

ISSN 2307-4221

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

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТА
ELECTRIFICATION OF TRANSPORT

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 11 / 2016

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

11 / 2016

Індекс 68641

ДНІПРОПЕТРОВСЬК



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

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 11 / 2016

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Передплатний індекс 68641

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

ДНІПРОПЕТРОВСЬК

№ 11, 2016

Видання Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

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

Затверджений до друку Вченою радою університету
протокол № 9 від 16.05.2016 р.

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

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

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

ВІД УКРАЇНИ

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

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ

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

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

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

Видання виходить 2 рази на рік з червня 2011 р.

Баранюк Р. А., Тодоренко В. А.

Аналіз електромагнітних процесів у понижуючому широтно-імпульсному перетворювачі з врахуванням температурного режиму роботи.....8

Баранюк Р. А., Тодоренко В. А.

Анализ электромагнитных процессов в понижающем широтно-импульсном преобразователе с учетом температурного режима работы 8

Baranyuk R. A., Todorenko V. A.

Analysis of the electromagnetic processes in the step-down pulse width converter with accounting of the temperature mode8

Канєвський М., Гловач М.

Вимоги та оцінка інтероперабельності інфраструктури: контактні мережі підсистеми «Енергетика» при взаємодії зі струмоприймачами і контактними накладками підсистеми «Локомотиви та пасажирський рухомий склад» відповідно до вимог ЄС TSI 13

Каневский М., Гловач М.

Требования и оценка интероперабельности инфраструктуры: контактные сети подсистемы «Энергетика» при взаимодействии с токоприемниками и контактными накладками подсистемы «Локомотивы и пассажирский подвижной состав» согласно требований ЕС TSI 13

Kaniewski M., Glowacz M.

Requirements and assessment of interoperability constituents: overhead contact line of the “Energy” subsystem and the pantograph and contact strips of “Locomotives and passenger rolling stock” subsystem according to EC TSI.....13

Кім Є. Д.

Дослідження електричного поля високовольтних тарільчастих ізоляторів22

Ким Е. Д.

Исследование электрического поля высоковольтных тарельчатых изоляторов 22

Kim Y. D.

Researching the electric field of high voltage cap insulators22

Кордін О. П., Деркач В. А., Мандич В. Г., Сиченко В. Г., Кузнецов В. В.

Паралельна робота живлячих трансформаторів автоблокування на тягових підстанціях суміжних електрифікованих ліній28

Кордин А. П., Деркач В. А., Мандыч В. Г., Сыченко В. Г., Кузнецов В. В.

Параллельная работа питающих трансформаторов автоблокировки на тяговых подстанциях смежных электрифицированных линий 28

Kordin O. P., Derkach V. A., Mandych V. G., Sychenko V. G., Kuznetsov V. V.

Parallel operation of the power supply transformers of the automatic block system at traction substations of adjacent electrified lines28

Панченко В. І., Ципленков Д. В., Леонова М. О., Кириченко В. В.

Характеристики електрогенератора вітроустановки з вертикальною віссю обертання.....36

Панченко В. И., Ципленков Д. В., Леонова М. О., Кириченко В. В.

Характеристики электрогенератора ветроустановки с вертикальной осью вращения 36

Panchenko V. I., Tsyplovkov D. V., Leonova M. A., Kirichenko V. V.

Characteristics of the electric wind turbine with a vertical axis of rotation.....36

Панасенко М. В., Шаповалов Д. Ю., Краснов О. О.

Про можливість зниження втрат енергії при вимиканні високовольтних IGBT-приладів та її схемотехнічна енергоефективність.....44

Панасенко Н. В., Шаповалов Д. Ю., Краснов А. А.

О возможности снижения потерь энергии при выключении высоковольтных IGBT-

Panasenko M. V., Shapovalov D. Yu., Krasnov A. A.

About a possibility of reducing losses of energy at switching off of high-voltage IGBT de-

приборів и ее схмотехническая энерго- эффективность	vices and its circuitry energy efficiency.....	44
--	--	----

Саблін О. І.

Оптимізація режимів тягового електроспоживання та рекуперації енергії в системах електричного транспорту		53
---	--	----

Саблин О. И.

Оптимизация режимов тягового электро- потребления и рекуперации энергии в системах электрического транспорта....	Sablin O. I. Optimization of the modes of traction power consumption and energy recuperation in sys- tems of electric transport	53
--	--	----

Сиченко В. Г., Косарев Є. М., Губський П. В., Замаруєв В. В., Івахно В. В., Стисло Б. О.

Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму...		61
---	--	----

Сыченко В. Г., Косарев Е. Н., Губский П. В., Замаруев В. В., Ивахно В. В., Стисло Б. О.

Исследование режимов напряжения в си- стеме тягового электроснабжения посто- янного тока	Sychenko V.G., Kosarev E. M., Gubskiy P. V., Zamaruev V. V., Ivakhno V. V., Styslo B. O. Researching the voltage modes in DC traction power supply system	61
--	--	----

електрорухомий склад / electric rolling stock

Афанасов А. М., Друбецький А. Ю.

Визначення розбіжності теплових навантажень обмоток збудження взаємно навантажених тягових електромашини		71
---	--	----

Афанасов А. М., Друбецкий А. Е.

Определение расхождения тепловых нагру- зок обмоток возбуждения взаимно нагру- женных тяговых электромашин	Afanasov A. M., Drubetskiy A. E. Determining differences of the heat load exci- tation windings of the mutually loaded traction electric machines	71
--	--	----

Балійчук О. Ю.

Теоретичні передумови симетрування живлячої напруги та обґрунтування структури симетруючого пристрою для живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М.....		75
---	--	----

Балийчук А. Ю.

Теоретические предпосылки симметриро- вания питающего напряжения и обоснова- ние структуры симметрирующих устройств для питания вспомогательных машин элект- ропоездов ЭР9М.....	Baliichuk O.Yu. Theoretical background of balancing supply voltage and justification of structure of sym- metrical unit for power supply of auxiliary motors of electric trains ER9M	75
--	--	----

Костін М. О., Нікітенко А. В.

Коефіцієнти потужностей рекуперуючого електрорухомого складу постійного струму....		81
--	--	----

Костин Н. А., Никитенко А. В.

Коэффициенты мощностей рекуперирую- щего электроподвижного состава постоян- ного тока	Kostin M. O., Nikitenko A. V. The power coefficients of DC electric rolling stock in the regenerative braking mode.....	81
---	---	----

енергозбереження / energy saving

Д'яконов О. В., Божко В. В., Ткаченко І. О., Дьяконов В. І.

Розробка і дослідження роботи ефективної багатоваріантної гнучкої технології утилізації рослинних та деревних відходів для підприємств залізниці		88
---	--	----

Дьяконов О. В., Божко В. В.,

Ткаченко И. О., Дьяконов В. И.

Разработка и исследование работы эффек- тивной многовариантной гибкой технологии утилизации растительных и древесных отхо- дов для предприятий железной дороги.....	Dyakonov O. V., Bozhko V. V., Tkachenko I. O., Dyakonov V. I. Development and research of the effective work multivariate flexible technology of recy- cling plants and waste wood for railway com- panies.....	88
--	--	----

Папахов О. Ю., Логвинова Н. О.

Математична модель розрахунку плану формування одногрупних наскрізних поїздів з використанням теорії множин 93

Папахов А. Ю., Логвинова Н. А.

Papakhov O. Yu., Logvinova N. A.

Математическая модель расчета плана формирования одногруппных сквозных поездов с использованием теории множеств 93

The mathematical model for calculating the formation of single-group plan with through trains using set theory 93

автоматизація і діагностика / automation and diagnose

Стасюк О. І., Гончарова Л. Л.

Методи інтелектуалізації інноваційних комп'ютерних технологій бортових систем моніторингу локомотивів 100

Стасюк А. И., Гончарова Л. Л.

Stasyuk A. I., Goncharova L. L.

Методы интеллектуализации инновационных компьютерных технологий бортовых систем мониторинга локомотивов 100

Methods of intellectualization of innovative computer technologies of onboard systems of monitoring of locomotives 100

електромагнітна сумісність / electromagnetic compatibility

Бадер М. П.

Передача електричної енергії електромагнітними полями та їх вплив на оточуюче середовище 108

Бадер М. П.

Bader M. P.

Передача электрической энергии электромагнитными полями и их воздействие на окружающую среду 108

Transmission of electrical energy by electromagnetic fields and their effect on the environment 108

Бялонь А., Адамські Д., Фурман Ю.

Вплив резонансів в контактній мережі на допустимі параметри перешкод 116

Бялонь А., Адамски Д., Фурман Ю.

Białoń A., Adamski D., Furman Ju.

Влияние резонансов в контактной сети на допустимые параметры помех 116

Influence of resonances in the contact network on the permissible parameters of interference 116

Саєнко Ю. Л., Калюжний Д. М., Свергуненко С. В.

Розподіл фактичних внесків лінійних джерел спотворень у спотворення напруги в точці загального присіднання за даними локальних вимірювань 122

Саєнко Ю. Л., Калюжный Д. Н.,

Saenko Yu. L., Kalyuzhniy D. M.,

Свергуненко С. В.

Svergunenko S. V.

Распределение фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения по данным локальных измерений 122

The distribution of the actual contributions of line sources of distortion in the voltage distortion at the point of common coupling according to local measurements 122

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ПОНИЖУЮЧОМУ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ВРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ

Вступ

Проблема перегріву напівпровідникових перетворювальних пристроїв, які використовуються на залізничному транспорті, є доволі актуальною. Особливо важливою ця проблема є для перетворювальних пристроїв, які працюють у ключовому режимі з нестационарними робочим інтервалом та паузою. Тривалість робочого інтервалу та паузи у цьому випадку залежать лише від дій користувача. Робота таких пристроїв проходить в постійних пускових перехідних електромагнітних процесах. Характер перехідних процесів та нагрів елементів перетворювачів у такому випадку залежать не лише від поточного навантаження, а і від попередніх режимів роботи.

Для розрахунків даних пристроїв необхідно аналізувати як перехідні та сталі електромагнітні процеси, так і перехідні теплові процеси.

Одним з напрямків розрахунку таких силових пристроїв є розрахунок суміщених електромагнітних та теплових процесів, оскільки при перехідних процесах нагрів та зміна параметрів компонентів є суттєвими. Зміна параметрів пасивних компонентів перед початком та протягом перехідного процесу може призвести до зміни характеру перехідного процесу та переходу до аварійних пускових режимів роботи. У зв'язку з цим аналіз суміщених електромагнітних та теплових процесів в перетворювальних пристроях є актуальним.

Розглянемо роботу понижуючого широтно-імпульсного перетворювача (ШПІ) з розімкненою системою керування, без зворотного зв'язку, схему якого зображено на рис.1.

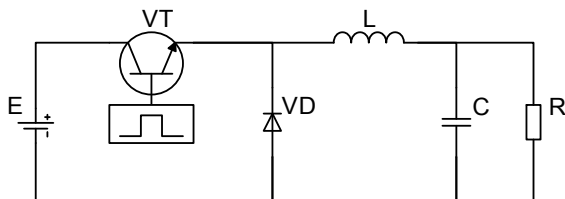


Рис. 1. Понижуючий ШПІ

При дослідженні електромагнітних процесів у ШПІ використаємо RS- моделі транзистора та діода та припущення про миттєве перемикавання ключів. Розглянемо вплив температурного режиму роботи на характер перехідних процесів.

Диференційні рівняння системи

Для опису електромагнітних процесів у ШПІ використаємо наступну систему кусочно-безперервних рівнянь [1, 2]

$$\frac{dX(t)}{dt} = A(t)X(t) + B(t),$$

де $X(t) = \begin{bmatrix} i_L \\ u_C \end{bmatrix}$ - вектор незалежних змінних

(i_L - струм в індуктивності L , u_C - напруга на ємності C ; $A(t)$ - матриця коефіцієнтів; $B(t)$ - вектор зовнішнього впливу.

Для схеми ШПІ зображеної на рис.1, з врахуванням прийнятих моделей ключів, система рівнянь має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{du_C}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{VT} \cdot s + r_{VD} \cdot (1-s) + r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E \cdot s}{L} \\ \frac{E \cdot s}{0} \end{bmatrix},$$

де r_{VT} , r_{VD} , r_L - опори транзистора, діода та дроселя відповідно; L , C , R - індуктивність дроселя, ємність конденсатора та опір навантаження, E - напруга джерела живлення;

$$s = \begin{cases} 0, \text{ключі: VT-закритий, VD-відкритий,} \\ 1, \text{ключі: VT-відкритий VD-закритий.} \end{cases}$$

Методом різницевих рівнянь було отримане наступне рішення цієї системи:

$$\begin{bmatrix} I \\ U \end{bmatrix} = e^{A_2(1-\gamma)mT} \times \left[e^{A_1\gamma mT} \begin{bmatrix} I(mT) \\ U(mT) \end{bmatrix} + A_1^{-1} \left(e^{A_1\gamma mT} - I \right) \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \right],$$

де матрична експонента до дужок відповідає інтервалу роботи ШПІ із закритим транзистором та відкритим діодом, вираз в дужках є початковими даними даного рівняння, тобто кінцевими даними першої частини періоду з відкритим транзистором та закритим діодом;

I – одинична матриця;

γ – скважність керуючих імпульсів транзистора;

m – номер періоду.

Отримане рішення є загальним і при модифікації моделей ключових та пасивних компонентів може змінюватися. Елементи рішення приймають наступний вигляд:

1. при ігноруванні опорів ключових елементів та дроселя - LC система, $\gamma = const$

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, A_1^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{L}{R} & C \\ -L & 0 \end{bmatrix};$$

2. при врахуванні опорів ключових елементів та дроселя - RLC система, $\gamma = const$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{r_{VT} + r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} \frac{r_{VD} + r_L}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$$

$$A_1^{-1} = \frac{RLC}{r_{VT} + r_L + R} \begin{bmatrix} -\frac{1}{RC} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{r_{VT} + r_L}{L} \end{bmatrix};$$

при врахуванні опорів ключових елементів та дроселя та їх залежності від температури RLC t° система, $\gamma = const$

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_0 + L(t^\circ)} = L_0^* + L^*(t^\circ),$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0 + C(t^\circ)} = C_0^* + C^*(t^\circ),$$

$$r_{VT,VD} + r_L = r_{VT,VD0} + r_{L0} + r_{VT,VD}(t^\circ) + r_L(t^\circ),$$

$$A_{1,2} = A_{1,2}(0) + A_{1,2}(t^\circ);$$

при врахуванні зміни скважності керуючих імпульсів $\gamma \neq const$

$$e^{A_1 \gamma m T} = e^{A_1 t_m}, e^{A_2 (1-(1+\gamma)mT)} = e^{A_2 (1-mT-t_m)};$$

де t_m – час перемикання.

Аналіз матричної експоненти

З використанням матричної експоненти знайдемо власні значення матриці (λ). Для цього скористуємося наступним виразом:

$$\det(A - \lambda I) = \begin{vmatrix} -\frac{r_{VT} \cdot s + r_{VD} \cdot (1-s) + r_L}{L} - \lambda & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

Нехай $r_{VT} \cdot s + r_{VD} \cdot (1-s) + r_L = r$, тоді:

$$\lambda^2 + \left(\frac{r}{L} + \frac{1}{RC} \right) \cdot \lambda + \frac{1}{LC} \left(\frac{r}{R} + 1 \right) = 0.$$

Корені характеристичного рівняння визначаються наступним чином:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{r}{L} + \frac{1}{RC} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{r}{L} + \frac{1}{RC} \right)^2 - \frac{4}{LC} \left(\frac{r}{R} + 1 \right)}.$$

В пакеті програм *Matlab* корені знаходять за таким алгоритмом. Для початку задається матриця (наприклад матриця A), а корені знаходяться за допомогою функції *eig(A)*. Одинична матриця другого порядку задається як *eye(2)*. Розв'язок диференційного рівняння знаходять за допомогою функції *dsolve*:

$$X = dsolve(diff(i_L) = ..., diff(u_C) = ..., i_L(mT) = ..., u_C(mT) = ...)$$

Від відношень $\frac{1}{T}$, λ_1 , та λ_2 , залежить більшість характеристик перетворювальних пристроїв [2]. Характер та тривалість перехідного процесу залежать від положення коренів характеристичного рівняння відносно уявної осі. Кут нахилу комплексно-спряжених коренів до уявної осі ϕ розраховується як:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\operatorname{Im}(\lambda)}{\operatorname{Re}(\lambda)},$$

де $\operatorname{Re}(\lambda)$ та $\operatorname{Im}(\lambda)$ реальна та уявна складові коренів, відповідно.

На рис. 2 зображені перехідні характеристики для струму дроселя та напруги на ємності ШПІ при $E=100B$, $L=0,1\Gamma H$, $C=0,1\mu K\Phi$, $r=0,021\Omega M$, $R=1\kappa\Omega M$, $f=20\kappa\Gamma\psi$ ($\phi=60^\circ$) та температурі $25^\circ C$. Дросель виконано з матеріалом магнітопроводу *3C11* [3], для якого при нагріванні від $25^\circ C$ до $90^\circ C$ на даній частоті магнітна проникність збільшується на 14% (в режимі слабкого поля), В якості конденсатора

фільтру використано алюмінієвий електролітичний конденсатор фірми Epcos [4], для якого при вказаних температурних режимах роботи типова залежність ємності від температури відповідає збільшенню ємності на 11%. Дані графічні залежності були побудовані при розрахунку електромагнітних процесів у ШПП в середовищі *Matlab*.

Були проведені відповідні розрахунки на температурі ємності 90°C. Під час ввімкнення пристрою з нагрітим конденсатором величини стрибків струму та напруги збільшуються, а кут, що характеризує ступінь коливальності процесу зростає до 65°. У разі використання у дроселі магнітного матеріалу в режимі початкового або слабого намагнічування при зростанні температури магнітна проникність суттєво збільшується [3]. При підвищенні величини індуктивності при нагріві до 0,14 Гн величина кута повертається до попереднього значення $\phi = 60^\circ$, і перехідний процес буде протікати так же само, як і при початковій температурі. При використанні магнітопроводу з невисокою чутливістю до температури, даної компенсації не буде.

При роботі магнітопроводу дроселя з високою напруженістю магнітного поля H , при зростанні температури до 90°C магнітна проникність та індуктивність дроселя суттєво зменшуються. При роботі з граничними значеннями H , величина індуктивності може становити близько 0.07 Гн, значення кута ϕ зростає до 71°, та перехідні процеси мають вигляд, як на рис. 3.

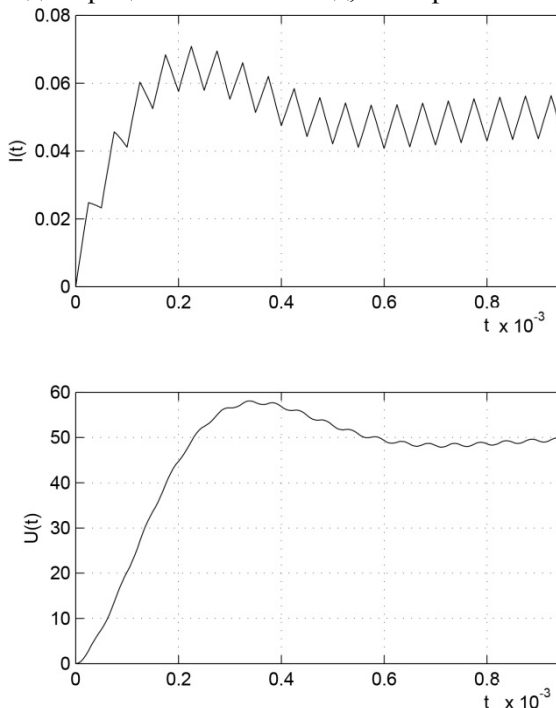


Рис. 2.

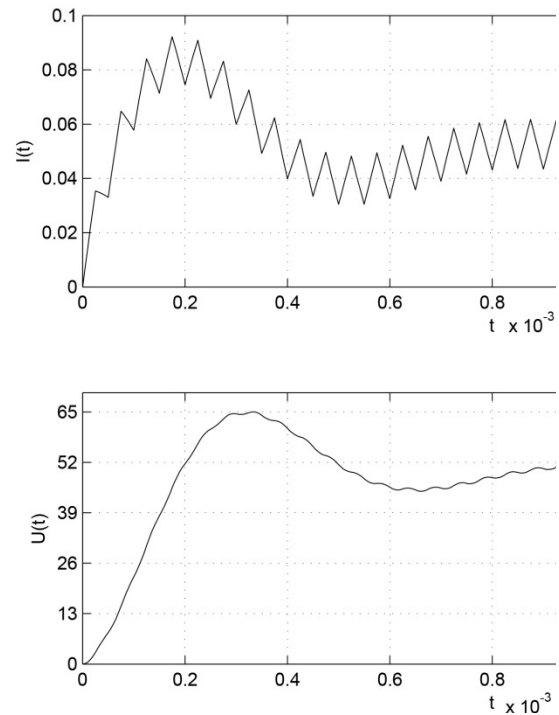


Рис. 3.

Як видно, пікова напруга і струм зростають. В перетворювачах з іншими параметрами пасивних компонентів можуть бути ще вищі скачки з встановленням неприпустимих як пікових, так і установлених режимів роботи, а також зміна самого характеру перехідного процесу з аперіодичного на коливальний.

За рахунок зміни параметрів пасивних компонентів можна змінювати характер перехідного процесу, перетворюючи його в аперіодичний, або навпаки, при великому запасі максимально допустимих параметрів ключових компонентів, довготривалий процес можна трансформувати в швидкий коливальний процес.

У рівнянні $\lambda^2 + b \cdot \lambda + c = 0$ величина b є сумою коренів квадратного рівняння, а c – їх добуток. У разі розташування коренів на комплексній площині, по формулам Вієта можна знайти значення коефіцієнтів, пов'язаних з параметрами пасивних компонентів системи. Чим більше значення коефіцієнта c , тим більше значення дійсної частини коренів, а значить тим швидшим є перехідний процес.

Для зміни типу перехідного процесу за допомогою зовнішнього впливу на компоненти, необхідно вибрати тип перехідного процесу та розрахувати параметри компонентів, вибираючи необхідне для даного типу характеристичне рівняння. Для досягнення даної цілі використовується значення середнього геометричного коренів характеристичного рівняння

$$\Omega = \sqrt{\lambda_1 \lambda_2},$$

Характеристичне рівняння можна записати як:

$$\lambda^2 + \frac{b}{\Omega} \cdot \Omega \cdot \lambda + \Omega^2 = \lambda^2 + B \cdot \Omega \cdot \lambda + \Omega^2 = 0,$$

В даному вигляді величина B характеризує криву перехідного процесу, а Ω – масштаб часу даного процесу $\tau = \Omega \cdot t$.

Висновки

В даній статті на основі проведеного аналізу електромагнітних процесів у понижуючому ШПІ розглянуто метод розрахунку перехідних та усталених режимів роботи з врахуванням

температурного режиму роботи пасивних компонентів.

Проведене моделювання показало можливість виникнення стрибків напруги на ємності та струму в дроселі ШПІ та залежність їх амплітуди від температурного режиму роботи.

На підставі проведеного аналізу коренів характеристичного рівняння показана можливість прогнозу загального вигляду перехідних процесів. Розглянута можливість температурної корекції типу перехідних процесів та їх форми. Отримані результати аналізу дозволяють проводити розробку перетворювальних пристроїв з врахуванням можливості виникнення аварійних перехідних режимів експлуатації перетворювальних пристроїв які виникають внаслідок підвищення робочої температури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вентильные преобразователи переменной структуры / Тонкаль В. Е., Руденко В.С., Жуйков В. Я. и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 336 с.
2. Стжелецки Р. Хаотические процессы в системах силовой электроники / Р. Стжелецки, И. Е. Коротеев, В. Я. Жуйков. – Киев: Аверс, 2001. – 197 с.
3. Soft Ferrites. Data Handbook MA01, Philips Components. Netherlands, Philips Electronics, 1996. 887 p.
4. Aluminium Electrolytic Capacitors, TDK. Germany, Epcos AG, 2014. 40 p.

Надійшла до друку 03.02.2016.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

REFERENCES

1. Tonkal V.E., Rudenko V.S., Zhujkov V.Y. and oth. *Ventilnye preobrazovateli peremennoy struktury* [Valve converters with variable structure]. Kyiv, Nauk. Dumka, 1989. 336p.
2. Styheletski R., Koroteev I.E., Zhujkov V.Ya. *Haoticheskie process v sistemah silovoj elektroniki* [Chaotic processes in power electronic systems]. Kyiv, Avers, 2001. 197p.
3. Soft Ferrites. Data Handbook MA01, Philips Components. Netherlands, Philips Electronics, 1996. 887p.
4. Aluminium Electrolytic Capacitors, TDK. Germany, Epcos AG, 2014. 40p.

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

Проблема перегріву напівпровідникових перетворювальних пристроїв, які використовуються на залізничному транспорті, є актуальною. Надзвичайно важлива ця проблема для перетворювальних пристроїв, які працюють у ключовому режимі з нестатичним робочим інтервалом. Робота таких перетворювальних пристроїв проходить в постійних пускових перехідних електромагнітних процесах. Характер перехідних процесів та нагрів елементів перетворювачів у такому випадку залежать не лише від поточного навантаження, а і від попередніх режимів роботи. Для розрахунків необхідно аналізувати як перехідні та сталі електромагнітні процеси, так і перехідні теплові процеси, які можуть привести до виникнення аварійних режимів роботи напівпровідникових приладів перетворювачів.

В даній статті на основі аналізу понижуючого ШПІ описані розрахунки перехідних і установлених електромагнітних режимів роботи імпульсних перетворювачів з врахуванням температурного режиму роботи пасивних компонентів. Проведений аналіз коренів характеристичного рівняння дозволяє прогнозувати тип перехідного процесу та оперативно проводити корекцію форми характеристик з врахуванням зміни температури.

Результати даного аналізу дозволяють при розробці перетворювальних пристроїв враховувати можливість виникнення аварійних перехідних режимів експлуатації внаслідок нагріву пасивних компонентів.

Ключові слова: ШПІ, різниці рівняння, нелінійні системи, характеристичні корені, матрична експонента, перехідні процеси.

УДК 621.314

Р. А. БАРАНИЮК, В. А. ТОДОРЕНКО (НТУУ «КПІ»)

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
ул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна, ел. пошта: licornedev@gmail.com,
ORCID: orcid.org/0000-0001-8673-3747

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОНИЖАЮЩЕМ ШИРОТНО ИМПУЛЬСНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ

Проблема перегрева полупроводниковых преобразовательных устройств, используемых на железнодорожном транспорте, является актуальной. Особенно существенна эта проблема для преобразовательных устройств, работающих в ключевом режиме с нестатическим рабочим интервалом. Работа таких устройств проходит в постоянных пусковых переходных электромагнитных процессах. Характер переходных процессов и нагрев элементов преобразователей в таком случае зависят не только от текущей нагрузки, но и от предыдущих режимов работы. Для расчетов данных устройств необходимо анализировать как переходные и статические электромагнитные процессы, так и переходные тепловые процессы, которые могут привести к возникновению аварийных режимов работы полупроводниковых приборов преобразователей.

В данной статье на основе анализа понижающего ШИП описаны расчеты переходных и установившихся электромагнитных режимов работы импульсных преобразователей с учетом температурного режима работы пассивных компонентов. Проведенный анализ корней характеристического уравнения позволяет прогнозировать тип переходного процесса и оперативно проводить коррекцию формы характеристик с учетом изменения температуры.

Результаты данного анализа позволяют при разработке преобразовательных устройств учитывать возможность возникновения аварийных переходных режимов эксплуатации вследствие нагрева пассивных компонентов.

Ключевые слова: ШИП, разностные уравнения, нелинейные системы, характеристические корни, матричная экспонента, переходные процессы.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.314

G. A. BARANYUK, V. A. TODORENKO (NTUU «KPI»)

National technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Polytechnic Str., 16, building 12, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: licornedev@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-8673-3747

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN STEP-DOWN PULSE WIDTH CONVERTER TAKING INTO ACCOUNT TEMPERATURE MODE OF OPERATION

The problem of overheating of semiconductor conversion devices used in railway transport, is quite relevant. Of particular significance is the problem of converting devices operating in the key non-static mode operating range. The operation of such devices is held in the permanent starting transient electromagnetic processes. Nature of the transitional process and the heating elements converters in this case depends not only on the current load, but also from the previous modes. For these devices the calculations necessary to analyze both static and transient electromagnetic processes and transient thermal processes, which can lead to accidental modes of semiconductor converters.

In this article, based on the analysis down PWM described calculations transient and steady modes of electromagnetic pulse converters based on the temperature mode of passive components. The analysis of the roots of the characteristic equation allows to predict the type of transition and quickly carry out the correction form characteristics, taking into account changes in temperature.

The results of this analysis allow the development of conversion devices to consider the possibility of emergency transient operating conditions due to the heat of passive components.

Keywords: buck converter, difference equations, nonlinear systems, characteristic root, matrix exponential, transients.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

M. KANIEWSKI, M. GŁOWACZ (RAILWAY INSTITUTE, WARSAW)

Institute of railways, 04-275 Warsaw, Poland, 50 Chlopitskogo Street, tel.: +48224731453, fax: +48224731036, e-mail: mkaniewski@ikolej.pl

REQUIREMENTS AND ASSESSMENT OF INTEROPERABILITY CONSTITUENTS: OVERHEAD CONTACT LINE OF THE “ENERGY” SUBSYSTEM AND THE PANTOGRAPH AND CONTACT STRIPS OF “LOCOMOTIVES AND PASSENGER ROLLING STOCK” SUBSYSTEM ACCORDING TO EC TSI

Introduction

Under Article 288 of the Lisbon Treaty, legal acts stated within the EU are the following: directives (adopted by the European Parliament), decisions and regulations (adopted by the European Commission) and opinions or recommendations. The directives, decisions and regulations are binding for the recipients, unlike the opinions or recommendations. To understand the EU directives and decisions properly – and to be able to discuss them – it is necessary to learn some new terms used in these documents. According to the documents [1, 2]:

1. “New Approach Directives” – state a rule that a product can be marketed in the whole EU, i.e. it is possible to sell a locomotive to any country within the EU and to operate it on railways anywhere in Europe only if it is compliant with the essential requirements of the proper directives;

2. “Essential requirements” means all the conditions set out in Annex III which must be met by a rail system, subsystems, and interoperability constituents, including interfaces [1];

3. “Subsystem” – should be considered as an effect of division of a railway system. A subsystem may be structural or functional;

4. “Interoperability” – is defined as “the ability of a rail system to allow the safe and uninterrupted movement of trains which accomplish the required levels of performance for these lines. This ability depends on all the regulatory, technical and operational conditions which must be met in order to satisfy the essential requirements.”;

5. “Interoperability constituent” – An interoperability constituent means any elementary component, group of components, sub-assembly or complete assembly of equipment that is incorporated or intended to be incorporated into a subsystem upon which the interoperability of the rail system depends directly or indirectly and includes both tangible objects and intangible ones such as software.

6. “Technical specification for interoperability” (TSI) – means a specification adopted in accordance with this Directive by which each subsystem or part subsystem is covered in order to meet the essential requirements and ensure the interoperability of the rail system [1];

7. “Notified bodies” – means the bodies which are responsible for assessing the conformity or suitability for use of the interoperability constituents or for appraising the ‘EC’ procedure for verification of the subsystems [1]. I.e. the Railway Institute is a notified body, registered as number NB 1467;

8. “Upgrading” – means any major modification work on a subsystem or part subsystem which improves the overall performance of the subsystem [1];

9. “Open points” – in a case that some technical aspects – related to the essential requirements – cannot be defined by the TSI they are called “open points” [1].

The aim of the Directive [1] is to obtain the interoperability of the railway system within EU territory covering the terms of the Directive. Those terms concern the process of design, construction, authorisation for placing in service, upgrade, renewal, operation and maintenance of a part of the system. Moreover, they concern professional qualifications, health and safety requirements for personnel responsible for the operation and maintenance.

Decision 2011/274/EU concerns the „Energy” subsystem for conventional railway lines. A conventional line is a railway line with operational speed is up to 200 km/h. On the other hand, the Decision 2008/284/EU concerns the „Energy” subsystem for high-speed railway lines. A high-speed line is a railway line with operational speed exceeding 200 km/h, although speeds exceeding 320 km/h are not covered by any specific requirements, but considered as an „open point”. Both 2011/274/EU and 2008/284/EU decisions concern 1435 mm gauge railways only. However, European Commission Regulation No 1301/2014 [13] con-

cerns both the conventional and the high-speed railways with all following track gauges 1435, 1520, 1524, 1600 and 1668 mm and therefore supersedes the 2008/284/EU and 2011/274/EU Decisions for new projects.

“Energy” subsystem

According to Decision [2] and Regulation [13] the „Energy” subsystem contains of a substation, section cabin, separation section (placed between two phases of the same AC power supply system or between two different power supply systems), overhead contact line (a facility transmitting the energy to the electric vehicles on the line via pantographs, containing manual or remote-operated isolators for electrical re-sectioning operations on particular tracks) and a return circuit (any conductors intended to carry the traction current from the vehicle back to the substation).

Moreover, the „Energy” subsystem includes any trainborne equipment of the Energy Measuring System (EMS) and the ground-based Compiled Energy Billing Data System (CEBD).

The „Energy” subsystem interfaces with other subsystems i.e. pantograph interfaces with the „Rolling stock” subsystem, while the structure gauge is considered to be an interface with the „Infrastructure” subsystem. ERTMS interfaces with the „Control-command and signalling” subsystem. Two parameters: current draw of a train and separation sections (for both phase and system separation) interface with „Traffic operation and management” subsystem.

For the „Energy” subsystem, the overhead contact line is the only interoperability constituent.

Parameters to be verified during the assessment of “overhead contact line” IC of “Energy” subsystem

Verification of the „Energy” subsystem should be performed according to the following parameters:

- 4.1. Voltage and frequency
- 4.2. Parameters relating to supply system performance
- 4.3. Current capacity, d.c. systems, trains at standstill,
- 4.4. Regenerative braking
- 4.5. Electrical protection coordination arrangements
- 4.6. Harmonics and dynamic effects for AC systems
- 4.7. Geometry of the overhead contact line
- 4.8. Pantograph gauge
- 4.9. Mean contact force

4.10. Dynamic behaviour and quality of current collection

4.11. Pantograph spacing (for OCL designing process)

4.12. Contact wire material

4.13. Phase separation sections

4.14. System separation sections

4.15. Ground-based compiled energy billing data system

4.16. Protective provisions against electric shock

4.17. Operating rules

4.18. Maintenance rules

4.19. Professional competences of staff

4.20. Personal protective safety provisions

4.21. Registration arm uplift clearance.

In the case of verification of the „Energy” subsystem the evaluation should be performed in two phases, that is in the ‘design review’ phase and in the ‘assembled, before putting into service’ phase. During the ‘design review’ phase the points 4.1 to 4.14 and 4.16 to 4.17 should be assessed, whereas during the ‘assembled, before putting into service’ phase the points to be assessed are 4.5, 4.10 and 4.16. In the case that the overhead contact line had been already assessed as an interoperability constituent at the ‘overall design’ phase it is not necessary to perform the tests once again during the „Energy” subsystem verification process.

In the case of „overhead contact wire” interoperability constituent assessment the choice of parameters is different. During the ‘design review’ phase the points 4.3, 4.7, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.21 should be assessed, whereas during the ‘assembled, before putting into service’ phase the points to be assessed are 4.3, 4.10, and 4.21.

Ad. 4.1 Voltage and frequency

Regulation [13] states that it is necessary to use one of the following power supply systems:

1) an a.c. system, 25 kV 50 Hz or 15 kV 16,7 Hz;

2) a d.c. system, 3 kV or 1,5 kV.

Voltage and frequency limits should comply with EN 50163:2004, par. 4., as quoted in Table 1

The following requirements shall be fulfilled:

- a) the duration of voltages between U_{min1} and U_{min2} shall not exceed 2 min;
- b) the duration of voltages between U_{max1} and U_{max2} shall not exceed 5 min;
- c) the voltage of the busbar at the substation at no load condition shall be less than or equal to U_{max1} .

Nominal voltages and their permissible limits in values and duration

Electrification system	Lowest non-permanent voltage $U_{\min 2}$	Lowest permanent voltage $U_{\min 1}$	Nominal voltage U_n	Highest permanent voltage $U_{\max 1}$	Highest non-permanent voltage $U_{\max 2}$
	V	V	V	V	V
d.c. (mean values)	1 000 2 000	1 000 2 000	1 500 3 000	1 800 3 600	1 950 3 900
a.c. (r.m.s. values)	11 000 17 500	12 000 19 000	15 000 25 000	17 250 27 500	18 000 29 000

For d.c. substations it is acceptable to have this voltage at no load condition less than or equal to $U_{\max 2}$, knowing that when a train is present, the voltage at this train's pantograph (s) shall be in accordance with Table 1 and its requirements;

d) under normal operating conditions, voltages shall lie within the range $U_{\min 1} \leq U \leq U_{\max 2}$;

Ad. 4.2 Parameters relating to supply system performance

System performance on a given route section is usually assessed on the basis of the three following parameters: a) maximum train current b) power factor of trains c) mean useful voltage.

The maximum permitted continuous current for contact and messenger wires can be calculated using the formula (1) already published in the paper [12]:

$$I_d = \sqrt{\frac{kAS\Delta\theta_d}{\rho_g}} \quad (1)$$

where: k – heat transfer coefficient;

A – circumference of the contact/messenger wire;

S – transversal cross-section of the contact/messenger wire;

$\Delta\theta_d$ – permissible temperature increase;

ρ_g – resistivity of the contact/messenger wire at maximum permissible temperature.

According to the train timetable on a given power supply section the current drawn by the trains heats the contact wire resulting in the temperature increase process. As long as there are no trains on the section the contact wire cools down to ambient temperature. In that case the maximum permitted current I_p for the wire can be calculated using the formula (2).

$$I_p = I_d \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}} \quad (2)$$

where: $\alpha_p = (t_p / (t_p + t_b))$, t_p – presence duration of the current, t_b – absence duration of the current.

The mean useful voltage on a pantograph can be calculated using the formula (3) originally given in EN 50388:2012

$$U_{\text{średnie użyteczne}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} U_{p_i} \times |I_{p_i}| \times dt}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} |I_{p_i}| \times dt} \quad (3)$$

where: T_i – interval of integration for a train number i ;

n – total number of trains taken into account during the simulation process for d.c. system;

U_{p_i} – actual mean voltage measured on pantograph of a train number i ;

$|I_{p_i}|$ – modulus of actual mean train current measured on pantograph of a train number i ;

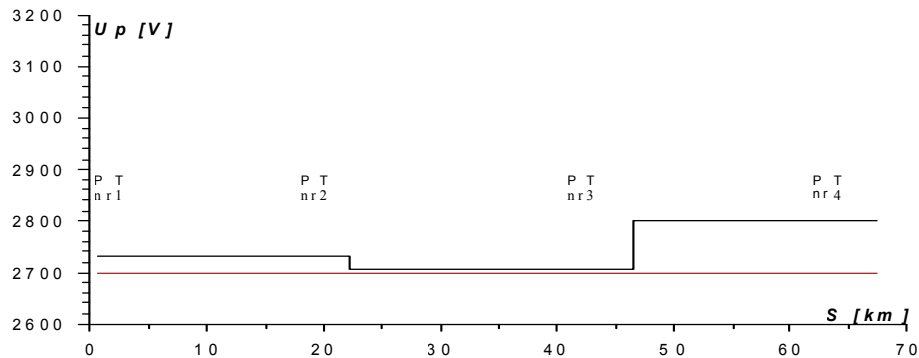
The above formula shows correlation between the mean power value, calculated for reference train/trains during their travel through the section, and the corresponding mean current value.

To perform calculations according to formula (3) an overhead contact line designer should know or assume the following data: overhead contact line cross-section, line speed, power and weight for each type of train, maximum train current and its characteristics, train timetable for the line (headway), track horizontal and vertical profile, substation and section cabin location, type and number of rectifiers, short-circuit power at transformer/switching station measured on medium-voltage side, transmission line voltage, number of transmission lines.

Simulation results have to prove that in case of 3 kV D.C. system the calculated mean useful voltage is higher than 2800 V (for line speeds >200 km/h) and 2700 V (for line speeds ≤ 200 km/h). If the simulation result is positive it is necessary to

check if pantograph voltage for any train is never lower than U_{min1} (2000 V in that case).

Maximum current should be 2500 A for conventional rail system and 3200 A for high-speed rail system.



Pic. 1. An example of mean useful voltage distribution along a section

Ad 4.3 Current capacity, D.C. systems, trains at standstill

According to the TSI it is required that – in case of the 3 kV d.c. system – every pantograph should be able to draw a current of 200 A. During this test the static contact force should be kept at $F_{st}=90$ N according to EN 50367:2012, Table 4 [11]. The maximum temperature at contact point should not exceed the limits given in EN 50119:2009, 5.1.2. [7]. After 30 minutes of heating those limit values are 120 °C for pure copper and 150 °C for copper silver alloy.

Ad 4.4 Regenerative braking

According to the TSI for the „Energy” subsystem, both d.c. and a.c. electrification systems should be designed to permit the use of regenerative braking and enable a train to exchange power at least with other trains. However, more effective use of the braking energy is possible if substations are equipped with energy storage devices. If not, the energy transmitted by braking locomotives and EMUs to the overhead contact line can be recuperated only by other electric trains that are working on the same power supply section.

Ad 4.5 Electrical protection coordination arrangements

The principle of the proper electrical protection coordination arrangements is the following. A traction vehicle, overhead contact wire, electrical circuits of a substation (on the 3 kV side) are protected against short-circuiting by high-speed circuit-breakers. On the ground side, they are installed on the supply end of feeder cables in each substation. Aboard a traction vehicle they are in-

stalled just behind its pantographs. Those areas are therefore protected against short-circuit negative effects. Once a short-circuit occurs aboard the train, the current will exceed the circuit-breaker threshold value. Preferred circuit-breaker to break this current is the trainborne one in order to avoid an unnecessary triggering of the substation one. The assessment criterion usually taken into account is the delay time for the substation circuit-breaker. This time should be 20 to 60 ms for 3 kV d.c. and 80 ms for 25 kV 50 Hz respectively.

Ad 4.6 Harmonics and dynamic effects for AC systems

This paragraph is about a.c. electrification systems. To obtain compatibility of power supply systems harmonics values should be kept below the limits given in EN 50833:2012, 10.4.

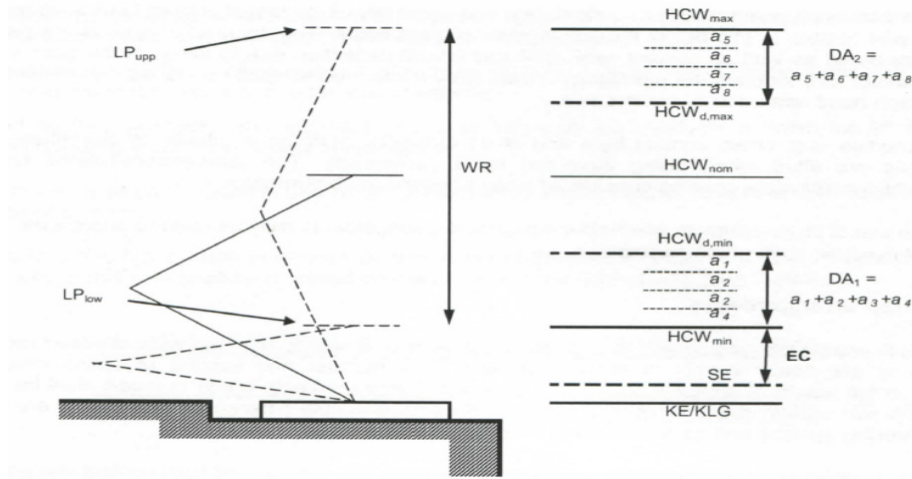
Ad 4.7 Geometry of the overhead contact line

Nominal contact wire height HCW_{nom} values (Fig. 2) as well as minimum and maximum permitted contact wire height values for 1435 mm and 1520/1524 gauges, for both speeds ranges <250 km/h and 250-320 km/h, are shown in Table 2.

The contact wire can be installed higher than indicated, i.e. on level crossings, yards, etc. In that case the design contact wire height $HCW_{d,max}$ should not be greater than 6,20 m. Therefore, including installation tolerances and contact wire uplift, maximum contact wire height (HCW_{max}) should not be greater than 6,50 m.

The assessment on the design phase is performed by confirming that the minimum, nominal and maximum contact wire heights are proper.

Description	Track gauge 1435		Track gauge 1520 and 1524
	$v \geq 250$ km/h	$v < 250$ km/h	
	mm	mm	
Nominal contact wire height	5080 to 5300	5000 to 5750	6000 to 6300
Minimum contact wire height	5080	EN 50119:2009, 5.10.4	5550
Maximum contact wire height	5300	6200 or 6500 see description below	6800



Pic. 2. Relationship between the contact wire height and the pantograph position (KE/KLG – kinematic loading gauge, EC - electrical clearance, other symbols described in EN 50119:2009 [7], 5.10.4)

Permitted variation in contact wire height due to local conditions depends on line speed. Maximum gradient and maximum changes of gradient values are given in EN 50119:2009, 5.10.3.

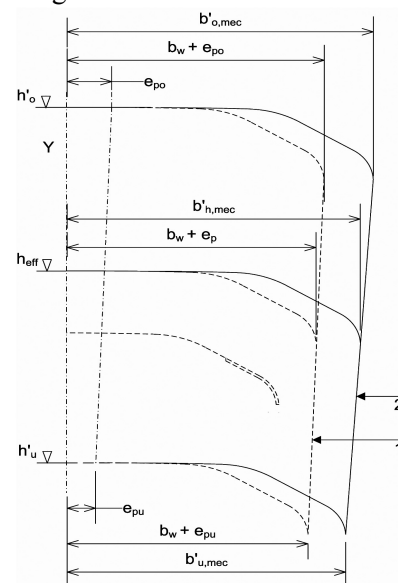
Maximum permitted horizontal deflection of contact wire caused by crosswind is equal 0,55 m for 1950 mm pantograph head, measured from track centre. The deflection caused by crosswind is determining maximum span length on both tangent and curved track. The assessment on the design phase is performed by finding the longest design span on tangent track and checking if the lateral crosswind deflection is not exceeding the limit value.

Ad 4.8 Pantograph gauge

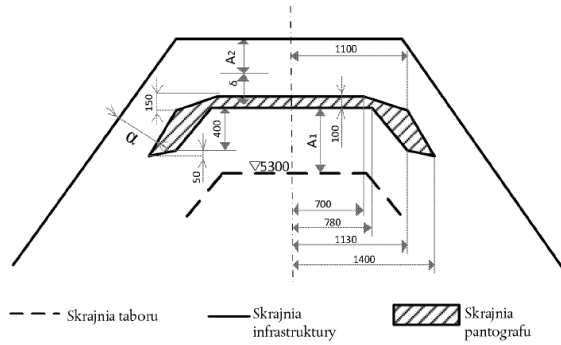
According to the *TSI*, any part of the „Energy” subsystem shall not enter the kinematic pantograph gauge envelope, except for the contact wire and steady arm.

The calculation method for the pantograph gauge envelope for 1435 mm gauge railways is described in the Regulation [13], Annex D. Assuming that: lateral pantograph sway on lower height $h'_u \leq 5,0$ m is equal $e_{pu}=0,110$ m; on upper height $h'_o = 6,5$ m is equal $e_{po} = 0,170$ m respec-

tively; half of collector head width $b_u = 0,975$ m (i.e. for Poland); and regarding permitted electrical clearances it is therefore possible to calculate the pantograph gauge envelope and then to compare it with structure gauge in a given country. For 1520/1524 mm railways static pantograph gauge is shown on Fig. 4.



Pic. 3. Determination of the kinematic pantograph gauge



Pic. 4. Static pantograph gauge for the track gauge 1520/1524 mm

Ad 4.9 Mean contact force

The contact force applied on the wire is a sum of static, dynamic and aerodynamic force. To calculate value of the mean contact force F_m the static force as indicated in EN 50367:2012, table 6 should be adopted. The mean contact force for the 3 kV d.c. system should be kept within following limits (4):

$$90 \text{ N} \leq F_m \leq 0,00097 \cdot vI + 110 \text{ N} \quad (4)$$

where: v – train speed in km/h, F_m – mean contact force in N.

The aerodynamic force F_{ae} depends on the design of a given pantograph. An example of the $F_{ae} + F_{st}$ value depending on speed is shown in Fig. 5.

