимного нагружения тяговых электрических машин. Проведен анализ возможных вариантов технического исполнения источников напряжения и тока, источников механического момента и угловой скорости. В анализе рассмотрены как статические, так и электромашинные преобразователи электрической мощности.

Рациональность использования того или иного альтернативного варианта предложено определять по таким критериям как: максимум энергетической эффективности системы взаимного нагружения электро-

При выборе рационального варианта источника мощности для питания системы взаимного нагружения тяговых электромашин необходимо учитывать структуру выбранного варианта силовой схемы испытательного стенда, стоимость комплектующих агрегатов и элементов источника, а также коэффициент полезного действия источника в заданных режимах нагружения испытываемых электромашин.

#### Выводы

Для питания систем взаимного нагружения тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока могут быть использованы как статические, так и электромашинные преобразователи мощности. Рациональность использования того или иного вида преобразователя определяется типом и номинальными данными тяговой электрической машины и выбранной структурой системы взаимного нагружения электромашин. Высокая энергетическая эффективность системы взаимного нагружения может быть достигнута за счет использования источников питания с минимальным количеством преобразователей мощности.

#### REFERENCES

1. GOST 2582-81. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye* [Rotating electrical machines traction] / *Gosudarstvennyy standart SSSR* – State Standard of the USSR. Moscow, Publisher standards, 1981. 50 p.
2. *Pravila remontu elektrichnikh mashin elektrovovoziv i elektropoizdiv. TsT-0063* [Rules repair electric cars and electric trains. TsT-0063]. Kiev, Publishing house «SAM», 2003. 286 p.
3. Zherve G. K. *Promyshlennye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electrical machines]. Leningrad, Energoatom Publ., 1984. 408 p.
4. Afanasov A. M. *Sistemy vzaimnogo nagruzheniya tyagovykh elektricheskikh mashin postoyannogo i pulsiruyushchego toka* [System of mutual loading traction electric machines constant and ripple current]. Dnipropetrovsk. Publishing house of Makovetsky, 2012. 248 p.
5. Burkov A. T. *Elektronnaya tekhnika i preobrazovateli* [Electronic technics and converters]. Moscow, Transport Publ., 1999. 464 p.
6. Ilinskiy I. F. *Avtomatizirovanny elektropriwod* [Automated electric drive]. Moscow, Energoizdat, 1990. 544 p.

машин; минимум капитальных затрат на создание новых или модернизацию существующих испытательных станций; возможность проведения всей программы приемо-сдаточных испытаний тяговых электромашин. Показано, что рациональность выбираемого варианта определяется номинальными данными испытываемых тяговых электромашин и принятой схемой их взаимного нагружения. Обоснована возможность выбора в качестве рационального варианта источников электрической мощности электромашинных преобразователей.

Результаты анализа могут быть использованы при проектировании станций для проведения приемо-сдаточных испытаний электрических машин тягового и моторвагонного подвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

**Ключевые слова:** тяговые электромашины, испытание, взаимное нагружение, источник мощности, преобразователь, выпрямитель, инвертор.

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЗТ)

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

## АНАЛІЗ СХЕМНИХ РІШЕНЬ ДЖЕРЕЛ ПОТУЖНОСТІ СИСТЕМ ВЗАЄМНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМАШИН

Розглянуті питання вибору раціональних схемних рішень джерел електричних та механічної потужності для живлення систем взаємного навантаження тягових електричних машин. Проведено аналіз можливих варіантів технічного виконання джерел напруги і струму, джерел механічного моменту та кутової швидкості. В аналізі розглянуті як статичні, так й електромашинні перетворювачі електричної потужності.

Раціональність використання того чи іншого альтернативного варіанту запропоновано визначати за такими критеріями як: максимум енергетичної ефективності системи взаємного навантаження електромашин; мінімум капітальних витрат на створення нових чи модернізацію існуючих випробувальних станцій; можливість проведення всієї програми приймально-здавальних випробувань тягових електромашин. Показано, що раціональність обираемого варіанту визначається номінальними даними випробовуваних тягових електромашин та прийнятою схемою їх взаємного навантаження. Обґрунтовано можливість вибору в якості раціонального варіанту джерел електричної потужності електромашинних перетворювачів.

Результати аналізу можуть бути використані при проектуванні станцій для проведення приймально-здавальних випробувань електричних машин тягового і моторвагонного рухомого складу магистрального та промислового транспорту.

**Ключові слова:** тягові електромашини, випробування, взаємне навантаження, джерело потужності, перетворювач, випрямляч, інвертор.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 629.423.31-048.24

A. M. AFANASOV (DNURT)

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

## ANALYSIS OF SCHEMATICS POWER SOURCES OF MUTUAL TRACTION LOAD ELECTROMACHINES

The problems of rational choice schematics sources of electrical and mechanical power supply systems for the mutual loading traction electric machines. The analysis of possible sources of technical performance voltage and current sources of mechanical torque and angular velocity. The analysis considered both static and rotating converters of electric power.

Rational use of alternative is proposed to determine the criteria such as: maximum energy efficiency of electric system load mutual; minimum capital expenditures for new or upgrading existing test stations; possibility of carrying out the program of acceptance testing of electric traction. Shown that rationality option that is selected is determined by the nominal values of traction electric cars that are tested and accepted scheme of their mutual loading. The possibility to select as a rational option sources of electric power rotating converters.

The analysis can be used in the design of stations for receiving and acceptance testing of electrical machines traction and multiple units of the main industrial and transport.

**Keywords:** traction electric machine, testing, mutual loading, power source, transformer, rectifier, inverter.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Lezhnyuk P. D.*

© Афанасов А. М., 2014

Д. О. КУЛАГІН, П. Д. АНДРІЄНКО (ЗНТУ)

Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, м. Запоріжжя, Україна,  
тел.: +38 (066) 236-52-71, ел. пошта: [nemix123@rambler.ru](mailto:nemix123@rambler.ru)

## ПОБУДОВА СХЕМИ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ МОТОРВАГОННОГО ПОЇЗДА З МОЖЛИВІСТЮ РЕКУПЕРАЦІЇ

### Вступ

Вибір схеми тягової електропередачі визначає характеристики, режими та показники використання всього моторвагонного поїзда під час експлуатаційних режимів.

Прийнята схема тягової електропередачі повинна забезпечувати:

- встановлені тягові властивості для всього моторвагонного поїзда;
- високий експлуатаційний коефіцієнт корисної дії (ККД) в усіх режимах (в цій вимозі виходять з максимально можливого ККД в режимі тяги та рекуперації);
- простоту побудови за мінімально можливою кількістю вузлів схеми, що забезпечить простоту монтажу, пусконаладжувальних робіт, експлуатації, поточних та капітальних ремонтів, доступність всіх вузлів для огляду та оперативної заміни;
- високу експлуатаційну надійність.

### Постановка задачі

Проектована перспективна схема тягової електропередачі повинна бути оптимізованою за певними принципами:

- параметричний принцип, за яким при заданій структурі тягової електропередачі та відомих функціональних впливах на її елементи потрібно визначити такі параметри, при яких задовольняються задані показники якості перехідних процесів в елементах тягової електропередачі [1, 2];
- структурний принцип, відповідно до якого тягова електропередача повинна містити мінімально необхідне число елементів, що легко фізично реалізуються для повноцінної роботи системи [2];
- функціональний принцип, за яким необхідно визначити закони керування всією електропередачею, а за ними структуру та чисельні значення параметрів елементів схеми передачі [2, 3].

### Мета роботи

Побудова та аналіз перспективної схеми тягової електропередачі дизель-поїзда для можливості здійснення рекуперації.

© Кулагін Д. О., Андрієнко П. Д., 2014

### Рішення задачі

До складу тягової електропередачі входять:

- дизельний двигун, що є первинним джерелом енергії;
- синхронний генератор;
- тяговий перетворювач частоти;
- перетворювач власних потреб;
- тяговий двигун;
- перетворювальні пристрої для забезпечення процесу заряд-розряд накопичувального елемента;
- система керування, що забезпечує узгоджену роботу всіх вузлів відповідно до оптимального режиму функціонування кожного з них, причому забезпечуючи найбільш раціональне споживання енергоресурсів кожним вузлом тягової електропередачі за даних умов експлуатації та при встановленому тяговому режимі моторвагонного поїзда. формування встановлених тягових характеристик поїзда шляхом узгодженої рекуперації та споживання енергії від накопичувального елемента тягової електропередачі також є задачею системи керування [4].

При цьому накопичувач енергії в поєднанні з перетворювальною системою, що забезпечує його роботу, повинен в комбінації з основними елементами тягової електропередачі забезпечувати вказані вимоги до електропередачі поїзда в усіх режимах експлуатації:

- режимі холостого ходу, при котрому відсутній обмін енергією між окремими компонентами передачі;
- режимі тяги з одночасною передачею енергії від ланки дизель – синхронний генератор та ланки накопичувача енергії на приводні колеса через тяговий перетворювач частоти;
- режимі тяги з використанням енергії тільки від ланки дизель – синхронний генератор на приводні колеса через тяговий перетворювач частоти, а в разі надлишку енергії - одночасної передачі надлишкової енергії до ланки накопичувача енергії для послідовного її використання за можливості;
- режимі вибігу з одночасним зарядом накопичувача енергії;

- режимі рекуперативного гальмування з одночасним переводом дизеля в режим холостого ходу [5].

Практичну побудову схеми тягової електропередачі розглянемо на прикладі перспективної схеми тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02.

Перспективна тягова електропередача візка дизель-поїзда ДЕЛ-02, представлена функціональною схемою рис. 1 і складається з дизеля Д, двообмоткового синхронного генератора СГ, некерованих випрямлячів НВ, до кожного з яких підключено гальмівний резистор ГР, блок фільтрів БФ, автономний інвертор напруги АІН, давач швидкості ДШ.

Окрім того, в каналі керування АІН міститься комплексний пристрій автоматики КПА, до якого входять сигнали зворотного зв'язку за швидкістю і фазним струмом з АД, сигнал давача завантаження дизеля ДЗД.

Керуючий сигнал  $U_{KM}$  від комп'ютера машиніста КМ діє на рівень подачі палива паливним насосом ПН до дизеля Д. Відповідно до швидкості обертання колінчатого вала дизеля ДЗД, що механічно зв'язаний з дизелем, фор-

мує сигнал про завантаженість дизеля на рівні від 0 до 5 В, який подається до КПА.

Відповідні сигнали зворотних та керуючих зв'язків КПА для другого АД візка на схемі для спрощення не показано.

Схема містить блок керування струмом збудження БКСЗ, що задає струм збудження  $i_{3\phi}$  для СГ.

Перетворювач для забезпечення власних потреб ПВП (навантаження власних потреб НВП включає в себе опалення вагонів, освітлення, підігрів води, системи пожежогасіння та сигналізації, кондиціонування, паливопідігрівачі та ін.) підключено до загальної шини постійного струму візка.

На рис. 1 пунктирною лінією виділено тяговий перетворювач частоти та його САК, перетворювач власних потреб ПВП та систему давачів, які виробляються ВАТ «НДІ «Перетворювач»».

Сигнали, що входять до КПА обробляються за певними законами в залежності від режиму роботи дизель-поїзда і подаються на регулятори швидкості та струму, вбудовані до КПА.

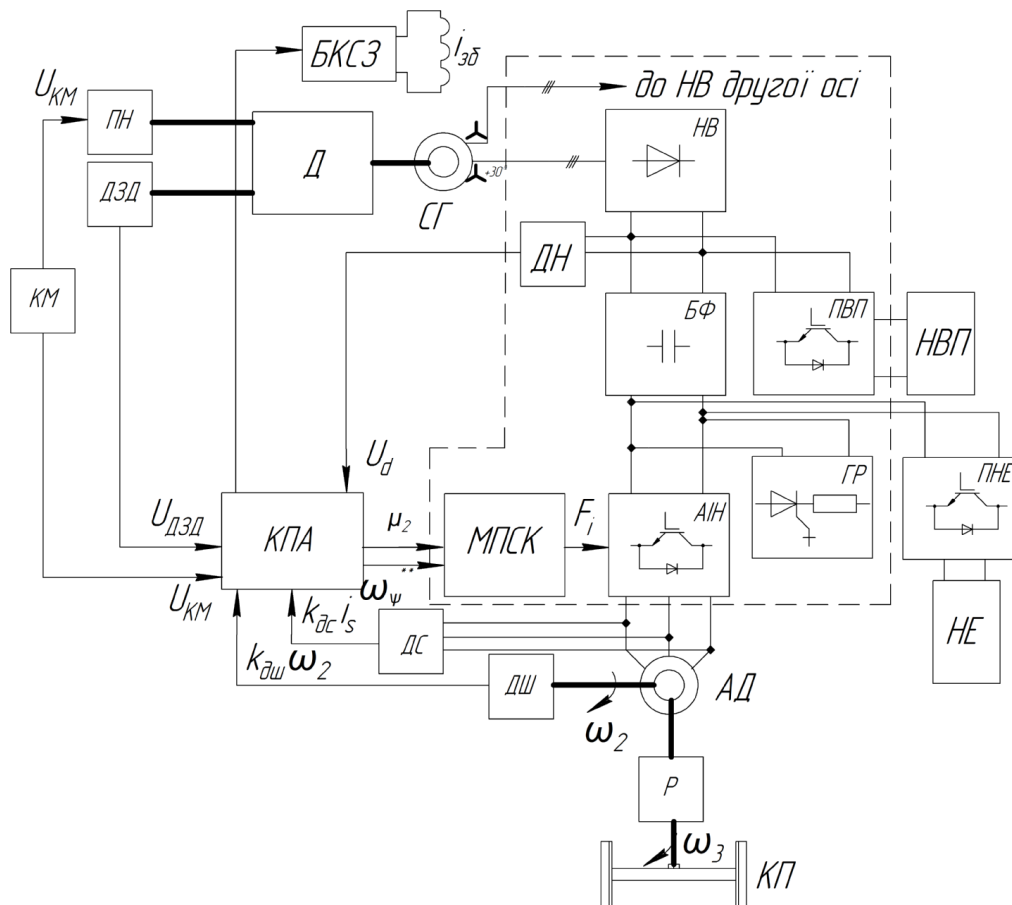


Рис. 1. Функціональна схема перспективної тягової електропередачі візка дизель-поїзда ДЕЛ-02



На рис. 1 показано також накопичувач енергії НЕ в поєднанні з перетворювальною системою накопичувального елемента ПНЕ, що забезпечує його роботу.

Зв'язок перетворювача власних потреб, системи гальмівного резистора, перетворювальної системи накопичувального елемента з КПА на схемі не показаний для спрощення побудови схеми, проте, дані зв'язки будуть показані в подальшому на узагальненій функціональній схемі.

Вихідний сигнал регулятора струму через існуючий в КПА задатчик інтенсивності (на основі інтегруючої ланки) формує значення завдання на швидкість обертання ротора АД та коефіцієнта модуляції  $\mu_2$  для АІН, що подаються в мікропроцесорну систему керування (МПСК). МПСК обробляє ці сигнали та виробляє імпульси керування АІН. Вбудований до КПА задатчик інтенсивності контролює зміни прискорення, швидкості, ривка та має можливості обмежувати темп зміни свого вихідного сигналу в залежності від значення струму в контурах тягової електропередачі.

КПА-МПСК являє собою складну інформаційну систему, впроваджену до тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 для комплек-

сного керування та контролю загальною системою механічних та електричних елементів руху дизель-поїзда, вибору оптимальних динамічних режимів руху та роботи окремих елементів електромеханічної частини, контролю роботи датчиків, системи власних потреб.

АД підключено через редуктор Р (передаточне число редуктора становить 2,1) до колісної пари КП візка вагона.

Характерною особливістю дизель-поїзда ДЕЛ-02 є наявність в тяговому генераторі двох трифазних обмоток, з'єднаних зіркою зі зміщенням між обмотками на 30 електричних градусів, від яких живляться некеровані трифазні мостові випрямлячі НВ візка, створюючи шину постійного струму зі значеннями напруги від 600 до 1500 В. До даної шини підключено два АІН, що живлять відповідно асинхронні тягові двигуни одного візка. На основі цих конструктивних особливостей вироблено характерні режими та закони керування АІН.

Зв'язок між системами регулювання рухом дизель-поїзда та системою керування ПЧ здійснюється по каналу CAN.

Узагальнена функціональна схема керування тяговою електропередачею візка дизель-поїзда показана на рис. 2.

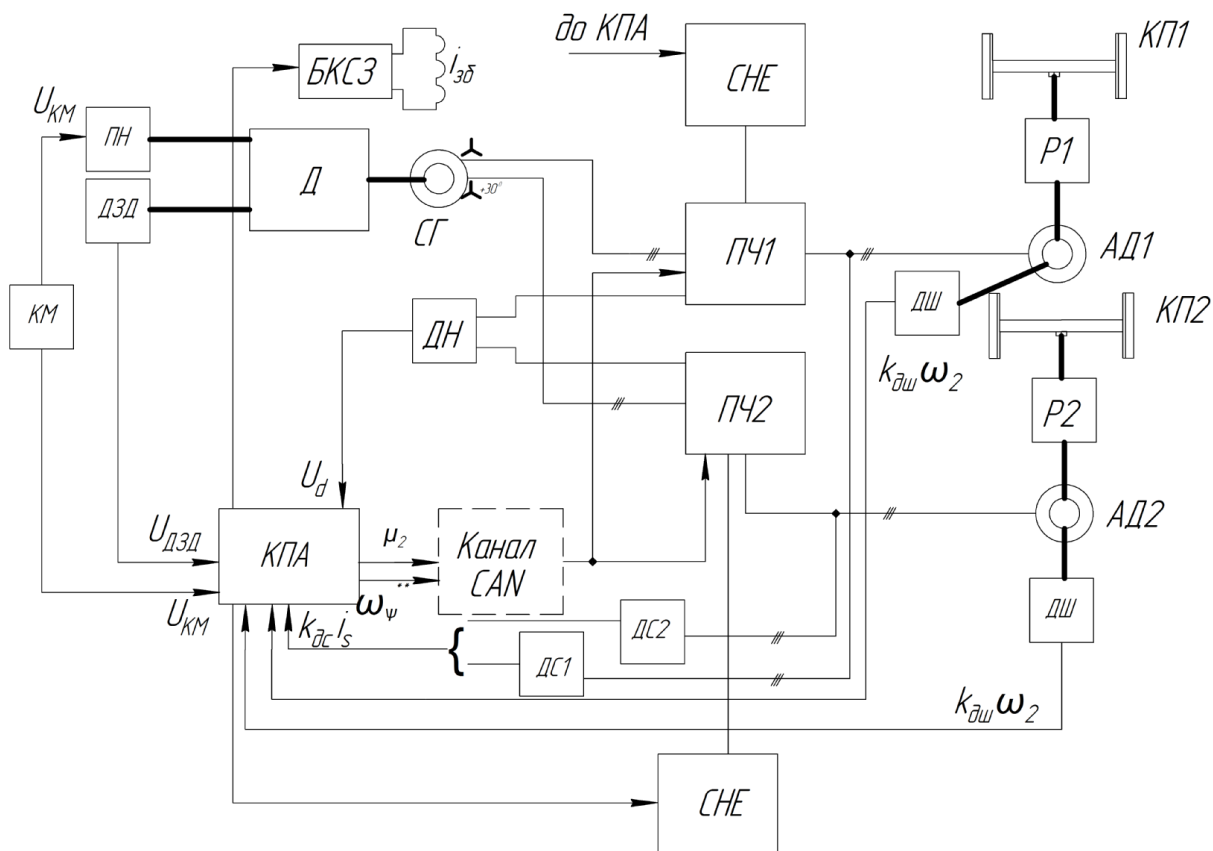


Рис. 2. Узагальнена функціональна схема перспективної тягової електропередачі візка дизель-поїзда ДЕЛ-02

На рис. 2 індексами 1 та 2 позначено відповідні елементи тягової електропередачі візка дизель-поїзда згідно з їх позначенням на рис. 4.11.