In case of a.c. electrification systems, for train speeds up to 200 km/h the maximum contact force can be calculated using the formula (5) and for speeds between 200 and 320 km/h using the formula (6).

$$F_{m,max} \leq 0,00047 \cdot vI + 90 \text{ N} \quad (5)$$

$$F_{m,max} \leq 0,00097 \cdot vI + 70 \text{ N} \quad (6)$$

Ad 4.10 Dynamic behaviour and quality of current collection

The dynamic behaviour is to be checked in two phases, that is the ‘design review’ phase and in ‘assembled, before putting into service’ phase. During the ‘design review’ phase it is to verify the dynamic behaviour using simulation and during the ‘assembled’ phase by measuring the contact wire uplift at a support and by assessing the quality of current collection from the overhead contact wire. Assessment of the quality can be performed using two methods: by checking mean contact force F_m and standard deviation σ_{max} or by calculating percentage of arcing between collector head and contact wire.

The verification of the dynamic behaviour in the ‘design review’ phase is to be done by performing proper calculations according to assumed mathematical model of the pantograph and the overhead contact

wire. Some mathematical models are described in paper [15]. The adopted method has to be validated using the algorithm given in EN 50318:2002 [10].

An example of simulation result, presenting calculated force against time, is shown in Fig. 6. However, verification of the dynamic behaviour in the ‘assembled, before putting into service’ phase is to be performed by measuring actual values of the contact force and then by calculating the mean contact force F_m and standard deviation σ_{max} . Accuracy of the measurement is defined by EN 50317:2012 [9]. The assessment result is deemed to be positive if the maximum contact force is lower or equal to the sum of $F_m + 3\sigma_{max}$. In the case of so-called ‘stiff points’ the contact force can be higher up to 350 N.

Ad 4.11 Pantograph spacing (for OCL designing process)

The pantograph spacing is to be assessed according to the Regulation [13] on basis of contact wire uplift with at least two adjacent operating pantographs. Spacing values are indicated in paragraph 4.2.1. of the this Regulation. Minimum distance between pantographs depends on line speed. Assessment is performed on the ‘design review’ phase. During the assessment contact wire uplift at a support should be simulated, resulting in an uplift over time waveform. Afterwards, two waveforms should be summed using the superposition method, described in paper [16]. Eventually, on the basis of the resultant waveform the given overhead contact line should be assigned to one of the following groups ‘A’, ‘B’, or ‘C’, defined in the Regulation.

Ad 4.12 Contact wire material

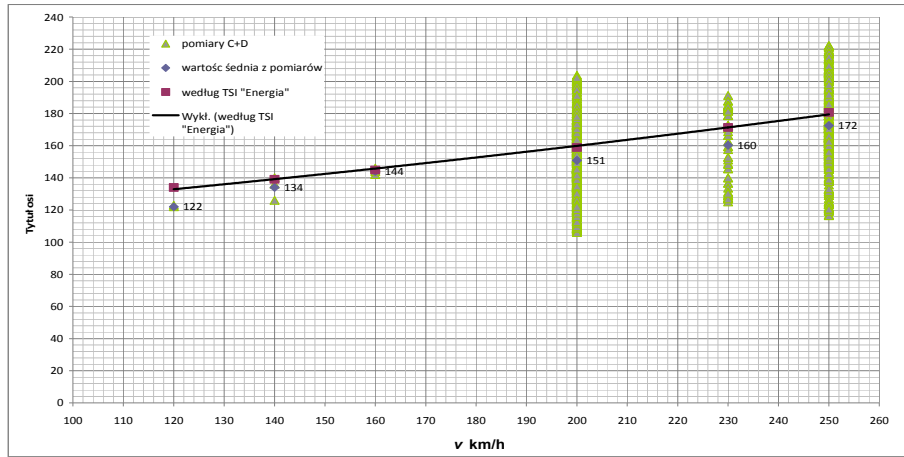
The contact wire material should be compliant to the requirements described in EN 50149:2012, 4.2, 4.3 and 4.6 to 4.8. Assessment is to be performed on the ‘design review’ phase. Essential requirements are: the dimensions, chemical composition and mechanical properties of the contact wire.

Ad 4.13 Phase separation sections

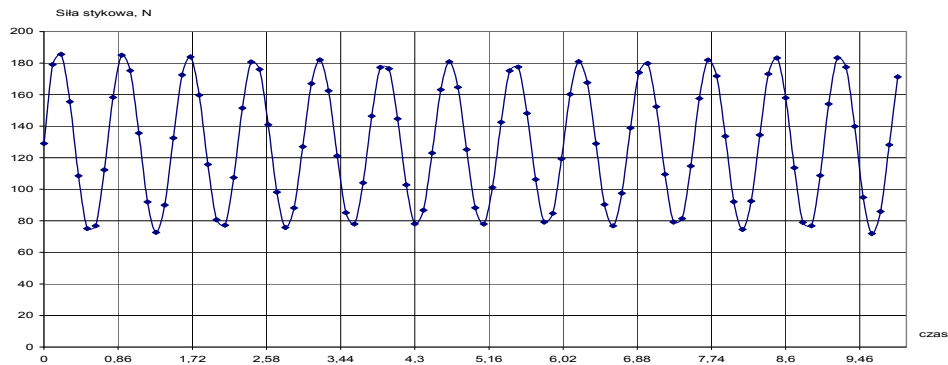
This clause is for a.c. systems only. In order to avoid short-circuiting of two consecutive phases during train transition from one to another, an OCL designer should apply one of the preventive solutions presented in EN 50367:2012, A.1.

Ad 4.14 System separation sections

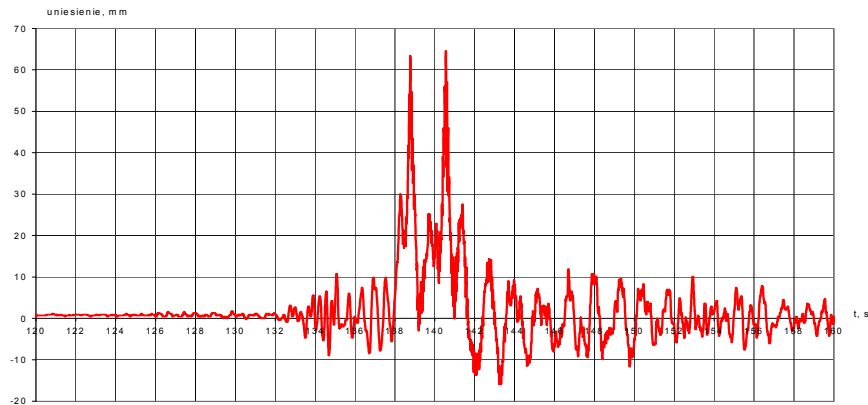
Design of the system separation section has to allow for train passing from one system to another without short-circuiting them. There are two methods to do so: with pantographs raised and with pantographs lowered.



Pic. 5. An example of F_{ac} depending on speed for a given pantograph



Pic. 6. An example of F_m over time waveform obtained during a simulation



Pic. 7. Contact wire uplift against time for two pantographs

Ad 4.15 Ground-based compiled energy billing data system

The ground-based compiled energy billing data system (CEBD) should collect train energy consumption data from a trainborne energy measuring system (EMS) and store for billing purposes. The TSI does not define any requirements for the system nor for data transmitting protocol.

Ad 4.16 Protective provisions against electric shock

For a d.c. electrification system the 'design review' assessment is performed by checking

the kind of provisions against electric shock and earth faults of OCL. The provision can be a system using group bonding of supporting structures with individual groundings or a system using individual bonding of supporting structures. It is to be checked if the return circuit contains transversal jumper bondings between rails and tracks where needed. Moreover, it is to be checked if the bonding jumpers cross-sections and electrical clearances are sufficient, according to EN 50122-1:2011, 5.2.1, 5.3.1 i 5.3.2 and 6.1 i 6.2. Eventually, it is to be confirmed that touch voltages values

are not exceeding the limits given in par. 9.2.2.1 i 9.2.2.2 of this standard (for a.c. systems) and in par. 9.3.2.1 i 9.3.2.2. (for d.c. systems, respectively).

Ad 4.17 Operating rules

Before placing a subsystem in operation it is obligatory to prepare complete technical documentation containing maintenance rules for the overhead contact line and the „Energy” subsystem in order to make sure that all TSI requirements will have to be under control during the whole life cycle of the subsystem.

Ad 4.21 Registration arm uplift clearance

According to the TSI the contact wire uplift at a support should not exceed a half of static distance between the contact wire and the registration arm. Calculations or measurements should be performed using mean contact force of the pantograph, as defined in formula (5), and maximum line speed. Conformity assessment of the clearance in the ‘design review’ phase should be performed using a validated simulation method compliant to EN 50318:2002 [10].

At first, contact force should be calculated according to paragraph Ad. 4.10. Knowing the value of overhead contact wire elasticity at a support (e_{stup}) it is possible to calculate the maximum uplift at a support, using the simple formula (6).

$$y_{stup} = F_m \cdot e_{stup} \quad (7)$$

The calculation method should be validated during in situ dynamic tests. Moreover, the overhead contact line should be assessed in ‘assembled, before putting into service’ phase by performing proper measurements during dynamic tests.

Summary

In order to obtain an EU Certificate it is necessary to develop the design of renewal, upgrade or construction of „overhead contact line” IC (or „Energy” subsystem) and then to perform verification tests according to the TSI requirements. Conformity assessment process is to be performed by a specialized notified body who therefore will issue the EU Certificate valid throughout European Union. This certificate is required for the settlement of European funds granted for realization of the investment.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Panasenko V. M.*

REFERENCES

1. Commission Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community.
2. Commission Decision 2011/274/EU of 26 April 2011 concerning a technical specification for interoperability relating to the energy subsystem of the trans-European conventional rail system.
3. Commission Directive 2009/131/EC of 16 October 2009 amending Annex VII to Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council on the interoperability of the rail system within the Community.
4. Commission Directive 2011/18/EU of 1 March 2011 amending Annexes II, V and VI to Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council on the interoperability of the rail system within the Community.
5. Commission Directive 2013/9/EU of 11 March 2013 amending Annex III to Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council on the interoperability of the rail system within the Community.
6. Commission Decision 2011/291/EU of 26 April 2011 concerning a technical specification for interoperability relating to the rolling stock subsystem — Locomotives and passenger rolling stock of the trans-European conventional rail system.
7. EN 50119:2009 – Railway applications. Fixed installations. Electric traction overhead contact lines.
8. EN 50149:2012 – Railway applications. Fixed installations. Electric traction. Copper and copper alloy grooved contact wires.
9. EN 50317:2012 – Railway applications. Current collection systems. Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line.
10. EN 50318:2002 – Railway applications. Current collection systems. Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line.
11. EN 50367:2012 – Railway applications. Current collection systems. Technical criteria for the interaction between pantograph and overhead line.
12. Artur Rojek, Wiesław Majewski, Marek Kaniewski, Tadeusz Knych *Obciążalność prądowa górnej sieci trakcyjnej*, PK, Zakopane, 2006 r.
13. Commission Regulation (EU) No 1301/2014 of 18 November 2014 on the technical specifications for interoperability relating to the ‘energy’ subsystem of the rail system in the Union.
14. Wytyczne projektowania i warunki odbioru sieci trakcyjnej z uwzględnieniem standardów i wymogów dla linii interoperacyjnych, PKP PLK, Warszawa 2006.
15. Marek Kaniewski, *Model matematyczny odbierania prądu i sieci jezdnej*. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, z XX, Transport, 2013 r.
16. Marek Kaniewski, *Symulacja uniesienia przewodów jezdnych sieci trakcyjnej pod wpływem przejazdu wielu pantografów*, Czasopismo techniczne, Elektrotechnika, Politechnika Krakowska 2011 r.

The introduction to this article gives the definitions of general terms used in the European Union Directives and Decisions. Subsequently, those interoperability constituents and subsystems which can be assessed by the Electric Power Division of the Railway Institute will be discussed. Those interoperability constituents are: overhead contact line, pantograph and contact strip. Issues relating to main circuit breaker assessment – which is also performed by the Division – are not a subject of this paper. Moreover, the paper describes the process of assessing the 21 basic parameters that are subject to analysis during the assessment of overhead contact line interoperability constituents and the „Energy” subsystem. Due to the limited volume of this paper the pantograph and the contact strip interoperability constituents – which are a part of the ‘Locomotives and passenger rolling stock’ subsystem – have only been described briefly.

Keywords: interoperability, infrastructure, overhead contact line, locomotive, TSI requirements.

УДК 621.331.3

М. КАНЕВСЬКИЙ, М. ГЛОВАЧ (ІНСТИТУТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ)

Інститут залізничного транспорту, 04-275 Варшава, Польща, вул. Хлопського 50, тел.: +48 22 4731453, факс: +48 22 4731036, ел. пошта: mkaniewski@ikolej.pl

ВИМОГИ ТА ОЦІНКА ІНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТІ ІНФРАСТРУКТУРИ: КОНТАКТНІ МЕРЕЖІ ПІДСИСТЕМИ «ЕНЕРГЕТИКА» ПРИ ВЗАЄМОДІЇ ЗІ СТРУМОПРИЙМАЧАМИ І КОНТАКТНИМИ НАКЛАДКАМИ ПІДСИСТЕМИ «ЛОКОМОТИВИ ТА ПАСАЖИРСЬКИЙ РУХОМИЙ СКЛАД» ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ ЄС TSI

У вступі статті наведено визначення загальних термінів, використовуваних в Рішеннях і Директивах Європейського Союзу. Згодом, мова піде про ці складові взаємодії та підсистеми, які можуть бути оцінені Відділом з електроенергії Залізничного Інституту. Цими складовими взаємодіями є: контактна мережа, пантограф і його полоз. Питання, що стосуються основних оцінок автоматичного вимикача, які також вирішуються Відділом – не є предметом даної статті. Більш того, у статті описується процес оцінки 21 основного параметра, що підлягає аналізу при оцінці контактної мережі, складові інтероперабельності та підсистеми «Енергія». Через обмежений обсяг даної статті взаємодія складових пантографа і його полоза, які є частиною локомотивів і підсистеми «Пасажирського рухомого складу» описані коротко.

Ключові слова: інтероперабельність, інфраструктура, контактна мережа, локомотив, вимоги TSI.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко В. М.*

УДК 621.331.3

М. КАНЕВСКИЙ, М. ГЛОВАЧ (ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА)

Институт железнодорожного транспорта, 04-275 Варшава, Польша, ул. Хлопицкого 50, тел.: +48 22 4731453, факс: +48 22 4731036, эл. почта: mkaniewski@ikolej.pl

ТРЕБОВАНИЯ И ОЦЕНКА ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТИ ИНФРАСТРУКТУРЫ: КОНТАКТНЫЕ СЕТИ ПОДСИСТЕМЫ «ЭНЕРГЕТИКА» ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТОКОПРИЕМНИКАМИ И КОНТАКТНЫМИ НАКЛАДКАМИ ПОДСИСТЕМЫ «ЛОКОМОТИВЫ И ПАССАЖИРСКИЙ ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ» СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЙ ЕС TSI

Во введении статьи приведены определения общих терминов, используемых в Решениях и Директивах Европейского Союза. Впоследствии, речь пойдет о этих составляющих взаимодействия и подсистемах, которые могут быть оценены Отделом по электроэнергии Железнодорожного Института. Этими составляющими взаимодействия являются: контактная сеть, пантограф и его полоз. Вопросы, касающиеся основных оценок автоматического выключателя, которые также решаются Отделом – не являются предметом данной статьи. Более того, в статье описывается процесс оценки 21 основного параметра, подлежащего анализу при оценке контактной сети, составляющие интероперабельности и подсистемы «Энергия». Из-за ограниченного объема данной статьи взаимодействие составляющих пантографа и его полоза, которые являются частью локомотивов и подсистемы «Пассажирского подвижного состава» описаны кратко.

Ключевые слова: интероперабельность, инфраструктура, контактная сеть, локомотив, требования TSI.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Панасенко В. Н.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ТАРЕЛЬЧАТЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Введение

Несмотря широкое внедрение современной космической телекоммуникации и волоконно-оптической технологии связи, все же около 50% передачи информации, необходимой для управления работой электроэнергетики осуществляется через каналы высокочастотной связи по воздушным линиям (ВЛ) электропередачи 35 кВ и выше. Это связано высокой эксплуатационной надежностью (большой механической прочностью) линий, что обеспечивают устойчивую работу связи, близкую к надежности каналов по кабельным линиям [1]. Вместе с тем при использовании ВЛ для передачи информации приходится учитывать особенности линий, в частности, с электромагнитными излучениями, обусловленными короной на проводах, частичными разрядами на изоляторах и деталях арматуры, создающими помехи на радиосвязи даже при нормальном режиме работы линии электропередачи.

Наибольшие радиопомехи наблюдаются при частотах сотен килогерц, поэтому уровни помех от различных объектов принято измерять при 0,5 и 1 МГц. В международных и национальных стандартах приведены соответствующие критерии оценки допустимых уровней помех для различных элементов ВЛ, находящихся под высоким напряжением. Например, для изоляторов тарельчатого типа в стандартах [2-4] описаны методики испытания и даны предельные нормированные величины помех, ниже которых радиоприем и передача высокочастотных сигналов считаются удовлетворительными.

Из ранних исследований радиопомех от высоковольтных изоляторов тарельчатого типа известно, что:

- источником радиопомех является высокочастотные электромагнитные излучения, обусловленные электрическими разрядами в воздухе – коронными разрядами у торца шапки и на стороне стержня в зоне контактов с армирующей цементно-песчаной связкой;
- при относительно невысоких напряжениях измеряемые помехи определяются процессами коронирования на стороне шапки изолятора,

однако по мере увеличения напряжения уровни радиопомех практически коррелируются с интенсивностью коронирования со стороны заделки стержня по границе связка – диэлектрик – воздух (рис. 1);

- существует непосредственная причинно – следственная связь между максимальной напряженностью электрического поля в открытых областях изолятора и уровнем радиопомех;

- уровни радиопомех от изоляторов носят статистический характер, в зависимости от внешних условий уровни помех могли как соответствовать, так и превышать нормированные значения.

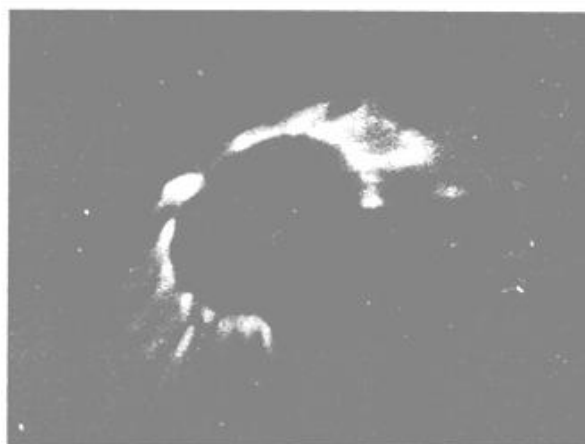


Рис. 1. Корона на изоляторе в зоне армирования стержня

Постановка задачи

Суть задачи заключается в обосновании практических путей оптимизации электрического поля изолятора с тем, чтобы увеличить «запаса прочности» изоляторов по уровню радиопомех. При этом предполагается, что конструкция составных деталей изоляторов (шапки, изоляционного элемента и стержня) сохраняется без изменения, поэтому конечная цель должна реализовываться посредством корректировки технологического регламента сборки изделия.

Как показывает существующая практика исследования резконеоднородных полей, каким является электрическое поле изолятора, на распределение напряженности поля в области

наибольших значений существенное влияние оказывает особенности конструктивного исполнения, а также электрофизические характеристики составных элементов в рассматриваемой области. В случае высоковольтных изоляторов тарельчатого типа наиболее нас интересующими областями являются открытые участки у края шапки и вдоль границы связка-диэлектрик в зоне заделки стержня. В качестве объекта исследований были взяты две конструкции ныне производимых изоляторов типа

ПС70Е и ПС210Б (70 кН и 210 кН по механической нагрузке), значительно отличающихся своими габаритными параметрами. В качестве инструмента выполнения численного анализа электрического поля, для решения уравнения Лапласа общего случая с комплексной проводимостью, была использована программа FEMM – 4.2, основанная на методе конечных элементов. В табл. 1 даны характеристики материалов составных деталей изоляторов и окружающей среды, принятые при расчетах.

Таблица 1

Деталь изолятора	Изоляционная деталь	Связующий элемент - связка	Среда - воздух	Шапка, стержень
ρ – удельное сопротивление, Ом.м	10^{12}	$10^4 \div 10^9$	10^{16}	0
ϵ – диэлектрическая проницаемость	$5 \div 7$	$4 \div 10$	1	-

Результаты расчета электрического поля изоляторов

Как ожидалось, в ходе численных исследований электрических полей выбранных изоляторов было установлено (рис. 2), что максимумы поля имелись место в зоне заделки стержня, в районе контакта шапки с изоляционной деталью посредством связки (E_{III}) и в самой связке у края головки стержня (E_2). Кроме того максимальные напряженности отмечались в изоляционной детали напротив головки стержня, однако по величине они были значительно меньшими, чем требовались для инициирования электрических процессов в самом диэлектрике. По этой причине основное внимание мы уделяли на величины напряженностей в выше названных областях:

Результаты расчетов поля представлены в виде графических зависимостей на рисунках 3 – 5, причем величины максимальных напряженностей поля соответствуют, испытательному напряжению промышленной частоты принятому в технических требованиях этих изоляторов и равному 20 кВ действующего значения.

И так, из рис. 3 хорошо видно насколько значимо влияние проводимости материала связки, с помощью которой создается целостная конструкция изолятора, на распределение электрического поля в интересующих областях. Для принятых в табл. параметрах связки максимальные значения напряженностей на стороне воздуха на границе заделки стержня и шапки E_{III} могут разниться до 1,5 – 1,9 крат. Очевидно, что с увеличением

проводимости связки, т. е. с уменьшением параметра ρ , происходит вытеснение поля из объема связки в соприкасающиеся с ней области, что наглядно иллюстрируется крутым спадом напряженности поля в самой связке. Следует отметить, что при значениях удельного сопротивления, выходящих за пределы $10^6 \geq \rho \geq 10^8 \text{ Ом.м}$ фактор электрической проводимости связки практически нивелируется. Кроме того, сравнивая между собой кривые 1-ПС70Е и 2-ПС210Е на рис. 3, приходим к выводу, что чем больше геометрия изолятора, тем влияние связки проявляется слабее.

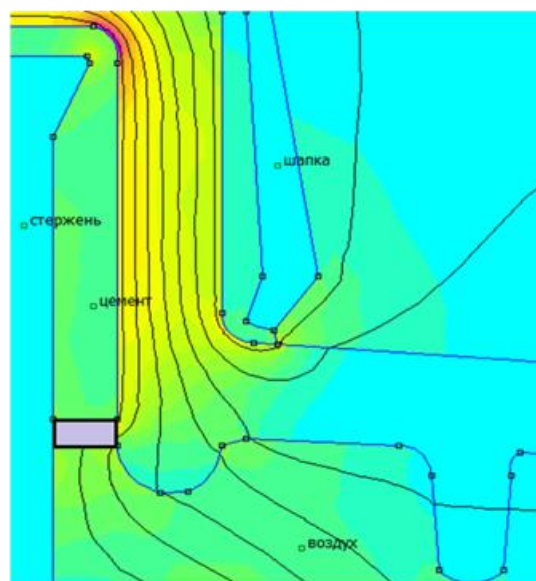


Рис. 2. Основные элементы изолятора и линий равных потенциалов электрического поля

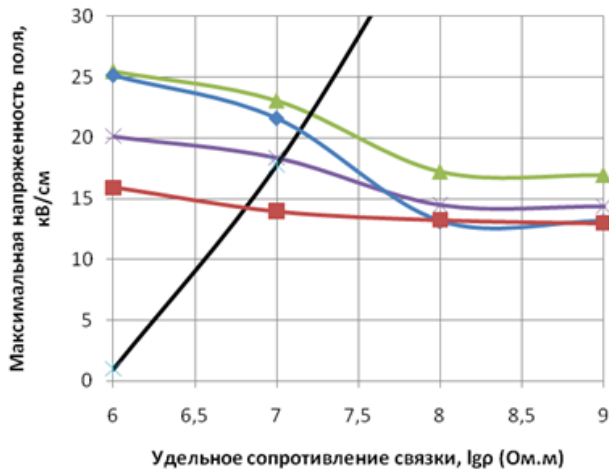


Рис. 3. Влияние удельного сопротивления связи на максимальные напряженности поля: 1-ПС70Е; 2-ПС210Б

В конструкторской документации изоляторов глубина Δh незаполненного связкой армируемого объема в зоне заделки стержня (см. рис. 2) устанавливаются исходя из стремления максимально использовать длину пути утечки диэлектрика с одной стороны, а с другой – из удобства выполнения операции заполнения связкой с последующей зачистки поверхности стекла или форфора. Очевидно, с точки зрения обеспечения механической прочности верхний предел параметра Δh следует ограничивать линией края шапки.

Расчеты показали, что глубина заделки стержня Δh также оказывает существенное влияние на максимальную напряженность поля в области стержня, (см рис. 4). При этом, чем глубже располагается поверхность связки, тем сильнее искривляется поля, соответственно, возрастает максимальная напряженность. В тоже время можно констатировать, что столь заметная деформация поля в зоне заделки стержня не влечет за собой изменение напряженности на стороне шапки, $E_{ш.}$.

Основываясь на результатах рис. 4 мы можем принять, что оптимальная допустимая глубина не должна превышать $2 \div 4$ мм. Причем, чем изолятор ниже по классу механической силы, тем параметр Δh должен быть меньше, что гармонируется с технологическими требованиями.

Таким образом, на основании выполненных расчетов мы располагаем две возможности регулировать электрическое поле тарельчатого изолятора рамках тех комплектующих деталей, используемых в производстве. Это увеличение удельного сопротивления связки на уровне

до $\rho = 10^8 \text{ Ом.м}$ и ограничение глубины заделки стержня, $\Delta h \leq 2 \div 4 \text{ мм}$.

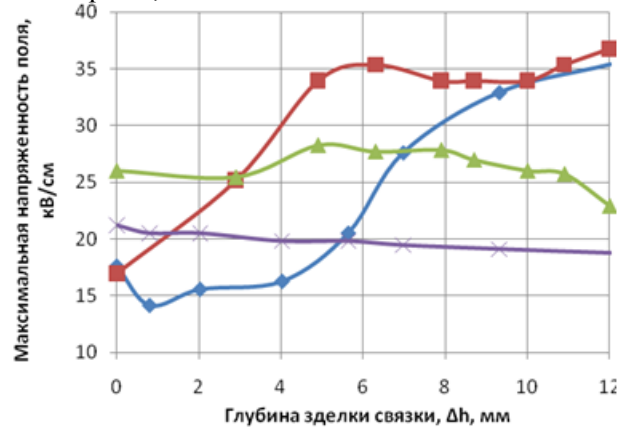


Рис. 4. Влияние глубины заделки связки на максимальные напряженности поля: 1- и 2 - $E_{ш.}$ ($\rho = 10^6 \text{ Ом.м}$)

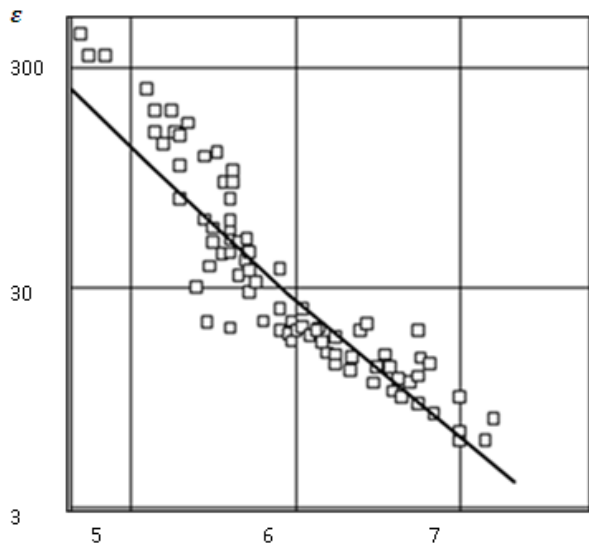
В настоящее время в качестве связующего материала используются цементно-песчаные растворы. Согласно данным измерений удельное сопротивление такой связки в конструкции изолятора в естественных условиях колеблется

в широких пределах, от 10^3 до 10^6 Ом.м , и существенно зависит от содержания свободной влаги в связке. Вообще говоря, путем принудительного нагрева изолятора можно увеличить величину этого параметра еще на один порядок и более (рис. 5). Опыты с предварительно подсушенными изоляторами показывают, что на одних изоляторах наблюдался ожидаемый эффект снижения уровня радиопомех, а на других – заметное увеличение помех. Последнее обстоятельство, вероятнее всего, обусловлено тем, что с увеличением сопротивления связки имеет место резкое увеличение напряженности

поля E_r в самой связке в области головки стержня (см. рис. 3). В затвердевшем цементно-песчаном теле всегда присутствуют воздушные микропоры, в которых при известных условиях могут происходить процессы ионизации газа, что вносят свой вклад в высокочастотные излучения. Кроме того эти внутренние микропроцессы могут являться причиной ускоренного электрического старения связки, что может привести к нарушению целостности конструкции изолятора.

В связи с неоднозначностью проявления связки с высоким электрическим сопротивлением на качество изолятора напрашивается вопрос – можно ли достичь желаемый результат изменением характеристики связки не по

всему армируемому объему? Последующие расчеты показали, что эффект выравнивания поля можно получить только лишь за счет замены верхнего слоя связки с большим удельным сопротивлением в зоне заделки стержня.



Удельное сопротивление связки, $\lg \rho$ (Ом.м)

Рис. 5. Диэлектрические характеристики цементно-песчаной связки

Достаточная толщина этого слоя $\Delta\theta$, как видим по рис. 6, не превышает $3 \div 5$ мм. Такая толщина верхнего слоя никак не может повлиять на механическую прочность изолятора, поэтому этот слой может быть выполнен из менее прочного материала, чем основная связка. Таким образом можно предложить следующее: стержень армируется с помощью принятой для этой цели цементно-песчаной связкой, у которой $\rho \leq 10^6$ Ом.м, а поверх нее ложится дополнительный слой $\Delta\theta \leq (3 \div 5)$ мм с удельным сопротивлением $\rho \approx 10^8$ Ом.м.

На поверхность используемой связки на основе цемента предусмотрено нанесение покрытия для защиты от внешнего атмосферного воздействия. Поэтому предполагаемый дополнительный верхний слой может быть реализован с учетом выполнения функции защиты основной связки.

Оценка ожидаемого снижения уровня радиопомех

Как известно, процессы коронирования относятся к явно нелинейным физическим явлениям с множеством трудно контролируемых и влияющих факторов, поэтому для принятия окончательного решения по повышению характеристики изоляторов по уровню радиопомех потребуются экспериментальное подтверждение в статистически надежном объеме. Но вместе с

тем имеет смысл выполнить приближенную оценку эффективности принимаемых решений, выраженных в единицах измерений помех, в дБ относительно микровольта. Для этой цели принимаем допущение о том, что ионизационные процессы на начальной стадии развития на одном и том объекте и в одинаковых внешних условиях определяются целиком от величины максимальной напряженности поля. Следовательно, при этих условиях можем предположить, что ток короны пропорционален напряженности: $i_k \approx \gamma E_n$, где γ - условная проводимость внешней среды, которая, как полагаем, слабо зависит от E_n .

В этом случае уровень радиопомех от изолятора, $Y(E_n)$, измеряемый по известной методике [2, 3] может быть представлен следующим соотношением [5]:

$$Y(E_M) \approx Y(E_{M.0}) + 40 \cdot \lg\left(\frac{E_M}{E_{M.0}}\right), \quad (1)$$

где $Y(E_{M.0})$ уровень помех при некоторой максимальной напряженности поля.

Нас интересует предполагаемое приращение уровня, обусловленное изменением напряженности поля:

$$\Delta Y \approx 40 \cdot \lg\left(\frac{E_M}{E_{M.0}}\right). \quad (2)$$

Подставляя данные напряженностей рис. 3, 4, получаем ожидаемое снижение радиопомех на уровне $10 \div 13$ дБ для рассмотренных в работе изоляторов ПС70Е и ПС210Б в случае реализации предлагаемых рекомендаций.

Заключение

Основываясь на причинно – следственную связь между напряженностью поля изолятора и уровнем радиопомех можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1 Существенное снижение напряженности поля изолятора на стороне окружающей его воздушной среды можно достигнуть увеличением удельного сопротивления связующего материала до $\rho \approx 10^8$ Ом.м в затвердевшем состоянии, а также ограничением глубины не заполняемого связкой участка в зоне армирования стержня, не более $\Delta h = 2 \div 4$ мм;

2 Поскольку удельное сопротивление применяемой цементно-песчаной связки существенно зависит от содержания свободной влаги, то с целью некоторого увеличения этого параметра желательно предусмотреть технологические меры по удалению избыточной влаги,

например, наносить гидроизолирующее защитное покрытие на цементные швы после вылежки изоляторов в сухих складских помещениях;

3 Для достижения наибольшего эффекта снижения напряженности поля в области заделки стержня достаточно предусмотреть дополнительный слой с удельным сопротивлением $\rho \approx 10^8 \text{ Ом.м}$ толщиной $\Delta\theta \leq (3 \div 5) \text{ мм}$,

наносимый поверх традиционной связки на основе цемента;

4 Целесообразно в будущем использовать альтернативные связующие материалы, не уступающие по своим техническим и ценовым характеристикам используемой цементно-песчаной связке, но с низкой электропроводностью и высокой устойчивостью к электростарению.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шкарин, Ю.П. Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи (часть 2) / Ю.П. Шкарин. — М.: НТФ "Энергопрогресс", 2001. — 72 с.
2. МЭК 437-73. Insulators. Method of measuring industrial radiointerferences.
3. ГОСТ 26196-84. Изоляторы. Метод измерения промышленных радиопомех.
4. СОУ МПЕ 51-103-2007. Ізолятори лінійні підвісні тарільчасті. Загальні технічні умови.
5. Ким, Е.Д. Влияние атмосферных условий на уровень радиопомех от изоляторов / Е.Д. Ким, Н.Ф. Тарасова // Электрические станции. - 1985. - №8. - С. 73-75.

Поступила в печать 10.03.2016.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Андриенко П. Д.*

Одним из основных источников высокочастотных помех в системе коммуникации оперативного управления работой электроэнергетики с использованием силовых проводов воздушной линии являются электрические разряды на высоковольтных изоляторах, возникающие даже при нормальном режиме работы линии электропередачи. Основываясь на причине – следственную связь между напряженностью поля изолятора и уровнем радиопомех ставится задача в обосновании практических путей выравнивания электрического поля изолятора с тем, чтобы увеличить «запаса прочности» изоляторов по уровню радиопомех. При этом предполагается, что конструкция составных деталей изолятора сохраняется без изменения, поэтому конечная цель должна реализовываться посредством корректировки технологического регламента сборки изделия.

Численный анализ электрического поля была выполнена с помощью известной программы FEMM – 4.2 с учетом комплексной проводимости. В качестве объекта исследования были взяты конструкции выпускаемых в настоящее время изоляторов класса 70 и 210 кВ по механической силе.

Общим результатом исследования является установление параметрической связи между максимальными напряженностями поля и электрическими характеристиками связующего материала, с помощью которого осуществляется сборка изолятора, а также уровнем заполнения связки.

Предложено: в области заделки стержня предусмотреть дополнительный слой с толщиной 3..5 мм из материала с удельным сопротивлением 10^5 Ом.м , наносимый поверх традиционной связки на основе цемента; в будущем использовать альтернативные связующие материалы, не уступающие по своим техническим и ценовым параметрам используемой цементно-песчаной композиции, с низкой электропроводностью, но с высокой устойчивостью к электростарению.

Ключевые слова: высоковольтный тарельчатый изолятор, корона, радиопомехи, численный анализ, напряженность электрического поля, цементно-песчаная связка, удельное сопротивление.

REFERENCES

1. Shkarin Y.P. *Vysokochastotnye trakty kanalov svyazi po liniyam elektropredachi (chast'2)* [High-frequency communication paths for transmission lines channel (part 2)]. – Moscow, NTF "Energoprogress" Publ., 2001. 72 p.
2. IEC 437-73. Insulators. Method of measuring industrial radiointerferences.
3. GOST 26196-84. *Izolyatory liniyni pidvisni tarilchasti. Zahal'ni tekhnichni umovy* [Insulators. Method of measuring industrial radiointerferences].
4. SOU MPE 51-103-2007. *Izolyatory liniyni pidvisni tarilchasti. Zahal'ni tekhnichni umovy* [Linear suspension insulators. General specifications].
5. Kim E.D., Tarasova N.F. *Vliyanie atmosferynykh usloviy na uroven' radiopomekh ot izolyatorov* [Influence of atmospheric conditions on the level of interference from the insulators]. *Elektricheskie stantsii* [Power Stations], 1985, no.8, pp. 73-75.

УДК 621.315

Є. Д. КИМ (УПА)

Кафедра електромеханічних систем, Українська інженерно - педагогічна академія, Харків (Бахмут),
тел.: (050) 3711941, ел. пошта: ykim@meta.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТАРИЛЧАСТИХ ІЗОЛЯТОРІВ

Одним з основних джерел високочастотних перешкод в системі комунікації оперативного управління роботою електроенергетики з використанням силових дротів повітряної лінії є електричні розряди на високовольтних ізоляторах, що виникають навіть при нормальному режимі роботи лінії електропередачі. Грунтуючись на причині - слідчий зв'язок між напруженістю поля ізолятора і рівнем радіоперешкод ставитися завдання в об'єднанні практичних шляхів вирівнювання електричного поля ізолятора з тим, щоб збільшити "запасу міцності" ізоляторів по рівню радіоперешкод. При цьому передбачається, що конструкція складених деталей ізолятора зберігається без зміни, тому кінцева мета повинна реалізовуватися за допомогою коригування технологічного регламенту зборки виробу.

Чисельний аналіз електричного поля була виконана за допомогою відомої програми FEMM - 4.2 з урахуванням комплексної провідності. Як об'єкт дослідження були узяті конструкції ізоляторів класу, що випускалися нині, 70 і 210 кН по механічній силі.

Загальним результатом дослідження є встановлення параметричного зв'язку між максимальних напружень поля та електричними характеристиками єднального матеріалу, за допомогою якого здійснюється зборка ізолятора, а також рівнем заповнення зв'язки.

Запропоновано: в області закладення стержня передбачити додатковий шар з товщиною 3..5 мм з матеріалу з питомим опором 1×10^4 Ом.м, що наноситься поверх традиційної зв'язки на основі цементу; в майбутньому використовувати альтернативні єднальні матеріали, не поступливі по своїх технічних і цінових параметрах використовуваної цементно-піщаної композиції, з низькою електропровідністю, але з високою стійкістю до електростаріння.

Ключові слова: високовольтний тарілчастий ізолятор, корона, радіоперешкоди, чисельний аналіз, напруженість електричного поля, цементно- піщана зв'язка, питомий опір.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

UDC 621.315

Y. D. KIM (UEPA)

Department of the electromechanics systems, Ukrainian engineer - pedagogical academy, Kharkiv (Baxmut),
tel.: (050) 3711941, e-mail: ykim@meta.ua

RESEARCH OF ELECTRIC FIELD HIGH-VOLTAGE PLAT INSULATORS

One of basic sources of high-frequency interference in the system of communication of operative management work of electroenergy with the use of power wires of air lines are electrical discharges in high-voltage insulators, resulting even in normal operation the power line. Based on the relationship between the strength of the insulator of the field and the level of interference the problem of justifying practical ways of leveling the electric field of the insulator in order to increase the "safety factor" of insulators on the level of interference is considered. It is assumed that the design of the isolator component parts remains unchanged, so the ultimate aim should be realized through the adjustment of production schedules of product assembly.

Numerical analysis of the electric field has been performed using a known program FEMM - 4.2 in view of the complex conductivity. As the object of study were taken design manufactured at present class of insulators 70 and 210 kN for mechanical strength.

The overall result of the study is to establish a parametric relationship between maximum field strength and electrical characteristics of the binder material, through which the assembly of the insulator, and the level of ligaments required.

It is proposed: in the field of sealing pin to provide an additional layer with a thickness 3..5 mm from a material with a resistivity 1×10^4 Ohm.m, applied over the traditional ligaments cement-based; the future use of alternative binders is not conceding in its technical and price parameters used by the cement-sand composition, low conductivity, but with a high resistance to electrical aging.

Keywords: high-voltage plat insulator, corona, radio interferences, numerical analysis, tension of electric-field, cement-sandy coupler, resistivity.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

УДК 621.331:621.311.05

А. П. КОРДИН, В. А. ДЕРКАЧ, В. Г. МАНДЫЧ (ПРИДНЕПРОВСКАЯ Ж.Д.),
В. Г. СЫЧЕНКО (ДНУЖТ), В. В. КУЗНЕЦОВ (НМЕТАУ)

Дорожная электротехническая лаборатория, Приднепровская железная дорога, 49124,
г. Днепропетровск, ул. Илларионовская, 6-б, эл. почта: o.kordin@dp.uz.gov.ua

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика
В. Лазаряна, кафедра «Электроснабжение железных дорог», 49010, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск,
тел.: +38(056)793-19-11, эл. почта: elpostz@i.ua

Национальная металлургическая академии Украины, кафедра Электротехники и электропривода,
пр-т Гагарина, 4, г. Днепропетровск, 49600, Украина, тел.: (056) 374-84-46, эл. почта: wit_jane2000@mail.ru

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ПИТАЮЩИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ АВТОБЛОКИРОВКИ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ СМЕЖНЫХ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЛИНИЙ

Анализ существующих схем питания железнодорожной автоматики

Устройства железнодорожной автоматики (СЦБ), как потребители первой категории должны получать питание от двух взаимно резервируемых источников через две взаимно резервируемых линии. Питание устройств СЦБ осуществляют, как правило, по трехфазным линиям 10 кВ с изолированной нейтралью.

Основное питание устройства СЦБ получают от специальных линий автоблокировки (ВЛ СЦБ), резервное питание - на участках, электрифицированных по системе постоянного тока и не электрифицированных участках, как правило, от трехфазных линий продольного электроснабжения (ПЭ) 10 кВ, а на участках, электрифицированных по системе переменного тока от линий “два провода-рельс” (ДПР 27,5 кВ).

Для обеспечения необходимого уровня надежности электроснабжения и гальванической развязки с другими электрическими линиями на электрифицированных железных дорогах линия ВЛ СЦБ получает питание от шин собственных нужд тяговой подстанции через повышающий трансформатор ТСЦБ.

Применяют три схемы питания линий автоблокировки: односторонняя (консольная), встречно-консольная и двухсторонняя (параллельная) [1]. При схеме консольного питания напряжение в линии автоблокировки подается от одной из тяговых подстанций, питающих смежные межподстанционные зоны. В случае исчезновения напряжения на этой подстанции питание линии автоблокировки автоматически переводится на смежную тяговую подстанцию. С целью повышения надежности при повреждениях на подстанциях или на линиях консольную схему питания необходимо выполнять так, чтобы линии основного и резервного питания устройств СЦБ на каждой фидерной

зоне нормально получали питание от разных подстанций. Схема консольного питания ВЛ СЦБ и линий продольного электроснабжения получила широкое распространение и является основной для участков постоянного тока, длина которых эквивалентна расстоянию между смежными подстанциями и не превышает 15-25 км.

При схеме встречно-консольного питания в середине зоны между подстанциями на ВЛ СЦБ делается раздел и напряжение на каждый участок линии подается от одной из смежных подстанций. В сравнении с консольной эта схема более совершенна, потому что длина участков питающей линии уменьшается вдвое. При этом улучшается режим напряжения в линии, а при повреждениях отключается только половина участка ВЛ СЦБ между подстанциями.

Схема встречно-консольного питания получила распространение на участках, электрифицированных по системе переменного тока 25 кВ, где расстояния между подстанциями увеличены до 40-50 км. Однако качество напряжения в конце фидерной зоны при этом ниже [2]. Особенно это имеет большое значение в зонах стыкования разных систем электрической тяги.

При двусторонней схеме питания линия автоблокировки питается от двух смежных подстанций. Теоретически двусторонняя схема питания является наилучшей, потому что в этом случае наименьшие потери напряжения и потери мощности в линии, а при аварийном отключении одной подстанции линия без перерыва продолжает получать питание от другой. Но практически осуществить такую схему питания трудно через появление уравнивающих токов, определяющихся векторной разницей напряжения на подстанциях и достигающих значений, при которых срабатывают токовые защиты фидеров ВЛ СЦБ или продольного электроснабжения. Кроме того, при отклю-

чении одной из подстанций при режимном или аварийном изменении напряжения на ней ток подтекания по ВЛ СЦБ и ПЭ 10 кВ резко растет и вызывает срабатывание защит и отключение линий на смежных подстанциях. В связи с этим схема двустороннего питания не получила распространения в эксплуатации.

Однако во всех схемах питания линий автоблокировки, продольного электроснабжения и ДПР пункты питания должны быть сфазированы между собой и допускать двустороннее питание после принятия мер по ограничению уравнильных токов. Для обеспечения нормального питания потребителей необходимо соблюдать одинаковое чередование фаз при условиях поочередного питания линий от смежных тяговых подстанций.

Линии продольного электроснабжения на участках постоянного тока подключаются к шинам двух смежных подстанций, фазировка которых, как правило, совпадает с фазировкой питающей сети энергосистемы.

Как известно, в системе внешнего электроснабжения тяговых подстанций переменного тока выполняется схема фазировки, которая дает возможность уменьшить в питающей сети 110-220 кВ несимметрию напряжения, обусловленную однофазной тяговой нагрузкой. Схема фазировки предусматривает три возможных варианта подключения выводов тяговых трансформаторов к фазам питающих линий. При этом на двух смежных тяговых подстанциях порядок чередования фаз вторичного напряжения, как правило, не совпадает, поэтому двустороннее питание трехфазных линий ДПР в большинстве случаев осуществить невозможно [3].

Основной схемой питания линии ДПР является схема одностороннего питания от одной из тяговых подстанций. При отключении питающего фидера (основного питания) линия может быть переведена на одностороннее питание от смежной тяговой подстанции (резервное питание). В случае присоединения линии ДПР к одноименным выводам трансформаторов смежных тяговых подстанций с несовпадающим чередованием фаз вторичного напряжения после переключения линии с основного питания на резервное изменится направление вращающегося магнитного поля и электродвигатели будут вращаться в противоположную сторону. Во избежание этого при переходе на резервное питание от смежных тяговых подстанций необходимо соблюдать порядок чередования фаз. Для этого при подключении проводов линии ДПР к шинам напряжением 27,5 кВ опережающую фазу сети подключают к опережающей

фазе подстанции и соответственно отстающую фазу - к отстающей.

Однако, как показывает опыт эксплуатации, при совместной работе резервных линий питания автоблокировки в зонах стыкования систем электрической тяги постоянного и переменного тока должна быть обеспечена не только правильная фазировка линий, но и соблюдены условия параллельной работы трансформаторов, питающих линии СЦБ.

Цель работы состоит в рассмотрении вопросов согласованной работы трансформаторов СЦБ при стыковании различных систем электрической тяги.

Изложение основного материала

Включением на параллельную работу трансформаторов считают такое подключение трансформаторов, при котором первичная и вторичная обмотки параллельно работающих трансформаторов подключены к одноименным фазам первичной и вторичной сети [4].

В соответствии с п. 6.4.30 Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей допускается параллельная работа трансформаторов (автотрансформаторов) при условии, что ни одна из обмоток не будет нагружена током, который превышает допустимый ток для данной обмотки [5].

Параллельная работа трансформаторов разрешается при таких условиях:

- группы соединений обмоток одинаковы;
- соотношение мощностей трансформаторов не более чем 1:3;
- коэффициенты трансформации отличаются не более чем на $\pm 0,5\%$;
- напряжения короткого замыкания отличаются не более чем на $\pm 10\%$;
- проведена фазировка трансформаторов.

Для выравнивания нагрузки между параллельно работающими трансформаторами с разными напряжениями короткого замыкания допускается в небольших пределах изменять коэффициент трансформации путем переключения ответвлений при условии, что ни один из трансформаторов не будет перегружен.

Все эти условия справедливы при подключении трансформаторов к одной и той же шине (линии) и при условии, что между общей первичной сетью и общей вторичной сетью отсутствуют какие-либо трансформаторы, кроме подключаемого на параллельную работу, то есть соблюдается следующая схема: первичная сеть $\rightarrow$ трансформатор $\rightarrow$ вторичная сеть.