Також на рис. 2 позначено СНЕ – систему накопичувача енергії.

В початковий момент часу при нерухомому дизель-поїзді колісні пари заблоковано механічними гальмами. При цьому напруга в шині постійного струму підтримується на рівні 600 В за допомогою роботи дизеля на знижених обертах. Це дозволяє постійно підтримувати роботу перетворювача власних потреб ПВП, на який покладено ряд важливих функціональних завдань навіть при нерухомому дизель-поїзді.

Перетворювач власних потреб містить загальний знижуючий імпульсний стабілізатор і утворює шину 600 В, від якої живляться система обігріву вагонів потужністю до 40 кВт і другорядні споживачі загальною потужністю до 40 кВт (сигналізація, підігрів палива, давачі та ін.).

Вказана силова схема електропередачі і перетворювачів дозволяє поліпшити комфортність дизель-поїзда за рахунок забезпечення постійної напруги в системі опалення та освітлення незалежно від режиму роботи дизеля Д, підвищити ККД.

Підключення перетворювача власних потреб до загальної шини постійного струму дозволяє збільшити міру використання кінетичної енергії при русі дизель-поїзда на вибігу та з уклону, що сприяє зниженню витрат палива.

При появі сигналу завдання від комп'ютера машиніста КМ на рух поїзда формування імпульсів керування ключами АІН відбувається за ШІМ-принципом. При досягненні вихідної напруги АІН рівня 600 В процес формування сигналу керування ключами АІН відбувається за амплітудним принципом.

В такому режимі відбувається робота тягової електропередачі до моменту досягнення в шині постійного струму напруги 1500 В. Після цього в залежності від завдання на швидкість руху дизель-поїзда від КМ, відбувається перехід роботи САК до зони керування з ослабленим потокозчепленням. Зменшення модуля вектора потокозчеплення ротора АД досягається за сталого значення вихідної напруги АІН шляхом подальшого збільшення частоти завдання для тягового АД. При цьому зміна завдання модуля вектора потокозчеплення ротора АД відбувається пропорційно в блоці БФПР на основі сигналу модуляції  $\mu_2$ , виробленого КПА.

Активна складова статорного струму тягового АД для систем з АІН рівна повному стру-

му в ланці постійного струму тягового ПЧ і визначається шляхом встановлення давача струму на вході АІН.

Режим тяги з одночасною передачею енергії від ланки дизель – синхронний генератор та ланки накопичувача енергії на приводні колеса через тяговий перетворювач частоти забезпечується шляхом розряду накопичувача енергії НЕ через ПНЕ.

При цьому КПА, отримуючи сигнали з давачів всієї системи тягової електропередачі, регулює роботу ПНЕ таким чином, щоб напруга на статорі тягового двигуна та струм розряду НЕ забезпечували необхідний закон зміни тягової потужності для забезпечення встановленого тягового режиму на даній ділянці перегону.

Режим тяги з використанням енергії тільки від ланки дизель – синхронний генератор на приводні колеса через тяговий перетворювач частоти, забезпечується при закритій системі ПНЕ. В разі надлишку енергії система ПНЕ відкривається і відбувається одночасна передача надлишкової енергії до ланки накопичувача енергії для послідовного її використання за можливості.

В режимі вибігу з одночасним зарядом накопичувача енергії НЕ відбувається керування струмом збудження синхронного генератора у блоці БКСЗ таким чином, щоб забезпечувався оптимальний режим заряду накопичувача.

В режимі рекуперативного гальмування з одночасним переводом дизеля в режим холостого ходу КПА керує системою ПНЕ та гальмівним резистором так, щоб забезпечувався оптимальний режим заряду накопичувача і при цьому забезпечувався необхідний темп гальмування.

## Висновки

1. На прикладі електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02 показано побудову перспективної схеми тягової електропередачі для можливості здійснення рекуперації.

2. В якості активного поглинача енергії можна використати додатковий перетворювач для використання можливості рекуперації енергії. В якості пасивного поглинача енергії можна використовувати резистор, що підключається до конденсатора фільтра через додатковий керований ключ. При цьому, енергія, що розсіюється в резисторі, забезпечує контрольований гальмівний процес шляхом зміни активної складової струму, пропорційно до ковзання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электроприводами [Текст] / Булгаков А. А. – М. : Энергоиздат. – 1982. – 216 с.
2. Башарин А. В. Управление электроприводами [Текст] / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. – 392 с.
3. Дацковский Л. Х. Принципы построения систем регулирования асинхронных электродвигателей с инверторными преобразователями частоты [Текст] / [Л. Х. Дацковский и др.] // Электротехническая промышленность. Электропривод. – 1974. – № 5(31). – с. 28–32.
4. Кулагін Д. О. Проектування систем керування тяговими електропередачами моторвагонних поїздів : монографія [Текст] / Дмитро Олександрович Кулагін. – Бердянськ : ФО-П Ткачук О. В., 2014. – 154 с.
5. Механизация, автоматизация, информатизация, телекоммуникация и связь в отраслях производств : коллективная монография [Текст] / Андриенко П. Д., Кулагин Д. А. и др., [под ред. С. М. Ахметова]. – Новосибирск : издательство «СибАК», 2014. – 156 с.

Надійшла до друку 17.06.2014.

## REFERENCES

1. Bulgakov A. A. *Chastotnoe upravlenie asinkhronnymi elektropriivodami* [Frequency control of asynchronous electric drives] / Bulgakov A. A. – M. : Energoizdat. – 1982. – 216 p.
2. Basharin A. V. *Upravlenie elektropriivodami* [Control of electrical drives] / A. V. Basharin, V. A. Novikov, G. G. Sokolovskiy. – L. : Energoizdat. Leningr. otd-nie, 1982. – 392 p
3. Datskovskiy L. X. *Printsipy postroeniya sistem regulirovaniya asinkhronnykh elektrodvigatelay s invertornymi preobrazovatelyami chastoty* [Principles of construction of systems of regulation of the asynchronous electric motors with inverting frequency converters] / [L. Kh. Datskovskiy i dr.] // *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Elektroprivod.* – 1974. – № 5(31). – p. 28–32.
4. Kulagin D. O. *Proektuvannya sistem keruvannya tyagovimi elektropередachami motorvagonnikh poizdiv : monografiya* [Designing of control systems of traction electrical transmission of motorvagonna trains : monograph] / Dmitro Oleksandrovich Kulagin. – Berdyans'k : FO-P Tkachuk O. V., 2014. – 154 p
5. *Mekhanizatsiya, avtomatizatsiya, informatizatsiya, telekommunikatsiya i svyaz' v otraslyakh proizvodstv : kollektivnaya monografiya* [Mechanization, automation, Informatization, telecommunications and communications in the sectors of industry : collective monograph] / Andrienko P. D., Kulagin D. A. i dr., [pod red. S. M. Akhmetova]. – Novosibirsk : izdatel'stvo «SibAK», 2014. – 156 p

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

В даній статті розглядається побудова та аналіз перспективної схеми тягової електропередачі дизель-поїзда для можливості здійснення рекуперації. Практичну побудову схеми тягової електропередачі розглянуто на прикладі перспективної схеми тягової електропередачі дизель-поїзда ДЕЛ-02. Було розглянуто типovu тягову електропередачу, що містить дизельний двигун, що є первинним джерелом енергії, синхронний генератор, тяговий перетворювач частоти, перетворювач власних потреб, тяговий двигун, перетворювальні пристрої для забезпечення процесу заряд-розряд накопичувального елемента, систему керування. Накопичувач енергії в поєднанні з перетворювальною системою, що забезпечує його роботу, повинен в комбінації з основними елементами тягової електропередачі забезпечувати вказані вимоги до електропередачі поїзда в усіх режимах експлуатації: холостого ходу, тяги з одночасною передачею енергії від ланки дизель – синхронний генератор та ланки накопичувача енергії на приводні колеса через тяговий перетворювач частоти, тяги з використанням енергії тільки від ланки дизель – синхронний генератор на приводні колеса через тяговий перетворювач частоти, вибігу з одночасним зарядом накопичувача енергії, рекупративного гальмування з одночасним переводом дизеля в режим холостого ходу.

**Ключові слова:** дизель-поїзд, рекуперація, тягова електропередача, енергоефективність, проектування, конденсаторна установка.

УДК 621.331.33:621.423.24

Д. А. КУЛАГИН, П. Д. АНДРИЕНКО (ЗНТУ)

Запорізький національний технічний університет, ул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжє, Україна, тел. +38 (066) 236-52-71, ел. пошта: [nemix123@rambler.ru](mailto:nemix123@rambler.ru)

## ПОСТРОЕНИЕ СХЕМЫ ТЯГОВОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ МОТОРВАГОННОГО ПОЕЗДА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ РЕКУПЕРАЦИИ

В данной статье рассматривается построение и анализ перспективной схемы тяговой электропередачи дизель-поезда для возможности осуществления рекуперации. Практическое построение схемы тяговой электропередачи рассмотрено на примере перспективной схемы дизель-поезда ДЕЛ-02. Была рассмотрена типовая тяговая электропередача, которая содержит дизель, который является первичным источником энергии, синхронный генератор, тяговый преобразователь частоты, преобразователь собственных нужд, тяговый двигатель, преобразовательные устройства для обеспечения процесса заряд-разряд накопительного элемента, систему управления. Накопитель энергии в объединении с преобразовательной системой, которая обеспечивает его роботу, должен в комбинации с основными элементами тяговой электропередачи обеспечивать указанные требования к электропередаче поезда во всех режимах эксплуатации: холостого хода, тяги с одновременной передачей энергии от звена дизель – синхронный генератор и звена накопителя энергии на приводные колеса через тяговый преобразователь частоты, тяги с использованием энергии только от звена дизель – синхронный генератор на приводные колеса через тяговый преобразователь частоты, выбега с одновременным зарядом накопителя энергии, рекуперативного торможения с одновременным переводом дизеля в режим холостого хода.

**Ключевые слова:** дизель-поезд, рекуперация, тяговая электропередача, энергоэффективность, проектирование, конденсаторная установка.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

UDC 621.331.33:621.423.24

D. O. KULAGIN, P. D. ANDRIENKO (ZNTU)

Zaporizhzhya national technical University, street Zhukovsky, 64, 69063, Zaporizhzhya, Ukraine, phone +38 (066) 236-52-71, e-mail: [nemix123@rambler.ru](mailto:nemix123@rambler.ru)

## A SCHEME OF TRACTION POWER EMU-TRAIN WITH THE POSSIBILITY OF RECOVERY

This article discusses the construction and analysis of perspective schemes of traction power diesel trains for the purpose of recuperation. A practical scheme of traction power transmission considered by the example of promising schemes diesel train DEL-02. Was considered the typical traction transmission, which includes diesel, which is a primary source of energy, synchronous generator, traction inverter, Converter own needs, traction motor, Converter device for implementation of the process of charge-discharge cumulative element management system. The store of energy in Association with the inverter system, which gives the robot should in combination with the basic elements of traction power to provide these requirements to the transmission of a train in all modes of operation: idle thrust with simultaneous transfer of energy from the link diesel synchronous generator and link the drive power to the drive wheels traction through a frequency Converter, the thrust of using energy only from the level of diesel synchronous generator on the drive wheels traction through a frequency Converter, run with simultaneous charge of energy storage, regenerative braking with simultaneous translation diesel at idle.

**Keywords:** diesel train, recuperation, traction transmission, power efficiency, design, condenser installation.

Internal reviewer *Getman G. K.*External reviewer *Panasenko M. V.*

© Кулагін Д. О., Андриєнко П. Д., 2014

H. SEELMANN (BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY)

Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Institute of Railway Constructions and Structures, Veveří 331/95, 602 00 Brno, Czech Republic, e-mail: [seelmann.h@fce.vutbr.cz](mailto:seelmann.h@fce.vutbr.cz)

## ELECTRIC RAIL TRACTION IN CZECH REPUBLIC AND LEVEL OF EFFECTIVENESS AND ENERGY SAVING MEASURES

This measure aims to reduce the peak usage of energy for trams and trolley buses in order to limit the contracted reserve capacity and the related costs. As final result, in 2012 DPMB contracted 6.24% less of additional reserve capacity due to new system. At the moment 380 electric vehicles (240 trams and 140 trolleybuses) are equipped with this system, which was certificated by Czech Railways Authority and can now be implemented by all other public operators in Czech Republic.

### Brief history of electric rail traction in Czech Republic

#### Railway transport

The history of railway transport in Czech Republic began in 1827 when the first section of horse railway České Budějovice/Budweis – Linz (Austria) was opened. The first railway route operated by steam locomotives was section Břeclav – Brno (1839) of the Northern line from Vienna (first section Vienna – Deutsch Wagram opened in 1837). In 1903 the first electric railway, the local line Tábor – Bechyně went into operation (24 km in standard gauge, traction 2x700 V DC, today 1500 V DC). In 1912 there followed a second local line Rybník – Lipno nad Vltavou (22 km in standard gauge, traction 1200 V DC, from 1955-2003 with 1500 V DC, since 2003 with 25 kV AC/50Hz).

The next step was the electrification of the railway ring in Prague 1926-1928 (about 30 km standard gauge, traction 1500 V DC, since 1962 with 3000 V DC). Then it took nearly 20 years until the next extension: In 1957 there went into operation the first electrified long distance railway line Praha – Česká Třebová with a length about 160 km and traction 3 kV DC. From this time most of the main Czech (and also Slovak) railway routes have been continuously electrified. An important step has been made in 1965 with the electrification of the line Kutná Hora – Jihlava (90 km) with traction 25 kV AC/50 Hz. The existence of two traction systems in formerly Czechoslovakia, however, in the 1970s caused problems in flexible operation (there existed only locomotives or electrical units with one of the two tractions). Therefore company

Škoda in 1974 delivered the first dual-system locomotives. Today, Czech Railways (ČD) operate even three-system electrical units (class 680 „Pendolino“) and locomotives (class 380) which are able to operate also in Austria and Germany (with traction 15 kV AC/16.7 Hz).

Very important for the development and research on electric traction is the large test circuit of VUZ (Railway Research Institute) in Velim near Prague, which exists since 1963 and enables power supply either AC or DC current system (25 kV AC/50 Hz, 15 kV AC/16.7 Hz, 3 kV DC, 1.5 kV DC) and therefore allows the testing of many rail vehicles of European railway operators.

At the end of 2013 overall 3217 km of the 9468 km long railway network of SŽDC (the state owned Railway Infrastructure Administration of Czech Republic) are electrified (these are 34%) with the following traction systems:

- 1788 km with 3 kV DC (mainly in the north);
- 1391 km with 25 kV AC/50 Hz (mainly in the south);
- 24 km with 1.5 kV DC (local line Tábor – Bechyně);
- 14 km with 15 kV AC/16.7 Hz (line Šatov/near Austrian border – Znojmo, operated by trains of ÖBB/Austrian Federal Railways).

The allocation of today's electric traction systems can be seen on the following map (fig. 1).

#### Public urban transport (tram, metro, trolleybus)

History of electric urban rail transport in Czech Republic began in 1891 with the opening of the first tram line in Prague. Today tram systems exist in 7 cities (resp. agglomerations) with a total length of 356 km (2012). All systems are operated at voltages of approximately 600 V DC. The Czech Republic is also well known for its production of tramcars: Company ČKD-Tatra manufactured with tramcar T3 the most numerous type of tram in the world (about 14.000 units).

The only city with metro system in the Czech Republic is Prague. The first section opened in 1974 and today 3 lines with a total length of 59 km



are in operation. The traction is performed at voltage 750 V DC by third rail. For the future there are planned extensions of the existing lines as well as the construction of a fourth line.

Another speciality of electric urban rail transport in Czech Republic is the trolleybus which is considered here as railway (because of his overhead wire). The first trolleybus line was

opened in 1936 in Prague. Today trolleybus systems exist in 13 cities (resp. agglomerations) with a total length of 393 km (2012). Most systems are operated at voltages of 600 V DC, two of 750 V DC.

The allocation of today's electric urban rail transport can be seen on the following map (fig. 2).

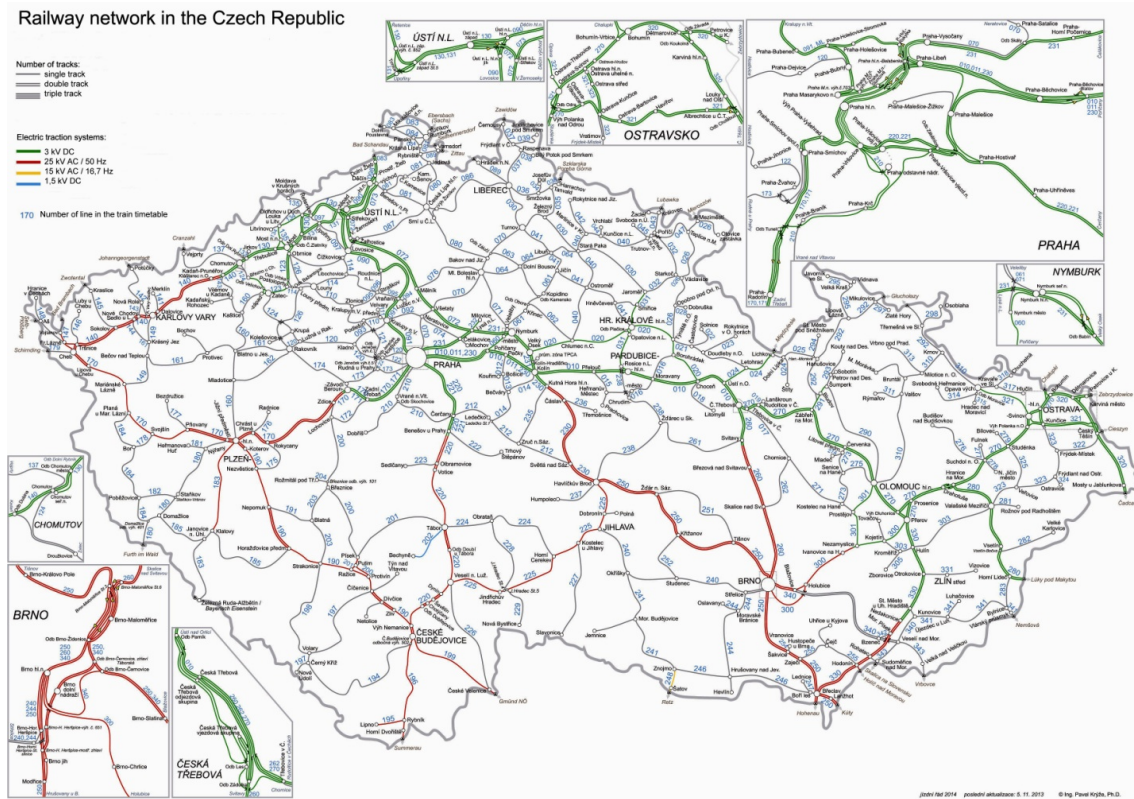


Fig. 1. Railway network in the Czech Republic

Source: SŽDC (Railway Infrastructure Administration of Czech Republic, state organization)



Fig. 2. Public urban transport

Source: Wikimedia Commons

## Level of effectiveness and energy saving measures on electric rail traction

### Use of multi-system electric locomotives and units

Because the existence of two traction systems in formerly Czechoslovakia caused problems in flexible operation in the year 1974 there were delivered the first dual-system locomotives. Today, Czech Railways (ČD and ČD Cargo) operate the following multi-system electric rail vehicles:

Two-system vehicles 3 kV DC and 25 kV AC/50Hz: 163 locomotives class 340 and 362/363.