Следует отметить, что на тяговых подстанциях как переменного, так и постоянного тока электрифицированных железных дорог трансформаторы СЦБ, подключаемые на параллель-

ную работу со вторичной стороны, напрямую не имеют общей шины со стороны первичного напряжения трансформаторов СЦБ смежных тяговых подстанций. Общей первичной стороной цепи параллельной работы трансформаторов СЦБ является питающая линия. Как правило, трансформаторы СЦБ подключаются к шинам собственных нужд (СН) подстанции. В свою очередь трансформатор СН подключается к шинам высокого напряжения 6-10-35 кВ, запитанным от главного понизительного трансформатора (ГПТ). Поэтому в цепи между трансформатором СЦБ и питающей линией тяговой подстанции могут быть задействованы трансформаторы, имеющие различные группы соединения, отличающиеся на смежных тяговых подстанциях, на которых включаются трансформаторы СЦБ на параллельную работу. Исходя из выше сказанного, следует, что параллельная работа трансформаторов СЦБ возможна при следующих условиях:

- независимо от группы соединений обмоток трансформаторов СЦБ и трансформаторов в

цепи до питающей линии тяговой подстанции, необходимо чтобы смещение векторов напряжения вторичной стороны трансформаторов СЦБ по отношению к векторам напряжения питающей линии (вводов) имело один и тот же угол на смежных тяговых подстанциях, где осуществляется параллельная работа трансформаторов СЦБ;

- проведение фазировки трансформаторов СЦБ по отношению к питающей линии смежных тяговых подстанций.

Группа соединения обмоток трансформатора, как известно, показывает, на сколько градусов смещены друг относительно друга векторы напряжений первичной и вторичной стороны трансформатора. Рассмотрим условия и возможность осуществления параллельной работы трансформаторов СЦБ на участке между тяговыми подстанциями А–П–Ж–В (рис. 1-4) в зоне стыкования участков электрической тяги переменного и постоянного тока.

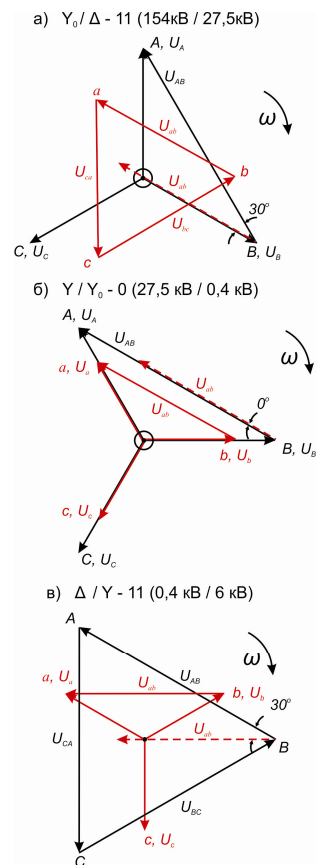
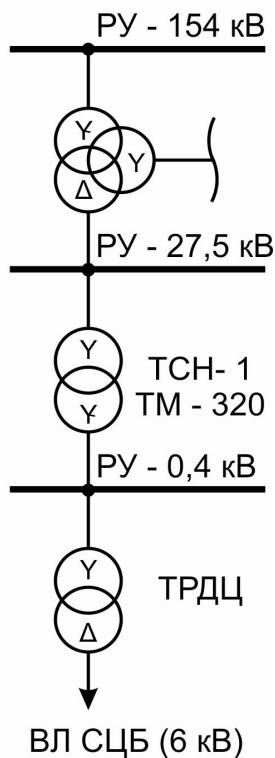


Рис. 1. Схема преобразования энергии на тяговой подстанции А и векторные диаграммы:

- ГПТ - вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ опережает вектор напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$ на 30° ;
- ТСН-1 - напряжение вторичной обмотки ГПТ является напряжением первичной обмотки ТСН-1, вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ совпадает по фазе с вектором напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$;
- ТР ДЦ - напряжение вторичной обмотки ТСН-1 является напряжением первичной обмотки ТР ДЦ, вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ опережает вектор напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$ на 30° .

В итоге угол между вектором напряжения питающей линии (первичной обмотки ГПТ) (154 кВ) и напряжением вторичной обмотки трансформатора СЦБ (ТР ДЦ) (6 кВ) составляет 60° .

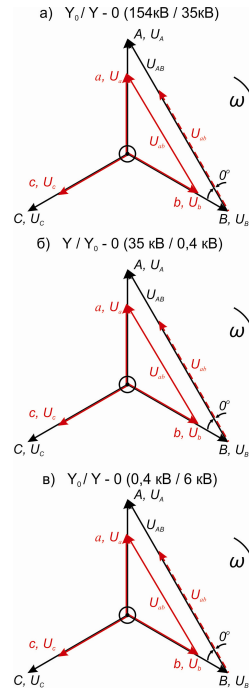
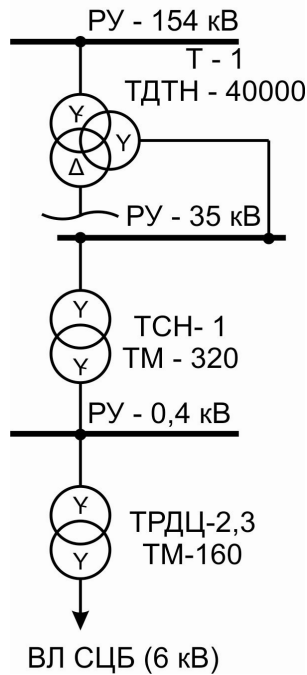


Рис. 2. Схема преобразования энергии на тяговой подстанции П и векторные диаграммы:

а) Т-1 - вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ совпадает по фазе с вектором напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$; б) ТСН-1 - напряжение вторичной обмотки Т-1 является напряжением первичной обмотки ТСН-1, вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ совпадает по фазе с вектором напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$; в) ТР ДЦ-2,3 - напряжение вторичной обмотки ТСН-1 является напряжением первичной обмотки ТР ДЦ-2,3, вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ совпадает по фазе с вектором напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$. В итоге угол между вектором напряжения питающей линии (первичной обмотки Т-1) (154 кВ) и напряжением вторичной обмотки трансформатора СЦБ (ТР ДЦ-2,3) (6 кВ) составляет 0° , т.е. совпадает по фазе.

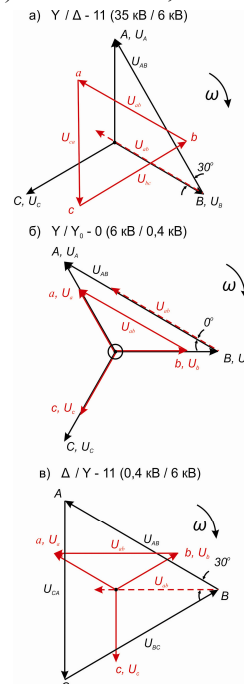
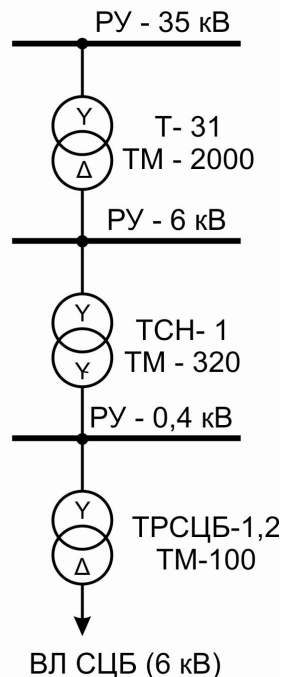


Рис. 3. Схема преобразования энергии на тяговой подстанции Ж и векторные диаграммы:

а) Т-31 - вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ опережает вектор напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$ на 30° ; б) ТСН-1 - Напряжение вторичной обмотки Т-31 является напряжением первичной обмотки, вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ совпадает по фазе с вектором напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$; в) ТР СЦБ-1,2 - напряжение вторичной обмотки ТСН-1 является напряжением первичной обмотки ТР СЦБ-1,2, вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ опережает вектор напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$ на 30° . В итоге угол между вектором напряжения питающей линии (первичной обмотки Т-31) (35 кВ) и напряжением вторичной обмотки трансформатора СЦБ (ТР СЦБ-1,2) (6 кВ) составляет 60° .

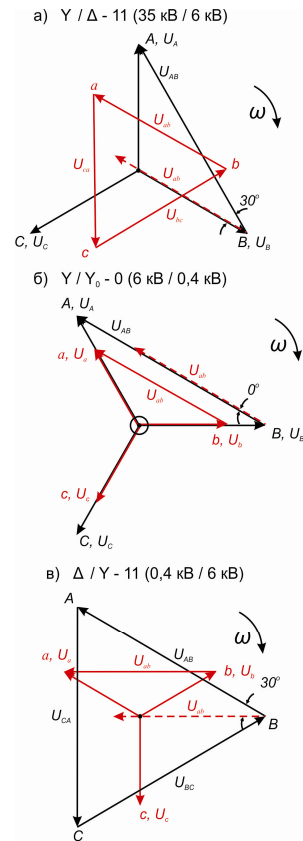
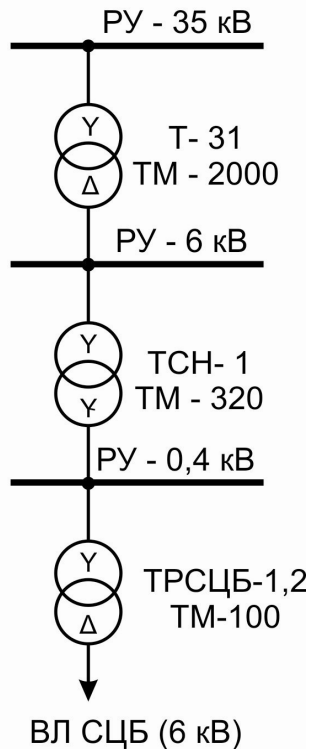


Рис. 4. Схема преобразования энергии на тяговой подстанции В и векторные диаграммы:
а) Т-31 - вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ опережает вектор напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$ на 30° ; б) ТСН-1 - напряжение вторичной обмотки Т-31 является напряжением первичной обмотки ТСН-1, вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ совпадает по фазе с вектором напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$; в) ТРСЦБ-1,2 - напряжение вторичной обмотки ТСН-1 является напряжением первичной обмотки ТРСЦБ-1,2, вектор напряжения первичной обмотки $\underline{U}_{AB}$ опережает вектор напряжения вторичной обмотки $\underline{U}_{ab}$ на 30° . В итоге угол между вектором напряжения питающей линии (первичной обмотки Т-31) (35 кВ) и напряжением вторичной обмотки трансформатора СЦБ (ТРСЦБ-1,2) (6 кВ) составляет 60° .

Проведенным анализом векторных диаграмм по тяговым подстанциям А–П–Ж–В было установлено, что угол между векторами напряжения питающей линии (первичной обмотки силовых трансформаторов) и напряжением вторичной обмотки трансформаторов СЦБ на тяговых подстанциях А, Ж, В составляет 60° , а по тяговой подстанции П – равен 0° .

Для осуществления параллельной работы трансформаторов СЦБ на этом участке предлагается следующее:

1. На тяговой подстанции П подключить трансформатор ТСН с группой соединения «звезда – звезда с нулём» ко вторичной обмотке напряжением 27,5 кВ главного понизительного трансформатора Т-1 или Т-2. Трансформатор ТР ДЦ-2,3 (СЦБ) установить с группой соединения «треугольник – звезда», вместо установленного на данный момент с группой соединения «звезда – звезда с нулём». При такой схеме подключения угол между вектором напряжения питающей линии (первичной об-

мотки силовых трансформаторов) и напряжением вторичной обмотки трансформаторов СЦБ на тяговых подстанциях А, Ж, В и П составит 60° .

2. На тяговой подстанции П при существующей схеме подключения трансформатора ТСН с группой соединения «звезда – звезда с нулём» ко вторичной обмотке 35 кВ главного понизительного трансформатора Т-1 или Т-2 и трансформатора ТР ДЦ-2,3 (СЦБ) с группой соединения «звезда – звезда с нулём» необходимо выполнить перепайку высоковольтных вводов в трансформаторе ТР ДЦ-2,3 для получения 6-й группы соединения обмоток (рис. 5).

Далее путём переподключения (круговой перестановки выводов) внешних кабелей со стороны 6 кВ можно добиться угла сдвига между вектором напряжения питающей линии (первичной обмотки силовых трансформаторов) и напряжением вторичной обмотки трансформаторов СЦБ на 60° (рис. 6).

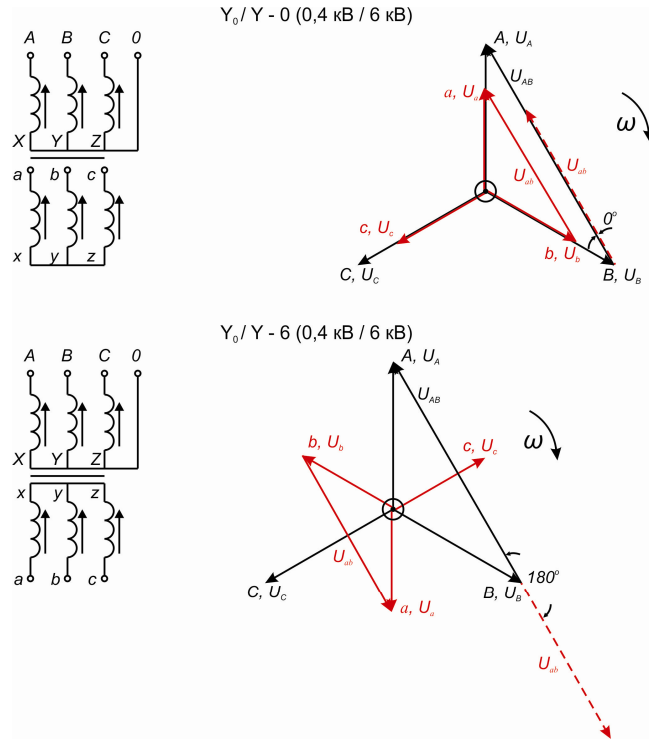


Рис. 5. Получение 6-й группы с группы соединения обмоток $Y_0/Y-0$
 $Y_0/Y - 10 (0,4 \text{ кВ} / 6 \text{ кВ})$

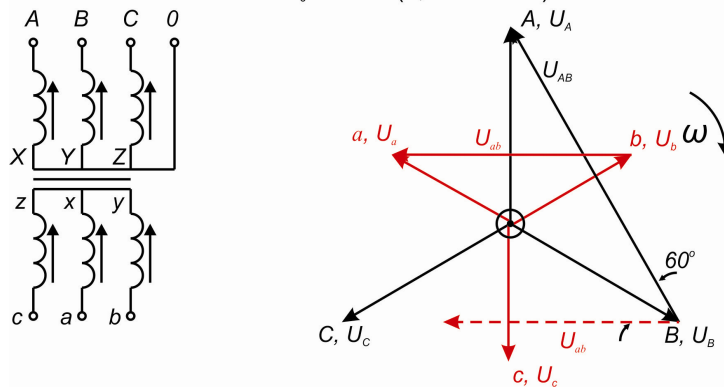


Рис. 6. Получение 10-й группы с группы соединения обмоток $Y_0/Y-6$

Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что при резервировании питания линий питания СЦБ в зонах стыкования разных систем электрической тяги необходимо при параллельной работе трансформаторов обеспечивать, кроме прочих условий, одинаковый угол сдвига фаз и группу соединений обмоток

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сиченко, В. Г. Електроживлення пристроїв залізничної автоматики. [Текст] / В. Г. Сиченко, В. І. Гаврилюк. – Дн-вськ.: Вид-во Маковецький, 2009. – 372 с.
2. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії в мережах нетягових споживачів електрифікованих залізниць. [Текст] / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, В. В. Кузнецов. Гірничя електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ, Вип. 96 – 2015, с. 9-13.

трансформаторов. Приведенные практические рекомендации по обеспечению согласованной работы трансформаторов СЦБ смежных линий разного рода тока позволяют обеспечить надежную работу цепей автоблокировки при аварийных режимах в линиях питания и необходимое качество напряжения.

REFERENCES

1. Sychenko V. G. *Elektrozhyvleniya prystroyiv zaliznychnoyi avtomatyky* [Power supply of railway automation equipment]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2009. 372 p.
2. Sychenko V. H., Bosiy D. O., Kuznetsov V. V. *Yakist' elektrychnoyi enerhiyi v merezhakh netyahovykh spozhyvachiv elektryfikovanykh zaliznyts'* [Electric energy quality in non-tractive consumers networks of electrified railways]. *Hirnycha elektromek-*

3. Ратнер, М. П. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. [Текст] / М. П. Ратнер, Е. Л. Могилевский. М.: Транспорт, 1985. – 295 с.

4. Дубинець, Л. В. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини. [Текст] / Л.В. Дубинець, О.І. Момот, О.Л. Маренич. - Д. : ДІТ, 2004. - 208 с.

5. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: Утв. 25.06.07, № 258 / Мин-во топлива и энергетики Украины. – Х.: Индустрия, 2007. – 288 с.

hanika ta avtomatyka - Mining electrical engineering and automation, 2015, vol. 96, pp. 9-13.

3. Ratner M. P., Mogilevskiy E. L. *Elektrosnabzhenie netyagovykh potrebiteley zheleznykh dorog* [The power supply of railways non-tractive consumers]. Moscow, Transport Publ., 1985. 295 p.

4. Dubinets L.V., Momot O.I., Marenich O.L. *Elektrychni mashyny. Transformatory. Asynkhronni mashyny* [The electric machine. Transformers. Asynchronous machine]. Dnepropetrovsk, DIIT Publ., 2004, 208 p.

5. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektro-ustanovok potrebiteley* [Rules of electrical consumers technical operation]. Kharkiv, Industria Publ., 2007. 288 p.

Поступила в печать 19.04.2016.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Сокол Е. И.*

При параллельной работе высоковольтных линий питания автоблокировки в зонах стыкования систем электрической тяги постоянного и переменного тока возникают сбои в работе устройств автоблокировки, вызванные несоблюдением условий параллельной работы трансформаторов. Несогласованность их работы вызвана различными схемами подключения тяговых подстанций постоянного и переменного тока к линиям внешнего электроснабжения, разным количеством ступеней трансформации, а также разными схемами и группами соединения обмоток трансформаторов автоблокировки. В статье проведен анализ условий параллельной трансформаторов автоблокировки на смежных тяговых подстанциях разных систем электрической тяги и решена проблема обеспечения их согласованной работы.

Ключевые слова: линия питания автоблокировки, параллельная работа трансформаторов, группа соединения обмоток, векторная диаграмма, качество напряжения.

УДК 621.331:621.311.05

О. П. КОРДИН, В. А. ДЕРКАЧ, В. Г. МАНДИЧ (ПРИДНІПРОВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ),
В. Г. СИЧЕНКО (ДНУЗТ), В. В. КУЗНЕЦОВ (НМЕТАУ)

Дорожня електротехнічна лабораторія, Придніпровська залізниця, 49124,
м. Дніпропетровськ, вул. Іларіонівська, 6-6, ел. пошта: o.kordin@dp.uz.gov.ua

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

Національна металургійна академія України, кафедра Електротехніки і електроприводу, пр-т Гагаріна, 4,
м. Дніпропетровськ, 49600, Україна, тел.: (056) 374-84-46, ел. пошта: wit_jane2000@mail.ru

ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА ЖИВЛЯЧИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ АВТОБЛОКУВАННЯ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ СУМІЖНИХ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЛІНІЙ

При паралельній роботі високовольтних ліній живлення автоблокування в зонах стикування систем електричної тяги постійного і змінного струму виникають збої в роботі пристроїв автоблокування, викликані недотриманням умов паралельної роботи трансформаторів. Неузгодженість їх роботи викликана різними схемами підключення тягових підстанцій постійного і змінного струму до ліній зовнішнього електропостачання, різною кількістю ступенів трансформації, а також різними схемами і групами з'єднання обмоток трансформаторів автоблокування. У статті проведено аналіз умов паралельної роботи трансформаторів автоблокування на суміжних тягових підстанціях різних систем електричної тяги і вирішена проблема забезпечення їх узгодженої роботи.

Ключові слова: лінія живлення автоблокування, паралельна робота трансформаторів, група з'єднання обмоток, векторна діаграма, якість напруги.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Сокол С. І.*

UDC 621.331:621.311.05

O. P. KORDIN, V. A. DERKACH, V. G. MANDYCH (PRYDNIPROVSKA RAILWAY),
V. G. SYCHENKO (DNURT), V. V. KUZNETSOV (NMETAU)

Railway electrotechnical laboratory, Prydniprovsk Railway, 49124, Dnipropetrovsk, Illarionivska Str. 6-b,
e-mail: o.kordin@dp.uz.gov.ua

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

National Metallurgical Academy of Ukraine, The department of electrical engineering, 4 Gagarina Ave, Dnepro-
petrovsk, 49600, Ukraine, tel.: (056) 374-84-46, e-mail: wit_jane2000@mail.ru

PARALLEL OPERATION OF THE POWER SUPPLY TRANSFORMERS OF THE AUTOMATIC BLOCK SYSTEM AT TRACTION SUBSTATIONS OF ADJACENT ELECTRIFIED LINES

In parallel operation of high-voltage power lines of automatic block system in the areas of splicing electric traction systems AC and DC there are failures in the auto-lock devices, caused by failure to conditions of parallel operation of transformers. Inconsistency of their work caused by various schemes of traction substations connecting AC and DC lines to the external power supply, a different number of transformation steps, as well as various schemes and groups of windings connection of automatic block system of transformers. The article analyzes the conditions of parallel transformers auto-lock on the adjacent traction substations different electric traction systems and solved the problem of providing their coordinated work.

Keywords: automatic lock-line supply, parallel operation of transformers, winding connection group, vector diagram, voltage quality.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Sokol E. I.*

В. И. ПАНЧЕНКО, Д. В. ЦИПЛЕНКОВ, М. О. ЛЕОНОВА, В. В. КИРИЧЕНКО (НГУ)

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», 49005, г. Днепропетровск, пр. Карла Маркса, 19, тел.: 066-774-63-09, эл. почта: nmu.em@ua.fm, mashaleo05@mail.ru, kirichenko_vv@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-6906-776X, orcid.org/0000-0002-0378-5400, orcid.org/0000-0003-2456-943X

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА ВЕТРОУСТАНОВКИ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Введение

Доля производства электроэнергии автономными источниками в мире превышает 10 %. Кроме этого повышенный интерес к малой энергетике объясняется рядом дополнительных проблем, возникающих при эксплуатации крупных электростанций.

Ветроустановки с вертикальной осью вращения привлекательны простотой конструкции, отсутствием необходимости ориентировки на ветер, сравнительной дешевизной оборудования. Но присущие недостатки мешают их широкому распространению. Недостатки эти таковы: большая осевая нагрузка на подшипники, поддерживающие ротор ветроколеса; тихоходность, требующая применение многополюсных генераторов или использование мультипликаторов; проблемы с выбором места размещения электрогенератора относительно ветроколеса и др. Одни из наиболее распространенных типов роторов, применяемых в ветроустановках малой мощности с вертикальной осью – ротор Эванса, ротор Дарье или Н-ротор.

Анализ надежности ветроэнергетических установок показывает, что большая часть повреждений вызывается выходом из строя генератора и мультипликатора (механизма, повышающего обороты рабочего колеса от 10-120 об/мин до необходимых 750-1000 об/мин генератора). Эти же элементы составляют определенную часть стоимости всей установки. Применение низкоскоростных генераторов для ВЭУ является актуальным. С точки зрения обеспечения хороших массогабаритных показателей, наиболее эффективной электрической машиной, работающей с низкой частотой вращения, является низкоскоростной торцевой генератор. Лучшими характеристиками из многообразия торцевых машин обладают торцевые синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Это связано с простотой конструкции, меньшим расходом меди, малыми габаритами, отсутствием скользящих контактов, с возможностью выполнять генератор низких скоростей вращения, что обуславливает его

низкую стоимость и высокую надежность. Применение низкоскоростных генераторов упрощает конструкцию мультипликатора, а в ряде случаев позволяет обходиться без него.

Одним из перспективных направлений в ветроэнергетике является разработка ветроэнергетических установок с ветроколесом типа ротора Дарье [1]. Ветроколеса этого типа существенно отличаются от традиционных пропеллерных ветроколес, имеют вертикальную ось вращения и могут работать при любом направлении ветра, не требуя систем ориентации по потоку. По своим энергетическим характеристикам такие ветроустановки приближаются к лучшим образцам установок пропеллерного типа. На сегодняшний день по своим энергетическим характеристикам такие ветроустановки приближаются к лучшим образцам установок пропеллерного типа.

Ветроустановки с вертикальной осью вращения привлекательны простотой конструкции, отсутствием необходимости ориентировки на ветер, сравнительной дешевизной оборудования. Но присущие недостатки мешают их широкому распространению. Недостатки эти таковы: большая осевая нагрузка на подшипники, поддерживающие ротор ветроколеса; тихоходность, требующая применение многополюсных генераторов или использование мультипликаторов; проблемы с выбором места размещения электрогенератора относительно ветроколеса и др.

Постановка задачи

Анализ надежности ветроэнергетических установок показывает, что большая часть повреждений вызывается выходом из строя генератора и мультипликатора (механизма, повышающего обороты рабочего колеса от 10-120 об/мин до необходимых 750-1000 об/мин генератора). Эти же элементы составляют определенную часть стоимости всей установки. Применение низкоскоростных генераторов для ВЭУ является актуальным. С точки зрения обеспечения хороших массогабаритных показателей, наиболее эффективной электрической

машиной, работающей с низкой частотой вращения, является низкоскоростной торцевой генератор. Лучшими характеристиками из многообразия торцевых машин обладают торцевые синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Это связано с простотой конструкции, меньшим расходом меди, малыми габаритами, отсутствием скользящих контактов, с возможностью выполнять генератор низких скоростей вращения, что обуславливает его низкую стоимость и высокую надежность. Применение низкоскоростных генераторов упрощает конструкцию мультипликатора, а в ряде случаев позволяет обходиться без него.

Решение задачи

Рассмотрим ветроустановку с вертикальной осью вращения в которой устранены некоторые из указанных выше недостатков. Установка (рис. 1) снабжена ветроколесом 1 в виде Н-ротора Дарье, который соединен элементами крепления 2 с трубой 3, посаженной посредством радиально-упорных подшипников 4 на стержневую опору 5. Последняя закреплена в верхней части башни 6. На крайних по высоте элементах крепления ветроколеса, в горизонтальной плоскости, расположен ротор 7 дискового синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов. Статор генератора 8 прикреплен к стержневой опоре 5. Постоянные магниты ротора закреплены (например, с помощью клея) на сплошном кольце из магнитомягкой стали. Магнитопровод статора сделан в виде кольца, навитым из ленты электро-технической стали. В нижней части кольца выполнены пазы, в которых размещены катушки трехфазной обмотки статора.

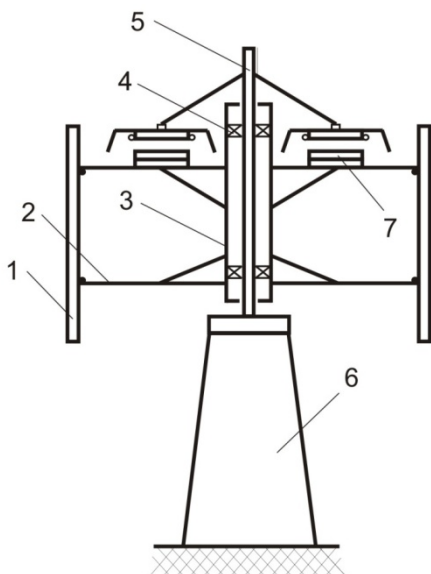


Рис. 1. Ветроэнергетическая установка

Рассмотрим некоторые особенности конструкции генератора. Его расчетная мощность определяется выражением [1]

$$P' = 0,164\alpha_i k_\phi k_{об} B_\delta A n D_{cp}^2 l, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где α_i – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; k_ϕ – коэффициент формы кривой магнитного потока воздушного зазора;

$k_{об}$ – обмоточный коэффициент; B_δ – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом влияния продольной реакции якоря, Тл; A – линейная нагрузка, А/м; n – частота вращения ротора, об/мин;

D_{cp} – средний диаметр статора (ротора), м; l – радиальная длина магнитопровода, м.

Между магнитопроводом статора и постоянными магнитами ротора наблюдается силовое взаимодействие. Усилие, с которым ротор притягивается к статору

$$F = \frac{(\alpha_i B_\delta)^2}{2\mu_0} S_\delta, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $S_\delta = \pi D_{cp} l$ – площадь воздушного зазора, м².

Запишем отношение

$$\frac{P'}{F} = 1,31 \cdot 10^{-7} \frac{k_\phi k_{об} A n}{\alpha_i B_\delta} D_{cp}. \quad (3)$$

Величина усилия F должна быть такой, чтобы обеспечить существенное уменьшение нагрузки на подшипники ветроколеса и в то же время не допустить "прилипания" ротора к статору. Исходя из этого, значение F должно быть таким

$$F = k_3 g m,$$

где $k_3 = 0,94 \dots 0,96$ – коэффициент; $g = 9,81$ м/с² – ускорение земного тяготения; m – масса вращающихся элементов установки.

Учитывая приведенное соображение по выбору величины усилия, определим из (3) среднее значение диаметра статора, при котором обеспечивается требуемая мощность генератора и при этом значительно разгружаются подшипники и исключается "прилипание" ротора к статору

$$D_{cp} = \frac{7,8 \cdot 10^5 \alpha_i B_\delta P'}{k_3 k_\phi k_{об} A n m}, \text{ м}. \quad (4)$$

Из последней формулы следует, что при больших значениях B_δ , что возможно при малом воздушном зазоре между ротором и статором, необходимо обеспечить большой средний диаметр и следовательно (при данной мощности) получить малую активную длину машины. Это вызовет увеличение расхода меди на изготовление обмотки из-за относительно большей доли ее лобовых частей. Для избежания этого, необходимо предварительно выбрать рациональные значения активной длины, например, $l \geq 0,1\text{ м}$ и диаметра $D_{\text{ср}}$. Затем, используя формулу (4), рассчитать требуемое значение магнитной индукции B_δ .

При выборе величины $D_{\text{ср}}$ нужно учесть следующие соображения. Магниты для уменьшения их потоков рассеяния должны иметь определенную ширину на окружности внутреннего диаметра $D_{\text{вн}}$ ротора (обычно не менее 6 мм) и не должны приходить в соприкосновение друг с другом на этом диаметре. Полюсное деление на внутреннем диаметре должно быть таким

$$\tau_{\min} = \frac{b_m}{0,6 \dots 0,7},$$

внутренний диаметр

$$D_{\text{вн}} = 2p\tau_{\min},$$

где b_m – ширина магнита; $2p$ – число полюсов (магнитов).

Средний диаметр должен быть равен

$$D_{\text{ср}} = D_{\text{вн}} + l = 2p\tau_{\min} + l.$$

Так, при $2p=120$, $l=100$ мм, $b_m=6$ мм, получим

$$D_{\text{ср}} = 120 \frac{6}{0,65} + 100 = 1208 \text{ мм}.$$

Выбрав материал магнита, например, с линейной характеристикой размагничивания, определим толщину одного магнита по формуле

$$h_m = \frac{k_F \mu_m}{\frac{B_r}{B_\delta} - \sigma} \delta,$$

где k_F – коэффициент насыщения магнитной цепи; μ_m – относительная магнитная проницаемость материала магнитов; B_r – остаточная магнитная индукция магнита; σ – коэффициент, учитывающий его поток рассеяния; δ – воздушный зазор.

Рассмотрим вопрос о конструкции обмотки статора генератора и обоснуем выбор соотно-

шения числа пазов Z_1 статора и количества полюсов (постоянных магнитов) $2p$ ротора. С целью уменьшения расхода меди используем т.н. зубцовую обмотку, предполагающую размещение на каждом зубце магнитопровода статора отдельной катушки обмотки. При этом обеспечивается минимальная длина лобовых частей, а сама обмотка в трехфазном исполнении реализуется при выполнении соотношения [2]

$$Z_1 = 2p + k,$$

где $k = 1, 2, 3 \dots$

Очевидно, что при $Z_1 = 2p$ трехфазную обмотку создать нельзя, так как электродвижущие силы (ЭДС) во всех катушках обмотки будут совпадать по фазе; кроме того, в этом случае имеет место максимальный тормозящий момент при пуске в ход ветроколеса (момент «залипания»). Обоснуем выбор значения k . По своему положению в магнитном поле воздушного зазора, создаваемом постоянными магнитами, взаимный угол сдвига α в электрических градусах двух катушек, размещенных на соседних зубцах, составит

$$\alpha = \frac{2\pi p}{Z_1} = \pi - \frac{k\pi}{Z_1}.$$

Так как трехфазная обмотка принятой конструкции выполняется с шагом из данного паза в соседний, то электрический угол между векторами ЭДС двух катушек, расположенных на соседних зубцах, при их последовательно-встречном включении будет таким

$$\alpha_c = \pi - \alpha = \frac{k\pi}{Z_1}.$$

Очевидно, что симметричная трехфазная обмотка может быть выполнена только при числе зубцов статора, кратном числу фаз m , то есть $Z_1 = am$, где $a = 1, 2, 3, \dots$. На каждую фазу при этом будет приходиться число зубцов (катушек) $a = \frac{Z_1}{m}$. Под числом k в формуле $Z_1 = 2p + k$ будем подразумевать количество последовательно или параллельно соединенных ветвей фазы. Тогда число катушек в одной ветви будет

$$a_g = \frac{Z_1}{km} = \frac{a}{k} - \text{целое число}.$$

Электрический угол, занимаемый всеми катушками ветви, в электрических градусах составит

$$\alpha_B = a_B \alpha_c = \frac{Z_1}{km} \cdot \frac{k\pi}{Z_1} = \frac{\pi}{m} = 60^\circ.$$

Отсюда следует возможность создания трехфазной обмотки с 60-ти градусной фазной зоной, что обеспечит достаточно высокое значение ее обмоточного коэффициента (до 0,956). Подчеркнем, что числа k и a_B должны быть целыми. Связь между ними, как это следует из приведенных выше формул, описывается соотношением

$$a_B = \frac{2p/k + 1}{m}. \quad (5)$$

Последовательно задавая значениями k , начиная с единицы, находят первое (наименьшее) значение числа a_B . Например, при частоте вращения ветроколеса $n = 50$ об/мин и требуемой частоте напряжения генератора $f = 50$ Гц, число пар полюсов последнего должно быть $p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{50} = 60$. Из (5) следует, что при $m = 3$ и только при $k = 6$ получим целое число.

При этом $Z_1 = 2 \cdot 60 + 6 = 126$; $a = \frac{Z_1}{m} = \frac{126}{3} = 42$.

Число пазов на полюс и фазу рассматриваемой обмотки

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{2p+k}{2pm} = \frac{1}{m} \left(1 + \frac{k}{2p} \right).$$

Подставим в последнее соотношение значение k из (5). При $m = 3$ получим

$$q = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{1}{3a_B - 1} \right).$$

Очевидно, что обмотка является дробной со значением $q < 1$. Известно [3], что дифференциальное рассеяние таких обмоток очень быстро возрастает с уменьшением q , начиная со значения $q = 1/3$. Поэтому желательно, как это следует из последней формулы, обеспечить в обмотке минимальное значение a_B . Так, при $a_B = 1$, получим $q = 0,5$.

На рис. 2 показана в двух проекциях конструкция синхронного генератора ветроэнергетической установки.

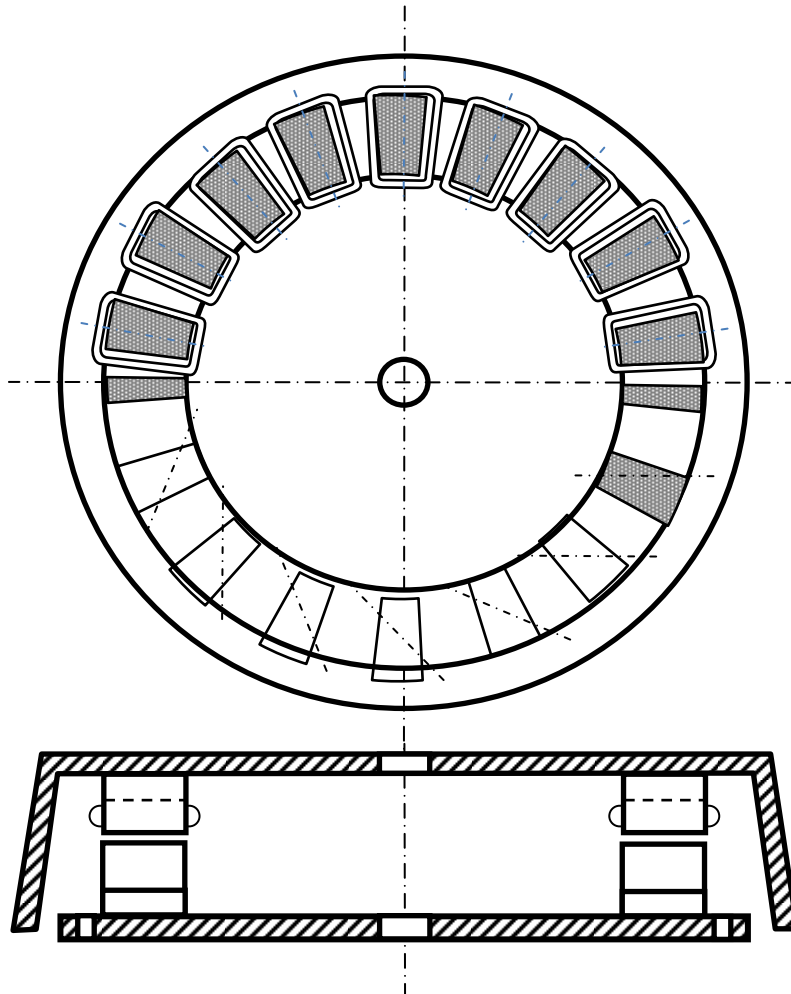


Рис. 2. Конструкция синхронного генератора ветроэнергетической установки с $2p = 16$ и $Z_1 = 18$

В нерабочем состоянии ветроустановки устойчивое положение ротора генератора наблюдается в случае, когда вертикальные оси магнитов совпадают с такими же осями зубцов статора. Чтобы вывести ротор из этого состояния нужно преодолеть действие статического момента «залипания». Определим значение момента, действующего в тангенциальном направлении на один магнит при сдвиге последнего относительно зубца статора

$$M_0 = \frac{dW_\delta}{d\gamma}, \quad (6)$$

где $W_\delta = W_0 dV_\delta = \frac{B_{\delta 0} H_{\delta 0}}{2} l \delta dx$; W_0 – магнитная энергия в единице объема воздушного зазора между поверхностями магнита и зубца, Дж; $B_{\delta 0}$, $H_{\delta 0}$ – магнитная индукция и напряженность магнитного поля в воздушном зазоре в режиме холостого хода, l – радиальная длина воздушного зазора, м; dx – взаимное перекрытие магнита и зубца в тангенциальном направлении, м; $dV_\delta = l \delta dx$ – элемент объема воздушного зазора между поверхностями магнита и зубца, м³. Учитывая, что $dx = R_{cp} d\gamma$, где $d\gamma$ – геометрический угол, занимаемый в пространстве элементом dx , из формулы (6) получим

$$M_0 = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} l \delta R_{cp} = \frac{B_{\delta 0}^2}{2\mu_0} \frac{\delta S_\delta}{2\pi} = \frac{B_{\delta 0}^2}{2\mu_0} \frac{V_\delta}{2\pi}, \quad (7)$$

где $R_{cp} = 0,5 D_{cp}$ – средний радиус ротора; $S_\delta = 2\pi R_{cp} l$ – площадь поверхности ротора, обращенной к воздушному зазору, м²; $V_\delta = \delta S_\delta$ – объем воздушного зазора, м³.

Статический момент «залипания»

$$M_c = M_0 N = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} \frac{S_\delta \delta N}{2\pi}, \quad (8)$$

где N – число магнитов оси, которых совпадают с осями зубцов статора при неподвижном роторе. Значение N зависит от соотношения между Z_1 и $2p$. При удачном выборе этого соотношения можно значительно уменьшить момент M_c , причем значение N находят как наибольший общий делитель чисел Z_1 и $2p$. Например, если $Z_1 = 126$, $2p = 120$, то числа 126 и 120 можно представить в виде

$$120 = 6 \cdot 20 \quad \text{и} \quad 126 = 6 \cdot 21,$$

а их наибольший общий делитель $N = 6$.

В общем случае для чисел $Z_1 = 2p + k$, которое является кратным трем и $2p$, которое всегда четное, наибольшим делителем будет число k , т.е. $N = k$.

Максимальное значение электромагнитного момента синхронного генератора можно представить следующей формулой

$$M_m = \frac{B_\delta^2}{2\mu_0} V_\delta p. \quad (9)$$

Из сравнения момента по последней формуле с моментом «залипания» по (8), получим

$$M_c = \left(\frac{B_{\delta 0}}{B_\delta} \right)^2 \frac{M_m N}{2\pi p}. \quad (10)$$

Запишем отношение магнитных индукций в формуле (10), учитывая, что $E_0 \equiv B_{\delta 0}$, а

$E_\delta \equiv B_\delta$ в виде

$$\frac{B_{\delta 0}}{B_\delta} = \frac{1}{k_E u},$$

$$\text{где} \quad k_E = \frac{E_\delta}{U_H} \approx \sqrt{\cos^2 \varphi + (\sin \varphi + X_\sigma^*)^2},$$

$$u = \frac{U_H}{E_0} = \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \sin \varphi; \quad i = \frac{I_H}{I_K}; \quad E_\delta \text{ и } E_0$$

– соответственно внутренняя ЭДС и ЭДС холостого хода генератора; U_H – номинальное выходное напряжение; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагрузки; $X_\sigma^* = 0,08 \dots 0,2$ – относительное значение индуктивного сопротивления рассеяния обмотки статора; I_H и I_K – соответственно номинальный ток и ток короткого замыкания генератора.

Например, приняв

$$\cos \varphi = 0,8; \quad i = 0,35; \quad X_\sigma^* = 0,12,$$

получим

$$k_E = 1,09; \quad u = 0,75 \quad \text{и} \quad \frac{B_{\delta 0}}{B_\delta} = 1,22.$$

Представим максимальный момент в виде

$$M_m = k_m M_H,$$

где M_H – номинальный момент; k_m – кратность моментов. В свою очередь

$$M_H = \frac{P_H}{\Omega} = \frac{P_H p}{2\pi f},$$

где $P_H = S_H \cos \varphi_H$; S_H – номинальная полная мощность, ВА; f – частота ЭДС генератора;

Ω – угловая частота вращения ротора; $\cos \varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности.

Подставим M_m в формулу (10), с учетом отношения магнитных индукций, получим

$$M_c = \frac{k_m S_H N \cos \varphi_H}{4\pi^2 f (k_E u)^2}.$$

Из последней формулы следует, что у высокочастотных генераторов статический момент «залипания» может быть сравнительно небольшим.

В процессе разгона ветроколеса на ротор генератора также будут действовать динамические (реактивные) моменты «залипания», обусловленные гармоническими составляющими индукции, созданные воздействием гармоник магнитодвижущих сил (МДС) постоянных магнитов $F(\gamma) = F_{m_v} \cos p v \gamma$ на зубчатый воздушный зазор, магнитная проводимость которого может быть представлена формулой

$$\Lambda(\beta) = \Lambda_0 + \sum_{k_1=1}^{\infty} \Lambda_K \cos k_1 Z_1 \beta,$$

где $v = 2s + 1$; $s = 0, 1, 2, 3, \dots$ – порядок гармоник МДС; F_{m_v} , Λ_K – амплитудные значения гармоник; γ , β – угловые координаты осей магнита и ближайшего зубца статора.

Наибольшие значения динамических моментов наблюдаются при выполнении равенств [4]

$$2pv = Z_1 k_1 \quad (11)$$

и

$$2pv = 2Z_1 k_1 \quad (12)$$

Для ослабления указанных моментов необходимо выбрать соотношение чисел пар полюсов p и пазов Z_1 таким, чтобы приведенные равенства выполнялись при возможно больших значениях k_1 и v . Запишем равенство (11) в

виде $\frac{v}{K_1} = \frac{Z_1}{2p}$. Подставим сюда соотношение $Z_1 = 2p + k$, получим

$$\frac{v}{K_1} = \frac{2p + k}{2p}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что для обеспечения v и k_1 возможно большими, величину k следует принимать такой, чтобы числитель и знаменатель

доби имели общим делителем возможно меньшее число, желательно единицу

Так при $k = 6$, $p = 60$, $Z_1 = 126$,

$$\frac{v}{k_1} = \frac{126}{2 \cdot 60} = \frac{21 \cdot 6}{20 \cdot 6} = \frac{21}{20};$$

имеем $v_{min} = 21$, $k_{1min} = 20$, наибольший общий делитель – число 6, т.е. $N = 6$. Значения v_{min} и k_{1min} можно найти непосредственно из соотношений

$$v_{min} = \frac{Z_1}{N} = \frac{126}{6} = 21;$$

$$k_{1min} = \frac{2p}{N} = \frac{2 \cdot 60}{6} = 20.$$

При $k = 3$, $p = 60$, $Z_1 = 123$:

$$\frac{v}{k_1} = \frac{123}{2 \cdot 60} = \frac{41 \cdot 3}{40 \cdot 3} = \frac{41}{40},$$

имеем $v_{min} = 41$, $k_{1min} = 40$. При этом наибольший общий делитель – $N = 3$. Или по-другому

$$v_{min} = \frac{123}{3} = 41, \quad k_{1min} = \frac{120}{3} = 40.$$

Аналогично, из равенства (12) получим

$$\frac{v}{k_1} = \frac{2p + k}{p}. \quad (14)$$

При $k = 6$, $p = 60$, $Z_1 = 126$ отношение (14)

$$\frac{v}{k_1} = \frac{126}{60} = \frac{21 \cdot 6}{10 \cdot 6} = \frac{21}{10}.$$

Здесь $v'_{min} = 21$, $k'_{1min} = 10$ наибольший общий делитель число $N = 6$. По-другому

$$v'_{min} = \frac{Z_1}{N} = \frac{126}{6} = 21; \quad k'_{1min} = \frac{p}{N} = \frac{60}{6} = 10.$$

При $k = 3$, $p = 60$, $Z_1 = 123$ отношение

$$\frac{v}{k_1} = \frac{123}{60} = \frac{41 \cdot 3}{20 \cdot 3} = \frac{41}{20}.$$

Здесь $v'_{min} = 41$, $k'_{1min} = 20$, наибольший общий делитель число $N = 3$. По-другому

$$v'_{min} = \frac{Z_1}{N} = \frac{123}{3} = 41; \quad k'_{1min} = \frac{p}{N} = \frac{60}{3} = 20.$$

В приведенных примерах v_{min} и k_{1min} сравнительно большие числа, поэтому возникающие в таком генераторе динамические мо-

менты «залипания» будут пренебрежимо малыми. Число возможных фиксаций ротора r генератора в процессе его разгона за один оборот при наличии моментов «залипания» составит [4]

$$r = 2pv_{min},$$

где v_{min} – наименьшее из минимальных значений v , при которых выполняется равенства (11) или (12).

Выводы

1. Рассмотрена конструкция ветроустановки с вертикальной осью вращения, в которой дисковой электрогенератор с постоянными магнитами на роторе размещен на верхних эле-

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гольберг О. Д. Проектирование электрических машин / О. Д. Гольберг, Я. С. Гурин, Н. С. Свириденко // Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 1984 – 431 с.
2. А.с. СССР № 788288. Индукторная машина. В.В. Аpsит и др., Б.И. №46, 1980.
3. Дулькин А. И. Дифференциальное рассеяние двухслойных и однослойных трехфазных обмоток / А. И. Дулькин, Р. М. Шидерова // Труды МЭИ, Высокосовольтные генераторы, вып. 78, 1971, с. 90 – 100.
4. Афанасьев А. А. Реактивный момент обесточенного вентильного двигателя с постоянными магнитами. – Электричество. – 2011. – № 3. – С. 46-51.

Поступила в печать 11.05.2016.

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

ментах крепления ветроколеса, что позволит уменьшить осевую нагрузку на подшипники и обойтись без мультипликатора.

2. Обоснован выбор соотношения числа зубцов статора и количества магнитов ротора, а также выбор рациональных параметров обмотки статора генератора.

3. Получена формула для расчета статического момента «залипания» ротора генератора и проведен анализ условий, выполнение которых обеспечит значительное снижение статического и динамического моментов «залипания».

4. Показано, что на величину моментов "залипания" решающее влияние оказывает выбор соотношения числа зубцов статора и количества постоянных магнитов ротора.

REFERENCES

1. Goldeg O.D., Gurin Y.S., Sviridenko N.S. *Proektirovanie elektricheskikh mashyn* [Electrical machines design]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 431 p.
2. Certificate of authorship USSR №788288, V.V.Apsit and others. *Induktornaya mashyna* [Inductor machines]. 1980.
3. Dulkan A.I., Shiderova R.M. *Differentsialnoye rassseyaniye dvukhsloynnykh i odnosloynnykh trekhfaznykh obmotok* [The differential scattering of single-layer and double-layer three-phase transformer windings]. Issue 78, 1971. 90-100 p.
4. Afanasiev A.A. *Reaktivniy moment obestochenogo ventelnogo dvigatela s postoyannymi magnitami*. [Reactive time de-energized valve motor with permanent magnets.]. Elektrichestvo Pubi., 2011. №3. 46-51 p.

Внешний рецензент Денисюк С. П.

Анализ надежности ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения показывает, что большая часть повреждений вызывается выходом из строя генератора и мультипликатора (механизма, повышающего обороты рабочего колеса от 10-120 об/мин до необходимых 750-1000 об/мин генератора). С точки зрения обеспечения хороших массогабаритных показателей, наиболее эффективной электрической машиной, работающей с низкой частотой вращения, является низкоскоростной торцевой генератор. Лучшими характеристиками из многообразия торцевых машин обладают торцевые синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. В работе рассматривается конструкция торцевого генератора ветроустановки, в которой устранены некоторые из известных недостатков. В результате исследований установлено, что предлагаемая конструкция, в которой дисковой электрогенератор с постоянными магнитами на роторе размещен на верхних элементах крепления ветроколеса, позволит уменьшить осевую нагрузку на подшипники и обойтись без мультипликатора. В работе обоснован выбор соотношения числа зубцов статора и количества магнитов ротора, а также выбор рациональных параметров обмотки статора генератора.

Ключевые слова: ветроустановка с вертикальной осью, синхронный генератор с постоянными магнитами, статор, ротор, надежность, торцевой синхронный генератор, число полюсов, ветроколесо.

УДК 621.313.3:621.548.5

В. І. ПАНЧЕНКО, Д. В. ЦИПЛЕНКОВ, М. О. ЛЕОНОВА, В. В. КИРИЧЕНКО (НГУ)

Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет", 49005, м. Дніпропетровськ, пр. Карла Маркса, 19, тел.: 066-774-63-09, ел. пошта: nmu.em@ua.fm, mashaleo05@mail.ru, kirichenko_vv@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-6906-776X, orcid.org/0000-0002-0378-5400, orcid.org/0000-0003-2456-943X

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР ВІТРОУСТАНОВКИ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ

Аналіз надійності вітроенергетичних установок з вертикальною віссю обертання показує, що більша частина пошкоджень викликається виходом з ладу генератора і мультиплікатора (механізму, підвищувального обороти робочого колеса від 10-120 об/хв до необхідних 750-1000 об/хв генератора). З погляду забезпечення хороших масогабаритних показників, найбільш ефективною електричною машиною, що працює з низькою частотою обертання, є низькошвидкісний торцевий генератор. Кращими характеристиками з різноманіття торцевих машин володіють торцеві синхронні генератори з збудженням від постійних магнітів. У роботі розглядається конструкція торцевого генератора вітроустановки, в якій усунуті деякі з відомих недоліків. В результаті досліджень встановлено, що запропонована конструкція, в якій дискової електрогенератор з постійними магнітами на роторі розміщений на верхніх елементах кріплення вітроколеса, дозволить зменшити осьову навантаження на підшипники і обійтися без мультиплікатора. У роботі обґрунтовано вибір співвідношення числа зубців статора і кількості магнітів ротора, а також вибір раціональних параметрів обмотки статора генератора.

Ключові слова: вітроустановка з вертикальною віссю, синхронний генератор з постійними магнітами, статор, ротор, надійність, торцевий синхронний генератор, число полюсів, вітроколесо.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.313.3:621.548.5

V. I. PANCHENKO, D. V. TSYPLENKOV, M. A. LEONOVA, V. V. KIRICHENKO (NMU)

State Higher Educational Institution «National mining university», 49005, Dnipropetrovsk, Karl Marks ave., 19, tel.: 066-774-63-09, e-mail: nmu.em@ua.fm, mashaleo05@mail.ru, kirichenko_vv@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-6906-776X, orcid.org/0000-0002-0378-5400, orcid.org/0000-0003-2456-943X

CHARACTERISTICS OF THE ELECTRIC WIND TURBINE WITH A VERTICAL AXIS OF ROTATION

Reliability analysis of wind turbines with a vertical axis of rotation shows that most of the damage is caused by failure of the generator and multiplier (mechanism increases the speed of the impeller from 10-120 rpm to required 750-1000 rpm generator). From the point of view of providing good weight and dimensions the most efficient electrical machine, operating with low rotation speed is low speed end generator. The best characteristics of the variety end machines have end synchronous generator with excitation from permanent magnets. This paper considers the design of the wind turbine end generator in which fixed some of the known shortcomings. As a result of the research showed that the proposed design, in which the disk generator with permanent magnets on the rotor located on the upper fastening elements of the propeller, will reduce the axial load on the bearings and do without multiplier. The article justifies the selection of the ratio of the number of teeth of the stator and the number of magnets of the rotor, and the choice of rational parameters of the generator stator winding.

Keywords: wind turbine with a vertical axis, the synchronous generator with permanent magnets, the stator, the rotor, reliability, end synchronous generator, the number of poles, wind wheel.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

Н. В. ПАНАСЕНКО (ЖТУ), Д. Ю. ШАПОВАЛОВ (ДНУЖТ), А. А. КРАСНОВ (ПИИЖТ)

Журнал Железнодорожный транспорт Украины, ул. И. Федорова, 39, г. Киев, 03038, тел.: 067-989-06-51, эл. почта: panasicom@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-6567-2065

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», ул. Лазаряна 2, г. Днепропетровск, 49010, тел.: 096-103-04-97, эл. почта: Dmitriy_Shapovalov@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-7024-628X

Проектно-изыскательский институт железнодорожного транспорта ПАО «Укрзалізниця», Харьковское отделение, ул. Красноармейская, 7, г. Харьков, 61052, тел.: 066-330-83-46, эл. почта: akv85@yandex.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-7538-8965

О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ ВЫКЛЮЧЕНИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ IGBT-ПРИБОРОВ И ЕЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Постановка проблемы

Известно [1], что в транспортной высоковольтной электронике при использовании IGBT 65-го класса по напряжению в цепях с «жесткой» коммутацией рабочая частота переключения этих приборов для приемлемого диапазона токовой нагрузки ограничивается, как правило, на уровне 600 Гц из-за роста динамических потерь. Причем, если динамические потери при включении связаны в некоторой мере с необходимостью ограничения скорости нарастания прямого тока в приборе [2] и их минимизация ограничена снизу заданной величиной допустимой скорости нарастания этого тока (di/dt), то динамические потери при выключении, как и потери проводимости, со всех точек зрения играют только негативную роль и, следовательно, они требуют минимизации в наибольшей степени. Задача снижения динамических потерь выключения выходит на первый план для высоковольтных IGBT, работающих с большой скважностью ($t_u / T_M = \gamma \geq 20$, где t_u – длительность включенного состояния прибора, T_M – период переключения прибора) при высоких частотах переключения $f_M = 1 / T_M$ в цепях с однородной коммутацией второго типа (включение происходит при «мягкой», а выключение – при «жесткой» коммутации [3]).

Анализ публикаций

Главными направлениями в разработке биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗов) последних поколений для транспортной техники являлись технологические способы уменьшения потерь проводимости силовых высоковольтных IGBT-приборов 45-го и выше класса по напряжению при сохранении приемлемой энергетики на частотах переключения до 1140 Гц

[4]. Специальные силовые высоковольтные IGBT-приборы 45-го и выше класса по напряжению (IGBT четвертого поколения), а это так называемые транзисторы с увеличенной инжекцией IEGT и транзисторы с накоплением носителей в базовой n -области CSTBT дают снижение остаточного напряжения до уровня стандартных асимметричных GTO-тиристоров (GTO с анодной шунтировкой), оставляя при этом динамические параметры, характерные для стандартных IGBT третьего поколения [5]. Поскольку механизм переключения структур IGBT третьего и четвертого поколения не изменился, то трудно ожидать революционных улучшений в энергетике динамических процессов за счет технологических усовершенствований их структуры. Это обусловлено тем, что закономерность БТИЗов, заключающаяся в том, что спроектированные IGBT любой мощности на низкие напряжения проводимости $U_{CE(sat)}^{min}$ всегда будут иметь относительно высокие энергии потерь при переключении $E_{пк} = E_{on} + E_{off}$ (где E_{on} и E_{off} – энергии потерь при включении и выключении соответственно), чем IGBT, спроектированные на низкие энергии потерь переключения $E_{пк} = (E_{on} + E_{off})^{min}$, но имеющие относительно большие напряжения проводимости $U_{CE(sat)}$ [6], относится ко всем комбинированным приборам с полевым управлением биполярных структур [7]. Указанная закономерность касательно $E_{off} = f(U_{CE})$ хотя и слабо, но просматривается для имеющихся на рынке различных типов 600-амперных IGBT 65-го класса по напряжению даже в случае их оптимизации на минимальные значения напряжения открытого

состояния $U_{CE(sat)}$ и приемлемую энергетику динамических процессов при переключениях с частотой до 500 Гц без существенного снижения токовых параметров (рис. 1, а, б).

Статические потери в рассмотренных выше 600-амперных приборах IGBT 65-го класса по напряжению при номинальном токе ($I_c = 600A$) сами по себе уже составляют довольно большие величины с точки зрения их

теплоотвода: 2760 Вт для CM600HG-130H (ME); 3180 Вт для FZ600R65KF1 (Еурес) и 3240 Вт для 5SNA0600G650100 (ABB). Потери же при выключении на частотах 1000 и более Гц при рабочих значениях тока $I_c = 600A$ и напряжения $U_{TC} = 3600B$ еще более осложняют теплоотвод, так как их величина составляет относительно большую долю в общих потерях.

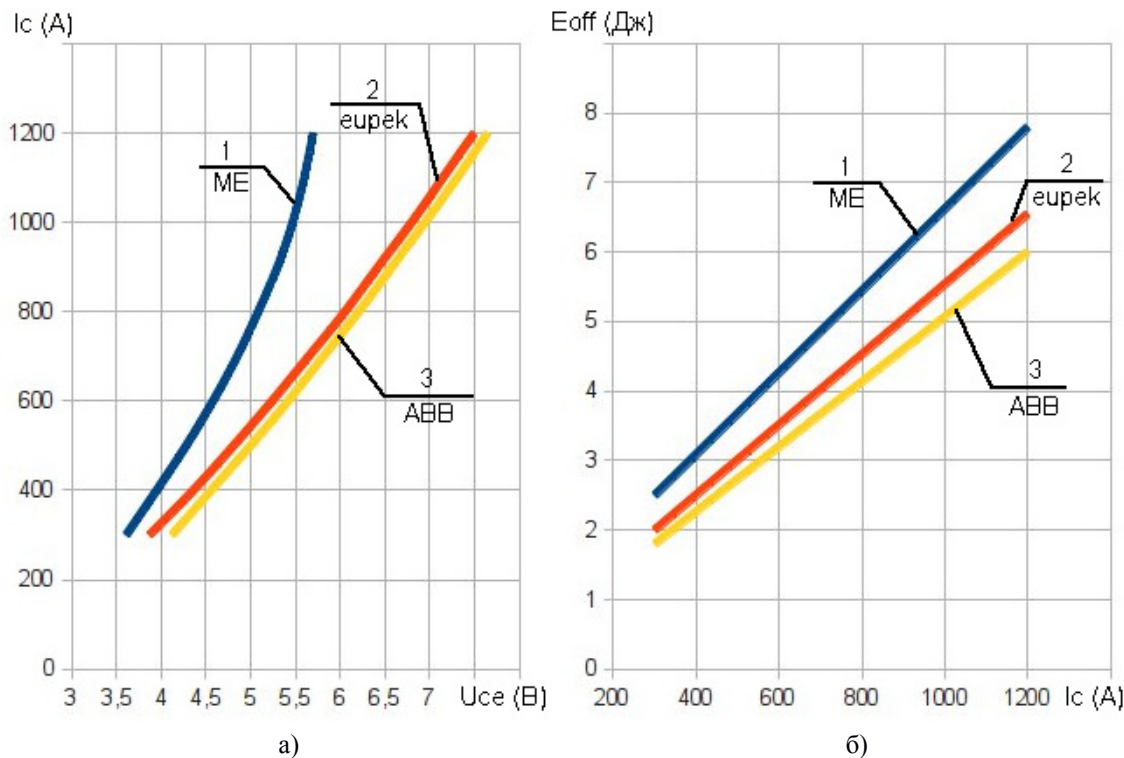


Рис. 1. Прямые ветви вольт-амперных характеристик (а) и зависимости потерь энергии выключения от тока (б) 600-амперных IGBT 65-го класса по напряжению (1 – IGBT типа CM600HG-130H фирмы Mitsubishi Electric; 2 — IGBT типа FZ600R65KF1 фирмы Еурес; 3 — IGBT типа 5SNA0600G650100 фирмы ABB)

Постановка задачи

Высокая доля динамических потерь мощности при выключении в общих потерях силовых высоковольтных IGBT-приборах при частотах переключений 1000 и более Гц даже при их использовании в цепях с однородной коммутацией второго типа ($E_{on} \rightarrow 0$) обуславливает необходимость поиска технологических решений для уменьшения потерь энергии выключения E_{off} при обеспечении минимально возможного роста напряжения проводимости $U_{CE(sat)}$. При этом в работе ставится еще задача очертить схемотехнику рационального применения силовых высоковольтных IGBT 65 класса по напряжению с повышенным напря-

жением проводимости и сниженными потерями выключения.

Изложение основного материала

Процесс выключения IGBT состоит из двух этапов: первый этап протекает относительно быстро и соответствует выключению управляющего n -канального полевого транзистора. Он называется инжекционной фазой выключения [7]. Второй этап определяется процессом рассасывания зарядов, накопленных в базовой области биполярного транзистора p - n - p -типа (БТИ-3а), и представляет собой рекомбинационную фазу выключения в режиме работы этого транзистора с «оборванной» базой. Восстановление блокирующих свойств IGBT происходит на первом этапе рекомбинационной фазы (этапе коллектирования дырок), при котором проис-

ходит обеднение носителями n -базы, прилегающей к коллекторному n - p -переходу, что сопровождается ростом напряжения на этом переходе. Этот этап сопровождается лавинообразным спадом тока через IGBT и лавинообразным нарастанием на нем напряжения. Из-за малой длительности этого этапа при быстром выключении (длительность этого этапа меньше времени жизни дырок τ_p в n -базе БТ) остаточный заряд дырок в электронейтральной части n -базы на момент восстановления блокирующей способности БТ будет еще весьма значительным, что и обуславливает протекание через транзисторную p - n - p -структуру БТИЗа относительно большого «хвостового» тока при полном напряжении на приборе. Остаточный заряд и временная зависимость «хвостового» тока являются внутренними свойствами транзисторной p - n - p -структуры и мы не можем на них влиять, управляя характером переключения [8]. «Хвостовой» ток снижается по мере рассасывания остаточного заряда дырок за счет рекомбинационных процессов электронейтральной области n -базы. Этот процесс носит характер экспоненциального спада с постоянной времени, равной в первом приближении времени жизни дырок τ_p [8] в n -базе БТ IGBT. Относительно большая длительность второго этапа рекомбинационной фазы выключения ($t_{рек} \approx 3\tau_p$), значительная величина амплитуды «хвостового» тока $I_{Cост}$, полное рабочее напряжение на IGBT-приборе U_{CE} , величина которого выбирается из условия

$$U_{CE} \gtrsim U_{CE-link}, \quad (1)$$

и обуславливает довольно значительные потери энергии выключения E_{off} у высоковольтных IGBT-приборов. Так, при $\tau_p = 4 \text{ мкс}$, $I_{ост} = 100 \text{ А}$, $U_{CE} = 3600 \text{ В}$ потери энергии выключения на втором этапе рекомбинационной фазы E_{off}^p составят около 2,16 Дж, а это больше половины паспортной величины суммарных потерь при выключении E_{off} рассмотренных выше 600-амперных IGBT 65-го класса по напряжению ведущих зарубежных фирм.

От времени жизни дырок τ_p в n -области транзисторной p - n - p -структуры IGBT зависят также потери энергии на первом этапе рекомбинационной фазы, которые для высоковольт-

ных IGBT составляют до 30% суммарных потерь энергии выключения [9].

Сказанное выше говорит о том, что для уменьшения потерь энергии при выключении E_{off} в высоковольтных IGBT необходимо снижение времени жизни дырок в n -базе τ_p , а это, как известно [8], входит в противоречие с необходимостью увеличения времени жизни носителей с точки зрения минимизации потерь проводимости. Оптимизационная задача комбинации низких потерь энергии выключения и малых потерь проводимости в одном и том же IGBT заключается в том, что высокая концентрация дырок в n -базе БТ должна быть там, где они наиболее полезны для уменьшения напряжения проводимости $U_{CE(sat)}$, в то время как их количество должно сохраняться на умеренном уровне в n -базе там, где они приводят к появлению «хвостового» тока и таким образом вносят существенный вклад в потери энергии выключения E_{off} . Анализ показывает, что область с высокой концентрацией дырок (с большим временем жизни) в n -базе БТ IGBT с точки зрения минимизации потерь проводимости должна прилегать к коллекторному переходу, а область с электронейтральным зарядом, определяющим длительность рекомбинационной фазы, и, следовательно, с точки зрения минимизации потерь выключения должна иметь пониженную концентрацию дырок (с меньшим временем их жизни) и находиться вблизи эмиттерного перехода БТ IGBT. Создать такой профиль жизни дырок в n -базе БТ IGBT с минимумом вблизи эмиттерного перехода и максимально возможным временем жизни в остальной части базы можно за счет облучения кристаллов чипов IGBT протонами. Протоны проходят сквозь массу кремния, относительно легко внедряясь в эту массу по пути своего следования, и только в конце своих траекторий создают повреждения кристаллической решетки кремния. Это и дает возможность создавать хорошо определенные локальные зоны повреждения с высокой концентрацией дефектов, которые действуют, как центры рекомбинации. Это как раз те зоны, которые определяют как время жизни носителей, так и концентрацию их в n -базе.

Сравнительно низкочастотная область сегодняшнего использования высоковольтных IGBT, что несколько нивелирует потери энергии выключения в сравнении со статическими потерями и обуславливает тот факт, что все силы раз-

Сравнительно низкочастотная область сегодняшнего использования высоковольтных IGBT, что несколько нивелирует потери энергии выключения в сравнении со статическими потерями и обуславливает тот факт, что все силы раз-

работчиков силовых высоковольтных IGBT направлены только на снижение величины напряжения проводимости при сохранении или даже некотором увеличении потерь выключения. Такой подход объясняется тем, что у современных высоковольтных приборов IGBT напряжение проводимости находится на запрещенном уровне и его повышение недопустимо для линейных вентилей схемотехники силовой высоковольтной электроники. Это обстоятельство, а также сравнительно высокая стоимость протонного облучения силовых высоковольтных IGBT с целью профилирования дырок в n -базе и не дает возможности количественно оценить перспективность протонного метода понижения энергии выключения для этих приборов.

Другим способом метода облучения, дающим равномерное снижение времени жизни дырок во всей области n -базы БТ IGBT (в том числе и в тех ее частях, которые не оказывают влияние на энергию потерь выключения, но приводят к росту прямого падения напряжения на открытом приборе) есть электронное облучение.

Соотношение времени жизни дырок в n -базе до и после электронного облучения определяется выражением [10]

$$\tau_{\text{эф}}^{-1} = \tau_p^{-1} + k\Phi, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{эф}}$ и τ_p – время жизни дырок до и после облучения;

Φ – поток пучка электронов в одном квадратном сантиметре;

k – коэффициент радиационных повреждений.

Так, для СИТ-приборов типа М2ТКС-50-12 (ОАО «Контур», Россия), механизм выключения которых такой же, как у IGBT, облучение электронами, дающее повышение напряжения проводимости с 1,0 В до 2,0 В, т.е. в 2 раза, снижает энергию потерь выключения в 5,87 раза с 6,64 мДж до 1,13 мДж [8]. Очевидно, что протонное облучение, профилирующее дырки в n -базе дало бы несколько лучшие результаты касательно повышения напряжения проводимости при той же величине снижения потерь выключения.

Интерполяция этого результата на 600-амперные IGBT-приборы 65-го класса по напряжению дает следующие результаты:

- CM600HG-130H при напряжении проводимости $U_{CE(sat)} = 9,2В$ будет иметь потери энергии при выключении $E_{off} \approx 0,732 Дж$;

- FZ600R65KF1 при напряжении проводимости $U_{CE(sat)} = 10,6В$ будет иметь потери энергии при выключении $E_{off} \approx 0,596 Дж$;

- 5SNA0600G650100 при напряжении проводимости $U_{CE(sat)} = 10,8В$ будет иметь потери энергии при выключении $E_{off} \approx 0,537 Дж$.

Рациональными режимами предлагаемых высоковольтных IGBT-приборов с повышенным напряжением проводимости и сниженными в разы потерями энергии выключения есть импульсные режимы с высокой частотой и скважностью большей 10 в цепях с однородной коммутацией второго типа ($E_{on} \approx 0$). Примерами таких режимов есть работа IGBT в качестве коммутирующих вентилей в высоковольтных одноквадрантных ключах с линейным однооперационным тиристором (схема с транзисторной коммутацией класса Е) [11] и в высоковольтных энергосберегающих двухквадрантных ключах с линейным двухоперационным тиристором [12]. Таким примером является также режим работы коммутирующего IGBT-прибора в схемах двухоперационных четырехквадрантных ключей последовательного типа с линейными IGBT вентилями, которые будут рассмотрены ниже.

Двухоперационность (принудительное включение и выключение) четырехквадрантных ключей в преобразователях с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения имеет следствием чередующиеся коммутационные операции ключа (включение и выключение), которые осуществляются под напряжением и, следовательно, сопровождаются значительными величинами энергии коммутационных потерь. Эти потери очень сужают диапазон безснабберного применения полупроводниковых управляемых высоковольтных приборов IGBT и IGCT в качестве линейных вентилей как со стороны токовых, так и со стороны частотных их возможностей. Поэтому реально в высоковольтных четырехквадрантных двухоперационных ключах (как и вообще во всех двухоперационных ключах) используются устройства коммутационной защиты, которые значительно снижают величины энергии коммутации в их линейных вентильях при включении и выключении [3]. Тем не менее, кроме положительных свойств, использование в ключах традиционных устройств коммутационной защиты (LRD-снабберов при включении и CRD-снабберов при выключении [5]) значи-

тельно усложняет схемотехнику, ухудшает массогабаритные и динамические характеристики ключей и снижает их КПД [4, 13]. Эти негативы становятся определяющими при увеличении рабочих величин напряжения, тока и частоты ШИМ с точки зрения практической реализации этой схемотехники четырехквadrантных ключей в модульном исполнении.

Известно [14], что при использовании в качестве линейных вентилей ключей IGBT-приборов можно отказаться от применения LRD-снабберов для ограничения скорости нарастания прямого тока при включении, возложив эту функцию на сам прибор, что однако приводит к увеличению в нем энергии потерь включения [2]. Строго говоря, функция ограничения скорости нарастания прямого тока через IGBT-прибор за счет управления по цепи затвора ПТ уже не является функцией коммутационной защиты при включении IGBT, так как при этом не решается задача снижения коммутационных потерь включения E_{on} IGBT-прибора, а решается задача ограничения «сквозного» тока при включении IGBT на проводящей противофазный диод [2]. И так, как задача ограничения амплитуды «сквозного» тока является первоочередной задачей в схемах с IGBT и она, как правило, решается в драйверах этих приборов, то от LRD-снабберов коммутационной защиты при включении отказываются в пользу модульности ключей [4]. В пользу модульности отказываются и от CRD-снабберов коммутационной защиты выключения ключей IGBT, возлагая на транзистор ограничение скорости спада тока на первом этапе рекомбинационной фазы выключения, уменьшая тем самым перегрузки по напряжению [14]. При этом мы не можем влиять на потери энергии, вызываемые «хвостовым» током, негатив которого несколько ослабляется возможностью реализации режима, близкого к «мягкой» коммутации даже без использования CRD-цепей [14]. Безснабберность же и обуславливает сравнительно большие потери в линейных вентильях четырехквadrантных IGBT-ключей модульного исполнения. Для подтверждения последнего тезиса рассмотрим потери в HiPak модуле 200-амперного четырехквadrантного IGBT-ключа 65 класса по напряжению, смоделированного в конструктиве из компонентов из 400-амперного. HiPak модуля двухквadrантного IGBT-ключа типа 5SNA0400J650100 (рис. 2, а, б).

При использовании 400-амперного модуля двухквadrантного IGBT-ключа типа

5SNA0400J650100 в качестве 200-амперного четырехквadrантного ключа на частоте 2000 Гц при скважности $\gamma \approx 1$, напряжении 3600 В и токе 200 А получим суммарные потери в линейных вентильях $VT_{л1}$ и $VD_{л1}$ величиной 6440 Вт: из них 5760 Вт в линейном транзисторе $VT_{л1}$ ($VT_{л2}$) и 680 Вт в линейном диоде $VD_{л2}$ ($VD_{л1}$). Составляющие потерь энергии в линейном транзисторе распределяются следующим образом: статические потери $\Delta P_{cm} = 840 Bm$, потери включения $\Delta P_{вкл} = 2800 Bm$, потери выключения $\Delta P_{выкл} = 2120 Bm$.

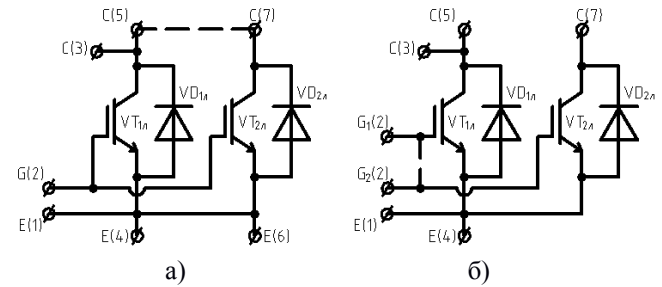


Рис. 2. Силовые схемы IGBT-ключей:

- а) двухквadrантного 400-амперного с внешней перемычкой между коллекторами (5) и (7);
- б) четырехквadrантного 200-амперного с отдельными выводами затворов $G_1(2)$ и $G_2(2)$

Разгрузить линейные транзисторы от потерь выключения мы можем введением в схему четырехквadrантного ключа (рис. 2, б) коммутирующего (снабберного) транзистора. На рис. 3, а представлена силовая схема четырехквadrантного IGBT-ключа с коммутирующим (снабберным) транзистором VT_k , а на рис. 3, б ее реализация на конструктиве и компонентах 600-амперного HiPak модуля двухквadrантного IGBT-ключа типа 5SNA0600G650100.

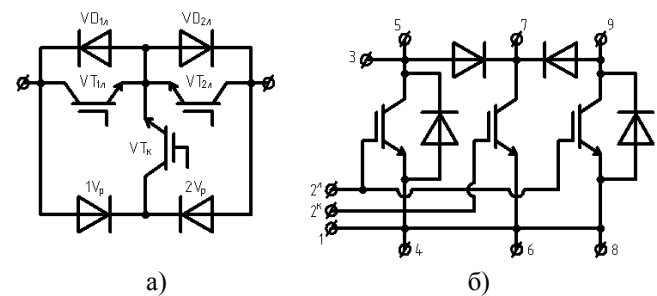


Рис. 3. Силовые схемы 200-амперных четырехквadrантных IGBT-ключей с коммутирующим транзистором: а) теоретическая; б) реализуемая на базе модуля 5SNA0600G650100 (ABB)

В схеме четырехквadrантного ключа с коммутирующим транзистором линейные транзисторы работают в режиме однородной коммутации первого типа ($E_{off} = 0$), а коммутирующий

транзистор – в режиме однородной коммутации второго типа ($E_{on} = 0$). Такое разделение коммутационных потерь между двумя транзисторами разгружает линейный транзистор на величину потерь энергии выключения $\Delta P_{выкл}$, что в указанном случае составляет 2120 Вт. Эти потери теперь переходят в коммутирующий транзистор VT_к, суммируясь с его статическими потерями, которые при длительности проводящего состояния $t_u = 25 \text{ мкс}$ на частоте 2000 Гц составляет около 55 Вт. Сумма этих потерь (2175 Вт) и будет определять теплонагруженность коммутирующего транзистора в рассмотренной схеме четырехквadrантного IGBT-ключа. Примерно 55 Вт будут и потери в разделительном диоде $1V_p$ ($2V_p$). Следовательно, суммарные потери в модуле 200-амперного четырехквadrантного ключа с коммутирующим транзистором того же типоминимала, что и линейные транзисторы (рис. 3), будут на 110 Вт большими, чем суммарные потери в модуле 200-амперного четырехквadrантного ключа без коммутирующего транзистора (рис. 2, б), что несколько нивелирует факт разгрузки линейных вентилях по потерям. И здесь становится очевидной энергоэффективность использования в качестве коммутирующего транзистора облученного IGBT с повышенным в 2 раза падением напряжения в проводящем состоянии и сниженными в 5,87 раза потерями энергии выключения. В этом случае потери в коммутирующем транзисторе при длительности его проводящего состояния 25 мкс и частоте ШИМ $f_M = 2000 \text{ Гц}$, при прерывании тока $I_c = 200 \text{ А}$ и при $U_{CE} = 3600 \text{ В}$ составляют $\Delta P_{Тк} = \Delta P_{СТ} + \Delta P_{выкл} = 110 \text{ Вт} + 361 \text{ Вт} = 471 \text{ Вт}$, т.е. будут на 1704 Вт меньшими, чем в предыдущем случае. На эту величину будут меньшими и суммарные потери в модуле четырехквadrантного IGBT-ключа с облученным коммутирующим транзистором по сравнению с потерями в модуле четырехквadrантного IGBT-ключа с необлученным коммутирующим транзистором, а это уменьшение потерь на 25%, что важно с точки зрения теплонагруженности модуля.

Выводы

Изложенные выше материалы позволяют сделать следующие выводы.

Во-первых, для снижения потерь энергии выключения высоковольтных IGBT-приборов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ласка Б. Развитие тяговых преобразователей на транзисторах IGBT: предпосылки и факторы

необходимо уменьшить время жизни дырок τ_p в электронейтральной части n -базы, что прилагает к эмитерному p - n -переходу биполярного p - n - p -транзистора.

Во-вторых, наиболее эффективным способом высокоэнергетического облучения для профилирования времени жизни дырок τ_p в n -базе есть протонное облучение, дающее возможность снизить потери энергии выключения без существенного увеличения падения напряжения на проводящем IGBT-приборе.

В-третьих, применение менее эффективного способа облучения, а именно электронного облучения, хотя и дает в разы уменьшение потерь энергии выключения, но приводит к существенному увеличению падения напряжения на проводящем IGBT-приборе, что делает такие приборы неподходящими для использования в качестве линейных вентилях двухоперационных высоковольтных ключей.

В-четвертых, рациональное использование облученных силовых высоковольтных IGBT-приборов возможно только в импульсных режимах с большой скважностью, типовым примером которых являются режимы работы коммутирующих транзисторов в одноквadrантных ключах с линейным однооперационным тиристором, в двухквadrантных и четырехквadrантных ключах с линейными двухоперационными управляемыми приборами: тиристорами и транзисторами.

В-пятых, 200-амперный HiPak IGBT-модуль четырехквadrантного ключа 65 класса с облученным электронами коммутирующим транзистором IGBT позволяет на 25% снизить суммарные потери по сравнению с необлученным коммутирующим IGBT-транзистором (с 6550 Вт до 4846 Вт $I_c = 200 \text{ А}$, $U_{CE} = 3600 \text{ В}$ и $f_M = 2000 \text{ Гц}$).

Касательно рекомендаций по дальнейшим исследованиям, то здесь наряду с задачей создания серийных четырехквadrантных IGBT-модулей с облученным коммутирующим (снаберным) транзистором, решаемой прибористами, специалистами по силовой электронике должны быть выданы рекомендации по рациональному использованию преобразователей на четырехквadrантных ключах в системах дизель-электрической и электрической тяги железнодорожного транспорта.

REFERENCES

1. Laska B.. Razvitie tyagovyh preobrazovateley na tranzistorah IGBT: predposylki i faktory uspeha techni-

успеха техники на базе IGBT / Б. Ласка // Железные дороги мира. – №11. – 2003. – С.32-39.

2. Хворост Н. В. Эксплуатационные характеристики управляемых полупроводниковых приборов тяговых преобразователей электроподвижного состава / Н. В. Хворост // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – №2. – 2003. – С. 31-36.

3. Перетворювальна техніка. Підручник Ч.2. Авт. Гончаров Ю. П. та ін. За ред. В. С. Руденка. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.

4. Yoji Di et. IEGT Power Converters for the Shinkansen Traction Systems./T.IEE Japan, vol. 121-D, №3, 2001. – P. 356-362.

5. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2, перераб. и доп. – М.: Додэка-XXI, 2005. – 384 с.

6. J. Catt, R. Chokhawala, B. Pelly. Применение 600-вольтных модулей БТИЗ в корпусах ADP-F-PAK и INT-PAK. // В кн. Силовые полупроводниковые приборы. – Воронеж, 1995. – С. 509-544.

7. Бономорский О. Исследование процессов запираания комбинированных транзисторов / О. Бономорский, П. Воронин, В. Кулаков, Н. Щепкин // Силовая электроника. – №2. – 2004. – С. 27-30.

8. Lorenz L., Schulze G. Импульсные параметры новых быстрых IGBT. // В кн. Силовые IGBT модули: материалы по применению. – М.: Додэка, 1997. – С. 55-60.

9. Eupec. Technishe Information [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://eu.mouser.com/ProductDetail/Infineon-Technologies/FZ600R65KF1/?qs=Phipx4kG5Fw6K831yQiKZA%3D%3D>.

10. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.

11. Тиристоры (Технический справочник). Пер. с англ., под ред. В. А. Лабунцова, С. Г. Обухова, А. Ф. Свиридова. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.

12. Панасенко М. В. Енергозберігаючі сильнотриві високвольтні ключі і фазні модулі на їх основі / М. В. Панасенко, В. М. Панасенко, М. В. Хворост // Електротехніка і електромеханіка. – №5. – 2007. – С. 24-29.

13. Мощные ключи на тиристорах, выключаемых по цепи управления: Авт. О. Г. Булатов, П. С. Лышак, С. В. Одын. – Электротехн. пром.-ть. Сер. 05. Силовая преобразовательная техника: Обзор. Информация, 1988, вып. 19 – 48 с.

14. IGBT (Insulated gate bipolar transistor) биполярный транзистор с изолированным затвором. / В кн. Силовые IGBT-модули: Материалы по применению. – М.: Додэка, 1997. – С. 38-45.

Поступила в печать 03.05.2016.

ki na baze IGBT [Development of traction converters on IGBT transistors: prerequisites and success factors for technology-based IGBT]. *Zheleznye dorogi mira – World railways*, 2003, no. 11, pp. 32-39.

2. Hovorost N. V. Ekspluatatsionnye kharakteristiki upravlyayemyh poluprovodnikovyyh priborov tyagovyh preobrazovateley elektropodvizhnogo sostava [Operational characteristics of the managed semiconductor devices of traction converters of electric rolling]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy na zheleznodorozhnom transporte – Information management systems for railway transport*, 2003, no. 2, pp. 31-36.

3. Goncharov Yu. P. *Peretvoriuvalna tehnik. Pidruchnik Ch.2.* [Converter equipment]. Kharkiv. Folio Publ., 2000. 360 p.

4. Yoji Di et. IEGT Power Converters for the Shinkansen Traction Systems./T.IEE Japan, vol. 121-D, №3, 2001. – p 356-362.

5. Voronin P. A. *Silovye poluprovodnikovye klyuchi: semeystva, kharakteristiki, primeneniye.* [Power semiconductor keys: families, characteristics, application. Prod. 2]. Moscow. Dodeka-XXI Publ., 2005. 384 p.

6. Catt J., Chokhawala R., Pelly B. *Primeneniye 600-voltnyyh moduley BTIZ v korpusah ADP-F-PAK i INT-PAK.* [Application the 600-V BTIZ modules in cases ADP-F-PAK and INT-PAK]. *Silovye poluprovodnikovye pribory – Power semiconductor devices*. Voronezh. 1995. pp. 509-544.

7. Bonomorskiy O., Voronin P., Kulakov V., Schepkin N. *Issledovanie protsessov zapiraniya kombinirovannykh tranzistorov* [Research of the processes of locking combined transistors]. *Silovaya elektronika – Power electronics*. 2004, no. 2, pp. 27-30.

8. Lorenz L., Schulze G. Moscow. *Impulsnye parametry novyyh bystrykh IGBT.* [Impulse factors of the new fast IGBT]. *Silovye IGBT-moduli: materialy po primeneniyu – Power IGBT modules: materials on application*. Moscow. Dodeka Publ., 1997. pp. 55-60.

9. Eupec. Technishe Information. Available at: <http://eu.mouser.com/ProductDetail/Infineon-Technologies/FZ600R65KF1/?qs=Phipx4kG5Fw6K831yQiKZA%3D%3D>

10. Bliher A. *Fizika silovykh bipolyarnyykh i polevyykh tranzistorov* [Physics of power bipolar and field transistors]. Leningrad. Energoatomizdat Publ., 1986, 248 p.

11. Labuntsov V. A., Obuhov S. G., Sviridov A. F. *Tiristory (Tekhnicheskiiy spravochnik)* [Thyristor (Technical reference book)]. Moscow. Energiya Publ., 1971, 560 p.

12. Panasenکو M. V., Panasenکو N. V., Khvorost V. Yu. *Energosberigaiuchi synostrumovi vysokovoltni kliuchi i fazni moduli na yih osnovi* [Energy-saving high-current high-voltage keys and the phase modules based on them]. *Elektronika i elektromekhanika – Electronics and electromechanics*. 2007, no. 5, pp. 24-29.

13. Bulatov O. G., Lyschak P. S., Odyn S. V. *Moschnyye klyuchi na tiristorah, vyklyuchaemykh po tsepi upravleniya* [Powerful keys on the thyristors which switched off on a chain of management:]. *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost – Electrical industry*. 1988, issue 19, 48 p.

14. *IGBT (Insulated gate bipolar transistor) bipolyarnyy*

tranzistor s izolirovannym zatvorom [The bipolar transistor with the isolated lock]. *Silovye IGBT-moduli: Materialy po primeneniyu – Power IGBT modules: Materials on application*. Moscow. Dodeka Publ., 1987, pp. 38-45.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Андрієнко П. Д.*

Статья посвящена исследованию проблемы коммутационных потерь в IGBT-модулях. Показано, что основными препятствиями на пути дальнейшего увеличения частоты переключений IGBT являются значительная величина «хвостового тока» и динамических потерь включения и выключения. Обоснована возможность снижения величины «хвостового тока» и динамических потерь выключения за счет профилирования структуры полупроводникового прибора путем протонного облучения. Протонное облучение IGBT позволяет создать большую концентрацию дырок вблизи коллектора, оставляя остальную структуру кристалла без изменений. При этом потери выключения снижаются в 2 раза. Дальнейшее снижение динамических потерь становится возможным благодаря введению в силовую схему четырехквadrантного IGBT-ключа коммутирующего (снабберного) транзистора. Представленная структура позволяет разгрузить основные силовые транзисторы и уменьшить тем самым динамические потери выключения. Предварительная оценка показывает, что тепловая нагрузка на такой модуль снижается на 25% по сравнению со стандартными IGBT. Такие приборы могут быть использованы на дизель- и электропоездах нового поколения.

Ключевые слова: IGBT прибор, выключение, потери, схемотехника, энергоэффективность.

УДК 621.3.066

М. В. ПАНАСЕНКО (ЗТУ), Д. Ю. ШАПОВАЛОВ (ДНУЗТ), О. О. КРАСНОВ (ПВІЗТ)

Журнал Залізничний транспорт України, вул. І. Федорова, 39, м. Київ, 03038, тел.: 067-989-06-51, ел. пошта: panasicom@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-6567-2065

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, кафедра «Електрорухомий склад залізниць», вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: 096-103-04-97, ел. пошта: Dmitriy_Shapovalov@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-7024-628X

Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту ПАТ «Укрзалізниця», Харківське відділення, вул. Червоноармійська, 7, м. Харків, 61052, тел.: 066-330-83-46, ел. пошта: akv85@yandex.ru, ORCID: orcid.org/0000-0002-7538-8965

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ ПРИ ВИМИКАННІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ IGBT-ПРИЛАДІВ ТА ЇЇ СХЕМОТЕХНІЧНА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

Стаття присвячена дослідженню проблеми комутаційних втрат в модулях IGBT. Показано, що основними перепонами на шляху подальшого збільшення частот переключень IGBT є значні величини «хвостового струму» та динамічних втрат вмикання та вимикання. Обґрунтовано можливість зниження величин «хвостового струму» та динамічних втрат при вимиканні за рахунок профілювання структури напівпровідникового приладу шляхом протонного опромінення. Протонне опромінення дозволяє створити більшу концентрацію дірок поблизу колектора, залишаючи інші частини структури кристалу без змін. При цьому динамічні втрати при вимкненні зменшуються у 2 рази. Подальше зниження рівня динамічних втрат є можливим за рахунок введення до силової схеми чотириквadrантного IGBT-ключа комутаційного (снабберного) транзистора. Представлена структура дозволить розвантажити основні силові транзистори і тим самим знизити динамічні втрати вимикання. Попередня оцінка показує, що теплове навантаження на такий модуль є на 25% нижчим, ніж на стандартний IGBT. У подальшому такі прибори можуть бути використані на дизель- та електропоездах нового покоління.

Ключові слова: IGBT прилад, вимикання, втрати, схемотехніка, енергоефективність.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

UDC 621.3.066

M. V. PANASENKO (RTU), D. YU. SHAPOVALOV (DNURT), A. A. KRASNOV (DRIRT)

Journal Railway Transport of Ukraine, I. Fedorova Str., 39, Kyiv, 03038, tel.: 067-989-06-51,
e-mail: panasicom@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-6567-2065

Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryana, Department of
electric rolling stock of railways., str. Lazaryana, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: 096-103-04-97,
e-mail: Dmitriy_Shapovalov@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-7024-628X

Design and Research Institute of Railway Transport of PJSC "Ukrzaliznytsia", Kharkov Department,
Chervonoarmiytska Str., 7, Kharkiv, 61052, tel.: 066-330-83-46, e-mail: akv85@yandex.ru,
ORCID: orcid.org/0000-0002-7538-8965

ABOUT A POSSIBILITY OF REDUCING LOSSES OF ENERGY AT SWITCHING OFF OF HIGH-VOLTAGE IGBT DEVICES AND ITS CIRCUITRY ENERGY EFFICIENCY

Article is devoted researching of a problem of switching losses in IGBT modules. It is shown that the main obstacles in a way of further increasing in frequency of switchings of IGBT are the considerable size of "tail current" and dynamic losses of inclusion and switching off. The possibility of decrease in size of "tail current" and dynamic losses of switching off due to profiling of structure of the semiconductor device by proton radiation is proved. Proton radiation of IGBT allows to create big concentration of holes near a collector, leaving other structure of a crystal without changes. At the same time losses of switching off decrease twice. Further decrease in dynamic losses becomes possible thanks to introduction to the power scheme of a four-quadrant IGBT key of the switching (snubber) transistor. The presented structure allows to unload the main power transistors and to reduce thereby dynamic losses of switching off. The preliminary estimate shows that thermal load of such module decreases by 25% in comparison with standard IGBT. Such devices can be used on the diesel- and electric trains of new generation.

Keywords: IGBT device, switching off, schematic, energy efficiency.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ТА РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Вступ

Особливістю роботи енергосистем електрифікованого транспорту є різкозмінні повторно-короткочасні режими тягового електроспоживання транспортних засобів та можливість рекуперації енергії при їх електричному гальмуванні. Регулювання в широкому діапазоні режимів руху електротранспорту викликає значні пікові навантаження систем тягового і зовнішнього електропостачання та підвищує рівень втрат енергії в них.

Розвиток високоефективних силових напівпровідникових перетворювачів та накопичувачів енергії, а також швидкодіючих систем керування ними відкриває широкі можливості щодо суттєвого підвищення енергетичної ефективності систем електричної тяги. За рахунок використання надсучасних силових енергетичних пристроїв та одночасної розробки раціональних алгоритмів їх функціонування, адаптованих до особливостей режимів електротягових навантажень, стає можливим мінімізувати втрати енергії в елементах системи електричної тяги та практично повністю вирішити проблему споживання надлишкової енергії рекуперації.

Актуальність

Одним з ефективних напрямів підвищення ефективності режимів тягового електроспоживання і рекуперації енергії електротранспорту є часткове або повне розділення в часі цих процесів, що дозволяє знизити втрати в елементах системи тягового електропостачання і може бути реалізовано при використанні стаціонарних або бортових накопичувачів енергії. Однак високі вартісні показники даного заходу вимагають пошуку менш затратних методів підвищення енергоефективності режимів тягового електроспоживання та рекуперації енергії електротранспорту та розробки підходів до зниження встановленої потужності накопичувачів шляхом підвищення коефіцієнту їх використання за рахунок оптимального управління їх режимами, що є актуальним напрямом досліджень.

Мета роботи

Розробка удосконалених технологій електроспоживання та рекуперації енергії електротранспорту шляхом вирівнювання графіків електротягових навантажень та управління режимами енергообміну між накопичувачами і тяговою та живлячою мережами засобами нечіткої логіки.

Огляд літератури

Режим тягового електроспоживання $p(t)$ в системах електротранспорту залежить від багатьох факторів, зокрема необхідної швидкості руху, профіля ділянки колії, маси та напруги на струмоприймачі транспортних засобів та ін. і є стаціонарним квазіусталеним випадковим процесом (рис. 1), розмах, інтенсивність і частота коливань якого здійснює вплив на рівень втрат енергії в елементах електричної тяги.

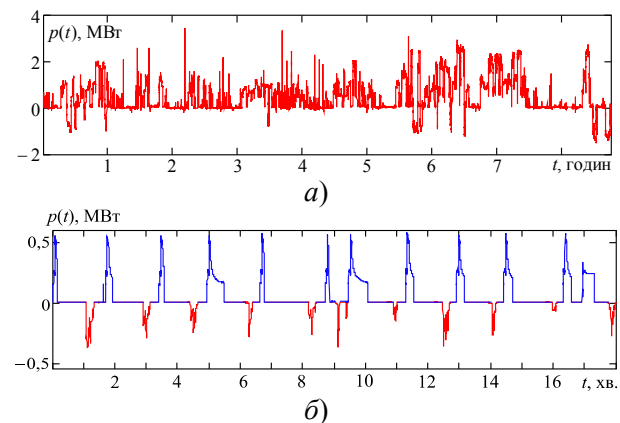


Рис. 1. Реалізації тягового електроспоживання електровозу ВЛ11М6 з вантажним поїздом (а) та електропоїзда метрополітену 81-717(714).5М (б) (рекуперація енергії при $p(t) < 0$)

В табл. 1 наведені основні імовірнісні характеристики процесу тягового електроспоживання транспортних засобів різних систем, що визначені в роботах [1-3] на базі дослідження множини реалізацій $\{p_n(t)\}$, отриманих в умовах реальної експлуатації.

Таблиця 1 – Основні імовірнісні характеристики електроспоживання тягового рухомого складу в різних системах електричного транспорту

Види транспортних засобів	m_p , МВт	σ_p , МВт	Mo_p , МВт	Me_p , МВт	As_p , від. од.	Ex_p , від. од.
Вантажні електровози	0,78	0,465	0,165	0,8	0,17	-1,07
Пасажирські електровози	0,595	0,576	0,32	0,565	0,93	0,03
Приміські електропоїзди	0,409	0,307	0,26	0,472	-0,01	-1,38
Швидкісні електропоїзди	0,724	0,375	0,144	0,575	0,83	-0,68
Міський транспорт (трамваї)	0,174	0,095	0,45	0,654	0,563	-1,23
Метрополітен	0,371	0,216	0,27	0,352	0,28	-1,85

Розподіл імовірності тягового електроспоживання має два виражені максимуми в області малих і середніх навантажень (рис. 2) що є характерним для всіх видів електричного транспорту. Це свідчить про недовикористання в експлуатації встановленої потужності тягового рухомого складу і його роботу в області понижених значень ККД.