Two-system vehicles 3 kV DC and 15 kV AC/16.7Hz: 16 locomotives class 371/372.

Three-system vehicles 3 kV DC, 25 kV AC/50Hz and 15 kV AC/16.7Hz: 20 locomotives class 380, 7 units class 680 („Pendolino“), 7 units class 640/650 („RegioPanter“).

Furthermore, locomotives from ZSSK (Slovakia) class 350 (3 kV DC, 25 kV AC/50Hz) and ÖBB (Austria) class 1116 (15 kV AC/16.7Hz, 25 kV AC/50Hz) and 1216 (3 kV DC, 15 kV AC/16.7Hz, 25 kV AC/50Hz) are running with international trains also in Czech Republic.

### Regenerative braking and recovery of electricity

Today regenerative braking and recovery of electricity in the electric railway network in Czech Republic is usual, but often in a limited form. The reasons for these limitations are:

Relatively small amount of electric locomotives and units capable for regenerative braking: Until now, these are 50 locomotives (class 363.5 and 380) as well as 97 units (class 440, 471, 640/650 and 680). Furthermore some locomotives of the ÖBB Taurus class (1116 and 1216) are running with international trains from and to Austria.

DC power supply system is a subject to restrictions on the maximum voltage: While European standards allow peak voltage of 3.9 kV, the locomotives of ČD and ČD Cargo have been only designed for a limit voltage of 3.6 kV.

Regarding the AC system the supplier of electricity (company ČEZ – Czech energy plants) initially was not very interested in regenerative braking and recovery of electricity due to the stochastic occurrence of these energy source (in case of older vehicles combined with additional problems like higher harmonics and worse power factors); all these problems increase the requirements on regulation of the entire supply network. Therefore, originally, regenerative braking was banned in the AC railway network. Because of newer technology

regenerative braking and recovery of electricity now continuously is allowed on more and more lines.

It is a goal of SŽDC and ČD to solve these problems and increase the amount of regenerative braking and recovery of electricity in the next years.

A different situation can be found in electric urban rail transport: The Prague Metro with a large number of simultaneously circulating units with frequent acceleration and deceleration has ideal conditions for regenerative braking. Also the Czech tram and trolleybus systems have made significant efforts in the recent years: A wide range of new vehicles put into service have regenerative braking. In addition in older vehicles the expired electromechanical equipment has been replaced by new electronic one which also enables regenerative braking.

### Automatic train leading by using magnetic information points

For purposes of automatic train leading (in Czech AVV) are on the track situated installations for identifying position, so-called magnetic information points. Magnetic information points are located in rails designed at the moment mainly for rides of local trains (with many stops). Description of the line („route map“) must be contained in the vehicle part of AVV („on-board“). Based on the train position identification, the route map and information transferred through the train control device and/or input by the driver the vehicle part of AVV ensures a continuous and economical train ride. With AVV local trains can achieve savings of 7-9% of traction energy. Currently, about 350 km of tracks and about 250 locomotives and units are completely equipped with ATL.

### Planned conversion of 3 kV DC to 25 kV AC/50 Hz

SŽDC, the state owned Railway Infrastructure Administration of Czech Republic, plans the conversion of its lines electrified with 3 kV DC to 25 kV AC/50 Hz during the next 30-40 years. Traction 25 kV AC/50 Hz is more efficient not only in investment but also operationally, e.g. eliminating damage by stray currents.

### Optimized Energy Consumption in Tram and Trolley Bus Network – A project of Brno Public Transport Company (DPMB)

This measure was realized within the EU-project CIVITAS-ELAN in the years 2009/2010. It aimed to reduce the peak usage of energy for trams

and trolley buses in order to limit the contracted reserve capacity and the related costs. Brno Public Transport Company (DPMB) has to contract its annual expected amount of electricity to ensure the electric vehicles operation. To obtain a balanced energy distribution, there is also a requirement for DPMB to book monthly a reserve capacity for each 15-minute interval. The costs related to reserve capacity have a negative influence on the cost of electricity because unused capacity still needs to be paid and exceeding the contracted reserve capacity is heavily penalised.

To achieve these objectives a remote heating control was installed in 380 electric vehicles (240 trams and 140 trolleybuses). This includes also an automatic warning system which in case of reaching the level of reserve capacity will generate the message to be transferred to the on-board computer in the electric vehicle and switch off the heating automatically for 5 minutes.

As final result, in 2012 DPMB contracted 6.24% less of additional reserve capacity due to new system and the total savings due to the operation of the system reached almost 132.000 EUR.

The whole system was certificated by Czech Railways Authority and can now be implemented by all other public operators in Czech Republic.

#### REFERENCES

1. Baudyš K. *Železniční osobní doprava* [Passenger rail transport]. *Ústav logistiky a managementu dopravy ČVUT v Praze, Fakulta dopravní* [Department of Logistics and Management of Transport of Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences]. Presentation, Praha, 2013.

2. Binko M. *Automatické vedení vlaku na síti SŽDC* [Automatic train leading on network of SŽDC]. SŽDC [Railway Infrastructure Administration, state organization]. Presentation, Praha, 2012.

3. Binko M. *Modernizace železniční infrastruktury do roku 2025* [Modernization of railway infrastructure up to the year 2025]. SŽDC [Railway Infrastructure Administration, state organization]. Presentation, Jeseník, 2013.

4. CIVITAS ELAN project in Brno. Optimised Energy Consumption in Tram and Trolleybus Network. Internet <http://www.civitas.brno.cz/>

5. *Ročenka dopravy České republiky 2012* – Transport Yearbook Czech Republic 2012. Ministerstvo dopravy – Ministry of Transport. Praha, 2013.

6. SPŽ – Stránky přátel železnic [Railway Fans Pages]. Statistiky vozidel železničních společností – České drahy / ČD Cargo [Statistics on vehicles of Railway companies – Czech railways / ČD Cargo]. Internet <http://spz.logout.cz/stat/stat.html>

7. SŽDC. *The Network Statement on nationwide and regional rail systems*. SŽDC [Railway Infrastructure Administration, state organization]. Praha, 2012.

8. SŽDC. *Prohlášení o dráze celostátní a regionální* [The Network Statement on nationwide and regional rail systems]. SŽDC [Railway Infrastructure Administration, state organization]. Praha, 2013.

9. SŽDC – *Správa železniční dopravní cesty* [Railway Infrastructure Administration, state organization]. Internet <http://www.szdc.cz/>

10. VUZ – *Výzkumný Ústav Železniční* [Railway Research Institute]. Internet <http://www.cdvuz.cz/>

11. Wikimedia Commons. Map of public transport in the Czech Republic.

Received 14.05.2014.

Internal reviewer Kuznetsov V. G.

External reviewer Tankevich E. M.

Czech Railways currently operate 163 two-system locomotives for 3 kV DC and 25 kV AC/50Hz, 16 two-system locomotives for 3 kV DC and 15 kV AC/16.7Hz, 20 locomotives and 14 units for three-systems (3 kV DC, 25 kV AC/50Hz, 15 kV AC/16.7Hz). Furthermore, some multi-system locomotives from Austria and Slovakia are running with international trains also in Czech Republic.

Regenerative braking and recovery of electricity in the electric railway network in Czech Republic is usual, but often in a limited form. Reasons are relatively small amount of electric locomotives and units capable for regenerative braking, restrictions on the maximum voltage in DC power supply system and restrictions because of requirements for the regulation of the overall network in AC power supply system.

With automatic train leading local trains can achieve savings of 7-9% of traction energy. Currently, about 350 km of tracks and about 250 locomotives and units are completely equipped with this system.

Optimized Energy Consumption in Tram and Trolley Bus Network is a project of Brno Public Transport Company. This measure aims to reduce the peak usage of energy for trams and trolley buses in order to limit the contracted reserve capacity and the related costs.

**Keywords:** electric traction, effectiveness, energy saving.



УДК 621.331.3

Х. СІЛМАН (ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, М. БРНО)

Технологічний університет м. Брно, факультет цивільного будівництва, Інститут залізничних споруд та будівель, вул. Вевері 331/95, 602 00 Брно, Чехія, ел. пошта: [seelmann.h@fce.vutbr.cz](mailto:seelmann.h@fce.vutbr.cz)

## ЕЛЕКТРИЧНА ТЯГА У ЧЕСЬКІЙ РЕСПУБЛІЦІ, РІВЕНЬ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЗАХОДИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Чеські залізниці обслуговуються 163 двосистемними електровозами для систем 3 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму частотою 50 Гц, 16 двосистемними електровозами для систем 3 кВ постійного струму та 15 кВ змінного струму частотою 16.7 Гц, 20 електровозів і 14 одиниць рухомого складу призначені для роботи на трьох системах електропостачання. Крім того, деякі багатосистемні електровози з Австрії та Словаччини також працюють на залізницях Чехії у складі міжнародних поїздів.

Рекуперативне гальмування та відновлення електроенергії в електричних мережах Чехії зазвичай використовується, але досить часто в обмеженому вигляді. Причиною тому є відносно невелика кількість електровозів та одиниць рухомого складу придатних для рекуперативного гальмування, обмеження стосовно максимальної напруги в системі тягового електропостачання постійного струму та обмеження стосовно вимог для регулювання в загальних мережах системи електропостачання змінного струму.

За допомогою технології автоматичного ведення поїзду приміські поїзди досягають економії електроенергії до 7-9 %. На даний час майже 350 км колій та близько 250 електровозів та одиниць рухомого складу обладнані цією системою.

Оптимізоване споживання енергії в мережах трамваїв та тролейбусів – проект компанії громадського транспорту Брно. Цей захід спрямований на зниження пікового навантаження для трамваїв та тролейбусів з метою обмеження договірної резервної потужності та пов'язаних з цим витрат.

**Ключові слова:** електрична тяга, ефективність, енергозбереження.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Танкевич Є. М.*

УДК 621.331.3

Х. СИЛМАН (ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, Г. БРНО)

Технологический университет г. Брно, факультет гражданского строительства, Институт железнодорожных сооружений и зданий, ул. Веверы 331/95, 602 00 Брно, Чехия, эл. почта: [seelmann.h@fce.vutbr.cz](mailto:seelmann.h@fce.vutbr.cz)

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА В ЧЕШСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ, УРОВЕНЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ

Чешские железные дороги обслуживаются 163 двухсистемными электровозами для систем 3 кВ постоянного тока и 25 кВ переменного частотой 50 Гц, 16 двухсистемными электровозами для систем 3 кВ постоянного тока и 15 кВ переменного тока частотой 16.7 Гц, 20 электровозов и 14 единиц подвижного состава предназначены для работы на трех системах электроснабжения. Кроме этого, некоторые многосистемные электровозы из Австрии и Словакии также работают на железных дорогах Чехии в составе международных поездов.

Рекуперативное торможение и возобновление электроэнергии в электрических сетях Чехии обычно используется, но очень часто в ограниченном виде. Причиной этому есть относительно небольшое количество электровозов и единиц подвижного состава способных применять рекуперативное торможение, ограничения относительно максимального напряжения в системе тягового электроснабжения постоянного тока и ограничения в отношении требований для регулирования в общих сетях системы электроснабжения переменного тока.

С помощью технологии автоматического ведения поезда пригородные поезда достигают экономии электроэнергии до 7-9 %. На текущий момент почти 350 км путей и около 250 электровозов и единиц подвижного состава оборудованы этой системой.

Оптимизированное потребление энергии в сетях трамваев и троллейбусов – проект компании общественного транспорта Брно. Это мероприятие направлено на снижение пиковых нагрузок для трамваев и троллейбусов с целью ограничения договорной резервной мощности и связанных с этим затрат.

**Ключевые слова:** электрическая тяга, эффективность, энергосбережение.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Танкевич Е. М.*

Р. М. ПЕТРУНЯК, О. О. МАТУСЕВИЧ (ДНУЗТ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, м. Дніпропетровськ, Україна, тел.: +38 (068) 338 14 98, ел. пошта [archemond@rambler.ru](mailto:archemond@rambler.ru)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ НА БАЗІ SMART ТЕХНОЛОГІЙ

### Вступ

Високовольтне електрообладнання (силові трансформатори, трансформатори струму і напруги, високовольтні вимикачі та засоби захисту від перенапруг) тягових підстанцій (ТП) є найважливішим обладнанням в системі тягового електропостачання. Найдорожчим елементом на будь-якій підстанції є перетворювач напруги – тяговий трансформатор. Більшість цих перетворювачів напруги протягом багатьох років працюють при різних навантаженнях, кліматичних умовах і піддаються зовнішнім та внутрішнім електромагнітним та механічним впливам.

Світовий досвід показує [1], що економічний збиток від випадкової аварії потужного силового трансформатора, пов'язаний як правило із зупинкою руху поїздів через відсутність напру-

ги живлення обчислюється мільйонами гривень, а також супроводжується досить великими затратами на відновлення ресурсу та працездатності трансформатора. З іншого боку, характерною тенденцією системи електропостачання є наростання ступеню зношеності основного силового електрообладнання ТП та недостатні темпи його оновлення [2].

### Основний матеріал

В даний час на електрифікованих ділянках залізниць України застосовується постійний та змінний струм з номінальною напругою 3,3 і 27,5 кВ відповідно. Тягове електропостачання залізниць здійснюється від 308 стаціонарних та пересувних ТП. Розподіл тягових підстанцій по терміну експлуатації наведено в табл. 1 [2].

Таблиця 1

Розподіл тягових підстанцій по терміну експлуатації

Тягові підстанції	Кількість	% терміну експлуатації		
		до 30 років	до 40 років	більше 40 років
Всього	308	21,1% (66)	14,6% (45)	64,2% (197)
В тому числі: стаціонарні	295	20,2% (62)	13% (39)	65,1% (193)
пересувні	13	20,5% (3)	63,8% (6)	15,7% (4)

Як бачимо, більше 64% тягових підстанцій системи електропостачання залізниць України мають термін експлуатації більше 40 років.

Також необхідно враховувати аварійні режими та короткі замикання силового обладнання ТП.

Багаторічна статистика по аварійних режимах показує, що на ТП відносна частота різних видів пошкоджень становить [3]:

- трифазні короткі замикання - 2 %;
- двофазні короткі замикання - 7 %;
- однофазні замикання на землю - 45 %;
- подвійні замикання на землю - 15 %;
- аварійні випадки на випрямних блоках - 31 %.

Відомо, що замикання на землю приводить до пошкодження випрямних блоків ТП постійного струму у 91 %. У силових і вимірюваль-

них трансформаторах, як і в кабелях, пошкодження в більшості випадків виникають внаслідок специфічних властивостей паперово-масляної ізоляції.

У цих умовах удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) старіючого обладнання ТП стає не лише завданням підтримки його працездатності, але і завданням підтримки на належному рівні надійності тягового електропостачання в цілому.

На цей час, при дослідженні технічного стану обладнання ТП застосовуються різні методи: математичні, фізичні, експериментальні, статистичні, тощо [4]. Основні ознаки технічного стану обладнання ТП, фізичні закономірності прояву дефекту та методи контролю стану силового обладнання ТП представлено в табл. 2.



## Діагностичні ознаки, фізичні закономірності прояву дефекту, методи та засоби контролю

Діагностичні ознаки	Фізична закономірність прояву дефекту	Методи і технічні засоби контролю стану об'єкта
1. Зниження експлуатаційної надійності силового обладнання ТП	Старіння (деструкція). Зволоження. Зміна ізоляційної відстані, тощо.	- вимірювання tgδ вимірювальний міст Р-2026; установка М-4000; вимірювання опору мегомметром на 2500 В; апарат АКІ-70 (АІМ-90). - візуальний контроль, біноклі, лінзи, ендоскопи, волоконно-оптичні пристрої. - оптичний метод. - метод проникаючого випромінювання (рентгено і гамма графування) - електрорентгенографія електричних кабелів і муфт.
2. Погіршення діелектричних характеристик ізоляції обладнання ТП	Зміна електричної ємності. Зміна діелектричної проникності. Зростання струму витоку. Зростання значення tgδ.	- ємнісний метод. - контроль частотних характеристик. - вимірювальний міст Р-2026, установка М-4000. - спеціальні схеми безперервного контролю ізоляції по зміні частотних характеристик.
3. Часткові розряди маслonaповненого обладнання	Поява електромагнітних сигналів. Поява акустичних сигналів.	- метод акустичної емісії. - засоби інфрачервоної техніки, електронно-оптичний дефектоскоп «Філін-3», «Філін-6» та ін - ультразвуковий дефектоскоп ДУК-66ПМ. - тепловізори МФ- 20 телевізорами, Ікар-3, ТВ-03, АГА 782, «Ірис-200» та ін.
4. Поява продуктів розкладання твердої і рідкої ізоляції силового обладнання	Поява різних газів. Поява води і кислот. Поява розчинних газів в маслі апаратів. Зміна фізико-хімічних властивостей ізоляційного матеріалу.	- візуальна перевірка. - метод хроматографування (прилади ЛМХ-80, «Модель 370», Агат та ін). - електрохімічний сигналізатор водню. - використання мегомметра, фронтографа 2500 В.
5. Перегрів контактів і окремих частин електроустановки ТП	Інфрачервоне випромінювання.	- метод амперметра - вольтметра для вимірювання перехідного контакту. - оптичний метод. - вихрострумний метод. - інфрачервоний і тепловізійний контроль (тепловізори НФ 20ТВ, Ікар-3, ТВ-03, Рубін 2, Янтар МТ, пірометри Ікар, ІКД, Термопінт-90 та ін. - інфрачервоний термометр типу ІЧ-10Р - інфрачервоний сканер «Бирег-Е». - термоіндикаторні фарби. - оптичні люмінесцентні датчики.
6. Електромагнітні високочастотні перехідні процеси вимикачів та трансформаторів ТП	Спектр високочастотних сигналів.	- метод частотних характеристик (виявлення деформацій обмоток). - електронний осцилограф типу С9-8.
7. Погіршення характеристик несучих і фіксуючих конструкцій ТП	Деградація залізобетону. Корозія металу. Знос при терті. Місцевий відпал металу. Зміна положення об'єкта в просторі.	- методи: фізики твердого тіла, опору матеріалів, теоретичної механіки. - використання фізичних ефектів. - вагон-лабораторія контактної мережі (Вікс - 76 , вагон НІЕФА). - інфрачервоний дефектоскоп ІКД. - пірометр «Термопінт 90» фірми AGEMA ( Швеція ) та ін. - діагностування електрокорозії (пристрою АДО -2М, «Діакор», ІДА - 2. - вимірювання товщини захисного шару бетону - прилад ІЗС -10М; міцність бетону прилади: «Бетон - 5»; УВК- 1М; УК-12П; УК- 14ПМ - діагностування залізобетонних опор контактної мережі тощо.

Вище розглянуті методи та засоби контролю технічного стану силового обладнання ТП в основному виконуються вручну по окремим дефектам. Такий підхід не дозволяє зробити загальний висновок про фактичний технічний стан обладнання ТП. Також до числа недоліків існуючих методик відноситься неможливість створення бази даних в електронному вигляді. За цими причинами, а також з метою підвищення якості обстеження високовольтного обладнання ТП, одним з перспективних напрямків є автоматизація системи діагностування електроустаткування та використання мікропроцесорних пристроїв і цифрових методів обробки результатів вимірювань та випробувань. Даний підхід поки не знайшов широкого і повсюдного застосування у практичній діяльності дистанцій електропостачання залізниць України [5, 8].

Для якісного рішення цієї проблеми бажано застосувати Smart Grid технології. Різні концепції інтелектуальної системи Smart Grid, що існують в даний час, зачіпають багато аспектів у тому числі управління і моніторинг стану електротехнічного устаткування ТП.