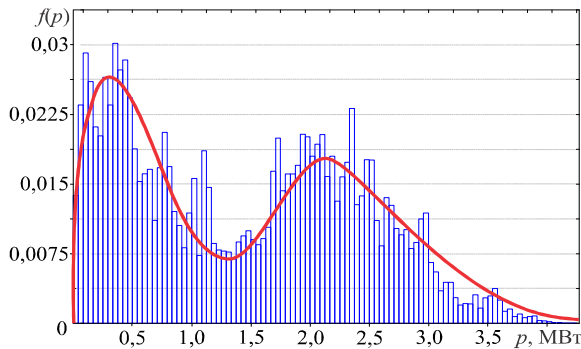


Рис. 2. Розподіл імовірності тягового електроспоживання вантажних електровозів

Кореляційні функції процесу $p(t)$ всіх видів електротранспорту мають незагасаючий коливальний характер (рис. 3), що властиво неергодичним випадковим процесам і пов'язано з наявністю в них схованої періодичності.

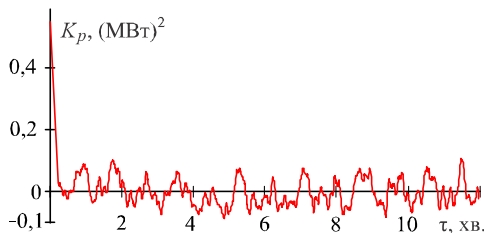
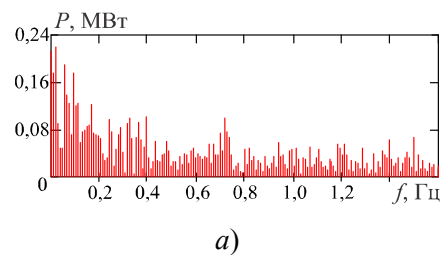


Рис. 3. Кореляційна функція тягового електроспоживання приміських електропоїздів ЕПЛ2Т

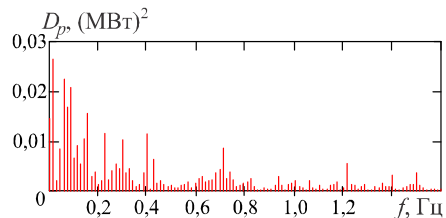
Для визначення періодичних коливань тягового електроспоживання в [4] застосовано перетворення Фур'є не до самого випадкового процесу $p(t)$, а до незагасаючої частини його

кореляційної функції $K_p(\tau)$ на інтервалі $\tau \in (\tau_k, T/5)$ (де τ_k – час кореляції, T – тривалість електроспоживання), що дозволило відфільтрувати періодичні коливання від власне випадкового процесу.

Спектри функцій $K_p(\tau)$ є прорідженими в порівнянні зі спектрами миттєвих графіків $p(t)$ (рис. 4) оскільки вільні від випадкової складової та вміщують у собі лише періодичні низькочастотні коливання процесу $p(t)$.



а)



б)

Рис. 4. Амплітудні спектри $p(t)$ (а) і $K_p(\tau)$ (б) приміських електропоїздів ЕПЛ2Т

Діапазон частот спектрів $p(t)$ і $K_p(\tau)$ в квазіусталених режимах електроспоживання транспортних засобів складає 0,001...1,5 Гц, а при регулюванні їх потужності – 0,1...10 Гц. Енергія періодичних коливань електроспоживання вантажних і пасажирських електровозів в квазіусталених режимах становить близько 15 % від усієї енергії випадкового процесу $p(t)$ та сягає 25 % для приміських електропоїздів, міського електротранспорту та метрополітенів, що

пов'язано з більш коливальним характером електроспоживання. Це необхідно враховувати при розробці заходів по зменшенню втрат в елементах системи електричної тяги.

Оцінка якості режимів тягового електроспоживання електротранспорту, що враховує вплив інтенсивності його коливань на рівень додаткових втрат в елементах системи електричної тяги у [5, 6] виконана з використанням таких показників, як пік-фактор pf та коефіцієнт форми k_ϕ процесу $p(t)$, що дорівнюють

$$pf = \frac{P_{\max}}{P_{\text{сер}}} = P_{\max} \left/ \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \right.,$$

$$k_\phi = \frac{P_d}{P_{\text{сер}}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt}},$$

де $P_{\max}$, $P_{\text{сер}}$, P_d – відповідно максимальне, середнє та діюче значення споживаної потужності за графіком тягового навантаження $p(t)$.

Наприклад для вантажних електровозів ці показники знаходяться в межах $pf \in [1,4; 7,52]$, $k_\phi \in [1,15; 3,72]$ при $\overline{pf} = 2,57$, $\overline{k_\phi} = 1,61$. Залежність додаткових втрат в системі електричної тяги від параметрів тягового електроспоживання pf та k_ϕ має вигляд рівняння

$$\Delta P_{\text{дод}}(pf, k_\phi) = 0,175 \Delta P_{\min} (0,19 pf + 0,81 k_\phi^2 - 1),$$

де $\Delta P_{\min}$ – мінімальні втрати для передачі заданої потужності P .

Виходячи з показників pf та k_ϕ основним критерієм ефективності режиму тягового електроспоживання електротранспорту, що забезпечує $\Delta P_{\text{дод}} \rightarrow \min$ є умова

$$|p(t) - P_{\text{сер}}|_{\max} \rightarrow \min, \quad (1)$$

при якій також мінімізується пікове навантаження систем тягового та зовнішнього електропостачання.

Основний матеріал

Коливання тягового навантаження в системах електричного транспорту виникають не лише при регулюванні потужності транспортних засобів, а і в усталених режимах руху (рис. 5), особливо якщо тягові засоби побудовані за дискретним принципом регулювання сили тяги. Наприклад, у наслідок існування неперекритої області регулювання (де відсутні природні характеристики) в полі тягових характеристик електровозів $F \times v$ у діапазоні технічних швидкостей залізничного

транспорту 35...55 км/год в усталеному режимі руху поїздів на послідовно-паралельному з'єднанні двигунів (СП) в певних умовах можливий дефіцит, а на паралельному (П) – надлишок потужності тягових засобів. В такому разі підтримання постійної швидкості поїздів (особливо неповновагових та на легких ділянках профілю) виконується за рахунок багаторазових переходів тягових засобів з вищих схем з'єднань тягових електродвигунів (ТЕД) на нижчі (рис. 5, б), що погіршує якість режимів електроспоживання та порушує умову (1).

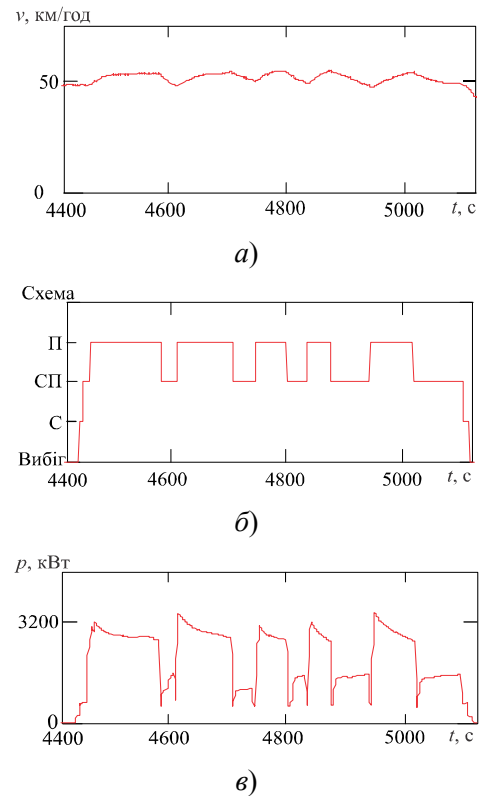


Рис. 5. Фрагмент реалізації швидкості руху (а), схеми з'єднання двигунів (б) і електроспоживання (в) електровоза ВЛ11М6 з вантажним поїздом

Зменшення втрат енергії в елементах системи електричної тяги та пікового навантаження систем електропостачання за рахунок зменшення надлишкової потужності тягових засобів може бути досягнуто за рахунок формування додаткових природних тягових характеристик в нерегульованій області потужності електровозів. Дані характеристики отримуються в усталеному режимі руху поїзда шляхом часткового вимикання груп двигунів на паралельному з'єднанні. В полі тягових характеристиках електровоза в результаті формуються додаткові природні характеристики $F'(v)$, а незаповнена область $F \times v$ частково заповнюється (рис. 6). При цьому залишені в роботі двигуни працюють в більш номіналь-

ному режимі, що може забезпечити їх більш високий експлуатаційний ККД.

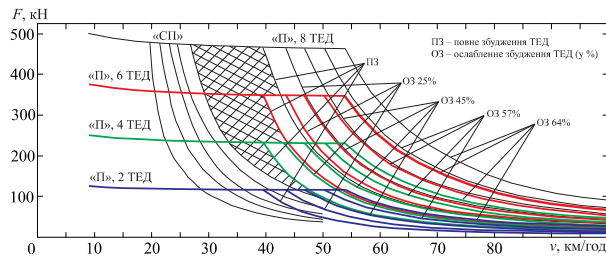


Рис. 6. Додаткові тягові характеристики електровоза ВЛ11М6

Енергоефективний режим електроспоживання електровоза при роботі на одній з двох рівних за потужністю тягових характеристиках (наприклад «П», 8 ТЕД, ОЗ 25% і «П», 6 ТЕД, ОЗ 45% на рис. 6) може бути визначено на підставі порівняння ККД в цих режимах. Згідно електромеханічних характеристик в області допустимих струмів можна отримати, що $\eta(I)|_{OZ1} > \eta(I)|_{ПЗ}$, $\eta(I)|_{OZ2} > \eta(I)|_{OZ1}$ і т. д. в області більших струмів двигуна.

Математичне моделювання режимів електроспоживання електротранспорту з додатковими тяговими характеристиками дозволило встановити, що використання запропонованого принципу зниження надлишкової потужності тягових засобів в усталених режимах руху не порушує умов зчеплення коліс тягових засобів з рейками та дозволяє вирівняти тягове навантаження і зменшити втрати енергії в системі тягового електропостачання на 20...25 %. Застосування даного принципу є ефективним, в тому числі для тягових засобів з плавним регулюванням потужності.

Треба зазначити, що ефект від використання розглянутих заходів полягає в першу чергу у зменшенні пікових навантажень систем тягового і зовнішнього електропостачання і втрат енергії в них. Можливості зниження на 1...5 % витрат енергії на тягу неповновагових поїздів, особливо на ділянках з легким профілем, при відключенні частини ТЕД тягового рухомого складу детально розглянуто в роботах професора Гетьмана Г.К. [7, 8].

В силу розглянутої специфіки режимів тягового електроспоживання в системах електротранспорту зберігається проблема споживання енергії рекуперації. Оскільки процес рекуперації енергії на транспорті переважно є короткочасним, що особливо виражено у приміському русі електропоїздів, на міському електротранспорті і метрополітенах, то при зниженні розмірів руху на ділянках практично унеможливлено

ється повторне використання відновленої енергії. Це вимагає розробки технологій підвищення ефективності використання енергії рекуперації поїздів в умовах зниження тягового електроспоживання на ділянках. Системний аналіз існуючих методів, а саме повернення енергії рекуперації в живлячу енергосистему, локалізація в системі електричної тяги накопичувачами енергії (НЕ) або шляхом оптимізації рівня вихідної напруги тягових підстанцій (ТП) та регулювання транспортного потоку поїздів виявив їх недостатню енергоефективність при окремому застосуванні, що змушує використовувати комплексний підхід для поєднання можливостей всіх методів.

Крім того, треба зазначити, що ефективність споживання надлишкової енергії рекуперації поїздів системою зовнішнього електропостачання (на приєднаннях 6, 35, 110 кВ) залежить від режимів нетягових споживачів у вузлах приєднання ТП системи тягового електропостачання [9], особливо коли енергосистема є недовантаженою. При підключенні суміжних інвертуючих ТП залізниць до ліній різного класу напруги можливим є нерівномірний розподіл завантаження суміжних ТП в режимі рекуперації, що збільшує втрати генерованої енергії в тягових мережах. В системах тяги постійного струму існують проблеми із забезпеченням необхідного рівня якості енергії рекуперації на виході інверторів згідно ГОСТ 13109-97, що передається до живлячої мережі [10].

Для забезпечення раціональних умов рекуперації електротранспорту в системі електричної тяги зі стаціонарними керованими НЕ і реверсивними ТП з плавним регулюванням вихідної напруги (рис. 7) необхідно вирішувати низку завдань з високим ступенем невизначеності, що вимагає врахування багатьох випадкових факторів, таких як режими живлячих мереж і тягових навантажень, які безпосередньо впливають на необхідні алгоритми управління роботою НЕ, інверторів і регуляторів.

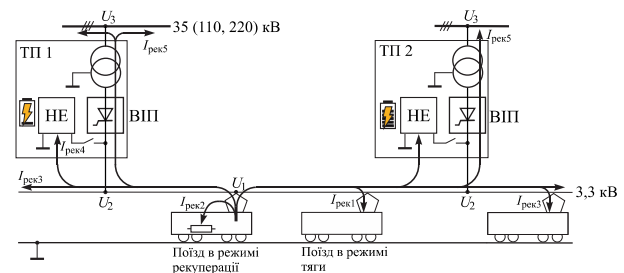


Рис. 7. Розподіл струму рекуперації в системі електротранспорту

На рис. 7 наведена схема декомпозиції струму рекуперації електротранспорту $I_{рек}$, де під надлишковим струмом розуміється частина струму $I_{рек}$, що не може бути використана безпосередньо на тягу інших поїздів, тобто

$$I_{рек}^{надл} = \sum_{k=2}^5 I_{рек k}, \quad (2)$$

де $I_{рек1}$ – частина струму рекуперації, що споживається на тягу; $I_{рек2}$ – частина струму рекуперації, що утилізується в гальмівних реостатах; $I_{рек3}$ – частина струму рекуперації, що перетікає на суміжні міжподстанційні зони (до віддалених поїздів); $I_{рек4}$ – частина струму рекуперації, що споживається НЕ; $I_{рек5}$ – частина струму рекуперації, що споживається живлячою мережею (через випрямно-інверторний перетворювач (ВІП) ТП).

Для мінімізації втрат енергії рекуперації необхідна мінімізація відстані до її потенційного споживача (поїзд, НЕ, живляча мережа) з урахуванням його ККД. Для цього формалізована та вирішена задача оптимізації розподілу надлишкової енергії рекуперації поїздів шляхом визначення раціонального співвідношення між значеннями складових струму (2) в реальному часі, що забезпечує виконання цільової функції

$$\left(\begin{array}{l} I_{рек2} \rightarrow 0, \\ \Delta P_{рек} (I_{рек3}(t), I_{рек4}(t), I_{рек5}(t)) \rightarrow \min \end{array} \right). \quad (3)$$

Враховуючи низький рівень інформаційного забезпечення систем тягового електропостачання для прийняття оперативних рішень згідно умови (3) можуть бути використані принципи нечіткого управління. Нечіткі закони регулювання режимів тягового електропостачання забезпечують підтримку напруги на струмоприймачах рекуперативних поїздів в допустимих межах при дефіциті тягового електроспоживання шляхом прийняття рішень про споживання енергії рекуперації НЕ (в залежності від їх заряду) або живлячою енергосистемою (в залежності від її завантаження), або забезпечення перетоків даної енергії на суміжні міжпідстанційні зони до віддалених поїздів (в залежності від їх положення на ділянці). При цьому можливе узгодження роботи НЕ в режимах вирівнювання пікового тягового навантаження і локальної буферизації надлишкової енергії рекуперації.

Пріоритетність розподілу надлишкової енергії рекуперації відповідно струмами $I_{рек3}$, $I_{рек4}$

або $I_{рек5}$ визначена в залежності від положення рекуперативного поїзда на ділянці. Алгоритм нечіткого управління режимами НЕ, ВІП та регуляторів вихідної напруги ТП в області допустимих значень розроблено з урахуванням умови (3) та обмежень напруги в тяговій мережі згідно [11, 12] у випадках коли $U_1 \rightarrow U_1^{max}$. Вхідними параметрами нечіткого регулятора є набір змінних (згідно рис. 7)

$$X = (E(t), I_1(t), U_1(t), U_2(t), U_3(t)),$$

де $E(t)$ – поточний заряд НЕ; I_1 – тягове електроспоживання в зоні рекуперації; $U_1(t)$ – напруга на струмоприймачі рекуперативного поїзда; $U_2(t)$ – напруга на виході ТП; $U_3(t)$ – напруга на вході ТП.

Параметрами управління нечіткого регулятора є змінні

$$Y = (I_{рек2}(t), I_{рек3}(t), I_{рек4}(t), I_{рек5}(t)).$$

Діапазон вхідних даних і параметрів управління задається п'ятьма нечіткими термами (низький, середньо-низький, середній, середньо-високий, високий) з трикутними функціями приналежності [13].

В роботі було створено модель нечіткого розподілу надлишкової енергії рекуперації, побудованої на базі п'яти блоків правил, структура якої наведена на рис. 8. Кожен блок правил використовує метод Мамдані для нечіткого виводу. Блоки зв'язані у вигляді послідовності для забезпечення покрокового прийняття рішення, за заданими пріоритетами. Вихід першого блоку служить входом для наступного, що дозволяє визначати необхідність розподілу залишку енергії за менш пріоритетними напрямками. Для останнього блоку виводу, служать входами всі попередні рішення, це дозволить визначити висновок тільки в тому випадку, якщо ще не було прийнято рішення.

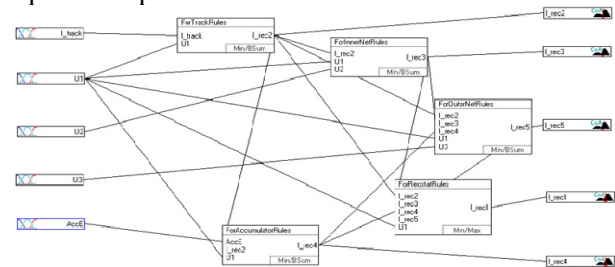


Рис. 8. Модель нечіткого регулятора розподілу енергії рекуперації

Для прийняття рішення про кількість енергії рекуперації, що передається до НЕ, вхідними параметрами є змінні $U_1(t)$ та $E(t)$, а виходом $I_{рек4}$. Знання експерта являють собою співвід-

ношення вигляду:

$$R = (U_1, E) \rightarrow I_{рек4},$$

де (U_1, E) – посилка; $I_{рек4}$ – наслідок;
 $\rightarrow$ – операція нечіткої імплікації.

Для кожного параметра відомі функції приналежності до нечітких термів, відповідно $\mu_{U_1}(x)$, $\mu_E(x)$ і $\mu_{I_{рек4}}(x)$. Ступінь приналежності конкретних входних значень (U_1, E) до кожного правила з експертної бази визначається за виразом:

$$\mu_{I_{рек4j}}(I_{рек4j}) = \mu_{Ej}(U_1) \wedge \mu_{I_{рек4j}}(E),$$

де $j = 1..n$ – номер правила; $\wedge$ – операція логічного мінімуму.

В результаті отримуємо наступну нечітку множину

$$I_{рек4} = \bigvee_{j=1..n} \mu_{I_{рек4j}}(I_{рек4j}),$$

де $\bigvee$ – операція логічного максимуму.

Точне значення параметрів змінної $I_{рек4}$ визначається як середньозважена сума

$$I_{рек4} = \frac{\sum_{j=1..n} \mu_{I_{рек4j}}(I_{рек4j}) I_{рек4j}}{\sum_{j=1..n} \mu_{I_{рек4j}}(I_{рек4j})}.$$

Для визначення чітких значень вихідних величин у роботі було використано метод дефазифікації «Center of Area» (центр площі). В результаті перебору безлічі варіантів різних входних станів моделі отримано простри прийняття рішень щодо розподілу енергії рекуперації електротранспорту по всіх можливих напрямках, геометричною інтерпретацією яких у певних умовах є поверхні, одна з яких наведена на рис. 9.

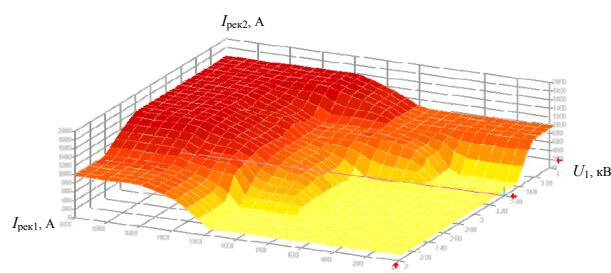


Рис. 9. Область прийняття рішень для залежності $I_{рек2} = f(I_{рек1}, U_1)$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Саблін, О. І. Підвищення ефективності електроспоживання електрорухомого складу постійного струму [Текст]: ар.ф. дис... к.т.н.: 05.22.09 / О. І. Саблін. – ДНУЗТ. Д., 2009. – 21 с.
2. Шевлюгин, М. В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии [Текст]: ар.ф. дис... д.т.н.:

Дані залежності відображають необхідні алгоритми керування силовим обладнанням ТП у реальному часі залежно від поточного стану тягової і живлячої енергосистем (а саме рівня тягового навантаження в зоні рекуперації, заряду НЕ, напруги на вводах ТП).

Розроблені алгоритми нечіткого управління дозволяють приймати оперативні рішення про раціональний розподіл надлишкової енергії рекуперації в умовах неповної інформації та є основою інтелектуального регулювання режимів тягового електропостачання при рекуперації енергії транспортних засобів.

Висновки

Зменшення надлишкової потужності тягових засобів шляхом оптимізації потрібної кількості їх двигунів (при частковому вимиканні двигунів на паралельному з'єднанні) дозволяє розширити регульовальні властивості транспортних засобів в діапазоні технічних швидкостей. В такому випадку при електроспоживанні тягових засобів в ustalених режимах руху можливим є на 20...25 % зменшити пікові тягові навантаження та втрати енергії в системах тягового і зовнішнього електропостачання залізниць.

Розроблений алгоритм управління накопичувачами енергії, інверторами та регуляторами вихідної напруги тягових підстанцій на базі нечіткої логіки забезпечує необхідні умови рекуперації електротранспорту на ділянках при дефіциті тягового електроспоживання та дозволяє оптимізувати розподіл надлишкової енергії гальмування транспортних засобів шляхом визначення раціонального співвідношення між складовими надлишкового струму рекуперації в реальному часі, що забезпечує мінімум втрат рекуперативної енергії в системах тягового та зовнішнього електропостачання. Використання цього алгоритму є ефективним в умовах неповної інформації та дозволяє мінімізувати встановлену потужність накопичувачів, інверторів та регуляторів вихідної напруги тягових підстанцій, що зменшує капітальні витрати на модернізацію існуючих та електрифікацію нових ділянок систем електротранспорту.

REFERENCES

1. Sablin, O. I. Pdivy'shshennya efekty'vnosti elektrospozhy'vannya elektroruxomogo skladu postijnogo strumu [Tekst]: aref. dy's... k.t.n.: 05.22.09 / O. I. Sablin. – DNUZT. D., 2009. – 21 s.
2. Shevlyugin, M. V. Resurso- i energosberegayushchie tehnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenah, realizuemye s ispolzovaniem nakopiteley energii

05.14.02 / М. В. Шевлюгин. – МГУПС. Москва, 2014. – 49 с.

3. Павелчик, М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии [Текст]: автореф. дис... д.т.н.: 05.09.03, 05.22.09 / М. Павелчик. – МГУПС. Москва, 2000. – 48 с.

4. Саблін, О. І. Спектральний аналіз случайних функцій тягового тока и напряжения на токоприемнике электроподвижного состава / О. І. Саблін // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – № 15. – С. 41-47.

5. Саблін, О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 9-13.

6. Саблін, О. І. Аналіз качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта / О. І. Саблін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – Вип. 38. – С. 186-189.

7. Гетьман, Г. К. О расчетном определении экономии электроэнергии при частичном отключении тяговых двигателей электроподвижного состава / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 4. – С. 51-54.

8. Гетьман, Г. К. О возможности снижения расхода электроэнергии на тягу карьерных поездов за счет частичного отключения части тяговых двигателей / Г. К. Гетьман, В. Е. Васильев // Електрифікація транспорту. – 2015. – № 10. – С. 49-58.

9. Саблін, О. І. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О. І. Саблін, Д. О. Босий, В. Г. Кузнецов та ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 73-79.

10. Костін, Н. А. Якість електроенергії, рекуперованої електровозами ВЛ11М6 і ВЛ11М / Н. А. Костін, А. Н. Муха, А. В. Нікітенко // Електрифікація транспорту. – 2015. – № 10. – С. 108-116.

11. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75 – [Действует с 1977-01-01] – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 3 с.

12. Напряжение питания тяговых железнодорожных сетей: Стандарт NF EN 50163-1996 – [Действует с 01.11.1996]. МКС 29.280, 1995. – 11 с.

13. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MathLab и FuzzyTech / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

[Текст]: автореф. дис... д.т.н.: 05.14.02 / М. В. Шевлюгин. – МГУПС. Москва, 2014. – 49 с.

3. Pavelchik, M. Povyshenie effektivnosti elektricheskoy tyagi pri pomoschi nakopiteley energii [Tekst]: avtoref. dis... d.t.n.: 05.09.03, 05.22.09 / M. Pavelchik. – MGUPS. Moskva, 2000. – 48 s.

4. Sablin, O. I. Spektral'nyy analiz sluchaynykh funkcy'j tyagovogo toka y' napryazheny'ya na tokopry'emny'ke elektropodvy'zhnogo sostava / O. I. Sablin // Visny'k Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo universy'tetu zalizny'chnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana. – 2007. – # 15. – S. 41-47.

5. Sablin, O. I. Doslidzhennya effektivnosti protsesu rekuperatsiyi elektroenergiyi v umovah metropoliteny / O. I. Sablin // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredoviyh tehnologiy. – 2014. – # 6/8 (72). – S. 9-13.

6. Sablin, O. I. Analiz kachestva rekuperiruemoy elektroenergiyi v sisteme elektricheskogo transporta / O. I. Sablin // Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». – 2013. – Vip. 38. – S. 186-189.

7. Getman, G. K. O raschetnom opredelenii ekonomii elektroenergiyi pri chastichnom otklyuchenii tyagovykh dvigateley elektropodvizhnogo sostava / G. K. Getman, V. E. Vasil'ev // Zal'iznichniy transport Ukraini. – 2011. – # 4. – S. 51-54.

8. Getman, G. K. O vozmozhnosti snizheniya rashoda elektroenergiyi na tyagu karernykh poezdov za schet chastichnogo otklyucheniya chasti tyagovykh dvigateley / G. K. Getman, V. E. Vasil'ev // Elektrifikatsiya transportu. – 2015. – # 10. – S. 49-58.

9. Sablin, O. I. Efekty'vnist' rekuperatsiyi elektroenergiyi v sy'stemi elektrottransportu z invertorny'my' tyagovy'my' pidstanciyamy' postijnogo strumu / O. I. Sablin, D. O. Bosy'j, V. G. Kuznecov ta in. // Visny'k Vinny'cz'kogo politexnicnogo insty'tutu. – 2016. – # 2. – S. 73-79.

10. Kostin, N. A. Yakist elektroenergiyi, rekuperovanoyi elektrovozami VL11M6 i VL11M / N. A. Kostin, A. N. Muha, A. V. Nskstenko // Elektrifikatsiya transportu. – 2015. – # 10. – S. 108-116.

11. Transport elektrifitsirovannyi s pitaniem ot kontaktной seti. Ryad napryazheniy: GOST 6962-75 – [Deystvuet s 1977-01-01] – M.: Izd-vo standartov, 1976. – 3 s.

12. Napryazhenie pitaniya tyagovykh zheleznodorozhnykh setey: Standart NF EN 50163-1996 – [Deystvuet s 01.11.1996]. MKS 29.280, 1995. – 11 s.

13. Leonenkov, A. V. Nechetkoe modelirovaniye v srede MathLab y' FuzzyTech / A. V. Leonenkov. – SPb.: BXV-Peterburg, 2005. – 736 s.

Надійшла до друку 17.02.2016.

Внутрішній рецензент Гетьман Г. К.

Зовнішній рецензент Андрієнко П. Д.

Розробка дієвих заходів з підвищення ефективності режимів тягового електроспоживання і рекуперації енергії в системі електричної тяги є важливим елементом зниження енергоємності електротранспорту та собівартості перевезень ним, що є актуальним в умовах стрімкого зростання цін на енергоносії. Одним з

ефективних заходів в цьому напрямку є часткове або повне розділення в часі процесів електроспоживання і рекуперації енергії електротранспорту, що дозволяє знизити втрати в елементах систем тягового і зовнішнього електропостачання і може бути реалізовано при використанні стаціонарних або бортових накопичувачів енергії. Високі вартісні показники даного заходу вимагають пошуку менш затратних методів підвищення енергоефективності режимів тягового електроспоживання та рекуперації енергії електротранспорту та розробки підходів до зниження встановленої потужності накопичувачів шляхом підвищення коефіцієнту їх використання за рахунок оптимального управління режимами енергообміну між ними, тяговою і живлячою мережами.

Ключові слова: рекуперація, тягове електроспоживання, надлишкова потужність, втрати енергії, накопичувачі, інвертори, тягове та зовнішнє електропостачання, нечітке управління.

УДК 621.331.3

О. И. САБЛИН (ДНУЖТ)

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

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ И РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

Разработка действенных мер по повышению эффективности режимов тягового электропотребления и рекуперации энергии в системе электрической тяги является важным элементом снижения энергоемкости электротранспорта и себестоимости перевозок им, что является актуальным в условиях стремительного роста цен на энергоносители. Одним из эффективных мероприятий в этом направлении является частичное или полное разделение во времени процессов электропотребления и рекуперации энергии электротранспорта, что позволяет снизить потери в элементах систем тягового и внешнего электроснабжения и может быть реализовано при использовании стационарных или бортовых накопителей энергии. Высокие стоимостные показатели данного мероприятия требуют поиска менее затратных методов повышения энергоэффективности режимов тягового электропотребления и рекуперации энергии электротранспорта и разработки подходов к снижению установленной мощности накопителей путем повышения коэффициента их использования за счет оптимального управления режимами энергообмена между ними, тяговой и питающей сетями.

Ключевые слова: рекуперация, тяговое электропотребление, избыточная мощность, потери энергии, накопители, инверторы, тяговое и внешнее электроснабжение, нечеткое управление.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Андриенко П. Д.*

UDC 621.331.3

O. I. SABLIN (DNURT)

Dnipropetrovsk national University of railway transport named after academician V. Lazaryan, 49010, Dnepropetrovsk, M., Lazaryan str., 2, tel (056) 793-19-11, e-mail: olegsss@i.ua

OPTIMIZATION OF THE MODES OF TRACTION POWER CONSUMPTION AND ENERGY RECUPERATION IN SYSTEMS OF ELECTRIC TRANSPORT

Development of effective measures to enhance the effectiveness of the modes of traction power consumption and energy recovery in the system of electric traction is an important element in reducing the energy intensity of electric transport systems and the cost of transportation that is relevant in the context of soaring energy prices. One of the most effective measures in this direction is the partial or complete separation in time of the processes of consumption and energy recovery of electric vehicles, what allows to reduce losses in the elements of systems of traction and external electric supply and can be implemented using stationary or onboard energy storage. High values of this event requires us to find less costly methods to increase efficiency of the modes of traction power consumption and energy recovery electro transport and develop approaches to reduce the installed capacity of disk drives by increasing utilization at the expense of optimum control of modes of energy exchange between them, traction and power supply networks.

Keywords: recovery, traction electricity consumption, excess capacity, loss of energy, drives, inverters, traction and power supply, fuzzy control.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

В. Г. СИЧЕНКО, Є. М. КОСАРЕВ, П. В. ГУБСЬКИЙ (ДНУЗТ),
В. В. ЗАМАРУСЬ, В. В. ІВАХНО, Б. О. СТИСЛО (ХПІ)

Кафедра «Електропостачання залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, 49010 м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: elpostz@i.ua, kosarev@e.diit.edu.ua, peter.gybskiy@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-9533-2897, orcid.org/0000-0003-3574-7414, orcid.org/0000-0002-0216-7256

Кафедра «Промислова і біомедична електроніка» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 61002 м. Харків, вул. Фрунзе 21, тел. +38(057) 707-60-44, e-mail: vyz1@ukr.net, v-ivakhno@ukr.net, bohdanstyslo@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Визначення режиму напруги і оцінка його впливу на роботу електрорухомого складу і пристроїв електропостачання є одним з найбільш важливих завдань при побудові сучасної інтелектуальної системи тягового електропостачання. Від режиму напруги залежать такі параметри, як швидкість руху поїзда, зміни струму і тягового зусилля електровоза, можливість подолання інерційних підйомів, навантаження і робота окремих пристроїв електропостачання [1-3]. Режим роботи електрифікованих ділянок залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів. Насамперед, це режими роботи системи зовнішнього електропостачання, кількість електрорухомого складу на фідерній зоні, параметри системи тягового електропостачання та режим ведення кожного електровоза. У свою чергу, кожний із зазначених факторів залежить від певних чинників. Так, наприклад, режим ведення електровоза залежить від кваліфікації і досвіду машиніста, профілю ділянки, ваги поїзда, його складу і типу електровоза. Нормований рівень напруги в тяговій мережі електрифікованої ділянки забезпечує рух поїздів з необхідною економічно доцільною швидкістю, встановленою умовами пропускної здатності. Такий режим забезпечує регламентовані витрати енергії на тягу з урахуванням втрат в системі електропостачання, необхідну надійність роботи електрорухомого складу (ЕРС) та пристроїв електропостачання. Робота ділянки у вимушеному режимі призводить до необхідності використання резервної потужності і перевантаження обладнання тягових підстанцій. При цьому напруга на струмоприймачах стає нижчою допустимого рівня і виникає необхідність у зниженні розмірів руху та збільшенні інтервалу між поїздами.

Впровадження швидкісного руху, збільшення вагових норм потягів обумовлює необхідність нарощування провідної здатності залізниць, але застосовувані системи тягового електропостачання постійного струму не завжди в змозі забезпечити передачу електроенергії необхідної потужності і високої якості для цих потягів. До числа основних обмежень відноситься зниження напруги на струмоприймачі електровоза нижче допустимого для нормальної експлуатації значення 2700 В (для швидкісного руху 2900 В) і нагрівання проводів контактної мережі, що сприяє втраті їх механічної міцності.

Метою роботи є аналіз режимів напруги та розробка рекомендацій щодо його покращення в системі тягового електропостачання постійного струму при впровадженні швидкісного та великовагового руху.

Дослідження режиму напруги на шинах тягових підстанцій

Одними з основних параметрів системи тягового електропостачання є число та потужність тягових підстанцій і відстань між ними. Повна встановлена потужність тягових підстанцій в основному складає 10÷20 МВт, але сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом електричної енергії для забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі при впровадженні швидкісного руху. При цьому коефіцієнт використання режимної потужності та обладнання тягових підстанцій не перевищує 15 %. Це підтверджується дослідними вимірюваннями, які були проведені автоматами на тягових підстанціях Придніпровської залізниці (табл. 1).

Рівень напруги на шинах тягової підстанції впливає на експлуатаційні характеристики функціонування електрифікованих залізниць та

залежить як від навантаження, так і від коливань напруги системи зовнішнього електропостачання. Вибіркові результати експерименталь-

них досліджень зміни напруги на шинах тягових підстанцій 3,3 кВ приведені на рис. 1 та рис. 2.

Таблиця 1

Результати дослідження завантаження тягових підстанцій

Тягова підстанція	Встановлена потужність P_B , кВт	Середня споживана потужність P_C , кВт	Коефіцієнт завантаження K_3 , %
ТП 1	20800	2868	13,7
ТП 2	20800	1080	5,2
ТП 3	19800	956	4,8
ТП 4	19800	422	2,1

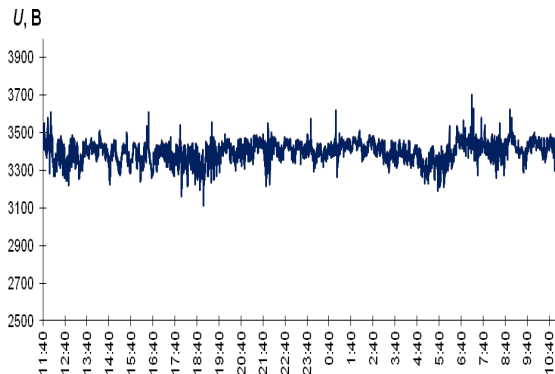


Рис. 1. Напруга на шинах 3,3 кВ тягової підстанції 1

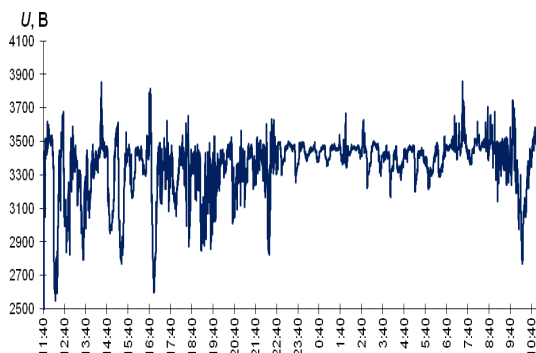


Рис. 2. Напруга на шинах 3,3 кВ тягової підстанції 2

Хоч режим напруги на шинах 3,3 кВ тягової підстанції і впливає на експлуатаційні характеристики функціонування електрифікованих залізниць, але різкозмінний характер напруги приводить до умовності застосування нормованих рівнів напруги [4]. Дослідженнями [5] роботи тягових допоміжних машин за умовами обмежень по зчепленню, за типом навантаження, по нагріванню обмоток, обмежень по потужності в умовах на колекторі і по комутації під щітками рекомендуються тривала найбільша напруга 3,6 кВ і тривала найменша 2,8 кВ. Цей діапазон зміни напруг стосовно регламентованого Правилами технічної експлуатації залізниць [4] $3,85 \pm 2,7$ кВ хоча й зменшений, але від номінальної напруги на струмоприймачі електровоза 3 кВ відрізняється на +20 % і -6,67 %.

Для забезпечення швидкісного руху нижній діапазон ще менший: - 3,33 %, що ставить питання про необхідність керування режимом напруги в тяговій мережі.

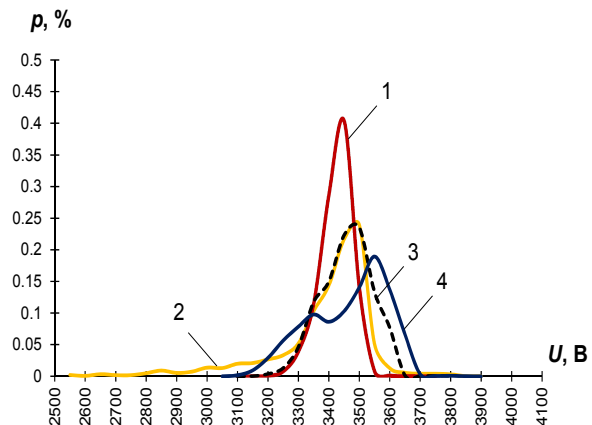


Рис. 1. Емпіричні розподіли напруги на шинах тягових підстанцій

З аналізу емпіричних розподілів напруги на шинах тягових підстанцій (рис. 3) можна зробити висновок, що рівні напруги на шинах дослідних тягових підстанцій мають широкий розкид значень та, при відсутності пристроїв регулювання напруги, забезпечення нормованої якості напруги на струмоприймачах ЕРС – неможливе. Числові характеристики режиму напруги в різних режимах роботи тягових підстанцій приведені в таблиці 2. Їх аналіз показує, що на шинах 3,3 кВ напруга має різкозмінний характер, а максимальні коливання напруги сягають значення 1300 В (табл. 2).

Дослідження режиму напруги на струмоприймачах електрорухомого складу

Координація роботи різних служб електрифікованих залізниць здійснюється за допомогою графіка руху, який визначає час ходу поїздів, обертання локомотивів, роботу станцій і т. і. Тому основна вимога до системи електропостачання зводиться до забезпечення нормального режиму напруги на струмоприймачах, який

би гарантував досягнення заданої швидкості, обумовленої графіком руху та забезпечував надійну та справну роботу ЕРС [1-6].

Використання нових, більш потужних електро-возів або збільшення їх числа чи секцій для пропуску поїздів великої маси, супроводжується значним зростанням потужності та струму, що споживається з тягової мережі. Так, наприклад, на Придніпровській залізниці на ділянці К-Н при масі поїзда 6004 т два електровози ВЛ11 встановленою потужністю 4,6 МВт кожен, споживали сумарний тяговий струм до 3 кА (рис. 4). При цьому, в режимі тяги, напруга на струмоприймачах виходила за межі допустимих значень (рис. 5).

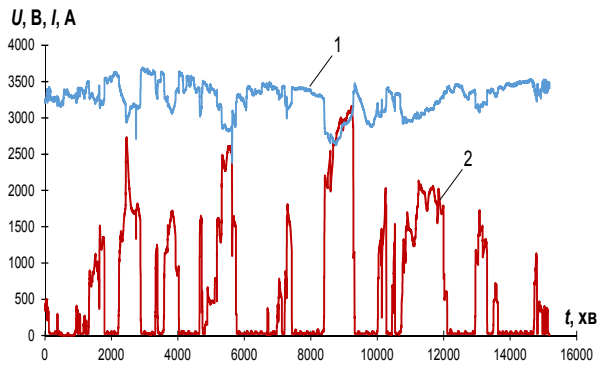


Рис. 4. Реалізація струму і напруги здвоєного поїзда на дослідній ділянці: 1 – напруга на струмоприймачах; 2 – споживаний струм

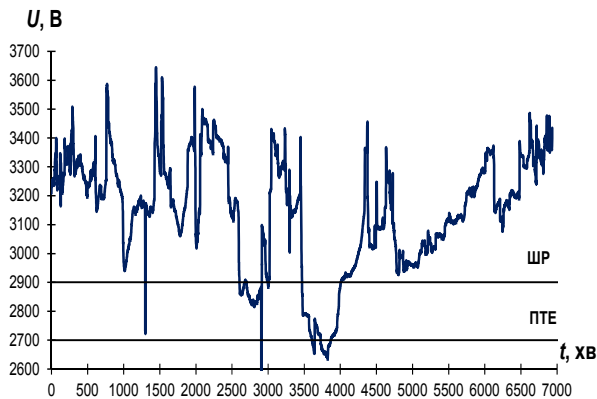


Рис. 5. Напруга на струмоприймачах в режимі тяги: ШР – норма напруги для швидкісного руху; ПТЕ – норма напруги за ПТЕ

В режимі вибігу також мали місце рівні напруги, які не відповідали нормованим значенням (рис. 6). Вони можуть бути обумовлені або коливаннями напруги на шинах тягових підстанцій, або короточасними піками тягових навантажень, які представляють собою наслідок співпадання пускових струмів окремих електро-возів або їх накладання на тягові струми, що споживаються іншими поїздами, які знаходяться на міжпідстанційній зоні.

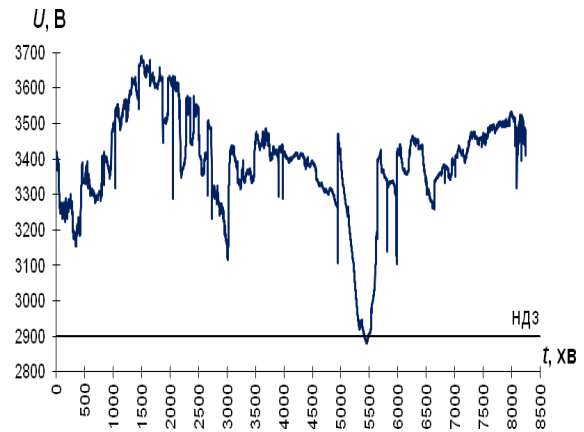


Рис. 6. Напруга на струмоприймачах в режимі вибігу

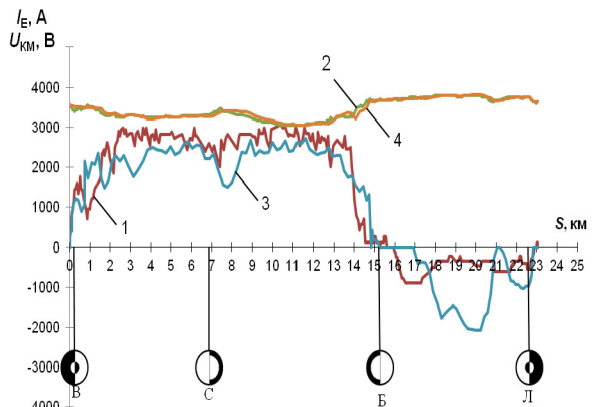


Рис. 7. Реалізація струму і напруги здвоєного поїзда на дослідній ділянці: 1, 2 – відповідно струм і напруга електровоза 2EC10; 3, 4 – відповідно струм і напруга електровоза 2EC6

На Львівській залізниці на ділянці Л – В струм двох сучасних електро-возів 2EC10 та 2EC6 при масі поїзда 3800 т сягав 5,5 кА, але значення напруги на струмоприймачах не було нижчим 3000 В¹ (рис. 7). Дотримання нормального режиму напруги було забезпечене за рахунок незначної відстані між тяговими підстанціями та значним збільшенням сумарного перерізу контактної мережі.

При проведенні експериментальних досліджень на ділянці 3-С2 Придніпровської залізниці значне споживання тягового струму електро-возом призвело до значного зниження напруги на струмоприймачеві. Мали місце значення рівнів напруги, як в режимі тяги (рис. 8), так і в режимі вибігу (рис. 9), які не відповідали встановленим нормам. Обробка дослідних даних показала, що крива щільності розподілу імовірностей значень напруги на струмоприймачі електро-возу (рис. 10) має двомодальний характер, представлений суперпозицією двох законів, близьких до нормального. Це пояснюється чергуванням двох режимів роботи ЕРС – тяги та вибігу. При аналізі

¹ Дані надано доц. каф «ЕРС» ДНУЗТ Арнулем С. В.

змін напруги на струмоприймачах електровозів доцільно розглядати ці два режими окремо (рис. 11, 12). Такий підхід дає можливість оцінити статистичні характеристики напруги без їх взаємного впливу.

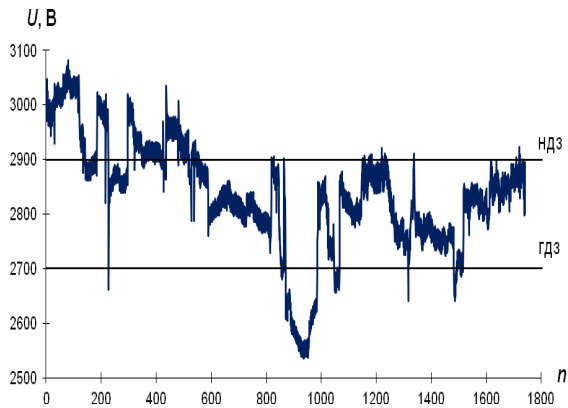


Рис. 8. Напруга на струмоприймачі в режимі тяги

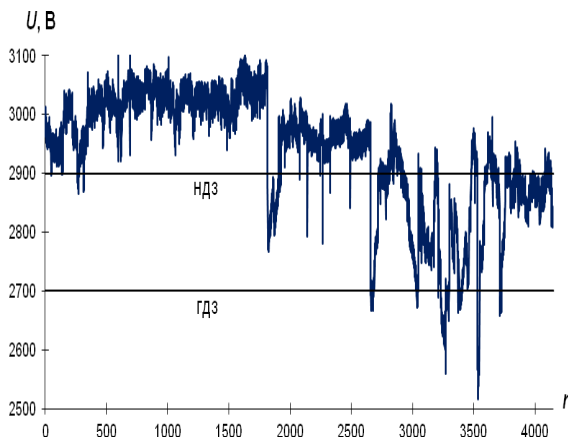


Рис. 9. Напруга на струмоприймачі в режимі вибігу

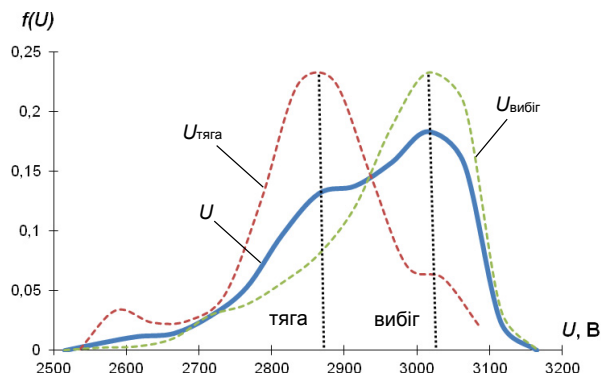


Рис. 10. Емпіричні функції розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі

Функція розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі в режимі тяги має тримодальний характер, що є результатом перегрупування тягових двигунів електровозу в з'єднання «С», «СП» та «П» (рис. 11). Чітке вираження мод в функції розподілу може свідчити про від-

сутність іншого тягового навантаження на ділянці, окрім дослідного поїзда, або незначний вплив інших споживачів на рівень напруги на струмоприймачеві даного електровоза.

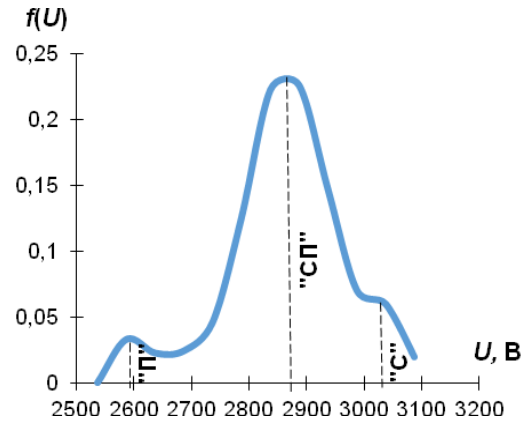


Рис. 11. Емпірична функція розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі в режимі тяги

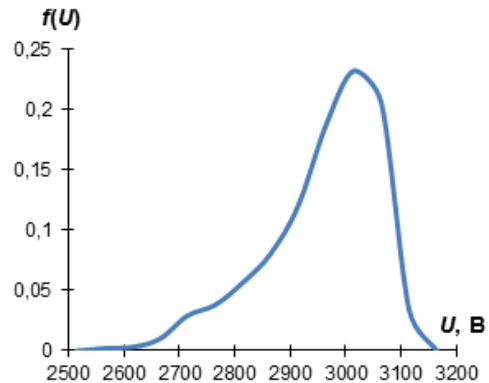


Рис. 12. Емпірична функція розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі в режимі вибігу

Таким чином, повертаючись до графіка напруги в режимі вибігу (рис. 9), можна сказати, що в цьому випадку недотримання нормованих значень відбувається за рахунок коливань напруги на шинах тягових підстанцій.

Числові характеристики режиму напруги в різних режимах роботи електровозу приведені в таблиці 2. Їх аналіз показує, що на струмоприймачі електровоза напруга також має різкозмінний характер. Максимальні коливання в режимі тяги можуть досягати значення 545 В, а в режимі вибігу – 618 В. Отримані результати обумовлюють необхідність зменшення коливань напруги в тяговій мережі та забезпечення сталості його ймовірнісних характеристик в межах, передбачених нормативними документами для високошвидкісного транспорту [4]. При цьому для забезпечення більш високих енергетичних показників функціонування ЕРС необхідно ставити задачу зменшення діапазону змін напруги на струмоприймачах протягом всього часу руху поїзда по перегону.

Числові характеристики режимів напруги

Показник	Шини 3,3 кВ		Струмopриймач ЕРС			Рекуперація
	ТП 1	ТП 2	Загалом	Тяга	Вибіг	
$M(U)$	3399.38	3363.21	2906.11	2835.91	2935.63	3388,039
$Mo(U)$	3427.10	3343.39	3013.00	2845.00	3036.00	3418,466
$Me(U)$	3407.11	3411.31	2923.50	2840.00	2958.00	3606,605
$D(U)$	2695.26	26836.09	12712.14864	10767.09	10633.96	222,2468
$s(U)$	51.92	163.82	112.7482	103.7646	103.1211	49393,66
$As(U)$	-0.62	-1.71	-0.70	-0.46	-0.98	-0,66284
$Ex(U)$	0.87	3.94	0.10	0.60	0.58	-0,26951
$\min(U)$	3113.52	2550.97	2516.00	2536.00	2516.00	2770,48
$\max(U)$	3700.35	3857.84	3134.00	3081.00	3134.00	3947,699
$M(\Delta U)$	99.4	63.2	-93.9	-164	-64.4	388
$U(0,95)$	3485.24	3530.52	3056.84	3011.21	3061.17	3294.36

Дослідження режиму напруги в системі тягового електропостачання при рекуперації енергії

Для аналізу режимів напруги в режимі рекуперації були проведені синхронізовані вимірювання одночасно на двох суміжних ТП і на електровозі, що рухався по ділянці між ними в режимі рекуперації (інших споживачів на дослідній ділянці не було). Для дослідження була обрана двоколійна міжпідстанційна зона С–В Львівської залізниці, оскільки в напрямку ст. В на ділянці ухил (спуск) сягає 28,4 ‰ і з метою обмеження швидкості поїздів є обов'язковим використання електричного гальмування (рис. 13).

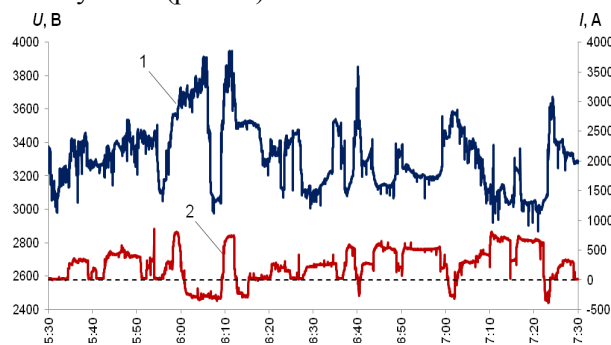


Рис. 13. Фрагмент параметрів електропостачання електровоза ВЛ11М на ділянці К–С–В:
1 – напруга; 2 – струм

Аналіз отриманих результатів показав, що для нормально встановленої схеми живлення режим напруги в тяговій мережі відповідав встановленим вимогам. Мінімальне значення напруги для двосторонньої схеми складало 2770 В у режимі тяги при загальному струмі електровозу 1220 А. Найвище значення напруги на струмоприймачі зафіксоване в режимі рекуперації, яке складає 3947,7 В при загальному струмі рекуперації електровозу 760 А.

Необхідно зазначити, що такі рівні напруги забезпечуються незначною відстанню між тяговими підстанціями та значним перерізом контактної мережі.

Розвиток підходів до поліпшення режиму напруги в тяговій мережі

На сьогоднішній день для поліпшення режиму напруги можуть застосовуватися різні способи, які мають різні схемні реалізації [4-5]. В Україні для покращення режиму напруги застосовується тільки установка пунктів паралельного з'єднання і збільшення перерізу дрітів контактної мережі, а регульовальні можливості управління режимами напруги обмежуються застосуванням пристроїв РПН на тягових підстанціях. У реальних умовах експлуатації СТЕ це призводить до неоптимального функціонування тягової мережі [7]. На сьогоднішній день, за участі авторів, пропонуються різні варіанти удосконалених схемних рішень для поліпшення режиму напруги в тяговій мережі, основою яких є застосування розподіленої системи тягового електропостачання [4, 6-8].

Нині пророблено декілька варіантів побудови таких систем, наприклад, розподіленої системи тягового електропостачання із застосуванням одноагрегатних тягових підстанцій, основою яких є застосування перетворювача ПА-5200 [9]. В цій системі здійснюється рівномірний розподіл агрегатної потужності по довжині електрифікованої ділянки. При проведенні оціночних розрахунків для обґрунтування доцільності цієї схеми приймалися наступні припущення: електровози споживають постійний і незмінний за величиною струм, поїзди рухаються рівномірно із постійною встановленою швидкістю 160 км/год, не враховується час на розгін та гальмування, загальний час ходу всіх

поїздів розрахунковою зоною становить 15 хв, напруга на шинах тягових підстанцій є сталою та незмінною за величиною у часі, внутрішні опори тягових підстанцій приймаються рівними. Результати порівняльного розрахунку схем централізованого та розподіленого живлення тягової мережі показують, що втрати електроенергії при реалізації заданого графіку руху поїздів при застосуванні схеми розподіленого живлення склали 104,21 кВт·год, що на 35,9 % менше від втрат електроенергії при централізованому живленні.

Регулювання споживаної потужності при цьому здійснюється у єдиній системі розподіленого керування активним інтелектуальним обладнанням, здатним адаптивно змінювати характеристики передачі, перетворення та споживання електроенергії і оптимізувати режим функціонування системи тягового електропостачання при завданих обсягах перевізної роботи та в умовах швидкісного руху.

Необхідно зазначити, що ефективність системи розподіленого типу, особливо при застосуванні альтернативних джерел електричної енергії, буде значно вищою при застосуванні накопичувачів електричної енергії. Використання накопичувачів електричної енергії (НЕ) в СТЕ дозволяє частково або повністю усунути нерівномірності енергоспоживання СТЕ, приймати надлишкову енергію рекуперації, підтримувати на певному рівні потужність тягової підстанції під час експлуатації, зменшити втрати енергії в зовнішній системі електропостачання. Окрім цього, накопичення і зберігання цієї енергії для повторного використання приведе до зменшення первинного енергоспоживання від зовнішньої системи електропостачання, що може привести до зниження встановленої потужності усіх агрегатів ТП [10-15].

На сьогоднішній день в пристроях СТЕ пропонуються до використання різні типи накопичувачів, але доцільність застосування того чи іншого типу накопичувача до цього часу не обґрунтована в повній мірі. Необхідно вказати, що за результатами експериментальних досліджень потужність НЕ для компенсації втрат напруги має бути 0,5÷1,5 МВт, в залежності від рівня споживаного струму та координати. Для застосування в системі розподіленого живлення НЕ повинен функціонувати в умовах різкої зміни навантаження та компенсувати коливання напруги при мінімальному часі відновлення. Як показує аналіз доступних джерел, на сьогоднішній день найбільш перспективним напрямком є застосування батарейних систем накопичення

електричної енергії (BESS), дозволяючих зменшити коливання споживаної потужності і рознести в часі фази накопичення та віддачі електроенергії [16].

Незважаючи на широку номенклатуру пропонує акумуляторних накопичувачів електричної енергії, специфіка використання їх в енергетиці накладає достатньо серйозні обмеження на вибір типу акумулятора:

- висока енергоємність;
- термін служби акумуляторної батареї;
- відсутність «ефекту пам'яті»;
- допустимість режимів швидкого заряду батареї;
- здатність працювати в режимі великих струмових перевантажень;
- безпека використання;
- низька вартість.

На жаль, жоден з існуючих на сьогоднішній день типів електрохімічних батарей (ЕХБ) не відповідає повністю таким вимогам: не зважаючи на велику поширеність, свинцево-кислотні акумулятори хоча і дозволяють використовувати їх в режимі великих струмових перевантажень та є досить дешевими, не допускають швидкісних режимів заряду/розряду, мають низьку енергоємність, є екологічно небезпечними, і вимагають спеціально обладнаних приміщень. NiCd та NiMH акумулятори допускають роботу при великих струмових перевантаженнях, швидкісний режим заряду/розряду, але мають ефект пам'яті (особливо, NiCd) і досить великий струм саморозряду. Батареї LiCoO₂ та LiMn₂O₄ мають високі енергетичні показники, великий термін служби, повністю позбавлені ефекту пам'яті, мають низький рівень саморозряду, допускають великі струмові перевантаження і швидкісні режими заряду/розряду, є екологічно безпечними, мають досить великий термін служби, але мають високу вартість і є вибухонебезпечними при неправильному режимі експлуатації. LiFePO₄ батареї мають всі позитивні якості літійових батарей (висока енергоємність, наявність режимів швидкого заряду/розряду, відсутність ефекту пам'яті, не вимагають періодичного обслуговування), але при цьому є вибухобезпечними, і мають набагато більший термін служби. Відносно недавня поява (2003 р.) акумуляторів цього типу пояснює їх високу вартість. У таблиці 3 наведено характеристики найбільш поширених типів ЕХБ, які можуть використовуватись в якості НЕ в СТЕ.

Експериментальні дослідження батареї LiFePO₄ відображають вплив паразитних елементів в еквівалентній схемі. Їх наявність суттєво впливає на частотні характеристики батареї.

Характеристики найбільш поширених типів ЕХБ

Тип батареї	Lead-acid	NiCad	NiMH	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄
Номинальна напруга, В	2	1,2	1,2	3,7	3,7	3,3
Відносна вартість	1	2	2,4	4	6	>10
Безпечність використання	Висока	Висока	Висока	Низька	Середня	Висока
Екологічність використання	Низька	Низька	Висока	Висока	Висока	Висока
Ефект пам'яті	-	+	+	-	-	-
Енергоефективність	60%	75%	70%	90%	90%	95%
Час життя (циклів)	400	500	500	>500	>500	>2000
Час зарядження, год	12	1.5	4	2-4	2-4	<2
Саморозрядження, % / міс.	20	30	35	10	10	8

На рис. 14 показано осцилограми перехідного процесу при стрибкоподібній зміні струму від нуля до 120 А.

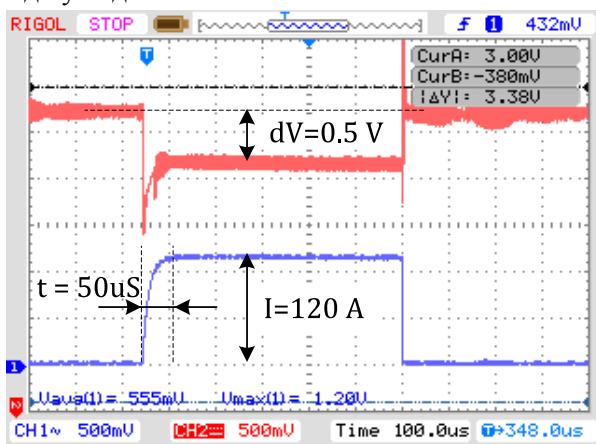


Рис. 14. Результат експериментального дослідження батареї

З результатів експерименту видно що постійна часу електрохімічних процесів в батареї складає близько 10 мкс (тривалість перехідного процесу $t = 4,6\tau = 50$ мкс). Для відносно низькочастотних процесів, що протікають у системі енергопостачання залізниці, даний тип батареї можна вважати ідеальним джерелом енергії.

На підставі проведеного авторами аналізу можливості застосування різних типів акумуляторних накопичувачів у складі BESS, перевагу слід віддати LiFePO₄ батареям: вони мають найкращі енергетичні характеристики при задовільних частотних характеристиках. Однак, їх використання накладає серйозні вимоги до системи керування батареєю. Для забезпечення нормальної роботи акумуляторної батареї, в процесі її експлуатації потрібно постійно відслідковувати рівень заряду кожного з елементів батареї, запобігаючи його виходу за допустимі межі. Крім того, необхідно вирівнювати значення напруги кожного з послідовно включених елементів між собою (балансувати рівень заряду).

Висновки

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що режими напруги в системі тягового електропостачання постійного струму не дозволяють в повній мірі забезпечити необхідні умови для впровадження швидкісного руху на існуючих лініях. Рівні напруги, як на шинах тягового навантаження, так і в тяговій мережі мають значний діапазон коливань, який визначається різними факторами: як впливом змін режимів роботи системи зовнішнього електропостачання, так і режимами роботи тягової мережі. При цьому, при наявності значного резерву встановленої потужності, на тягових підстанціях України відсутні засоби регулювання режимів напруги в тяговій мережі. Найбільш часто поліпшення режимів напруги виконується за рахунок тривіальних мало затратних заходів, що недостатньо при збільшенні тягових навантажень, виникаючих при збільшенні швидкостей руху. Однією з необхідних умов при цьому є необхідність звуження діапазону змін напруги на струмоприймачах е. р. с. та підвищення ефективності використання енергії.

Для вирішення поставленого завдання авторами пропонується використання схемотехнічних рішень системи тягового електропостачання на основі розподіленого живлення. Їх застосування дозволяє зменшити діапазон зміни напруги в тяговій мережі та підвищити економічні показники функціонування системи тягового електропостачання. Встановлення необхідного рівня звуження діапазону змін напруги для швидкісного руху потребує проведення додаткових досліджень.

На основі проведеного аналізу показано, що суттєвого покращення режиму напруги в тяговій мережі можна досягти використанням батарейних систем накопичення електричної енергії, дозволяючих зменшити коливання споживаної потужності і рознести в часі фази накопичення та віддачі електроенергії. При цьому необхідно вирішити питання розробки системи керування режимами роботи пропонованих накопичувачів електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

REFERENCES

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Rojek A. Traction power supply in 3 kV DC system. / A. Rojek // Warszawa: KOW media&marketing Sp. Z o.o., 2012. – 250 s.
3. Shelag A. Influence of voltage in 3 kV DC catenary on traction and energy parameters of the supplied vehicles / A. Shelag // Radom: Spatium, 2013. – 158 s.
4. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саєнко, Д.О. Босий; Дн-вськ. : «Стандарт-Сервіс», 2015. - 344 с.
5. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : монография / Б. А. Аржанников. // – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 176 с.
6. Косарев, С. М. Регулирование напряжения в контактной сети электрифицированных железных дорог постоянного тока / С. М. Косарев // Электрификация транспорта. – 2015. – №9, с. 37-43.
7. V. Sychenko. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current. / V. Sychenko, D. Bosiy, E. Kosarev // The archives of transport. Volume 35, Issue 3, 2015, p. 63-70.
8. Сиченко В. Г. Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з пунктами підсилення. / В. Г. Сиченко, Д.О. Босий, С. М. Косарев// Вісник Вінницького політехнічного інституту. № 6 – 2015, - с. 95-103.
9. Гончаров Ю. П. Стабилизирующие тяговые перетворювальні агрегати з системою активної фільтрації для електропостачання тягових мереж постійного струму швидкісних магістралей. / Ю.П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Замаруєв та ін.// Залізничний транспорт України, – № 6 – 2011, с. 26-31.
10. Добровольские Т. П. Обеспечение стабильного напряжения в контактной сети при пропуске скоростных тяжеловесных поездов. / Добровольские Т. П., Алексеев Е. Н.//Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе.: Сб. научн. тр. ОАО ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2010. с. 184-187.
11. Заруцкая Т. А. Исследование эффективности применения сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии на тяговой подстанции постоянного тока. Специальность 05.22.07 - «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: автореф. дис. канд. техн. наук/ Заруцкая, - Ростов-на-Дону, 2004. – 21 с.
12. Пунынин, В.Н. Условия эффективного использования емкостного накопителя энергии в системах тягового электроснабжения железных дорог/ В.Н. Пунынин, В.Л.Никитин // Электричество, 1993, № 1, - С. 52-58.
13. Пунынин В.Н. Разработка энергосберегающих систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока 3,3 кВ с использованием

1. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* [Electricity electric-infected railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
2. Rojek A. Traction power supply in 3 kV DC system. / A. Rojek // Warszawa: KOW media&marketing Sp. Z o.o., 2012. – 250 p.
3. Shelag A. Influence of voltage in 3 kV DC catenary on traction and energy parameters of the supplied vehicles / A. Shelag // Radom: Spatium, 2013. – 158 p.
4. Sychenko V.G. Quality of electric energy in the traction network of electrified railways / V.G. Sychenko, J.L. Saenko, D.O. Bosiy; Day-Su. : "Standard Service", 2015. - 344 p.
5. Arzhannikov B. A. *Sistema upravlyаемого elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog postoyannogo toka : monografiya* [Managed system DC power supply of electrified railways: monograph]. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 2010. 176 p.
6. Kosarev, Je. M. *Reguljuvannja naprugi v kontaktnej merezhi elektrifikovanikh zaliznits' postijnogo strumu* [Adjusting the voltage in the contact network of the electrified railways DC]. *Elektrifikatsija transport - Electrification of transport*, 2015. no. 9, pp. 37-43.
7. V. Sychenko. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current. / V. Sychenko, D. Bosiy, E. Kosarev // The archives of transport. Volume 35, Issue 3, 2015, pp. 63-70.
8. Sychenko V. G., Bosiy D.O., Kosarev Je. M. *Optimizacija keruvannja rezhymom naprugi v tjavovij merezhi postijnogo strumu z punktamy pidsylennja* [Management optimization mode voltage in the power network of DC gain points]. *Visnyk Vinnyc'kogo politehnicznego instytutu - Herald of Vinnitsa Polytechnic Institute*, 2015, no 6, pp. 95-103.
9. Goncharov Ju.P., Panasenko M. V., Zamarujev V. V. ect. *Stabilizujuchi tjavovi peretvorjuval'ni agregaty z systemoju aktyvnoi' fil'tracii' dlja elektropostachannja tjavovyh merezh postijnogo strumu shvydkisnyh magistralej* [Stabilizing Traction converting units with active filtration system for traction power supply networks DC highways]. *Zaliznychnyj transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine*, 2011, no 6, pp. 26–31.
10. Dobrovol'skis T. P., Alekseev E. N. *Obespechenie stabil'nogo naprjazhenija v kontaktoej seti pri propuske skorostnyh tjazhelovesnyh poezdov* [Ensuring a stable voltage in the contact network when the pass-sko-speed heavy trains]. *Tokos'em i tjavovoe jelektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postojannom toke.: Cb. nauchn. tr. OAO VNIIZhT* [Current collection and traction power supply during high-speed driving at a constant current]. Moscow Intekst, 2010, pp. 184-187.
11. Zaruckaja T. A. *Issledovanie jeffektivnosti primenenija sverhprovodnikovogo induktivnogo nako-pitelja jenerгии na tjavovoj podstancii postojannogo toka*. Avtoreferat Diss. [Study of the effectiveness of application sverhprovodnykovoho ynduktyvnoho Disk Drive energy to traction substations constantly current. Author's abstract.]. Rostov-on-Don, 2004. 21 p.

накопителей энергии. Часть II Имитационная модель системы тягового электроснабжения с накопителями энергии/ В.Н. Пунынин, М.В. Шевлюгин // Сборник научных трудов «Фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области железнодорожного транспорта 1998 г.». Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), Москва, 1999, вып. 921, с. 14-22.

14. Феоктистов В.П. Повышение тягово-энергетической эффективности транспортных систем при помощи накопителей энергии/ В.П. Феоктистов, М. Павелчик // Транспорт, 1999, № 12, с. 21-26.

15. Reiner K. Einsatzmöglichkeiten für Energiespeicher im elektrischen Bahnantrieb. // Elektrische Bahnen, vol. 91, 1993, iss. 10, pp. 331-335.

16. Update: Ionex Has a 1 MW Battery Ready for the Grid, EPRI issues ESS RFI // Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/ionex-has-a-1-mw-battery-ready-for-the-grid>

12. Punynin V.N., Nikitin V.L. *Uslovija jeffektivnogo ispol'zovanija emkostnogo napovitelja jenerгии v sistemah tjavovogo jelektrosnabzhenija zheleznyh dorog* [Terms of the effective use of capacitive energy storage systems to traction power supply of railways]. *Jel-ektrichestvo – Electricity*, 1993, no 1, pp. 52-58.

13. Punynin V.N., Shevlyuhyn M. V. *Razrabotka enerhosberehayushchykh system tyahovoho elektrosnabzheniya zheleznykh doroh postoyannoho toka 3,3 kV s yspol'zovanyem nakopyteley enerhyy. Chast' II Ymytatsyonnaya model' systemy tyahovoho elektrosnabzheniya s nakopytelyamy enerhyy* [Development of energy-saving traction systems railway power supply DC 3.3 kV using energy storage. Part II Simulation model of traction power supply system with energy storage] *Sbornyk nauchnykh trudov «Fundamental'nye y poyskovye nauchno-ysledovatel'skiye raboty v oblasti zheleznodorozhnogo transporta 1998 h.»* [Collection of scientific works "Fundamental and search research work in the field of railway transport in 1998".] 1999, iss. 921, pp. 14-22.

14. Feoktistov V.P., Pavelchik M. *Povyshenie tjavovojenergeticheskoy jefektivnosti transportnyh sistem pri pomoshhi napovitelej jenerгии* [Increased traction and energy efficiency transport systems using energy storage]. *Transport – Transport*, 1999, no 12, pp. 21-26.

15. Reiner K. Einsatzmöglichkeiten für Energiespeicher im elektrischen Bahnantrieb. // Elektrische Bahnen, vol. 91, 1993, iss. 10, pp. 331-335.

16. Update: Ionex Has a 1 MW Battery Ready for the Grid, EPRI issues ESS RFI, Electronic resource. Access mode <http://www.greentechmedia.com/articles/read/ionex-has-a-1-mw-battery-ready-for-the-grid>

Надійшла до друку 06.04.2016.

Внутрішній рецензент Гетьман Г. К.

Зовнішній рецензент Панасенко М. В.

Режим напруги в тяговій мережі залежить від багатьох факторів та визначає експлуатаційні характеристики електрифікованої ділянки. Проведеними експериментальними дослідженнями встановлено, що рівні напруги, як на шинах тягових підстанцій, так і на струмоприймачах електровозів, коливаються в значних межах і перевищують нормовані показники, встановлені для швидкісного руху. Для підвищення енергетичної ефективності функціонування системи тягового електропостачання постійного струму при швидкісному русі та зменшення коливань напруги авторами запропоновано застосування у розподіленій системі живлення тягової мережі батарейних систем накопичення електричної енергії, побудованих на сучасних літєвих батареях.

Ключові слова: система тягового електропостачання, постійний струм, режим напруги, розподілена система живлення, накопичувач електричної енергії.

УДК 621.331.3

В. Г. СЫЧЕНКО, Е. Н. КОСАРЕВ, П. В. ГУБСКИЙ (ДНУЖТ),
В. В. ЗАМАРУЕВ, В. В. ИВАХНО, Б. А. СТЫСЛО (ХПИ)

Кафедра «Электроснабжение железных дорог» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, 49010 г. Днепропетровск, ул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: elpostz@i.ua, kosarev@e.dnuit.edu.ua, peter.qvbskiy@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-9533-2897, orcid.org/0000-0003-3574-7414, orcid.org/0000-0002-0216-7256

Кафедра «Промышленная и биомедицинская электроника» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», 61002 г. Харьков, ул. Фрунзе 21, тел. +38(057) 707-60-44, e-mail: vyvz1@ukr.net, v-ivakhno@ukr.net, bohdanstyslo@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Режим напряжения в тяговой сети зависит от многих факторов и определяет эксплуатационные характеристики электрифицированного участка. Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что уровни напряжения, как на шинах тяговых подстанций, так и на токоприемниках электровозов, колеблются в значительных пределах и превышают нормированные показатели, установленные для скоростного движения. Для повышения энергетической эффективности функционирования системы тягового электроснабжения постоянного тока при скоростном движении и уменьшения колебаний напряжения авторами предложено применение в распределенной системе питания тяговой сети батарейных систем накопления электрической энергии, построенных на современных литиевых батареях.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, постоянный ток, режим напряжения, распределенная система питания, накопитель электрической энергии.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

UDC 621.331.3

V. G. SYCHENKO, YE. M. KOSARIEV, P. V. GUBSKIY (DNURT),
V. V. ZAMARUEV, V. V. IVAKHNO, B. A. STYSLO (KhPI)

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

Department "Industrial and biomedical electronics», National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 61002, Kharkiv, 21 Frunze str., tel. +38(057) 707-60-44 e-mail: vyz1@ukr.net, v-ivakhno@ukr.net, bohdanstyslo@gmail.com

RESEARCH THE VOLTAGE MODE OF SYSTEM DC TRACTION POWER SUPPLY

The voltage mode of traction network depends on many factors and determines the operating characteristics of electrified section. Experimental studies have established that the voltage levels as on buses of traction substations, and on the current collectors of electric locomotives, vary considerably and exceed the normalized indicators established for high-speed traffic. To improve the energy efficiency of the system, the traction power direct current at high-speed motion and reduce the voltage fluctuations, the authors propose the use in a distributed power supply system traction network battery systems store electrical energy built on the modern lithium batteries.

Keywords: traction power supply system, DC, voltage mode, distributed power supply system, electricity storage.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

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

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373-15-31, эл. почта: afanasof@ukr.net, drubetskiy@mail.ru,
ORCID: orcid.org/0000-0003-4609-2361; orcid.org/0000-0001-5691-0925

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОЖДЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ОБМОТОК ВОЗБУЖДЕНИЯ ВЗАИМНО НАГРУЖЕННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН

Введение

Требования соответствующих стандартов [1] и правил ремонта тягового подвижного состава [2,3] предусматривают проведение приёмо-сдаточных испытаний каждой тяговой электромашин: либо вновь изготовленной, либо вышедшей из ремонта. Эти испытания представляют собой важную, неотъемлемую часть технологического процесса изготовления или ремонта тяговой электромашин, материальные затраты на которую входят в себестоимость конечной продукции.

Качество технического контроля, проводимого при приёмо-сдаточных испытаниях тяговых электромашин, в конечном счёте, определяет надёжность и безотказность всего тягового средства, а, следовательно, и эффективность самих железнодорожных перевозок.

Зависимость относительной разности токов возбуждения от коэффициента насыщения

Одним из важных условий обеспечения качества испытаний на нагрев является равенство тепловых нагрузок лимитирующих обмоток обеих испытываемых электромашин, которая определяет корректность оценки результатов испытаний. Требование ГОСТ 2582-81 [1] в части токовой нагруженности обмоток испытываемых двигателя и генератора является формальным, так как не учитывает ни схемы испытания, ни то, какая из обмоток электромашин является лимитирующей [4]. Тем не менее, этот фактор, определяющий качество испытаний, должен учитываться при оптимизации структуры системы взаимного нагружения.

Расхождение тепловых нагрузок обмоток возбуждения испытываемых тяговых электромашин характерно для системы взаимного нагружения с регулированием магнитных потоков путём шунтирования обмоток возбуждения испытываемого генератора [4]. В такой схеме за счёт разности токов возбуждения испытываемых

электромашин создаётся небалансная электромагнитная мощность, покрывающая потери холостого хода.

Разницу токов возбуждения испытываемых электромашин для случая шунтирования представим в виде

$$\Delta I_B = I_{\text{ч}} - I_B \quad (1)$$

где $I_{\text{ч}}$ – часовой ток или другой эквивалентный ток, при котором проводится испытание;

I_B – ток возбуждения в регулируемой обмотке.

Относительные (приведенные к часовому току) разности токов возбуждения:

$$K_{\Delta I} = \frac{\Delta I_B}{I_{\text{ч}}} \quad (2)$$

Зависимости параметра $K_{\Delta I}$ от приведенных потерь холостого хода Δp одной испытываемой электромашин, полученные в работе [5], приведены в табл. 1. Данные зависимости получены для трех значений коэффициента насыщения тягового двигателя k_H (1,67; 1,91; 2,15).

Зависимость расхождения тепловых нагрузок обмоток двигателя от коэффициента насыщения

В качестве критерия расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения $K'_{\text{ТВ}}$ целесообразно использовать отношение квадратов токов возбуждения генератора и двигателя.

$$K'_{\text{ТВ}} = \frac{I_B^2}{I_{\text{ч}}^2} = K_{I_B}^2 \quad (3)$$

где K_{I_B} – отношение токов возбуждения тяговых электромашин,

$$K_{I_B} = \frac{I_B}{I_{\text{ч}}} \quad (4)$$

Таблица 1

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

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

Так как ток возбуждения испытуемого генератора меньше тока двигателя (номинального тока),

$$K_{IB} < 1$$

Отношение токов возбуждения K_{IB} может быть выражено через их относительную разность как

$$K_{IB} = 1 - K_{\Delta I} \quad (5)$$

Тогда отношение тепловых нагрузок обмоток возбуждения

$$K'_{\tau B} = (1 - K_{\Delta I})^2 \quad (6)$$

Универсальный характер зависимостей $K_{\Delta I}(\Delta p)$ позволяет рассчитать отношение тепловых факторов $K'_{\tau B}$ для заданных коэффициентов магнитного насыщения k_H в зависимости от приведенных потерь холостого хода Δp .

В табл. 2 приведены результаты расчета зависимостей $K'_{\tau B}(\Delta p)$, полученные по формуле (4.68) для трёх значений коэффициента магнитного насыщения k_H (1,67; 1,91; 2,15).

Значения $K'_{\tau B}$, приведенные в числителе, относятся к случаю совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин, а в знаменателе – к случаю максимального их расхождения (6%). На рис. 1, 2 и 3 зависимости $K'_{\tau B}(\Delta p)$ представлены графически.

Из данных графиков видно, что степень расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения испытуемых тяговых электромашин зависит от коэффициента магнитного насыщения k_H . Чем выше коэффициент магнитного насыщения тяговых электромашин, тем выше степень расхождения тепловых нагрузок их обмо-

ток возбуждения. Существенное влияние на степень расхождения тепловых нагрузок обмоток возбуждения оказывает расхождение магнитных характеристик пары взаимно нагруженных тяговых электромашин.

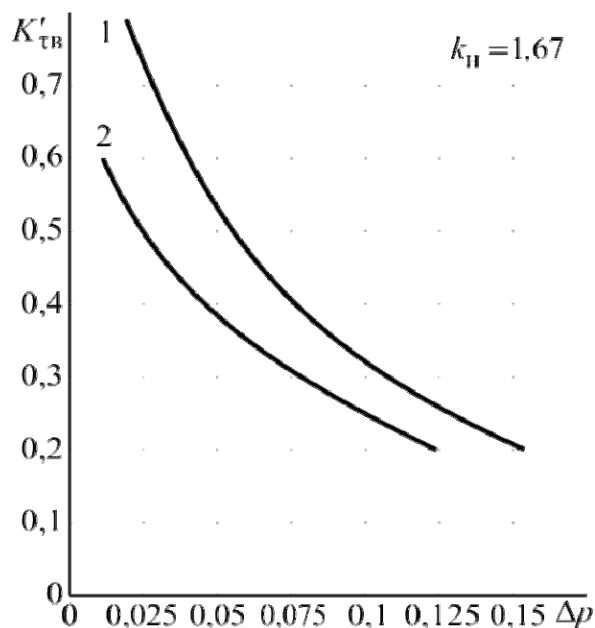


Рис. 1. Зависимости $K'_{\tau B} = f(\Delta p)$ для $k_H = 1,67$

Вывод

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что использование взаимного нагружения с регулированием разницы магнитных потоков пары испытуемых тяговых электромашин приводит к расхождению тепловых нагрузок их обмоток возбуждения, которое зависит от коэффициента магнитного насыщения тяговых электромашин и усиливается в случае расхождения их магнитных характеристик.

Результаты расчета зависимостей $K'_{\text{тв}}(\Delta p)$

$k_{\text{H}}=1,67$	Δp	<u>0,019</u>	<u>0,041</u>	<u>0,066</u>	<u>0,104</u>	<u>0,154</u>	–	–
	$K'_{\text{тв}}$	0,79	0,60	0,44	0,31	0,20	–	–
$k_{\text{H}}=1,91$	Δp	<u>0,016</u>	<u>0,032</u>	<u>0,050</u>	<u>0,070</u>	<u>0,094</u>	<u>0,129</u>	–
	$K'_{\text{тв}}$	0,83	0,67	0,53	0,40	0,30	0,21	–
$k_{\text{H}}=2,15$	Δp	<u>0,011</u>	<u>0,023</u>	<u>0,038</u>	<u>0,054</u>	<u>0,071</u>	<u>0,090</u>	<u>0,112</u>
	$K'_{\text{тв}}$	0,85	0,72	0,59	0,48	0,38	0,29	0,21

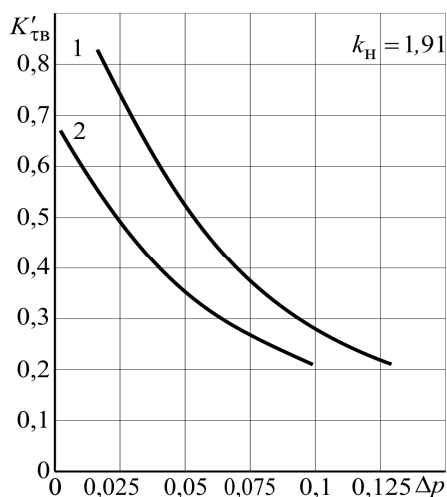


Рис. 2. Зависимости $K'_{\text{тв}} = f(\Delta p)$ для $k_{\text{H}} = 1,91$

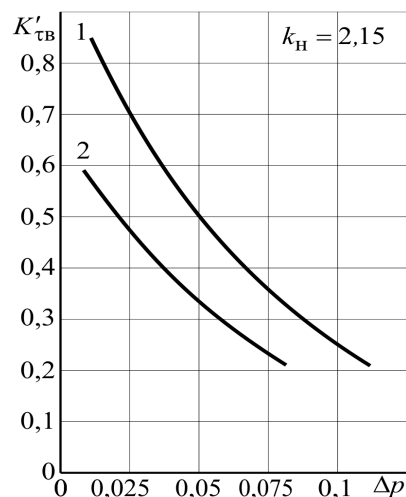


Рис. 3. Зависимости $K'_{\text{тв}} = f(\Delta p)$ для $k_{\text{H}} = 2,15$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. – Введ. 1983-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 1981. – 50с.
2. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
3. Правила ремонту электрических машин электропоездов и электропоездов. ЦТ-0204. – К.: Видавничий дім «САМ», 2012. – 286 с.
4. Афанасов А. М. Энергетическая эффективность нагрева обмоток тяговых электромашин при приемосдаточных испытаниях / А. М. Афанасов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Вып. 5/8(59). – С. 6-9.
5. Лоза, П. О. Визначення еквівалентного струму навантаження при випробовуванні тягових електродвигунів на нагрівання без вентиляції / П. О. Лоза, Л. В. Дубинець, Д. В. Устименко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 25. – С. 26–29.

Поступила в печать 17.03.2016.

REFERENCES

1. GOST 2582-81. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye*. [State Standard 2582-81. Rotating electrical machines for rail and road vehicles. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1981. 50 p.
2. Zherve G. K. *Promyshlennye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electrical machines]. Leningrad, Energoatom Publ., 1984. 408 p.
3. *Pravila remontu elektrichnikh mashin elektrovoziv i elektropoizdiv* [Rules repair of electric machines of electric locomotives and electric trains]. TsT-0204. – Kyiv, Publishing House «SAM», 2012. 286 p.
4. Afanasov A. M. *Energeticheskaya effektivnost nagrevaniya obmotok tyagovykh elektromashin pri priemosdatochnykh ispytaniyakh* [Energy indicators for electric method for compensating magnetic and mechanical losses in the traction electric motors in their mutual load]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 2012, no 5/8(59), pp. 6-9.
5. Loza P. O., Dubinets L. V., Ustimenko D. V. *Viznachennya ekvivalentnogo strumu navantazhennya pri viprovovuvanni tyagovykh elektrodviguniv na nagrivannya bez ventilyatsii* [Determination of equivalent current load when tested in traction electric motors for heating without ventilation]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 25, pp. 26–29.

Применение схемы взаимного нагружения, в которой небалансная электромагнитная мощность создается за счет разности магнитных потоков испытуемых машин путем шунтирования обмотки возбуждения генератора, вызывает расхождение тепловых нагрузок обмоток возбуждения.

Целью работы является исследование расхождения тепловых нагрузок в зависимости от коэффициента насыщения и относительной разности магнитных потоков машин.

Учет таких параметров, как коэффициент насыщения и расхождение магнитных характеристик испытуемых машин могут быть использованы для разработки автоматизированного испытательного стенда, а также, позволит повысить качество технического контроля при приемо-сдаточных испытаниях тяговых электрических машин.

Ключевые слова: приемо-сдаточные испытания, расхождение тепловых нагрузок, шунтирование обмотки возбуждения, коэффициент насыщения, расхождение магнитных характеристик.

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ, А. Ю. ДРУБЕЦКИЙ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 31, e-mail: afanasof@ukr.net, drubetskiy@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-4609-2361; orcid.org/0000-0001-5691-0925

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗБІЖНОСТІ ТЕПЛОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ ОБМОТОК ЗБУДЖЕННЯ ВЗАЄМНО НАВАНТАЖЕНИХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМАШИНИ

Застосування схеми взаємного навантаження, у якій небалансна електромагнітна потужність створюється за рахунок різниці магнітних потоків випробовуваних машин за допомогою шунтування обмотки збудження генератора, викликає розходження теплових навантажень обмоток збудження.

Ціллю роботи є дослідження розходження теплових навантажень в залежності від коефіцієнту насичення та відносної різниці магнітних потоків машин.

Врахування таких параметрів, як коефіцієнт насичення та розходження магнітних характеристик випробовуваних машин можуть бути використані для розробки автоматизованого випробувального стенду, а також дозволить підвищити якість технічного контролю при приймально-здавальних випробуваннях.

Ключові слова: приймально-здавальні випробування, розходження теплових навантажень, шунтування обмотки збудження, коефіцієнт насичення, розходження магнітних характеристик.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

UDC 629.423.31-048.24

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

Department «Electric rolling stock of railways» of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373- 15-31, e-mail afanasof@ukr.net, drubetskiy@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-4609-2361, orcid.org/0000-0001-5691-0925

DETERMINING DIFFERENCES OF THE HEAT LOAD EXCITATION WINDINGS OF THE MUTUALLY LOADED TRACTION ELECTRIC MACHINES

Application of mutual loading scheme in which Unbalanced electromagnetic power generated by the difference in magnetic flux machines tested by shunting of-winding of the generator excitation, causing the discrepancy heat load excitation windings.

The aim is to study the differences in the thermal loads depending on the co-saturation coefficient and the relative difference between magnetic machine flows.

The account parameters such as saturation factor and the divergence of the magnetic characteristics of the test machine can be used to develop automated test and of the stand, as well, will improve the quality of the technical control if acceptance in testing traction electric machines.

Keywords: acceptance tests, the difference of thermal loads, shunt field winding saturation factor, the difference of magnetic characteristics.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

О. Ю. БАЛІЙЧУК (ДНУЗТ)

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 49010, м. Дніпропетровськ, Україна, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-47, ел. пошта: balichukaleksei@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-0119-1446

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СИМЕТРУВАННЯ ЖИВЛЯЧОЇ НАПРУГИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ СИМЕТРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЕР9М

Вступ

Із практики експлуатації мереж загального користування, енергозабезпечення промислових підприємств [1, 2] відомо, що несиметрію напруг можна обмежити до значення $k_{2U} \leq k_{2U_{\text{доп}}}$ застосовуючи як різні схемні рішення, так і спеціальні симетруючі пристрої [1, 2]. Аналогічні за суттю заходи є прийнятними для застосування на рухомому складі, зокрема на електропоїздах змінного струму ЕР9М, на яких живлення допоміжних машин в режимах, що відрізняються від номінальних, можливе трифазною напругою із значною несиметрією. Це призводить до виникнення додаткових нагрівань обмоток статорів допоміжних машин і, як наслідок, передчасного виходу з ладу допоміжних машин.

Якщо допустимих значень коефіцієнта несиметрії застосуванням схемних рішень досягти не вдається, необхідний рівень несиметрії забезпечують за допомогою симетруючих пристроїв (СП) [1, 2].

Постановка задачі

Постає задача розробити структуру симетруючого пристрою для забезпечення живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, який би дозволив підтримувати допустиме значення коефіцієнту несиметрії напруги в умовах реальної експлуатації, а також розробити методику визначення параметрів симетруючих елементів даного пристрою.

Заголовок розділу

Процес симетрування напруги за допомогою СП полягає в компенсації еквівалентного струму зворотної послідовності, що обумовлений напругою зворотної послідовності.

В залежності від місця встановлення СП розрізняють індивідуальний, груповий, централізований і комбінований способи симетрування [1, 2]. При цьому індивідуальний

спосіб полягає у встановленні СП безпосередньо біля допоміжної машини, при груповому симетруванні в системі допоміжних машин в різних точках приєднання встановлюють декілька СП, кожен із яких симетрує напругу лише частини системи допоміжних машин. При централізованому симетруванні встановлюється лише один СП. Комбінований спосіб поєднує в собі способи симетрування живлячої напруги, описані раніше.

Індивідуальний спосіб симетрування дозволяє знизити несиметрію напруги і струмів безпосередньо на допоміжній машині, але при цьому встановлена потужність СП використовується нерационально [1, 2]. При централізованому способі симетрування потрібна менша встановлена потужність елементів СП.

Враховуючи вплив сумарного електричного навантаження на несиметрію напруги на виході розщеплювача фаз, зміну величини напруги в контактній мережі, а відповідно і напругу в системі живлення допоміжних машин, різну гранично допустиму несиметрію напруги за умови нормальної температури нагріву кожної допоміжної машини доцільним є застосування індивідуальних способів симетрування напруги керованими СП.

Керовані СП можуть мати як неперервне (аналогове) так і ступеневе (дискретне) керування.

Для симетрування системи лінійних напруг широкого застосування набули батареї конденсаторів із неоднаковими потужностями фаз. Так, зображені на рис. 1 конденсатори мають неоднакову реактивну потужність, тобто $Q_{C_{AB}} \neq Q_{C_{BC}} \neq Q_{C_{AC}}$.

В керованих дискретних СП батареї конденсаторів (БК) утворюються із декількох груп, з яких одна підключена постійно, а інші під'єднуються по мірі необхідності. Комутація груп БК здійснюється контакторами, або тиристорними ключами.

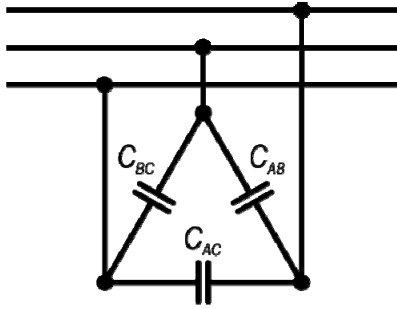


Рис. 1. Схема симетрування системи напруги із застосуванням батарей конденсаторів

На рис. 2. наведено загальний вигляд принципової схеми пропонованого автором пристрою для симетрування системи лінійних напруг в колах живлення допоміжних машин електропоїзда серії EP9M [3].

Симетрування напруги в даному пристрої виконується за допомогою під'єднання батарей конденсаторів паралельно до кожної допоміжної машини. Набір необхідної величини ємності відбувається шляхом почергового підключення до схеми кожної із батарей конденсаторів. Момент комутації батарей конденсаторів, а також послідовність їх комутації визначає мікроконтролерна система керування, яка відслідковує поточне значення лінійних напруг в системі живлення допоміжних машин, порівнюючи напругу в лінійних проводах і обчислює поточне значення

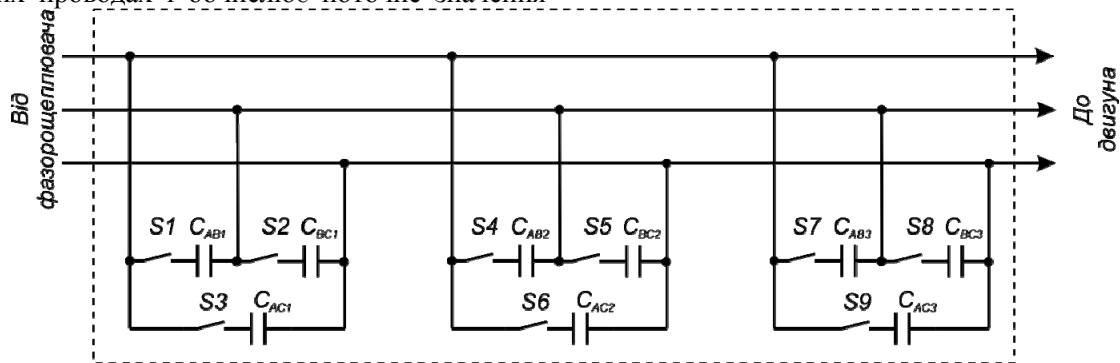


Рис. 2. Принципова схема силової частини пристрою для симетрування напруги живлення допоміжних машин електропоїзда EP9M

На рис. 3. пронумеровано зони в яких аргумент φ_2 набуває певного значення. Таким чином:

Зона I: $180^\circ \leq \varphi_2 \leq 300^\circ$.

Зона II: $300^\circ \leq \varphi_2 \leq 60^\circ$.

Зона III: $60^\circ \leq \varphi_2 \leq 180^\circ$.

В загальному випадку для визначення реактивної потужності БК використаємо наступну систему рівнянь [4]:

$$\begin{cases} Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_2 \cdot (\sqrt{3} \cdot \sin \varphi_2 + \cos \varphi_2), \varphi_2 \in I; \\ Q = 2\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \varphi_2 \in II; \\ Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_2 \cdot (\sqrt{3} \cdot \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2), \varphi_2 \in III. \end{cases}$$

несиметрії живлячої напруги. При досягненні значення несиметрії напруги, що перевищує гранично допустимі величини для конкретної допоміжної машини система керування формує сигнал на підключення до працюючого допоміжного двигуна симетруючих батарей конденсаторів, ємність яких компенсує реактивну потужність, що виникне в колі живлення внаслідок протікання струмів зворотної послідовності, які виникли в результаті дії напруги зворотної послідовності, що прикладена до симетричних допоміжних машин.

Комутація батарей конденсаторів відбувається за допомогою контакторів модульного виконання.

Сумарна потужність ємнісного СП обирається за умови компенсації реактивної потужності. Вона перерозподіляється по фазам СП (див. рис. 1) таким чином, щоб струм зворотної послідовності несиметричної БК компенсував струм зворотної послідовності симетричного навантаження, який обумовлено дією несиметричної вихідної системи напруг асинхронного розщеплювача фаз.

Потужність БК визначається в залежності від аргумента φ_2 вектора струму зворотної послідовності I_2 [1, 2, 4].