При розробці проектів по інтелектуалізації електричних мереж слід пам'ятати, що Smart Grid – це не просто автоматизація процесу управління виробництвом, передачею або розподілом електричної енергії, Smart Grid – це система управління всією електричною мережею, яка зрештою повинна стати повністю автоматичною, а все наявні автоматизовані системи (АСДУ, АСУ ТП, системи моніторингу, системи управління даними і ін.) є лише інструментом для досягнення поставлених цілей.

Порівняння характеристик функціональних властивостей існуючої на сьогоднішній день енергетичної системи та енергетичної системи на базі концепції Smart Grid [6] представлено в табл. 3.

Таблиця 3

**Порівняльна характеристика функціональних властивостей існуючої енергетичної системи та енергетичної системи на базі концепції SMART GRID**

Існуюча енергетична система	Енергетична система на базі концепції Smart Grid
Одностороння комунікація між елементами енергетичної системи або її відсутність	Двосторонні комунікації
Централізована генерація (складно інтегрована розподілена генерація)	Розподілена генерація
Топологія (переважно радіальна)	Переважає мережева
Реакція на наслідки аварій	Реакція на запобігання аварій
Робота устаткування до відмови	Моніторинг та самодіагностика, що подовжують строк служби обладнання
Ручне відновлення мережі	Автоматичне відновлення - «самолікуючі мережі»
Схильність до системних аварій	Запобігання розвитку системних аварій
Перевірка технічного стану обладнання за місцем	Дистанційний моніторинг обладнання
Обмежений контроль перетоків потужності	Управління перетіканнями потужності
Недоступна або сильно запізнена інформація про ціну для споживача	Ціна в реальному часі

Інтегровані в єдину платформу існуючі автоматизовані інформаційні системи дозволять по-новому підходити до побудови електричних мереж та організації і контролю режиму їх роботи [7]. Інтелектуальна електрична мережа залежно від умов, що склалися, в автоматичному режимі може здійснювати переконфігурацію електричної мережі з метою досягнення мінімуму витрат енергоресурсів без зниження надійності роботи у тому числі управління і моніторингу стану електротехнічного устаткування ТП. Також актуальність даного питання обумовлена тим, що вдосконалення системи діагностування і методів аналізу інформації підвищує

об'єктивність оцінки технічного стану силового обладнання ТП та дозволяє планувати і своєчасно та якісно проводити ТО і Р. Все це підвищує надійність експлуатації електроустаткування ТП, подовжує ресурс його роботи, економить матеріальні витрати на ТО і Р, знижує ризик збитків і позитивно позначається на енергозбереженні.

Для вирішення вище розглянутої проблеми авторами запропонована блок-схема та алгоритм роботи інтелектуальної системи діагностування і оцінки технічного стану силового обладнання ТП, яка представлена на рис. 1:

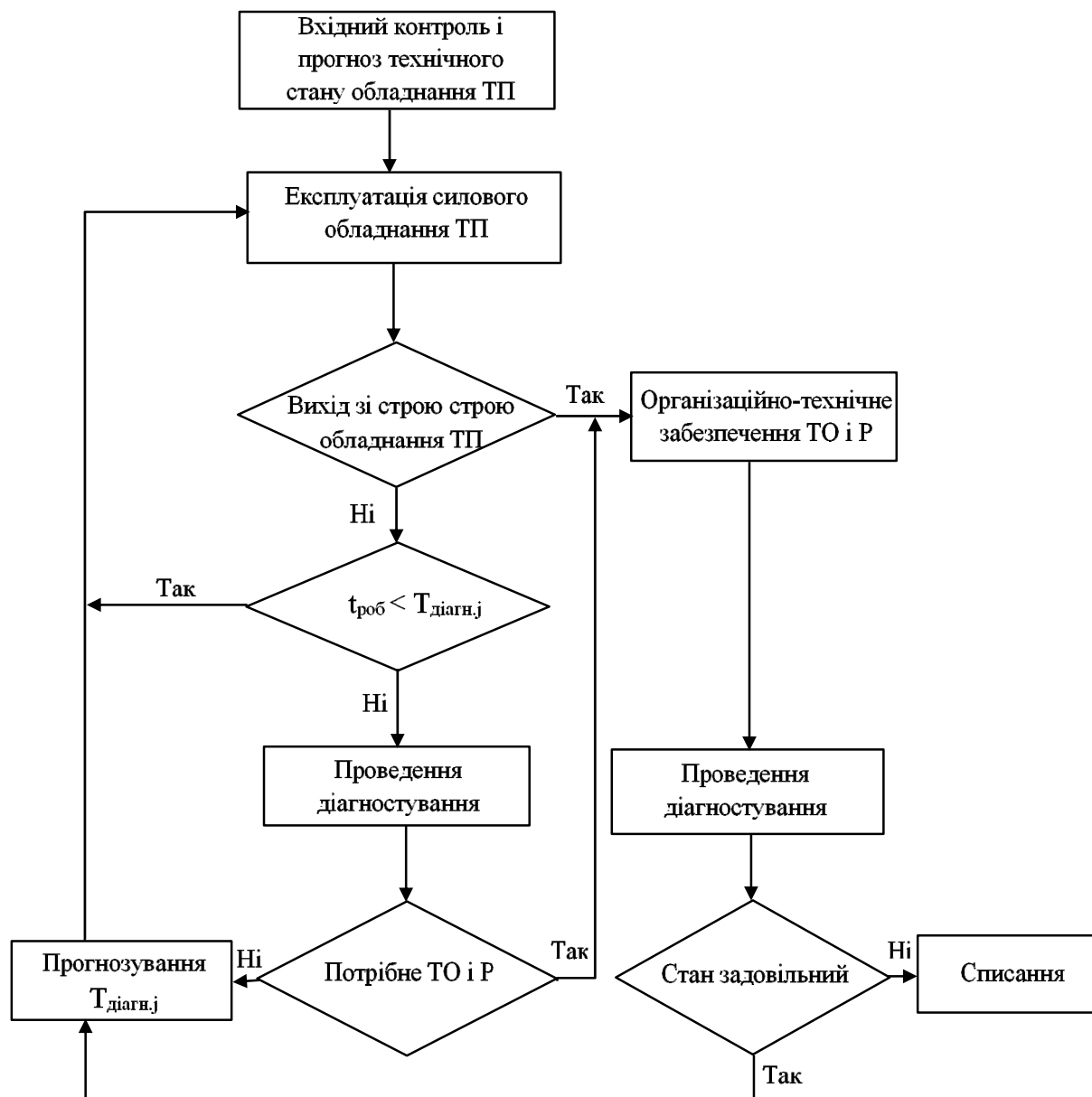


Рис. 1. Блок-схема проведення діагностування обладнання ТП

### Висновки

1. При побудові системи діагностики високовольтного обладнання ТП доцільно забезпечити комплексний підхід до автоматизованого безперервного контролю технічного стану електроустановки ТП. При цьому, в першу чергу, повинен забезпечуватися безперервний моніторинг стану силового обладнання ТП з можливістю подальшого розширення переліку контрольованого обладнання. Створення і впровадження комплексних систем моніторин-

гу та діагностування обладнання ТП є основою для побудови інтелектуальних систем тягового електропостачання залізниць України на базі SMART технологій.

2. Розроблена блок-схема діагностування обладнання ТП дозволяє забезпечити безперервне діагностування силового обладнання ТП і суттєво скорочує експлуатаційні витрати та підвищує надійність системи тягового електропостачання.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рассальский, А. Н. Методы непрерывного контроля и оценки состояния высоковольтного оборудования подстанции / Рассальский А.Н., Конограй С.П., Сахно А.А. // IV междунар. науч.-техн.

### REFERENCES

1. Rassal'skyu, A.N. *Metodi neprerivnoho kontrolya y otsenky sostoyannya visokovol'nogo oborudovannya podstantsyy* [Methods for the continuous monitoring and evaluation of high-voltage substation

конф. "Силовые трансформаторы и системы диагностики", 22-23 июня 2010 г.: докл. – С. 9-10.

2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2012 році : офіц. текст: - К. : Головне управління електрифікації та електропостачання залізниць, 2013. – 247 с.

3. Насиров, Ш.Н. Интеллектуальная система диагностики аварийных ситуаций в тяговых подстанциях постоянного тока / Ш.Н.Насиров // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна – Д., 2009. – Вип. 28. С. 53 – 57.

4. Балабанов В.Н. Диагностика в системе технического обслуживания и ремонта электроустановок / В.Н. Балабанов // Учебное пособие. – Хабаровск: ДВГУПС, 2003. – с. 81

5. Михеев Г.М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования / Г.М. Михеев // — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. — с. 304.

6. Кобец Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова. — М.: ИАЦ Энергия, 2010. — 208 с.

7. Петруняк, Р. М. Дослідження та вдосконалення систем діагностики тягової підстанції на базі SMART технологій / Р. М. Петруняк, О. О. Матусевич // Науково-технічний прогрес на залізничному транспорті: тез. 74-ї наук.-техн. конф. / Мін-во освіти і науки України, Дніпропетр. нац. ун-т з-д. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: ДНУЗТ, 2014. – 83 с.

8. Тутик, В. Л. Засоби моніторингу систем електропостачання залізниць [Електронний ресурс] / Ю.В. Пилипенко, Р.Б. Каменський, П.Й. Тарасович, І.В. Невечера, В.М. Стретович // — Режим доступу: <http://www.ess.kpi.ua/index.php/ru/joomla/arkhiv-konferentsi/ess10>.

Надійшла до друку 18.05.2014.

equipment]. / Rassal'skiy A.N., Konohray S.P., Sakhno A.A. //IV mezhdunar. nauch.-tehn. konf. "Sylovie transformatori y systemi dyahnostyky", 22-23 yuunya 2010 g.: dokl. – P. 9-10.

2. *Analiz roboty hospodarstva elektryfikatsiyi ta elektropostachannya v 2012 rotsi* [Analysis of the work farm electrification and power supply in 2012] : ofits. tekst: - K. : Holovne upravlinya elektryfikatsiyi ta elektropostachannya zaliznyts', 2013. – 247p.