При цьому струм зворотної послідовності для асинхронної допоміжної машини [5]:

$$I_2 = k_2 U \cdot k_I \cdot I_{\text{НОМ}}, \quad (1)$$

де k_I – кратність початкового пускового струму – відношення сталого струму в обмотці електродвигуна при нерухомому роторі, номінальній підведеній напрузі і номінальній його частоті;

$I_{\text{НОМ}}$ – номінальний струм статорної обмотки асинхронного двигуна.

Асинхронна допоміжна машина являє собою активно-індуктивне навантаження, при цьому

$\cos \varphi_2 = 0,7 \dots 0,9$, що відповідає II зоні, тому сумарна потужність БК при умові повної компенсації реактивної потужності пропонується визначати за виразом:

$$Q = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2. \quad (2)$$

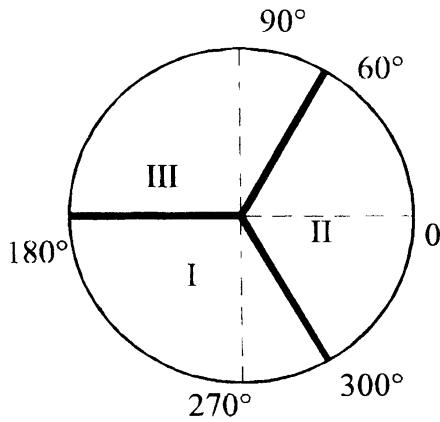


Рис. 3. Діаграма розподілу аргумента φ_2 струму зворотної послідовності $I_{2\Sigma}$

Замість I_2 у вираз (2) підставимо вираз (1), отримаємо

$$Q = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2. \quad (3)$$

Реактивна потужність конденсатора пропорційна його ємності і номінальній напрузі на його обкладках, тобто

$$Q = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2. \quad (4)$$

Ліві частини виразів (3) та (4) рівні, прирівняємо праві частини виразів, отримаємо

$$2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2 \quad (5)$$

Із виразу (5) знайдемо ємність БК для повного симетрування напруги живлення допоміжних машин. Після всіх необхідних перетворень і спрощень отримаємо

$$C = \frac{\sqrt{3} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot f \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (6)$$

де k_{2U} – коефіцієнт несиметрії напруги у в.о.;

k_I – кратність усталеного пускового струму двигуна;

$I_{\text{ном}}$ – номінальний струм двигуна, А;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга двигуна, В;

f – частота живлячої змінної напруги, Гц.

Для асинхронних двигунів справедливий вираз [6]

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1, \quad (7)$$

де m_1 – кількість фаз обмотки статора, для трифазних двигунів $m_1 = 3$, тому запишемо

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1. \quad (8)$$

В номінальному режимі роботи вираз (8) набуде вигляду

$$P_{1\text{ном}} = 3 \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}. \quad (9)$$

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна [6]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (10)$$

В номінальному режимі споживана двигуном потужність становить

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_2}{\eta_{\text{ном}}}, \quad (11)$$

Підставимо праву частину виразу (11) замість лівої частини виразу (9), отримаємо

$$\frac{P_2}{\eta_{\text{ном}}} = 3 \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}. \quad (12)$$

Із рівняння (12) виразимо номінальний струм статора $I_{\text{ном}}$

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_2}{3 \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{3 \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (13)$$

Підставимо вираз (13) замість $I_{\text{ном}}$ до виразу (6), отримаємо

$$C = \frac{\sqrt{3} k_{2U} k_I \frac{P_2}{3 \eta_{\text{ном}} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} \cos \varphi_2}{\pi f U_{\text{ном}}} = \frac{k_{2U} k_I P_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} \pi f \eta_{\text{ном}} U_{\text{ном}}^2 \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (14)$$

Якщо прийняти в першому наближенні у виразі (14) $\eta_{\text{ном}} = 0,75$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ і частоту живлячої мережі $f = 50$ Гц. При прямому пуску асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором кратність пускового струму $k_I = 4 \dots 7$ [6] в залежності від умов пуску.

Приймаємо важкі умови пуску для допоміжних машин, відповідно $k_I = 7$.

З урахуванням вищенаведеного після відповідних перетворень і спрощень вираз (14) матиме вигляд

$$C = 0,043 \cdot \frac{k_{2U} \cdot P_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_{\text{ном}}^2}. \quad (15)$$

Рівняння (15) являє собою наближені залежності $C = f(k_{2U}, P_2)$ для симетрування системи лінійних напруг живлення допоміжних машин електропоїзда змінного струму серії ЕР9М.

Використовуючи вираз (15), побудуємо графік орієнтовної залежності величини ємності батареї симетруючих конденсаторів при змінній потужності допоміжної машини і коефіцієнті несиметрії живлячої напруги. Для цього приймаємо, що потужність P_2 змінюється в

межах $P_2 = 0 \dots 6$ кВт, а коефіцієнт несиметрії $0 \leq k_{2U} \leq 0,2$. Отримані результати представлено у вигляді графіка на рис. 3.

За допомогою графіка на рис. 3 можна визначити орієнтовне значення сумарної ємності БК в СП для кожної допоміжної машини. Значення необхідної ємності лежить на поверхні графіка в точці, координати якої відповідають номінальній потужності допоміжної машини і гранично допустимому значенню несиметрії живлячої напруги за умов нормальної температури обмотки статора.

Для точного визначення ємності БК для симетрування лінійних напруг допоміжних машин необхідно враховувати реальний ккд та коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ допоміжної машини, тому для цього потрібно використовувати вираз (14).

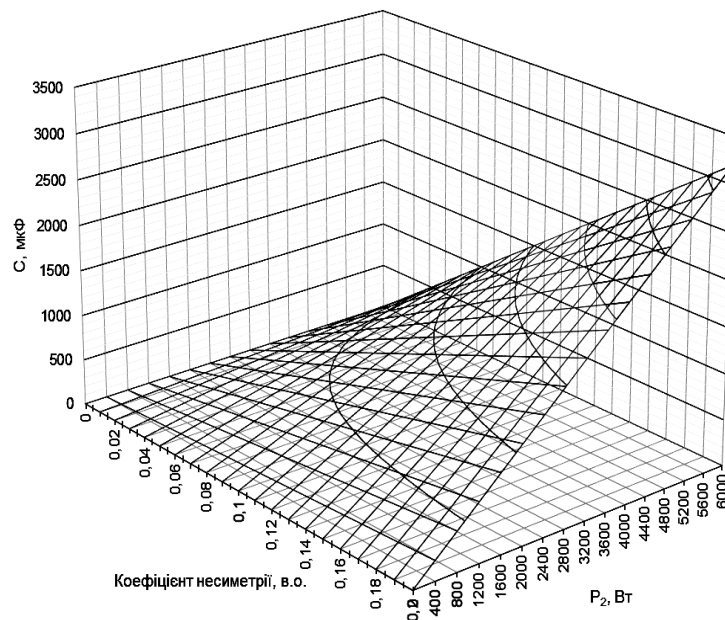


Рис. 3. Орієнтовна залежність $C = f(k_{2U}, P_2)$ батарей конденсаторів СП в системі живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

Висновки

В ході аналізу розглянуто відомі способи симетрування системи лінійних напруг. Розглянуто можливість симетрування системи лінійних напруг допоміжних машин електропоїздів змінного струму за допомогою керованих індивідуальних ємнісних симетруючих пристроїв дискретної дії.

Запропоновано структуру та принципову схему пристрою для контролю якості електричної енергії, якою живляться допоміжні машини електропоїзда змінного струму серії ЕР9М, із системою керування на базі мікроконтролерів.

Розроблено методику визначення ємності батарей конденсаторів симетруючих пристроїв, за якою виконано розрахунок орієнтовних значень ємності симетруючих конденсаторів для всіх допоміжних машин електропоїзда змінного струму серії ЕР9М при умові повного симетрування системи лінійних напруг на затискачах машин. Дослідження показали, що для симетрування системи напруг, коефіцієнт несиметрії якої знаходиться в діапазоні від 2% до 14%, якою живляться допоміжні машини потрібно застосовувати конденсаторні батареї, ємності яких складають 50...1900 мкФ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Данцис, Я. Б. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий / Я.Б. Данцис, Т.М. Жилов. Л.: Энергия, 1980. – 176 с.
2. Кузнецов, В.Г. Снижение несимметрии и не-синусоидальности напряжения в электрических сетях / В.Г. Кузнецов, А.С. Григорьев, В.Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 239 с.
3. Патент 95540 Україна, МПК G05F 1/00, H02M 3/24. Пристрій для забезпечення симетрії живлення допоміжних машин електропоїздів змінного струму / Балійчук О.Ю.; заявник і патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. - № u201408026; заявл. 16.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл.№ 24.
4. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
5. Некрасов, О. А. Вспомогательные машины электроподвижного состава переменного тока / О.А. Некрасов. – М.: Транспорт, 1967. – 168с.
6. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высших технических учебных заведений / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

Надійшла до друку 12.05.2016.

Внутрішній рецензент Муха А. М.

REFERENCES

1. Dancis Ja.B., Zhilov T.M. *Emkostnaja kompensacija reaktivnyh nagruzok moshhnyh tokopriemnikov promyshlennyh predpriyatij* [The capacitive compensation of reactive loads of powerful industrial enterprises for the current collectors]. Leningrad, Energiya Publ., 1980. 176 p.
2. Kuznecov V.G., Grigor'ev A.S., Daniljuk V.B. *Snizhenie nesimmetrii i nesinusoidal'nosti naprjzhenija v jelektricheskikh setjah* [Reduction of asymmetry and non-sinusoidal voltage in electrical networks]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 239 p.
3. Baliychuk O.Yu. *Prystriy dlya zabezpechennya symetriyi zhyvlennya dopomizhnykh mashyn elektropoyizdiv zminnoho strumu* [The device for symmetry of power supply of auxiliary motors of AC electric trains] Patent UA, no. u201408026, 2014.
4. Zhezhelenko I.V., Saenko Ju.L. *Pokazateli kachestva jelektoenerгии i ih kontrol' na promyshlennyh predpriyatijah* [Quality parameters of power and control of industrial plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p.
5. Nekrasov O.A. *Vspomohatelnye mashyny elektropodvyzhnoho sostava peremennogo toka* [Auxiliary electric machines of the electric rolling stock AC]. Moscow, Transport Publ., 1967. 168 p.
6. Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1978. 832 p.

Зовнішній рецензент Денисюк С. П.

Для електропоїздів серії ЕР9М характерною є значна несиметрія напруги, що живить допоміжні машини, в режимах які відрізняються від номінальних. Виникаючі при цьому додаткові перегріву обмоток статорів допоміжних машин призводять до ушкодження їх ізоляції і передчасного виходу з ладу.

Проведено аналіз відомих способів симетрування системи лінійних напруг з метою пошуку таких, які можна застосувати в системі живлення допоміжних машин електропоїздів змінного струму. Розглянуто можливість симетрування системи лінійних напруг допоміжних машин електропоїздів змінного струму за допомогою керованих індивідуальних ємнісних симетруючих пристроїв дискретної дії. Розроблено структуру симетруючого пристрою для забезпечення живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, який би дозволив підтримувати допустиме значення коефіцієнту несиметрії напруги в умовах реальної експлуатації, а також розроблено методику визначення параметрів симетруючих елементів названого пристрою.

В ході дослідження визначено, що для забезпечення повного симетрування напруги при коефіцієнті несиметрії 0,02..0,14 в колах живлення допоміжних машин потрібна ємність конденсаторних батарей повинна складати 50...1900 мкФ.

Ключові слова: допоміжні машини, електропоїзд змінного струму, симетрування системи лінійних напруг, симетруючий пристрій.

УДК 629.423.064.5:621.3.025

А. Ю. БАЛИЙЧУК (ДНУЖТ)

Кафедра «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 49010, г. Дніпропетровськ, Україна, г. Дніпропетровськ, ул. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-47, ел. пошта: baliichukaleksei@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-0119-1446

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СИММЕТРИРОВАНИЯ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПИТАНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ЭР9М

Для электропоездов серии ЭР9М характерна значительная несимметрия питающего вспомогательные машины напряжения, в режимах которые отличаются от номинальных. Возникающие при этом дополни-

тельные перегрев обмоток статоров вспомогательных машин приводят к повреждению их изоляции и преждевременному выходу из строя.

Проведен анализ известных способов симметрирования системы линейных напряжений с целью поиска таких, которые можно применить в системе питания вспомогательных машин электропоездов переменного тока. Рассмотрена возможность симметрирования системы линейных напряжений вспомогательных машин электропоездов переменного тока с помощью управляемых индивидуальных емкостных симметрирующих устройств дискретного действия. Разработана структура симметрирующих устройства для обеспечения питания вспомогательных машин электропоезда ЕР9М, который бы позволил поддерживать допустимое значение коэффициента несимметрии напряжения в условиях реальной эксплуатации, а также разработана методика определения параметров симметрирующих элементов названного устройства.

В ходе исследования установлено, что для обеспечения полного симметрирования напряжения при коэффициенте несимметрии 0,02..0,14 в цепях питания вспомогательных машин потребная емкость конденсаторных батарей должна составлять 50 ... 1900 мкФ.

Ключевые слова: вспомогательные машины, электропоезд переменного тока, симметрирование системы линейных напряжений, симметрирующее устройство.

Внутренний рецензент *Муха А. Н.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 629.423.064.5:621.3.025

O.Yu. BALIICHUK (DNURT)

Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 373-15-47, e-mail: baliichukaleksei@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-0119-1446

THEORETICAL BACKGROUND OF BALANCING SUPPLY VOLTAGE AND JUSTIFICATION OF STRUCTURE OF SYMMETRICAL UNIT FOR POWER SUPPLY OF AUXILIARY MOTORS OF ELECTRIC TRAINS ER9M

The power supply voltage of auxiliary machines of multiple-unit train ER9M series is characterized by the considerable voltage asymmetry, especially in condition which differ from nominal. Emerging with additional overheating of the stator windings of auxiliary machines cause damage to their insulation and premature failure.

Was made the analysis of the known methods of balancing the system of line voltages in order to find those that may be apply in the system of auxiliary motors of AC electric multiple-unit train. Was shown the possibility of balancing electric system AC line voltage of auxiliary machines by means of individual controlled capacitive units discret action. Was developed the structure of the capacitor units to provide power supply to auxiliary electric machines of multiple-unit train ER9M series, which would allow to maintain the allowable voltage unbalance factor of importance in a real operation, and was developed the method of determining the parameters of balancing elements of the named device.

The study found that the required capacity of the capacitor banks must be 50 ... 1900 uF for full voltage balancing with the unbalance coefficient 2...14 percent in the supply circuits of auxiliary machines.

Keywords: auxiliary machine, AC electric multiple-unit train, balancing the system of line voltages, symmetrical unit.

Internal reviewer *Mukha A. M.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

М. О. КОСТІН (ДНУЗТ), А. В. НІКІТЕНКО (ВАРШАВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ)

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, к. 238, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна, тел.: +380563731537, e-mail: nkoston@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0856-6397>

Інститут електричних машин, Варшавський політехнічний університет, пл. Політехніки, 1, к. 246, м. Варшава, 00661, Польща, тел.: +48222347435, факс: +48226299817, e-mail: anatolij.nikitenko@ee.pw.edu.pl, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6426-5097>

КОЕФІЦІЄНТИ ПОТУЖНОСТЕЙ РЕКУПЕРУЮЧОГО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Ця робота є продовженням і розвитком досліджень [1, 2] по оцінці впливу режимів рекуперативного гальмування (РГ) електрорухомого складу (ЕРС) системи електротяги постійного струму на якість енергії рекуперації та енергетичні показники ЕРС.

Електроенергетична ефективність режимів РГ ЕРС постійного струму повинна оцінюватись не лише за об'ємом і станом використання рекуперативної електроенергії, але й за енергетичними показниками (коефіцієнтом потужності λ і коефіцієнтом реактивної потужності $\text{tg}\varphi$) ЕПС як джерела електроенергії, від якого залежить її якість. І в той же час ці показники залишаються майже не вивченими, не дивлячись на те, що процеси РГ застосовуються здавна, майже з часів початку впровадження системи електричної тяги. Імовірно, це пов'язано з думкою, що, оскільки тягові електродвигуни ЕРС є машинами постійного струму, то і генеровані в режимах РГ напруга і струм є теж постійними, а отже $\lambda = 1$ і $\text{tg}\varphi = 0$. Насправді, рекуперовані і напруга $U(t)$, і струм $I(t)$ являються змінними, навіть різкозмінними, в часі поїздки ЕРС величинами. Більш того, вони мають випадковий характер (рис.1), обумовлений технологічними імовірнісними факторами: масою і швидкістю руху поїзда; профілем залізничної колії; режимом ведення поїзда (кваліфікацією машиніста) тощо.

Стохастичний характер генерованих $U(t)$, $I(t)$ не дозволяє використовувати відомі в теоретичній електротехніці класичні вирази для визначення потужностей, а отже і коефіцієнтів λ і $\text{tg}\varphi$. Особливо це стосується реактивної потужності, відносно поняття і формул розрахунку якої до цього часу продовжуються наукові дискусії. В [3] запропоновано метод кореляційних функцій для визначення потужностей,

але метод базується на теорії стаціонарних ергодичних випадкових процесів. В існуючих закордонних публікаціях, зокрема в [4-6], означена проблема розв'язується, виходячи з детермінованого характеру зміни напруг і струмів, отриманих до того ж в тягових режимах ЕРС. В [7] запропоновано кореляційно-дисперсійний метод визначення складових повної потужності, однак вихідні вирази дещо складні. Тому у подальшому, у цій роботі, скористаємося зазначеним методом для визначення λ і $\text{tg}\varphi$, дещо спростивши результуючі формули.

Заголовок розділу

Існуюча на сьогоднішній день і яку найчастіше застосовують, в тому числі і в електричних колах систем тяги, традиційна класична система критеріїв ефективності електроенергетичних процесів включає в себе наступні показники якості енергопроцесів [8]: коефіцієнт зсуву фаз основної гармоніки струму відносно основної гармоніки напруги ($\cos\varphi_{(1)}$); коефіцієнт спотворення форми струму по відношенню до форми напруги (γ); коефіцієнт несиметрії навантаження по фазах ($K_{\text{нс}}$); коефіцієнт нерівномірності споживання електроенергії ($K_{\text{нр}}$).

Ці коефіцієнти, як і енергетичні показники, базуються на співвідношеннях потужностей (енергетичних характеристиках): активній, реактивній, спотворення, несиметрії нерівномірності та повній. Зазначені коефіцієнти визначають через ці потужності, як складові повної потужності, а загальним показником в цій системі являється коефіцієнт потужності (пристрою, системи) λ , який об'єднує всі локальні коефіцієнти за виразом:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos\varphi_1 \gamma K_{\text{нс}} K_{\text{нр}}. \quad (1)$$

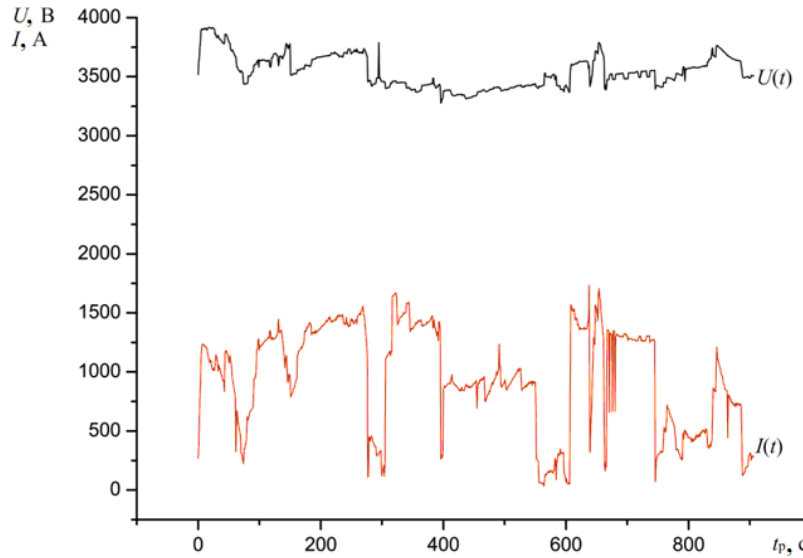


Рис. 1. Реєстрограми напруги на струмоприймачі $U(t)$ та струму $I(t)$ електровоза ВЛ11М6 в режимі рекуперації

У класичному розумінні стосовно ЕРС коефіцієнт потужності λ , по-перше, визначає ступінь використання повної рекуперативної потужності S . По-друге, величина λ також характеризує втрати активної потужності в силових тягових колах ЕРС. Слід зауважити, що цей коефіцієнт потужності не завжди є достатньо очевидним енергетичним показником і тому в останні 10...15 років в тяговому електропостачанні, подібно промислового, в якості звітної величини використовують коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\varphi$, який визначається як

$$\text{tg}\varphi = \frac{Q_F}{P}. \quad (2)$$

і який є більш енергетично практичним показником. Дійсно, наприклад, згідно попередніх розрахунків, при $\lambda = 0,934$ величина $\text{tg}\varphi = 0,384$, тобто, хоча λ вище нормативного і близький до 1, але споживана реактивна потужність Q_F складає майже 40% від активної, тобто порівняно велика. Якраз про це свідчить $\text{tg}\varphi$, значення якого більше норми 0,25.

Як впливає із (1) і (2), визначення коефіцієнтів λ і $\text{tg}\varphi$ можливо через знання потужностей S , P , Q_F . Остання потужність Q_F – це реактивна потужність Фризе [9], ефективність і перспективність використання якої в електричних колах несинусоїдного струму зазначається багатьма спеціалістами-електроенергетиками.

Отримаємо викази коефіцієнтів λ і $\text{tg}\varphi$, скориставшись, так званим, дисперсійним підходом, який є розвитком методу, запропонованого в [7], і який базується на тому, що, згідно [10, 11], кореляційна функція $R(t, t') = R(t, t + \tau)$

будь-якого випадкового процесу при $\tau = 0$ дорівнює дисперсійній функції $D(t)$ цього процесу. Імовірісно-статистична обробка реєстрограм $U(t)$ і $I(t)$, записаних в режимах рекуперації, дозволяє визначити кореляційні, а отже, і дисперсійні функції напруги і струму:

$$R_U(t, \tau = 0) = D_U(t) = U_{\partial}^2(t) - m_U^2(t), \quad (3)$$

$$R_I(t, \tau = 0) = D_I(t) = I_{\partial}^2(t) - m_I^2(t), \quad (4)$$

де $U_{\partial}(t)$, $m_U(t)$ та $I_{\partial}(t)$, $m_I(t)$ – функції діючих значень і математичних очікувань випадкових процесів напруги та струму.

Визначивши $U_{\partial}(t)$ і $I_{\partial}(t)$ із (3) і (4), знаходимо функціональну залежність повної потужності:

$$S(t) = U_{\partial}(t)I_{\partial}(t) = \sqrt{\left[D_U(t) + m_U^2(t) \right] \times \left[D_I(t) + m_I^2(t) \right]}. \quad (5)$$

За аналогією, взаємну кореляційну функцію процесів $U(t)$ і $I(t)$ можна записати як

$$R_{UI}(t) = P(t) - m_U(t)m_I(t), \quad (6)$$

звідки функція активної потужності:

$$P(t) = R_{UI}(t) + m_U(t)m_I(t). \quad (7)$$

Враховуючи відомий вираз реактивної потужності за Фризе

$$Q_F(t) = \sqrt{S^2(t) - P^2(t)} \quad (8)$$

та вирази (1), (2), (5) та (7), знаходимо шукані вирази коефіцієнтів λ і $tg\varphi$ у вигляді:

$$\lambda(t) = \frac{R_{UI}(t) + m_U(t)m_I(t)}{\sqrt{[D_U(t) + m_U^2(t)][D_I(t) + m_I^2(t)]}}, \quad (9)$$

$$(tg\varphi)(t) = \frac{\sqrt{\left[\begin{aligned} &D_U(t) + m_U^2(t) \times \\ &\times [D_I(t) + m_I^2(t)] - \\ &- [R_{UI}(t, \tau=0) + \\ &+ m_U(t)m_I(t)]^2 \end{aligned} \right]}}{R_{UI}(t) + m_U(t)m_I(t)}. \quad (10)$$

Результати та аналіз чисельних розрахунків

Використовуючи отримані вище вирази та статистичний матеріал, приведений в [12, 13], були виконані чисельні розрахунки коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ електровозів ВЛ 11М 6 і ВЛ 8, а також електропоїзда ЕПЛ2Т в режимах рекуперативного гальмування при їх експлуатації на ділянках Придніпровської залізниці. Величини λ і $tg\varphi$ розраховували як середні значення за термін часу t_p фази рекуперативного гальмування.

Як випливає із рис.2-4, часові за кожну поїзду залежності $\lambda(t)$ і $tg\varphi(t)$ мають різкозмінний характер своєї поведінки, особливо це стосується електровозів. В різні фази РГ коефіцієнти мають різні значення, які суттєво випадково відрізняються одне від одного. Тим самим, часові залежності $\lambda(t)$ і $(tg\varphi)(t)$ являються собою випадкові процеси, по одній реалізації яких представлено на рис.2-4. В більшості фаз рекуперації коефіцієнт потужності λ менше нормативного значення 0,92...0,95, а коефіцієнт реактивної потужності перевищує нормативну величину 0,25.

Статистичні розподілення випадкових величин $\lambda(t)$ і $tg\varphi(t)$ суттєво відрізняються одне від одного. Закон розподілення значень $tg\varphi(t)$ для усіх досліджених типів ЕРС, близький до закону Гаусса з коефіцієнтом асиметрії $A_s = -0,18...+0,357$ і ексцесом $E_x = -1,0...+0,154$ (рис.5).

В той же час, розподілення λ асиметричні, не гауссові, скошені в бік більших значень, мають від'ємний $A_s = -1,35...-0,4$ і $E_x = -1,02...+1,42$ (рис.6).

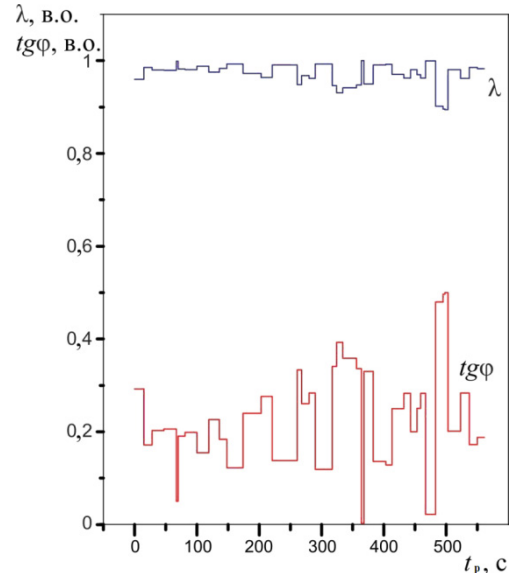


Рис. 2. Часові залежності коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ електровозів ВЛ 11М 6 в режимі рекуперативного гальмування

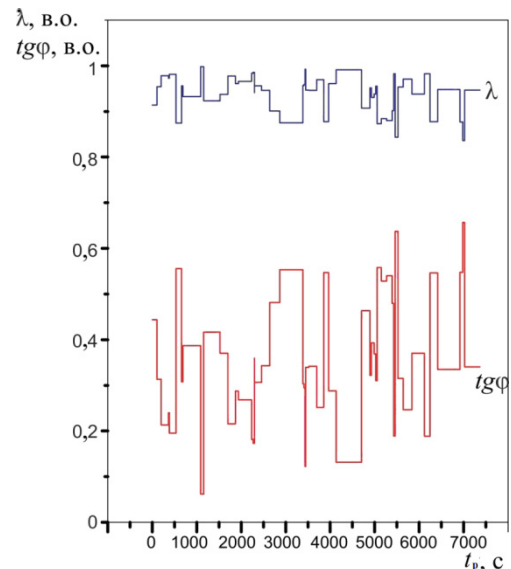


Рис. 3. Часові залежності коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ електровозів ВЛ 8 в режимі рекуперативного гальмування

Тому в цій роботі розподілення значень λ вирівнювали асиметричним нормальним законом з дисперсійною функцією σ_λ^2 [14]:

$$f(\lambda) = \frac{\sigma_\lambda^2}{\sqrt{2\pi\sigma_\lambda}} \exp\left[-\frac{(\lambda - m_\lambda)^2}{2\sigma_\lambda^2}\right],$$

де

$$\sigma_\lambda^2 = 1 - E_x - A_s \left(\frac{\lambda - m_\lambda}{\sigma_\lambda} \right) - 2E_x \left(\frac{\lambda - m_\lambda}{\sigma_\lambda} \right)^2 + \frac{A_s}{3} \left(\frac{\lambda - m_\lambda}{\sigma_\lambda} \right)^3 + \frac{E_x}{3} \left(\frac{\lambda - m_\lambda}{\sigma_\lambda} \right)^3.$$

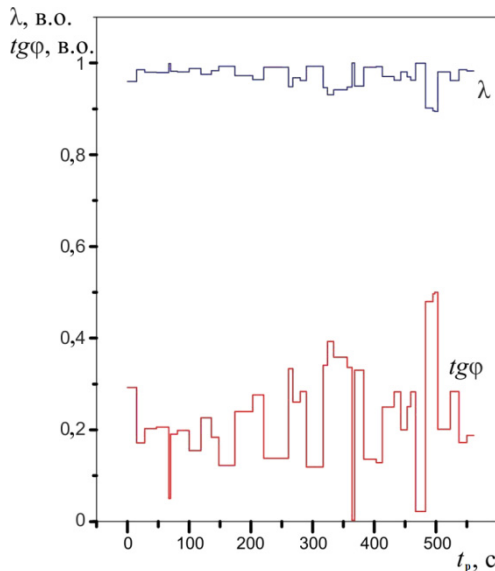


Рис. 4. Часові залежності коефіцієнта потужності λ і коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ електровозів ЕПЛ2Т в режимі рекуперативного гальмування

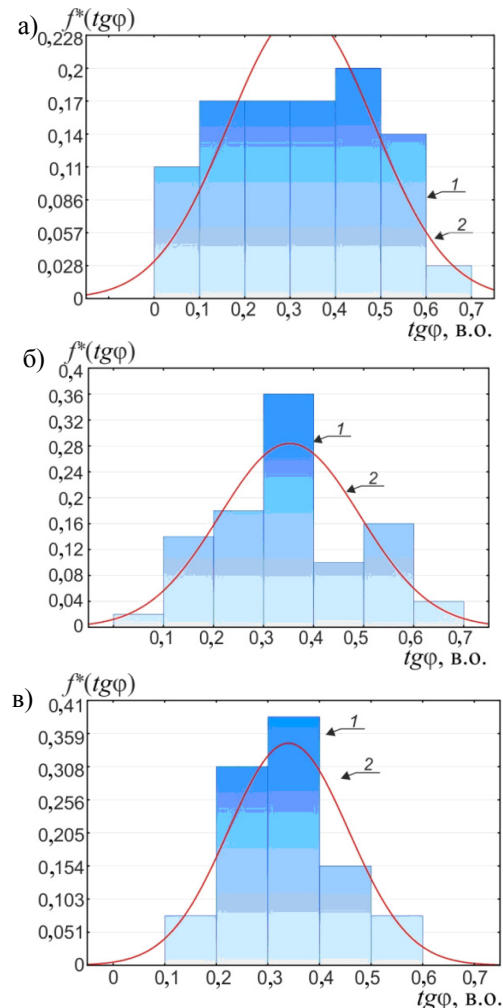


Рис. 5. Гістограма (1) і теоретичне розподілення (2) коефіцієнта реактивної потужності $tg\varphi$ в режимі рекуперативного гальмування: а) електровоза ВЛ 11М 6; б) електровоза ВЛ 8; в) електропоїзда ЕПЛ2Т

Як випливає із вигляду гістограм, розкиди $\lambda(t)$ і $(tg\varphi)(t)$ значні: для λ – від 0,8 до 0,98; для $tg\varphi$ – від 0,05 до 0,7. При цьому в певні фази РГ значення λ досягають значення, близького 1, а $tg\varphi = 0,05 \dots 0,1$. Тобто, в певні фази РГ генерується якісна електроенергія (якщо оцінювати її за коефіцієнтом λ). Однак, аналіз параметрів розподілень λ і $tg\varphi$ підтверджує думку, що λ не зовсім «точно» характеризує «якість» енергетичних процесів. Дійсно, це випливає із порівняння математичних очікувань і середньоквадратичних відхилень λ і $tg\varphi$ для кожного типу ЕРС. А саме, для ВЛ11М6: $m_\lambda = 0,946$; $\sigma_\lambda = 0,042$, тобто, виходячи із λ , нормативне значення виконується, а в той же час $m_{tg\varphi} = 0,323$; $\sigma_{tg\varphi} = 0,158$, тобто, по $tg\varphi$ норматив не дотримується і розкид вище. Аналогічно, для ВЛ 8 маємо: $m_\lambda = 0,946$ (вище норми), а $m_{tg\varphi} = 0,323$ (норма не дотримується).

За аналогією з режимом тяги можна зробити висновок, що в режимах рекуперації $\lambda < 1$, а $tg\varphi > 0$ за рахунок реактивної потужності (Фризе), а остання, певно, обумовлена двома складовими: потужністю накопичення в реактивних елементах силового тягового кола електровоза і потужністю викривлення. Перша має місце внаслідок наявності нелінійних індуктивностей тягових двигунів ЕРС, а друга – внаслідок викривлення струму рекуперації у порівнянні з формою напруги на струмоприймачі в режимі рекуперативного гальмування.

Висновки

1. Класичні методи теоретичної електротехніки не застосовні для оцінки в режимах рекуперативного гальмування енергетичних показників підсистем системи електротяги, необхідна розробка спеціальних методів, що базуються на кореляційній теорії випадкових процесів.

2. Часові залежності коефіцієнту потужності λ і коефіцієнту реактивної потужності $tg\varphi$ являють собою стохастичні процеси, стаціонарні в фазах рекуперації і нестаціонарні на протязі терміну часу всієї певної поїздки з поїздом.

3. Статистичні розподілення випадкової величини $tg\varphi$ для усіх досліджених типів ЕРС являють собою закон, що близький до закону Гауса, а розподілення коефіцієнта λ – асиметричний нормальний закон з дисперсійною функцією.

4. Середньоквадратичні відхилення величин λ і $tg\varphi$ значні і тому у більшості фаз рекупера-

тивного гальмування значення коефіцієнта λ помітно менше нормативних величин 0,92...0,95, а значення $tg\varphi$ – значно перевищують допустиму величину 0,25, тим самим підк-

реслюючи той факт, що під час рекуперативного гальмування ЕРС генерується електроенергія низької якості, що спричинює її додаткові втрати в елементах системи електричної тяги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Костін М. О. Вплив рекуперації та вибігу електрорухомого складу на його енергетичні показники / М. О. Костін, О. І. Саблін, А. В. Нікітенко // *Науковий журнал «Електрифікація транспорту»* – Д. : Вид-во ДНУЗТ, 2011. – №2. – С. 44-46.
2. Костін М. О. Якість електричної енергії, рекуперованої електровозами ВЛ11М6 і ВЛ11М / М. О. Костін, А. М. Муха, А. В. Нікітенко // *Науковий журнал «Електрифікація транспорту»* – Д. : Вид-во ДНУЗТ, 2015. – №10. – С. 108-116.
3. Костін М. О. Методи визначення складових повної потужності в системах електричної тяги / М. О. Костін, А. В. Петров // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «ПСЕ-2011»*, 2011. – Вип. 4.3. – С. 53-59.
4. Szelağ A. Effectiveness and energy saving aspects in modernization process of tram power supply system / A. Szelağ, T. Maciołek, Z. Dążek, M. Patoka // *Pojazdy Szynowe*, 2011. – Vol. 3. – P. 34-42.
5. J.M. (Jan) van Gigch, G. (Gert-Jan) van Alphen AC traction power supply design and EMC verification / J.M. (Jan) van Gigch, G. (Gert-Jan) van Alphen // *Materiały konferencyjne. 6 międzynarodowa konferencja naukowa «Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku (25-27 września 2003)»*, Warszawa, Polska, 2003. – P. 1-6.
6. Krocak M. Measurements of electric energy parameters using PC-programmed power analyzer/ M. Krocak // *Materiały konferencyjne. 6 międzynarodowa konferencja naukowa «Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku (25-27 września 2003)»*, Warszawa, Polska, 2003. – P. 118-121.
7. Нікітенко А. В. Кореляційно-дисперсійний метод визначення складових повної потужності в пристроях електричного транспорту / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // *“Наука та прогрес транспорту” Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені ак. В. Лазаряна*. – Д. : Вид-во ДНУЗТ, 2013. – В. 2(44). – С. 64-75.
8. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М. : Энергия, 1978. – 320 с.
9. Fryze S. Wirk-, build- und scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nicht sinsformigen verfä von strom und spanning/ S. Fryze // *ETZ*, Germany, 1932, No 25, pp. 596-599; No 26, pp. 625-627; No 29, pp. 700-702.
10. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. – М. : Гостехиздат, 1957. – 659 с.
11. Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций. – М. : Наука, 1968. – 463 с.
12. Kostin M. Statistics and probability analysis of voltage on the pantograph of DC electric locomotive in

REFERENCES

1. Kostin M. O. Vplyv rekuperatsii ta vybihu elektrorukhomoho skladu na yoho enerhetychni pokaznyky [Influence of recuperation and running-out of electric rolling stock on its energy indices] / M. O. Kostin, O. I. Sablin, A. V. Nikitenko // *Naukovyi zhurnal «Elektryfikatsiia transportu»* [Scientific journal «Electrification of transport»] – D. : Pub. dep. of DNURT, 2011. – №2. – P. 44-46.
2. Kostin M. O. Yakist elektrychnoi enerhii, rekuperovanoi elektrovozamy VL11M6 i VL11M [The quality of electric energy recuperated by locomotives VL11M6 and VL11M] / M. O. Kostin, A. M. Mukha, A. V. Nikitenko // *Naukovyi zhurnal «Elektryfikatsiia transportu»* [Scientific journal «Electrification of transport»] – D. : Pub. dep. of DNURT, 2015. – №10. – P. 108-116.
3. Kostin M. O. Metody vyznachennia skladovykh povnoi potuzhnosti v systemakh elektrychnoi tiahы [Methods for estimation of the total power components in the electric traction systems] / M. O. Kostin, A. V. Petrov // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk «PSE-2011»* [Technical Electrodynamics. Thematic Volume «PSE-2011»], 2011. – V. 4.3. – P. 53-59.
4. Szelağ A. Effectiveness and energy saving aspects in modernization process of tram power supply system / A. Szelağ, T. Maciołek, Z. Dążek, M. Patoka // *Pojazdy Szynowe*, 2011. – Vol. 3. – P. 34-42.
5. J.M. (Jan) van Gigch, G. (Gert-Jan) van Alphen AC traction power supply design and EMC verification / J.M. (Jan) van Gigch, G. (Gert-Jan) van Alphen // *Materiały konferencyjne. 6 międzynarodowa konferencja naukowa «Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku (25-27 września 2003)»*, Warszawa, Polska, 2003. – P. 1-6.
6. Krocak M. Measurements of electric energy parameters using PC-programmed power analyzer/ M. Krocak // *Materiały konferencyjne. 6 międzynarodowa konferencja naukowa «Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku (25-27 września 2003)»*, Warszawa, Polska, 2003. – P. 118-121.
7. Nikitenko A. V. Koreliatsiino-dyspersiyni metod vyznachennia skladovykh povnoi potuzhnosti v prystroiah elektrychnoho transportu [The method of the correlation and dispersion defining of the total power components in the electric transport devices] / A. V. Nikitenko, M. O. Kostin. // *“Наука та прогрес транспорту” Біuletен Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені ак. В. Лазаряна* [“Science and transport progress” Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after ac. V. Lazaryan]. – D. : Pub. dep. of DNURT, 2013. – V. 2(44). – P. 64-75.
8. Maevski O. A. Energeticheskie pokazateli ventilyh preobrazovateley [Power indexes of valve inverters]. – Moscow : Energy, 1978. – 320 p.

the recuperation mode / M. Kostin, A. Nikitenko // *Przegląd Elektrotechniczny*, Warsaw, Poland, 2013. – No 2a. – P. 273-275.

13. Нікітенко А. В. Імовірнісно-статистичний і кореляційно-спектральний аналізи струму рекуперації електрорухомого складу постійного струму / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // “Наука та прогрес транспорту” Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені ак. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2014. – В. 3(51). – С. 51-64.

14. Бернштейн С. Н. *Собрание сочинений. Том IV. Теория вероятностей. Математическая статистика.* – М.: Наука, 1964. – 557 с.

Надійшла до друку 19.04.2016.

9. Fryze S. Wirk-, build- und scheinleistung in elektrischen stromkreisen min nicht sinsformigen verfaf von strom und spanning/ S. Fryze // *ETZ*, Germany, 1932, No 25, pp. 596-599; No 26, pp. 625-627; No 29, pp. 700-702.

10. Pugachev V.S. *Teoriya sluchaynykh funktsiy i eye primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya [The theory of the random functions and its using in the problems of the self-operated control systems]*. Moscow : Gostekhizdat Publ., 1957. – 659 p.

11. Sveshnikov A.A. *Prikladnyye metody teorii sluchaynykh funktsiy [The applied methods of the random functions theory]*. Moscow : Nauka Publ., 1968. – 463 p.

12. Kostin M. Statistics and probability analysis of voltage on the pantograph of DC electric locomotive in the recuperation mode / M. Kostin, A. Nikitenko // *Przegląd Elektrotechniczny*, Warsaw, Poland, 2013. – No 2a. – P. 273-275.

13. Nikitenko A. V. Imovirnisno-statystychnyi i koreliatsiino-spektralnyi analizi strumu rekuperatsii elektrorukhomoho skladu postiinoho strumu [Statistic, probabilistic, correlation and spectral analyses of regenerative braking current of DC electric rolling stock] / A. V. Nikitenko, M. O. Kostin // “*Nauka ta prohres transportu*” *Biuletyn Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni ak. V. Lazariana* [“*Science and transport progress*” *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after ac. V. Lazaryan*]. – D. : Pub. dep. of DNURT, 2014. – V. 3(51). – P. 51-64.

14. Bernshteyn S. N. *Sobranie sochineniy. Tom IV. Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika [Collected works. Volume IV. Probability theory. Mathematical statistics]*. – Moscow : Science, 1964. – 557 p.

Внутрішній рецензент Кузнецов В. Г.

Зовнішній рецензент Денисюк С. П.

Необхідність оцінки не лише якості рекуперованої електроенергії, але й енергетичних показників електрорухомого складу, як генератора цієї енергії, не дискутується. І в той же час ці показники, зокрема, коефіцієнт потужності λ і коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\phi$, залишаються не вивченими. Складність розв'язання цієї задачі стримується, насамперед, випадковим (стохастичним) характером зміни напруги і струму в режимах рекуперативного гальмування. В роботі запропоновано дисперсійний метод вивчення λ і $\text{tg}\phi$, який базується на кореляційній теорії випадкових процесів. Виконані і проаналізовані результати чисельних розрахунків коефіцієнтів λ і $\text{tg}\phi$ для електровозів ВЛ11М6 і ВЛ8, а також для електропоїзда ЕПЛ2Т в режимах їх рекуперативного гальмування на діючих ділянках Придніпровської залізниці. Встановлено, що часові залежності $\lambda(t)$ і $\text{tg}\phi(t)$ являють собою різкозмінні випадкові процеси, стаціонарні в фазах рекуперативного гальмування і нестаціонарні – за термін часу всієї поїздки з поїздом. Результати імовірнісно-статистичної обробки свідчать, що статистичні розподілення коефіцієнта $\text{tg}\phi$ близькі до закону Гаусса, а розподілення випадкової величини λ підкоряються асиметричному нормальному закону з дисперсійною функцією. Середньоквадратичні відхилення λ і $\text{tg}\phi$ значні і тому в більшості фаз рекуперативного гальмування значення λ менше нормативних величин 0,92...0,95, а значення $\text{tg}\phi$ – перевищують гранично допустиме 0,25. Аналіз параметрів статистичних розподілень λ і $\text{tg}\phi$ для усіх досліджених типів електрорухомого складу підтверджує також думку, що коефіцієнт $\text{tg}\phi$ більш «точно», ніж λ , характеризує «якість» енергетичних процесів в системі електричної тяги постійного струму.

Ключові слова: рекуперативне гальмування, коефіцієнт потужності, випадковий процес, електровоз.

УДК 629.423.1

Н. А. КОСТИН (ДНУЗТ), А. В. НИКИТЕНКО (ВАРШАВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Кафедра «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, к. 238, г. Днепропетровск, 49010, Украина, тел.: +380563731537, e-mail: nkostin@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0856-6397>

КОЭФФИЦИЕНТЫ МОЩНОСТЕЙ РЕКУПЕРИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Необходимость оценки не только качества рекуперированной электроэнергии, но и энергетических показателей электроподвижного состава, как генератора этой энергии, не дискутируется. И в то же время эти показатели, в частности, коэффициент мощности λ и коэффициент реактивной мощности $\text{tg}\varphi$, не изучены. Сложность решения этой задачи сдерживается, прежде всего, случайным (стохастическим) характером изменения напряжения и тока в режимах рекуперативного торможения. В работе предложен дисперсионный метод изучения λ и $\text{tg}\varphi$, который основан на корреляционной теории случайных процессов. Выполнены и проанализированы результаты численных расчётов коэффициентов λ и $\text{tg}\varphi$ для электровозов ВЛ11М6 и ВЛ8, а также для электропоезда ЭПЛ2Т в режимах их рекуперативного торможения на действующих участках Приднепровской железной дороги. Установлено, что временные зависимости $\lambda(t)$ и $\text{tg}\varphi(t)$ являются резкоизменяющимися случайными процессами, стационарные в фазах рекуперативного торможения и нестационарные – за период времени всей поездки с поездом. Результаты вероятностно-статистической обработки свидетельствуют, что статистические распределения коэффициента $\text{tg}\varphi$ близки к закону Гаусса, а распределения случайной величины λ подчиняются асимметричному нормальному закону с дисперсионной функцией. Среднеквадратические отклонения λ и $\text{tg}\varphi$ значительны и поэтому в большинстве фаз рекуперативного торможения значения λ меньше нормативных величин 0,92...0,95, а значения $\text{tg}\varphi$ – превышают граничное допустимое 0,25. Анализ параметров статистических распределений λ и $\text{tg}\varphi$ для всех исследуемых типов электроподвижного состава подтверждает также мысль, что коэффициент $\text{tg}\varphi$ более «точно», чем λ , характеризует «качество» энергетических процессов в системе электрической тяги постоянного тока.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, коэффициент мощности, случайный процесс, электровоз.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 629.423.1

M. O. KOSTIN (DNURT), A. V. NIKITENKO (WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY)

Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, office 238, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel.: +380563731537, e-mail: nkosten@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0856-6397>

Institute of Electrical Machines, Warsaw University of Technology, Pl. Politechniki, 1, room 246, Warsaw, 00661, Poland, tel.: +48222347435, fax: +48226299817, e-mail: anatolij.nikitenko@ee.pw.edu.pl, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6426-5097>

THE POWER COEFFICIENTS OF DC ELECTRIC ROLLING STOCK IN THE REGENERATIVE BRAKING MODE

The need to estimate not only the quality of recovered electricity, but also the energy performance of electric rolling stock, as a generator of energy, is not debated. At the same time the indexes as a power factor λ and a reactive power coefficient $\text{tg}\varphi$ are not studied enough. The complexity of this task is constrained primarily by a random (stochastic) nature of the voltage and current in the regenerative braking mode. The paper covers a dispersion method for studying λ and $\text{tg}\varphi$, which is based on the correlation theory of stochastic processes. The results of numerical calculations of λ and $\text{tg}\varphi$ are performed and analyzed for the VL11M6 and VL8 electric locomotives, as well as for the EPL2T multiple-unit train, which operate in the Prydniprovsk railway. It was established, that the time dependences of $\lambda(t)$ and $(\text{tg}\varphi)(t)$ are stochastic processes with sharply changing characteristics. These dependences have stationary character in the separate phases of regenerative braking. In case of a total time of trip they have a non-stationary character. The results of probabilistic and statistical analyses show that the statistical distributions of $\text{tg}\varphi$ are close to the Gaussian's Law. At the same time the distributions of random quantity of λ follow to a normal asymmetrical law with the dispersion function. The root-mean-square deviations of $\lambda(t)$ and $\text{tg}\varphi(t)$ have significant values, therefore the coefficients of λ are less than the normative values of 0,92...0,95 in the most phases of regenerative braking. The values of $\text{tg}\varphi$ exceed the allowable limit of 0,25. Analysis of the statistical distributions of λ and $\text{tg}\varphi$ for all types of electric rolling stock confirms an idea, that the coefficient $\text{tg}\varphi$ characterizes the "quality" of energy processes in a DC power system with greater precision than power coefficient λ .