3. Nasyrov, Sh.N. *Intellektual'naya sistema dyahnostyky avaraynykh sytuatsiy v tyahovykh podstantsyyakh postoyannoho toka* [Intelligent diagnostic system emergencies in DC traction substations] / Sh.N.Nasyrov // Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'nogo universytetu zaliznychnoho transportu im. akad. V. Lazaryana – D., 2009. – Vyp. 28. P. 53 – 57.

4. Balabanov V.N. *Dyahnostyka v systeme tekhnicheskoho obsluzhyvaniya y remonta elektroustanovok* [Diagnostics in system maintenance and repair of electrical] / V. N. Balabanov // Uchebnoe posobyie. – Khabarovsk: DVHUPS, 2003. – P. 81

5. Mykheev, H.M. *Tsyfrovaaya dyahnostyka visokovol'nogo elektrooborudovaniya* [Digital diagnostics of high-voltage electrical equipment] / H.M. Mykheev // — M.: Yzdatel'skiy dom «Dodeka-XXI», 2008. – P. 304.

6. Kobets, B.B. *Ynnovatsyonnoe razvytye elektroenerhetyky na baze kontseptsyy Smart Grid* [Innovative development of electric power based on the concept of Smart Grid] / B.B. Kobets, Y.O. Volkova.— M.: YATs Enerhiya, 2010. – 208 p.

7. Petrunyak, R.M. *Doslidzhennya ta vdoskonalennya system diahnostyky tyahovoyi pidstantsiyi na bazi SMART tekhnolohiy* [Research and improvement of diagnostic traction substation at the SMART technologies] / R. M. Petrunyak, O. O. Matusевич // Naukovo-tehnichniy progress na zaliznichnomu transporti: tez. 74-iy nauk.-tehn. konf. / Min-vo osvitu i nauki Ukrainu, Dnipropetr. nats. un-t z.-d. transp. im. akad. V. Lazaryana.– D.: DNUZT, 2014. – 83 p.

8. Tutyk, V.L. *Zasoby monitorynhu system elektropostachannya zaliznyts'* [Means of monitoring electrical railways] / Yu.V.Pylypenko, R.B. Kamenskyy, P.Y. Tarasovych, I.V. Nevechera, V.M. Stretovykh // — Rezhym dostupu: <http://www.ess.kpi.ua/index.php/ru/joomla/arkhiv-konferentsi/ess10>.

Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

Зовнішній рецензент Денисюк С. П.

На сьогоднішній день діагностування і моніторинг силового обладнання ТП є однією із суттєвих проблем системи тягового електропостачання. Тому створення автоматизованої системи діагностування допоможе вирішити їх.

У статті описано концепцію комплексної діагностики основного високовольтного обладнання ТП. Створення інтелектуальних електроенергетичних систем та підстанцій, що не обслуговуються – не можливе без ефективної системи автоматизованої діагностики обладнання. Запропонований у статті комплексний підхід до безперервної діагностики обладнання, дозволяє суттєво скоротити експлуатаційні витрати та підвищити його ефективність. Також в даній статті розроблено блок – схему проведення діагностування обладнання ТП. Було порівняно функціональні властивості існуючих енергетичних систем діагностування та системи на базі Smart технологій. Наводяться традиційні і нові методи діагностики підстанційного обладнання.

**Ключові слова:** електроустаткування, тягова підстанція, електрична система, діагностика, прогнозування технічного стану, надійність.

© Петруняк Р. М., Матусевич О. О., 2014

УДК 621.311.4-52

Р. М. ПЕТРУНЯК, О. О. МАТУСЕВИЧ (ДНУЖТ)

Кафедра Электроснабжение железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (068) 338 14 98, эл. почта: [archemond@rambler.ru](mailto:archemond@rambler.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ НА БАЗЕ SMART ТЕХНОЛОГИЙ

На сегодняшний день диагностирование и мониторинг силового оборудования ТП является одной из существенных проблем системы тягового электроснабжения. Поэтому создание автоматизированной системы диагностирования поможет решить их.

В статье описана концепция комплексной диагностики основного высоковольтного оборудования тяговой подстанций. Создание интеллектуальных электроэнергетических систем и необслуживаемых подстанций – не возможно без эффективной системы автоматизированной диагностики оборудования. Предложенный в статье комплексный подход к непрерывной диагностике оборудования позволяет существенно сократить эксплуатационные затраты и повысить его эффективность. Также в данной статье разработана блок-схема проведения диагностирования оборудования ТП. Было сравнено функциональные свойства существующих энергетических систем диагностирования и системы на базе Smart технологий. Приводятся традиционные и новые методы диагностики подстанционного оборудования.

**Ключевые слова:** электрооборудование, тяговая подстанция, электрическая система, диагностика, прогнозирование технического состояния, надежность.

Внутренний рецензент Сыченко В. Г.

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.311.4-52

R.M. PETRUNIAK O.O. MATUSEVICH (DNURT)

Department of Electric Power Supply of Railroads of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (068) 338 14 98, e-mail [archemond@rambler.ru](mailto:archemond@rambler.ru)

## RESEARCHING AND IMPROVING THE DIAGNOSTIC SYSTEM OF THE TRACTION SUBSTATION BASED ON THE SMART TECHNOLOGIES

The diagnostics and monitoring of power equipment TP is one of the major problems of traction power supply. Therefore, the creation of an automated diagnostic system will help to solve them.

The paper describes the concept of comprehensive primary diagnosis of high-voltage substation equipment. Making intelligent power systems and substations unattended - not possible without an effective system of automated diagnostic equipment. Proposed in the paper an integrated approach to continuous diagnostic equipment can significantly reduce operational costs and increase efficiency. Also in this article designed the block diagram of the traction substations diagnostics equipment. Compared the functional properties of existing energy systems diagnosing and system based Smart technology. Shown are traditional and new methods of diagnosis of substation equipment.

**Keywords:** electrics, traction substation, electrical system, diagnostics, forecasting technical condition, reliability.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*



**ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ  
ТРАНСПОРТУ**

*науковий журнал*

**ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ  
ТРАНСПОРТА**

*научный журнал*

**ELECTRIFICATION  
OF TRANSPORT**

*scientific journal*

*Свідоцтво про державну реєстрацію № 17327 – 6097P від 14.10.2010 р*

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

*Передплатний індекс 68641*

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

*Передрук матеріалів здійснюється тільки з дозволу редакції*

*Члени редакційної колегії здійснюють рецензування та редагування статей*

*Статті друкуються українською, російською та англійською мовами*

*Журнал представлений у науково-метричних та реферативних базах даних*

INDEX  COPERNICUS  
INTERNATIONAL

  
Uran  
Український реферативний журнал



 *Український реферативний журнал*  
**"Д Ж Е Р Е Л О"**

*Редактор: Сиченко В. Г.*

*Комп'ютерна верстка: Босий Д. О.*

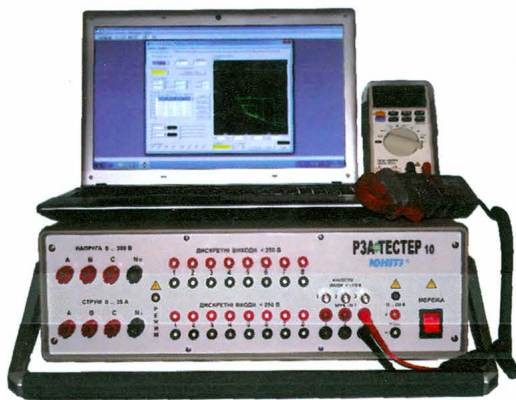
**Поштова адреса:**

49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2  
ДНУЗТ, кафедра «Електропостачання залізниць»,  
тел.: (056) 373-19-11, факс.: (0562) 47-16-74  
E-mail: [elpostz@i.ua](mailto:elpostz@i.ua) URL: <http://etr.diit.edu.ua/>

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub> Ум. др. арк. 14,8. Зам. № 1333  
Наклад 150 прим.

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

49010, Україна, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2  
Тел.: +38(0562) 33-58-96, факс: +38(0562) 33-58-97



**Основные технические данные:**

Источники напряжения трехфазного/однофазного:

переменного тока

3х(0...125)В, 150ВА/1х(0...250)В, 300ВА

постоянного тока

3х(0...175)В, 3х150Вт

Источники тока трехфазного/однофазного:

переменного тока

3х(0...35)А, 550ВА/1х(0...105)А, 1650ВА

постоянного тока

3х(0...28)А, 3х550Вт/1х(0...84)А, 1650Вт

Источник напряжения постоянного (оперативного) тока:

1х(15...255)В, 100Вт

Дискретные входы/ выходы, шт.: 8 / 8

Предназначена для проверки и испытаний вторичного и первичного (с дополнительными устройствами) электрооборудования в электроэнергетике и энергоемких отраслях промышленности.

Позволяет проводить ручную и автоматизированную проверку устройств РЗА всех поколений, начиная от простых реле, электромеханических панелей и заканчивая микропроцессорными защитами различных производителей.

Дополнительное оборудование расширяет функциональные возможности системы: однофазный трансформатор тока ТТ-350 масштабирует ток с коэффициентами преобразования— 10; 5, 0,1.

трехфазный трансформатор напряжения ТН-600 масштабирует напряжения с коэффициентами преобразования напряжений 4;  $\sqrt{3}$ ; 1;  $1/\sqrt{3}$  с возможностью подключения «звезда»/ «треугольник».

Испытательная система соответствует международным и национальным стандартам, сертифицирована в системе УкрСЕПРО. Производитель декларирует соответствие техническому регламенту продукции по ЭМС и низковольтному электрическому оборудованию.



АО «ЮНИТИ», а/я 2807, г. Харьков, 61085, Украина.

Телефон / факс (057) 720-32-77, 717-99-85, [info@uniti.ua](mailto:info@uniti.ua), [www.uniti.ua](http://www.uniti.ua).