Keywords: regenerative braking, power factor, stochastic process, electric locomotive.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

О. В. Д'ЯКОНОВ (ХНТУСГ), В. В. БОЖКО (ДП «УКРЗАЛІЗНИЧПРОЕКТ»),
І. О. ТКАЧЕНКО, В. І. Д'ЯКОНОВ (ХНУМГ)

Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка,
тел.: 066-723-00-94, ел. пошта: dyakonov_1953@mail.ru

Державне підприємство «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» ПАТ «Укрзалізниця», Харківське відділення, тел.: 099-015-32-20, ел. пошта: bozhko_vv@mail.ru

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, тел.: 099-940-57-59, 066-723-00-94, ел. пошта: tia_tpv@mail.ru, dyakonov_1953@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-7326-8161

РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕФЕКТИВНОЇ БАГАТОВАРІАНТНОЇ ГНУЧКОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ РОСЛИННИХ ТА ДЕРЕВНИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ ПІДПРИЄМСТВ ЗАЛІЗНИЦІ

Вступ

Традиційні джерела енергії (нафта, вугілля, дизельне паливо) а також зростаючі тарифи на електроенергію і опалення не задовольняють потребам залізниці. Сьогодення диктує потреби в пошуку нових, легко відновлювальних, екологічних і дешевих джерел енергії. Їх переробка в технічно зручні види палива має декілька шляхів. Одним з них є утилізація біомаси в тверді види палива.

Літературний огляд

Проблематика розвитку біоенергетики, оцінювання потенціалу виробництва та ефективності використання висвітлені в багатьох наукових працях [1-6].

Питання шляхів розвитку виробництва біопалива розглянуто в працях таких науковців, як Железна Т. А., Матвеев Ю. Б., Жовнір М. М., та ін., однак стосовно доцільності виробництва біопалив серед вчених ведеться дискусія [5, 6].

Мета статті

Створення нової гнучкої технології одержання палива з рослинних та деревних відходів для опалення приміщень тягових підстанцій або ЕЧК.

Основний матеріал дослідження

Відновлювальні джерела енергії – це сонячна, вітрова, геотермальна енергія, енергія хвиль та припливів, біомаси, газу з органічних відходів і каналізаційно-очисних станцій, біогазів, гідроенергія та вторинні енергетичні ресурси. З цього переліку важливу роль відіграє біомаса – продукти, що складаються повністю або частково з речовин рослинного походження. Біомаса вважається одним з ключових поновлюваних

енергетичних ресурсів майбутнього. Сьогодні вона забезпечує близько 14% споживання первинної енергії [6-7, 9]. Тому, використання біомаси як палива для опалення приміщень тягових підстанцій або ЕЧК при використанні твердопаливних котелень може значно підвищити енергоефективність основних господарств залізниць України, тим паче, що переробці підлягатимуть енергоресурси які з'являтимуться при виконанні робіт з видалення деревно-чагарникової рослинності, що знаходяться у смузі відводу.

Енергетичний потенціал біомаси в Україні становить понад 23 млн. т. умовного палива на рік, зокрема енергетичні культури та відходи деревини – 6,7 млн. т.; солома зернових культур – 4,6 млн. т.; інші відходи сільськогосподарських культур – 5,2 млн. т.; рідкі палива (біодизель, етанол) – 2,2 млн. т.; торф – 0,6 млн. т.; інші – 4,0 млн. т. [8]

В природному вигляді біомасу не можна використовувати – її необхідно переробляти.

Отже нами було розроблено гнучку мобільну установку [10] так як рослинні відходи доцільно переробляти прямо на місці їх утворення для економії коштів на транспортування. Бажаючи такі установки робити на базі трактора кл. 1.4-2 т. з трьома лініями переробки біомаси рис 1.

Перша лінія - виробництво дров. Друга лінія - виробництво євродров (сумішевих брикетів). Третя лінія - піролізна - виробництво газу та деревного вугілля.

Згідно поставленої задачі виробництва дров, установка оснащується модулем для поперечного різання неліквідної деревини (МПРД) та модулем для розколювання неліквідної деревини (полін) (МРД).

Друга лінія установки повинна оснащатися модулем для подрібнення (МПД) та модулем для сушіння біомаси (МСБ). Для виготовлення євродров потрібен модуль для пресування (МП). Також в процесі роботи такої установки накопичується багато тирси і гілок деревини. Повноцінна робота установки передбачає необ-

хідність використання допоміжних модулів: МЗБ - модуль змішування біомаси; МЗ - модуль зневоднення біомаси; МТ - модуль збору тирси; МЩ - модуль пакування щепи; МБ - модуль пакування брикетів; МД - модуль пакування дров; МТр - модуль транспортування; МУ - модуль управління.

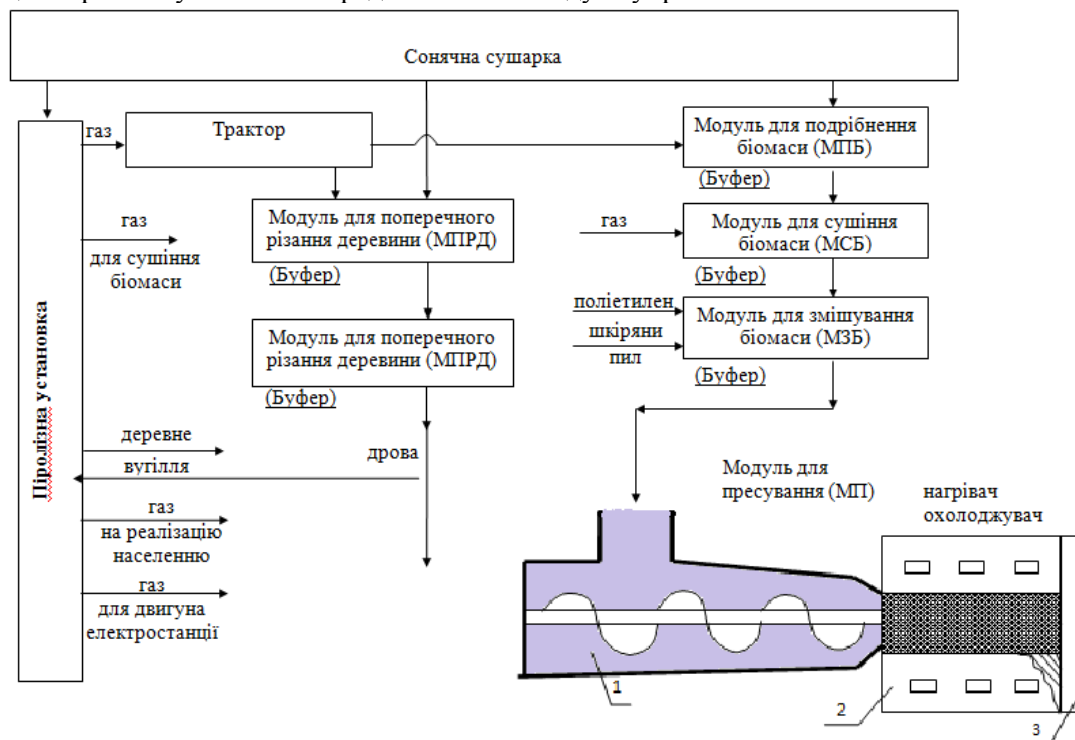


Рис. 1. Схема переробки та утилізації деревних і рослинних відходів в тверде біопаливо: 1-шнековий робочий орган для брикетування біомаси 2- охолоджувач 3- затвор

Основними стадіями виробництва паливних брикетів з рослинної та деревної сировини є її подрібнення (МПД), сушіння (МСБ), брикетування, охолодження та пакування продукції. Кожна із цих стадій є енергоємною.

Лінія обробки деревних відходів представлені на рис. 2. Всі вищезазначені модулі (основні та допоміжні) встановлюються на рамі 1, яка навішується за трьох-точковою схемою на задній начіпний пристрій трактора з маніпулятором. Модуль поперечного різання деревини (МПРД) рис 2 складається із пильного диска 2 закритого кожухом з накопичувачем тирси, рами надвигання з лотка 3 для стовбура неліквідної деревини та лотка для дріблення 4. Модуль для розколювання деревини (МРД) складається із гідроциліндра 5, повзуна 6 та ножа 7. На місце цього модуля легко монтується модуль для зневоднення біомаси при використанні гідроциліндра 5.

Маршрут виробництва дров наступний. Оператор кладе стовбур неліквідної деревини довжиною 1,5-2м на лоток 3 та подає його на пильний диск 2. Відрізаний чурак 8 під силою

тяжіння падає по направляючим 4 до модуля МРД та опиняється між повзуном 6 та ножом 7. При подачі оливи до гідроциліндра 5 повзун 6 тисне на чурак 8 та насуває його на ніж 7 для розколення. Гідроциліндр можна використовувати не тільки для розколювання деревини але і для зневоднення біомаси при застосуванні модуля зневоднення біомаси (МЗ).

Сушіння пиломатеріалів може реалізовуватися у барабанних, стрічкових сушарках та сушарках киплячого шару, які є громіздкими та потребують встановлення очисного обладнання, а це в свою чергу є енергоємним, оскільки на процес витрачається до 37 % енергозатрат технологічного процесу виробництва брикетів. Все це спонукає до пошуку шляхів до її зниження. Наш досвід свідчить про високу ефективність сонячних сушарок, з огляду на інтенсивність процесу сушіння, можливість отримання достатньо низької кінцевої вологості матеріалу і його високу якість. Також для сушіння можливо використовувати вихлопні гази ДВЗ і більш ефективно висушувати рослинні та дерев'яні відходи та знизити енерговитрати до 16%.

Енерговитратною стадією виробництва являється і брикетування або гранулювання, на реалізацію чого витрачається до 20 % загальних енергозатрат. Виготовлення дріб'язку із рослинної та деревної сировини наступна. Сировина поступає до модулю подрібнення (МП). Після подрібнення сировина поступає до модулю сушник (МС) і далі до модулю змішування. Біомасу змішують у змішувачі Z-подібною мі-

шалкою з максимальною кількістю 4,7 % відходами поліетиленової плівки та max 1,8 % шкіряного пилу. Отриману суміш необхідно підігрівати гарячим повітрям при 140-160°C протягом 2-5 хв а потім завантажити в прес-форму та зжимати під тиском 5,0-15,0 МПа протягом 0,3-0,5 хв з додатковим охолодженням, після чого утворюється готовий брикет.

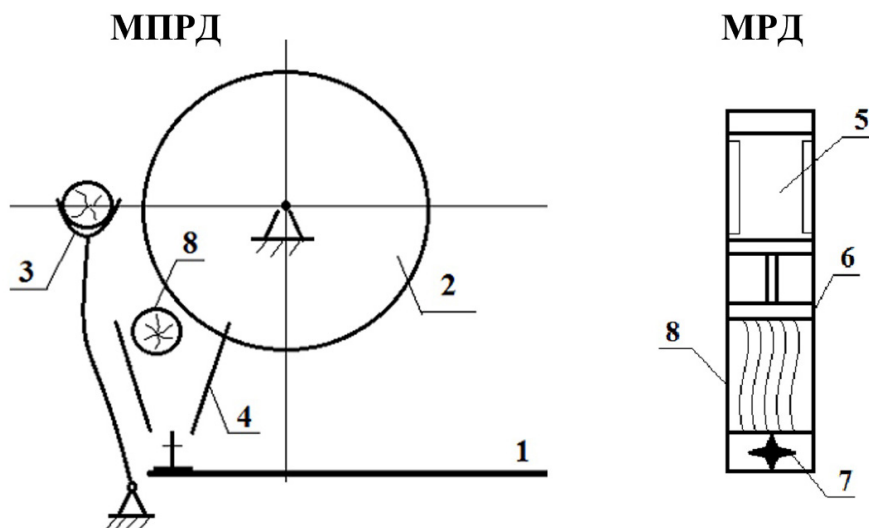


Рис. 2. Лінія обробки деревних відходів: 1 – рама транспортного засобу; 2 – пильний диск; 3 – лоток для деревини; 4 – лоток для дріблення; 5 – гідроциліндр; 6 – повзун; 7 – ніж; 8 – перероблена речовина.

Також можливий і варіант використання сухої біомаси при отриманні дерев'яного вугілля. Для цього за допомогою регульованого шнекового транспортера біомаса подається на вхід піролізної установки (третя лінія). У процесі піролізу виділяються піролізні гази, які відводяться в топку установки і згоряють, здійснюючи подальший процес піролізу. Також піролізні гази можна використовувати для живлення двигуна трактора, потреб населення а також для сушіння біомаси або живлення двигуна електростанції. Даний процес відбувається безперервно і не потребує додаткового палива. У кінцевому процесу піролізу ми отримуємо деревне вугілля. Для зменшення простою будь-якої з трьох ліній між її модулями необхідно застосовувати буферні пристрої.

Завдяки процесу піролізу з'являється можливість використання на тракторі газогенераторної установки, що підвищує енергоефективність даної системи, що в свою чергу вже підтверджено нашими дослідженнями та дослідженнями Житомирського національного агроекологічного університету [5]. Тип газогенератора вибрано – обернений. Основною причиною цього є те, що при такому типі газогенератора крекінгуються в більшості своїй смоли,

які присутні в складі деревини. Газогенераторна установка дає змогу економити дизельне паливо на рівні 60-70 %.

Висновки

1. Біомаса з деревини – одне з найефективніших джерел відновлювальної енергії, з високим потенціалом застосування, яку можна використовувати для вирішення комунально-побутових потреб (опалення приміщень тягових підстанцій за допомогою твердопаливних котелень та ін. приміщень), що може значно підвищити енергоефективність господарств залізниці.

2. На вибір системи машин для переробки біомаси з деревини суттєво впливають розмірно-якісні характеристики сировини.

3. Збільшення завантаження запропонованого устаткування на 30-40% досягається за рахунок можливості обробки в ньому різноманітних видів біомаси.

4. Переробці підлягатиме біомаса з деревини, що потребує утилізації при виконанні робіт з видалення деревно-чагарникової рослинності, що знаходяться у смузі відводу залізниць.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дубровін В.О. Біопалива (технології, машини і обладнання) / В.О. Дубровін, М.О. Корчемний, І.П. Масло// – К.: Енергетика і електрифікація, 2004. – 256 с.
2. Блюм Я.Б. Новітні технології біоенергоконверсії: Монографія / Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетуха, І.П. Григорюк // – К.: Аграр Медіа Груп, 2010. – 360 с.
3. Орськ Л.С. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития / Л.С. Орськ, Н.Т. Сорокин, В.Ф. Федоренко // -М.: Росинформ агротех, 2008. - 404 с.
4. Дубровін В.О. Біоенергія в Україні – розвиток сільських територій та можливості для окремих громад: Науково-методичні рекомендації / В.О. Дубровін, М.Д. Мельничук, Ю.Ф. Мельник // – К.: НУБіП України, 2009. – 122 с.
5. Мельничук М.Д. Альтернативна енергетика: Навч. посібник для студ. вищ. навч. закл. / М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко та ін.// – К.: Аграр Медіа Груп, 2011. – 612 с.
6. Гелетуха Г.Г. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні / Г.Г. Гелетуха, Т.А. Железня, Ю.Б. Матвеев, М.М. Жовнір // Промислова теплотехніка. – 2006. - Т. 28. - № 2. – С. 85-93.
7. Гомонай М.В. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы: монография / М.В. Гомонай. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2006. – 68 с.
8. Сарана В.В. Багатокритеріальна оцінка сучасного обладнання для виготовлення паливних гранул і брикетів з відходів переробки сільськогосподарських культур та деревини / В.В. Сарана, М.М. Гудзенко, С.М. Кухарець // Науковий вісник Національного університету біоресурсів природокористування України. Серія: техніка та енергетика. – К.: НУБіП України, 2010. – Вип. 144, ч. 3. – С. 190-198.
9. Мельничук Д.О. Короткий словник-довідник найуживаніших термінів з екології, біотехнології та біоенергетики / Д.О. Мельничук, М.Д. Мельничук, В.А. Гайченко та ін. // За ред. акад. Д.О. Мельничука. – К.: НУБіП України, 2009. – 310 с.
10. Д'яконов О.В., Д'яконов В.І., Богомоллова В.П. Пристрій для переробки неліквідної деревини на дрова. Патент №65904 МПК51. B27B5/00

Надійшла до друку 15.01.2016.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

Стаття присвячена розробці і дослідженню роботи ефективної багатоваріантної гнучкої технології утилізації рослинних та деревних відходів. Обґрунтовані та подані результати робіт зі створення конструктивно-технологічної схеми утилізації рослинних та деревних відходів шляхом розробки і впровадження у виробництво ефективних гнучких засобів. Розроблено нормативно-технічну документацію на ресурсозберігаючу технологію виробництва твердого біопалива з деревних відходів.

REFERENCES

1. Dubrovin V.O., Korchemnyi M.O., Maslo I.P. Biopalyva (tekhnologii, mashyny i obladnannia) [Biofuel (technologies, machines and equipment)] Kyiv, Enerhetyka i elektryfikatsiia, 2004. – 256 s.
2. Blum Ya.B., Heletukha H.H., Hryhoriuk I.P. Novitni tekhnologii bioenerhokonversii: Monohrafiia [The latest technology bioenergy conversion: Monograph] Kyiv, Ahrar Media Hrup, 2010. – 360 s.
3. Orsyk L.S., Sorokyn N.T., Fedorenko V.F. Byoenerhetyka: myrovoi opyt i prohozy razvytyia [Bioenergy: international experience and forecast of development] Moscow, Rosynform ahrotekh, 2008. - 404 s.
4. Dubrovin V.O., Melnychuk M.D., Melnyk Iu.F. Bioenerhiia v Ukraini – rozvytok silskykh terytorii ta mozhlyvosti dlia okremykh hromad: Naukovo-metodychni rekomendatsii [Bioenergy in Ukraine – development of rural areas and opportunities for individual communities: methodological recommendations] Kyiv, NUBiP Ukrainy, 2009. – 122 s.
5. Melnychuk M.D., Dubrovin V.O., Myronenko V.H. Alternatyvna enerhetyka: Navch. posibnyk dlia stud. vyshch. navch. zakl. / [Alternative energy: Textbook for students of higher educational institutions] Kyiv, Ahrar Media Hrup, 2011. – 612 s.
6. Heletukha H.H., Zheleznaia T.A., Matvieiev Iu.B., Zhovnir M.M. Vykorystannia mistsevykh vydiv palyva dlia vyrobnytstva enerhii v Ukraini [Using a local fuels for energy production in Ukraine] Promyslova teplotekhnika. – 2006. - T. 28. - № 2. – S. 85-93.
7. Gomonay M.V. Proizvodstvo toplivnykh briketov. Drevsnoe syire, oborudovanie, tehnologii, rezhimy raboty: monografiya [Production of fuel briquettes. Wood raw materials, equipment, technologies, modes of work: monograph] Moscow, GOU VPO MGUL, 2006. – 68 s.
8. Sarana V.V., Hudzenko M.M., Kukharets S.M. Bahatokryterialna otsinka suchasnoho obladnannia dlia vyhotovlennia palyvnykh hranul i bryketiv z vidkhodiv pererobky silskohospodarskykh kultur ta derevyny [Multi-criteria evaluation of modern equipment for the manufacture of fuel pellets and briquettes made of wastes of agricultural crops and wood] Naukovy visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seria: tekhnika ta enerhetyka. – Kyiv, NUBiP Ukrainy, 2010. – Vyp. 144, ch. 3 – S. 190-198.
9. Melnychuk D.O., Melnychuk M.D., Haichenko V.A. Korotkyi slovnyk-dovidnyk naiuzhyvanishykh terminiv z ekolohii, biotekhnolohii ta bioenerhetyky [A brief dictionary of the most commonly used terms in ecology, biotechnology and bioenergy] Kyiv, NUBiP Ukrainy, 2009. – 310 s.
10. Diakonov O.V., Diakonov V.I., Bohomolova V.P. Prystrii dlia pererobky nelikvidnoi derevyny na drova. [Device for processing non-liquid wood for firewood]. Patent №65904 МПК51. B27B5/00

Досліджено перспективи розширення використання газогенераторів для газифікації твердої паливної біомаси для забезпечення енергетичних потреб сільських господарств різної спеціалізації та виробничих потужностей, визначено основні можливості та обмеження господарства у впровадженні обладнання для газифікації біомаси.

Ключові слова: мобільний агрегат, гнучкі технології, паливні брикети, дрова, щепи, рослинні та деревинні відходи, тягові підстанції.

УДК 674.81:662.638

А. В. ДЬЯКОНОВ (ХНТУСХ), В. В. БОЖКО (ГП «УКРЗАЛИЗНИЧПРОЕКТ»),
И. А. ТКАЧЕНКО, В. И. ДЬЯКОНОВ (ХНУГХ)

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенка, тел.: 066-723-00-94, эл. почта: dyakonov_1953@mail.ru

Государственное предприятие «Проектно-изыскательский институт железнодорожного транспорта ПАТ «Укрзализныця», Харьковское отделение, тел.: 099-015-32-20, эл. почта: bozhko_vv@mail.ru

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, тел.: 099-940-57-59, 066-723-00-94, эл. почта: tia_tpv@mail.ru, dyakonov_1953@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-7326-8161

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭФФЕКТИВНОЙ МНОГОВАРИАНТНОЙ ГИБКОЙ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ И ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Статья посвящена разработке и исследованию работы эффективной многовариантной гибкой технологии утилизации растительных и древесных отходов. Обоснованы и представлены результаты работ по созданию конструктивно-технологической схемы утилизации растительных и древесных отходов путем разработки и внедрения в производство эффективных гибких средств. Разработана нормативно-техническая документация на ресурсосберегающую технологию производства твердого биотоплива из древесных отходов.

Исследованы перспективы расширения использования газогенераторов для газификации твердой топливной биомассы для обеспечения энергетических потребностей сельских хозяйств различной специализации и производственных мощностей, определены основные возможности и ограничения хозяйства во внедрении оборудования для газификации биомассы.

Ключевые слова: мобильный агрегат, гибкие технологии, топливные брикеты, дрова, щепи, растительные и древесные отходы, тяговые подстанции.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 674.81:662.638

O. V. DYAKONOV (KNTUA), V. V. BOZHKO (UKRZALIZNYCHPROEKT),
I. O. TKACHENKO, V. I. DYAKONOV (KNUME)

Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasilenko, tel.: 066-723-00-94, e-mail: dyakonov_1953@mail.ru

The State Enterprise «Design and Research Institute of Railway Transport», Kharkov department, tel.: 099-015-32-20, e-mail: bozhko_vv@mail.ru

Kharkiv National University of Municipal Economy, tel.: 099-940-57-59, 066-723-00-94, e-mail: tia_tpv@mail.ru, dyakonov_1953@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-7326-8161

RESEARCH AND DEVELOPMENT WORK EFFICIENT UTILIZATION MULTIPLE FLEXIBLE TECHNOLOGY OF PLANT AND WOOD WASTE FOR ENTERPRISES OF RAILWAYS

The article is devoted to the development and research of effective multivariate flexible technologies for the utilization of plant and wood waste. It justifies and presents the results of works on creation of constructive-technological scheme of disposal of plant and wood waste through the development and introduction into production of effective flexible funds. Developed normative - technical documentation on resource-saving technology of production of solid biofuels from wood waste.

Investigates the prospects of extending the use of the gasifier for gasification of solid biomass fuel to meet the energy needs of the rural farms of different specialization and production capacity, identifies the main opportunities and constraints of agriculture in the implementation of equipment for biomass gasification.

Keywords: mobile unit, flexible technology, briquettes, firewood, wood chips, plant and wood waste, traction substations.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Lezhnuk P. D.*

© Д'яконов О. В. та ін., 2016

А. Ю. ПАПАХОВ, Н. А. ЛОГВИНОВА (ДНУЖТ)

Кафедра «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел.: + 38(067) 524-43-22, эл. почта: papahov0362@mail.ru, nata4ka@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-2357-8158, orcid.org/0000-0002-0730-247X

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПЛАНА ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОГРУППНЫХ СКВОЗНЫХ ПОЕЗДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ МНОЖЕСТВ

Постановка проблемы

Одним из основных документов, регламентирующих работу железной дороги является порядок направления вагонопотоков по сети или план формирования грузовых поездов (ПФП).

Методика расчета ПФП постоянно изменялась и совершенствовалась начиная с 60-х годов прошлого века, когда на железнодорожном транспорте началось широкое применения вычислительной техники.

В 1970-е гг. в ГВЦ МПС появляются разработки в рамках системы АСОВ (автоматизированная система организации вагонопотоков) и прежде всего программа расчета плана формирования одногруппных поездов по методике [1], основанная на методе улучшения плана.

В 1990-х гг. в ГВЦ МПС создаются программные комплексы: оперативная корректировка и контроль за нарушениями плана формирования поездов; отправительская маршрутизация; программный комплекс для инженера-разработчика плана формирования поездов (дорожный и сетевой уровни) «Ведение сетевой книги ПФП»; комплекс программ формирования электронного макета книг плана формирования (дорожный и сетевые уровни) и др.

Все рассмотренные методы, кроме метода абсолютного расчета, не содержат доказательства нахождения математического оптимума. В последующем в 1980-е годы специалистами ВНИИЖТа было установлено, что план формирования одногруппных поездов относится к классу задач, называемых в дискретной математике NP-полными или NP-трудными задачами. Для задач этого класса не найдены эффективные алгоритмы отыскания оптимального решения (кроме полного перебора всех вариантов).

Поэтому и существующие, и вновь разрабатываемые методы расчета плана формирования одногруппных поездов являются приближенными.

Развитие вычислительной техники, развитие теории постановки и решения задач математи-

ческого программирования (включая линейное, нелинейное, целочисленное, динамическое программирование) привели к появлению группы новых методов расчета. Сюда относятся предложения [2] (рассмотрение плана формирования как задачи целочисленного программирования с булевыми переменными).

Отсюда следует, что с развитием вычислительной техники появляется возможность производить расчеты плана формирования грузовых поездов с использованием новых типов ЭВМ, а также необходимостью создания новой методики его расчета.

Анализ последних исследований

Наиболее совершенный из существующих методов расчета плана формирования одногруппных поездов на ЭВМ, получивший реальное практическое применение в 1970-80-е годы - метод улучшения плана [1].

Этот метод, хотя и предусматривал расчет вариантов объединения струй в поездные назначения на жестко заданных маршрутах следования потоков по сети (кружностях), по существу впервые дал практическое решение задачи для всей сети железных дорог СССР. Программа расчета находилась в промышленной эксплуатации. Расчет велся на полигоне в 285 сортировочных, участковых и крупных грузовых станций. При этом учитывались ограничения: на допустимое число формируемых назначений одногруппных поездов по каждой станции, а для двусторонних сортировочных станций - по каждой сортировочной системе.

Однако в методике не учитывались: ограничения по перерабатывающей способности станций; нелинейное изменение затрат по станциям с ростом объемов перерабатываемого вагонопотока; двукратная переработка вагонов углового потока на двусторонних сортировочных станциях; необходимость выделения двух или трех путей для накопления составов поездов мощных назначений, особенно на станциях

без парков отправления, имеющих сортировочно-отправочные пути.

В последнее десятилетие в связи с изменением экономических условий функционирования железных дорог много внимания уделяется выбору критерия оценки оптимальности плана формирования поездов.

Основным критерием в расчетах по оценке оптимальности вариантов плана формирования однопутных поездов приняты расходы, связанные с накоплением составов по назначениям и переработкой вагонов на станциях, выраженные в приведенных вагоно-часах.

К последним работам в данной области относятся исследования ПГУПС - предложения [3] по оценке вариантов плана формирования поездов по нескольким натуральным критериям.

Распространенный критерий оптимизации плана формирования поездов - минимум затрат на накопление вагонов и их переработку - отражает лишь небольшую часть фактических затрат, связанных с перевозочным процессом. Критерий оптимизации плана должен быть тесно связан прежде всего с работой локомотивов, использованием путевого развития станций и участков. Неоптимальность плана формирования вызывает большие потери, к которым также можно отнести нереализованные возможности повышения скорости продвижения вагонопотоков (включая затраты маневровых средств и порчу вагонов из-за многочисленных их переработок).

Необходимо отметить, что современные принципы транспортного обслуживания диктуют повышенные требования практически ко всем элементам технологии организации вагонопотоков в поезда - информационному обеспечению, нормативной базе и методикам расчетов, функциям управления и контроля, но прежде всего - к критериям оценки плана формирования поездов.

Целью данной работы является разработка математической модели и вычислительных методов организации вагонопотоков в грузовые поезда на основании векторной оптимизации с целью сокращения вагоно-часов накопления составов поездов на технических станциях.

Основной задачей исследования есть организация и распределение вагонопотоков в однопутные сквозные поезда на технических станциях с минимальными затратами времени на их накопление.

Изложение основного материала

Принимаем основные допущения:

1. Сеть железных дорог моделируется графом $G(V, E)$ где V - перечень вершин графа

(станции сети), E - перечень ребер графа (участка между станциями).

2. Заданы вагонопотоки N_{ij} , где i - номер станции зарождения потока, j - номер станции его погашения.

3. Задачи маршрута S_{ij} следования вагонопотока N_{ij} . Маршрут S_{ij} задается как перечень вершин графа (станций) следования, т.е. $S_{ij} = [i, k_1, k_2, \dots, k_e, j]$ - элементарный путь без самопересечений. Если S_{ij} содержит станцию K_m , то на этой станции вагонопоток может быть переработан.

4. Для каждого участка e_{ij} (дуги графа) задана величина $(cm)_{ij}$, где c - параметр накопления, m - состав поезда. Другими словами величина $(cm)_{ij}$ - затрата на накопление вагонов на одно формируемое назначение по направлению e_{ij} .

Замечание. Величины $(cm)_{ij}$ задаются с учетом периода (сутки, месяц), по которому заданы вагонопотоки N_{ij} .

Для каждого участка (ребра графа) задана величина $T_{эки}$ - экономия от проследования одного вагона, проходящего по e_{ij} через станцию i без переработки.

Для каждой станции i задано число путей $n_i^ч$ в четном парке и число путей $n_i^н$ в нечетном парке.

Для каждого участка e_{ij} задан признак формирования $\gamma_{ij} = 0$ в четном парке или $\gamma_{ij} = 1$ в нечетном парке.

Заданы обязательные и запрещенные назначения плана формирования однопутных поездов. Считаем, что все участковые назначения являются обязательными.

Вариант плана формирования однопутных поездов характеризуется следующими величинами:

а) ζ_{ij} - равно единице, если план формирования содержит назначение (i, j) и нулю в противном случае.

б) ξ - равно единице, если вагонопоток включается в назначение (i, j) и нулю - в противном случае.

Вагонопоток N_{em} может быть включен в назначение (i, j) , если $\zeta_{ij} = 1$ и маршрут S_{ij}

является отрезком маршрута S_{em} или совпадает с ним.

Индексацию маршрута следования вагонопотока N приведено на рис. 1.



Рис.1. Индексация маршрута следования вагонопотока

$$S_{ij} \in S_{em}$$

Для каждого ненулевого вагонопотока [1] N_{em} вводит величины ξ_{ij}^{lm} , которые должны определены так, что назначения (i, j) , для которых $\xi_{ij}^{lm} = 1$ образуют последовательность $(i, k), (k_1, k_2) \dots (k_u, j)$, которую называют путем по назначениям.

Если вагонопоток N_{em} включается в назначения $(i, k), (k_1, k_2) \dots (k_u, j)$, то вагонопоток подвергается переработке на станциях $k_1, k_2, \dots, k_u$.

При этом вводит условие непрерывного потока N_{em} в виде

$$\sum_{j=1}^N (\xi_{ij}^{lm} - \xi_{ji}^{lm}) = \begin{cases} 1, & \text{если } i=1; \\ -1, & \text{если } i=m; \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

в) Если назначение (i, j) включено в план формирования, то вводится понятие мощности назначения n_{ij} , определяемое по формуле:

$$n_{ij} = \sum_{l,m=1}^N N_{lm} \xi_{ij}^{lm}.$$

г) Проведенные затраты вагоночасов на накопление по станции i определяется так

$$\sum_{j=1}^N (n_{ij} - N_{ij}) T_{ij},$$

где $T_{ij} = T_{эк\ i,j}$.

е) $\sum NT$ - суммарные проведенные затраты вагоночасов на накопление и переработку по заданному варианту плана формирования одногруппных поездов определяется по формуле:

$$\sum NT = \sum_{i,j=1}^N \left\{ [cm]_{ij} \xi_{ij} + (n_{ij} - N_{ij}) T_{ij} \right\}.$$

Далее формируется задача:

$$C = \sum_{i,j=1}^N \left\{ [cm]_{ij} \xi_{ij} + n_{ij} T_{ij} \right\} \rightarrow \min \quad (1)$$

при условиях

$$n_{ij} = \sum_{l,m=1}^N N_{lm} \xi_{ij}^{lm}, \quad i, j = \overline{1, N}; \quad (2)$$

$$\xi_{ij}^{lm} \leq \xi_{ij}, \quad i, j, l, m = \overline{1, N}, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N (\xi_{ij}^{lm} - \xi_{ji}^{lm}) = \begin{cases} 1, & \text{если } i=l; \\ -1, & \text{если } i=m; \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (4)$$

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } (i, j) \in M_o; \\ 0, & \text{если } (i, j) \in M_z; \\ 0 \text{ либо } 1 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (5)$$

где M_o - обязательные назначения;

M_z - запрещенные назначения.

$$\xi_{ij}^{lm} = \begin{cases} 0, & \text{если } S_{ij} \notin S_{lm} \\ 0 \text{ либо } 1, & \text{если } S_{ij} \in S_{lm}, \quad i, j, l, m = \overline{1, N} \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N S_{ij} \gamma_{ij} \leq n_i^H, \quad i = \overline{1, N} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^N S_{ij} (1 - \gamma_{ij}) \leq n_i^U, \quad i = \overline{1, N} \quad (8)$$

Таким образом должны быть определены S_{ij} , ξ_{ij}^{lm} по заданным вагонопотокам N_{ij} , приведенным затратам на накопление $(cm)_{ij}$ и переработку T_{ij} , количеству путей n_i^U , n_i^H и множествам M_o , M_z .

Изложенная задача (1) - (8) в математическом плане представляет собой задачу линейного программирования в булевых переменных [2, 4], которую в стандартном виде можно записать следующим образом:

$$c = \sum_{j=1}^N c_j x_j \rightarrow \min \quad (9)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i = \overline{1, m} \quad (10)$$

где N - общее число булевых переменных в постановке (1) - (8),

x_j - булевы переменные.

Существование решения задачи (9) - (10), а тем самым и задачи в виде (1) - (8) не вызывает сомнения в силу конечного числа вариантов, удовлетворяющих ограничениям (10).

Рассмотрим еще один способ представления задачи (9) - (10) [5], которая известна в математической литературе как задача о многомерном ранце.

Пусть $\mathbb{Q} = \{1, 2, \dots, N\}$, а множество $A \in \mathbb{Q}$ перечень булевых переменных равных 1, тогда (9) можно представить в виде

$$c = \sum_{j \in A} c_j \rightarrow \min, \quad (11)$$

а условия (10) принимают вид

$$G_i = \sum_{j \in A} a_{ij} - b_i \leq 0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (12)$$

Представление (11) - (12) означает, что c есть некоторая функция множества A , а ограничения G_i тоже некоторые функции множества A .

Таким образом, приходим к поиску минимума функции множества $C(A)$ при ограничениях $G_i(A) = 0$, $i = \overline{1, m}$, т.е. рассматривается задача на условный минимум в терминах функций множества [6].

Новый метод решения задачи многомерного ранца.

В целях замкнутости изложения приведем некоторые факты теории функций множества [6, 7].

В теории функций множества важным понятием является понятие меры, т.е. специальной функции множества $\mu(A)$, обладающей следующими свойствами:

свойство 1. $\mu(A) \geq 0$, для любого подмножества множества $\mathbb{Q}$;

свойство 2. Если $\mu(A) = 0$, то это возможно, когда $A = \emptyset$;

свойство 3. $\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B) - \mu(A \cap B)$;

свойство 4. Если любая последовательность множеств в B_n , $n = 1, 2, \dots$ сходится к множеству B , то имеет место

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(B_n) = \mu(B).$$

Следующим важным понятием является понятие производной функции множества по мере $\mu(A)$ на некоторой последовательности множеств B_n , $n = 1, 2, \dots$.

В математическом плане данная производная представляет собой

$$\left. \frac{dF(A)}{d\mu} \right|_{\{B_n\}} \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F(A \Delta B_n) - F(A)}{\mu(A \Delta B_n) - \mu(A)}.$$

Тогда, если множество A_* доставляет $F(A)$ минимальное значение и существует производная, то с необходимостью имеет место

$$\left. \frac{dF(A)}{d\mu} \right|_{\{B_n\} \rightarrow B \subseteq A_*} \leq 0.$$

Задача (11) - (12) является задачей на условный минимум, поэтому составляем функцию Лагранжа

$$L(A, \lambda) = \sum_{j \in A} C_j - \sum_{i=1}^m \lambda_i G_i(A) \quad (13)$$

и выписываем необходимое условие ее минимума

$$\left. \frac{dF(A_*, \lambda)}{d\mu} \right|_{\{B_n\} \rightarrow B \subseteq A_*} \frac{L(A_* \Delta B, \lambda) - L(A_*, \lambda)}{\mu(A_* \Delta B) - \mu(A_*)} \leq 0.$$

Вычислим числитель и знаменатель данной производной

$$\begin{aligned} L(A_* \Delta B, \lambda) - L(A_*, \lambda) &= \sum_{j \in A_* \Delta B} C_j - \sum_{i=1}^m \lambda_i G_i(A_* \Delta B) - \\ &- \sum_{j \in A_*} C_j + \sum_{i=1}^m \lambda_i G_i(A_*) = \\ &= \sum_{j \in A_*} C_j + \sum_{j \in B} C_j - 2 \sum_{j \in A_* \cap B} C_j - \sum_{i=1}^m \lambda_i (G_i(A_*) + \\ &+ G_i(B) - 2G_i(A_* \cap B)) - \sum_{j \in A_*} C_j + \sum_{i=1}^m \lambda_i G_i(A_*) = \\ &= - \sum_{j \in B} C_j - \sum_{i=1}^m \lambda_i (-G_i(B)) = - \sum_{j \in B} C_j + \sum_{i=1}^m \lambda_i G_i(B) \end{aligned}$$

В данном вычислении учтено, что $B \subset A_*$ и функции $G_i(A)$ являются аддитивными.

Что касается знаменателя, то получаем

$$\mu(A_* \triangle B) - \mu(A_*) = -\mu(B).$$

Таким образом, производная от функции Лагранжа равна

$$\left. \frac{dL(A_*, \lambda)}{d\mu} \right|_{\{B_n\} \rightarrow B \subset A_*} = \frac{\sum_{j \in B} C_j - \sum_{i=1}^m \lambda_i G_i(B)}{\mu(B)}.$$

И, так как, $\mu(B) > 0$, то получаем необходимое условие минимума функции Лагранжа в виде

$$\sum_{j \in B} C_j - \sum_{i=1}^m \lambda_i G_i(B) \leq 0 \quad (14)$$

Пусть множество B состоит из одного элемента множества A_* , т.е. $B = \{j\}$, тогда (14) будет следующим

$$C_j - \sum_{i=1}^m \lambda_i (a_{ij} - b_i) \leq 0.$$

Следовательно, множество A_* будет существенно зависеть от множителей Лагранжа λ_i и тогда $A_*(\lambda)$ будет равно

$$A_*(\lambda) = \left\{ j \in \mathbb{Q} : C_j - \sum_{i=1}^m \lambda_i (a_{ij} - b_i) \leq 0 \right\}.$$

По данному множеству сформируем следующее множество

$$A_{**}(\lambda) = \left\{ j \in A_*(\lambda) : G_i(A_{**}(\lambda)) \leq 0, \quad i = \overline{1, m} \right\} \quad (15)$$

Определим функцию

$$F(\lambda) = \begin{cases} \infty, & \text{если } A_{**}(\lambda) = \emptyset \\ \sum_{j \in A_{**}(\lambda)} C_j, & \text{если } A_{**}(\lambda) \neq \emptyset \end{cases} \quad (16)$$

Таким образом задача (11) – (12) сводится к поиску минимума функции $F(\lambda)$ по множителям Лагранжа $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$.

Пример. Необходимо найти такое множество $A \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$, чтобы

$$F_1(A) = \sum_{j \in A} f_1(j) \rightarrow \max$$

при условиях

$$F_2(A) = \sum_{j \in A} f_2(j) \geq m_2;$$

$$F_3(A) = \sum_{j \in A} f_3(j) \geq m_3.$$

В данном примере $n = 5$, а f_1, f_2, f_3 представляют собой

$$f_1 = [15, 7, 8, 5, 10]; \quad f_2 = [20, 5, 6, 7, 3];$$

$$f_3 = [6, 2, 2, 5, 4]$$

Выполнив перебор по множителям Лагранжа получаем

$$A = \{13\}; \quad F_1 = 23; \quad F_2 = 26; \quad F_3 = 8.$$

Для проверки выполним перебор по всем подмножествам множества $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ получаем аналогичный ответ.

Программа в среде Maple [8], реализующая данный алгоритм получает следующий результат:

$\{1, 3, 4, 5\}, \{1, 3\}, 23, 26, 8$
 $\{1, 4, 5\}, \{1\}, 15, 20, 6$
 $\{1, 2, 4, 5\}, \{1, 2\}, 22, 25, 8$
 $\{1, 5\}, \{1\}, 15, 20, 6$
 $\{1, 2, 5\}, \{1, 2\}, 22, 25, 8$
 $\{1, 3, 5\}, \{1, 3\}, 23, 26, 8$
 $\{1\}, \{1\}, 15, 20, 6$
 $\{1, 2\}, \{1, 2\}, 22, 25, 8$
 $\{1, 3\}, \{1, 3\}, 23, 26, 8$
 $\{1, 4\}, \{1\}, 15, 20, 6$
 $\{1, 2, 4\}, \{1, 2\}, 22, 25, 8$
 $\{1, 3, 4\}, \{1, 3\}, 23, 26, 8$

Выполнив перебор по множителям Лагранжа получаем:

$$A = \{1, 3\}; \quad C(1) = 23; \quad F_2 = 26; \quad F_3(A) = 8.$$

Из приведенного выше следует, что решение задачи программой в среде Maple позволяет найти оптимальное решение.

Вывод

Задачи ранцевого типа, применяемые в рациональном инвестировании, сведены к обычной оптимизации. Численная реализация показала привлекательность предложенного алгоритма.

Из приведенного выше следует, что предложен новый метод решения задач ранцевого ти-

па может быть использован при расчете плана формирования однопутных сквозных поездов и позволяет отказаться от булевых переменных

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дувалян, С. В. Разработка алгоритмов и программ расчета сетевого плана формирования поездов [Текст] /С.В. Дувалян. –М.: «Отчет по научно-исследовательской работе», ВНИИЦ – 1978. –120 с.
2. Папахов, А. Ю. Внутри дорожный план формирования поездов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. [Текст] /А.Ю Папахов//– М.: МИИТ, 1990, –140 с.
3. Осминин, А.Т. Рациональная организация вагонопотоков на основе методов многокритериальной оптимизации. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. [Текст] /А.Т. Осминин// – Самара, 2000, –261 с.
4. Папахов, О.Ю. Элементы вдосконалення методики розрахунків плану формування поїздів [Текст]/ О.Ю. Папахов, О.М. Логвінов //Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені В. Лазаряна.-2006.- №12.- С. 91 – 93.
5. Босов А. А. Функции множества и их применение [Текст] / А.А. Босов – Днепродзержинск, Изд. дом «Андрей», 2007. – 182 с.
6. Киселева, Е.М. Непрерывные задачи оптимального разбиения множеств. Теория, алгоритм, приложения [Текст]/ Е.М. Киселева, Н.З. Шап// -К.: Наукова Думка, 2005 – 564 с.
7. Ильин, В.А. Аналитическая геометрия [Текст]/В.А. Ильин, Э.Г. Позняк – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002, - 240 с.
8. Прохоров, Г.В. Пакет символьных вычислений Maple [Текст] /Г.В. Прохоров, М.А. Леденев, В.В. Колбеев//М: Компания «Пезит»,-1997.-200 с.

Поступила в печать 20.04.2016.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

Целью данной работы является разработка математической модели и вычислительных методов организации вагонопотоков в грузовые поезда на основании векторной оптимизации с целью сокращения вагоно-часов накопления составов поездов на технических станциях.

Основной задачей исследования есть организация и распределение вагонопотоков в однопутные сквозные поезда на технических станциях с минимальными затратами времени на их накопление.

Объектом исследования выступает сеть железнодорожных технических станций расчетного полигона.

Предметом исследования есть организация вагонопотоков в однопутные сквозные поезда.

Методом исследования является теория функций множества.

Научная новизна заключается в решении задачи линейного программирования в булевых переменных с помощью функций множества приводя к поиску множества мини-мизирующей функцию цели при некоторых ограничениях на элементы данного множества.

Получены необходимые условия решения задачи векторной оптимизации при расчете плана формирования однопутных сквозных поездов на полигоне выделенных станций сети.

Ключевые слова: организация вагонопотоков, модель, поезд, график движения, теория функций множества.

REFERENCES

1. Duvalyan, S. *Razrabotka algoritmov i programm rascheta setevogo plana formirovaniya poezdov* [Development of algorithms and calculation power train formation plan programs]. Moscow: "The report on the research work" VNGITS Publ., 1978. 120 p.
2. Papahov A. *Vnutridorozhnyy plan formirovaniya poezdov*. Cand. Diss. [Inside ground plan for the formation of trains. Cand. Diss.]. Moscow, 1990. 140 p.
3. Osminin, A. *Ratsional'naya organizatsiya va-gonopotokov na osnove metodov mnogokriterial'noy optimizatsii*. Dokt. Diss. [The rational organization of traffic volumes on the basis of multi-criteria optimization methods. Dokt. Diss.]. Samara, 2000. 261 p.
4. Papahov A. *Elementy vdoskonalennya metodyky rozrakhunkiv planu formuvannya poyizdiv* [Elements of improvement of methodology of calculation of the plan of formation of trains] *Visnyk Dnipropetrovs'koho natsional'noho universytetu zaliznychnoho transportu im. akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2006, no.12,- pp 91 - 93.
5. Bosov A. *Funktsii mnozhestva i ikh primenenie* [Set Functions and Their Applications]. Dnieper-Dzerzhinsk, "Andrei" Publ., 2007. 182 p.
6. Kiseleva E. *Nepreryvnye zadachi optimal'nogo razbieniya mnozhestv. Teoriya, algoritm, prilozeniya* [The continuous problems of optimal partitioning sets. Theory, Algorithms, Applications]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 2005. 564 p.
7. Ilyin, V. *Analiticheskaya geometriya* [Analytic Geometry]. Moscow, 2002. 240 p.
8. Prokhorov, G. *Paket simvol'nykh vychisleniy Maple* [Package Maple symbolic computation]. Moscow, "Pezhit" Publ., 1997. 200 p.

УДК 656.212

О. Ю. ПАПАХОВ, Н. О. ЛОГВИНОВА (ДНУЗТ)

Кафедра «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел.: +38 (067) 564-65-65, ел. пошта: papahov0362@mail.ru, nata4ka@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-2357-8158, orcid.org/0000-0002-0730-247X

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ПЛАНУ ФОРМУВАННЯ ОДНОГРУПНИХ НАСКРІЗНИХ ПОЇЗДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ МНОЖИН

Метою даної роботи є розробка математичної моделі і обчислювальних методів організації вагонопотоків в вантажні поїзди на підставі векторної оптимізації з метою скорочення вагоно-годин накопичення складів поїздів на технічних станціях.

Основною задачею дослідження є організація і розподіл вагонопотоків в одногрупні наскрізні поїзди на технічних станціях з мінімальними витратами часу на їх накопичення.

Об'єктом дослідження виступає мережа залізничних технічних станцій полігону. Предметом дослідження є організація вагонопотоків в одногрупні наскрізні поїзди. Методом дослідження є теорія функцій множин. Наукова новизна полягає у вирішенні задачі лінійного програмування в булевих змінних за допомогою функцій множин приводячи до пошуку множин мінімізує функцію мети при деяких обмеженнях на елементи даної множини.

Отримані необхідні умови розв'язання задачі векторної оптимізації при розрахунку плану формування одногрупних наскрізних поїздів на полігоні виділених станцій мережі.

Ключові слова: організація вагонопотоків, модель, поїзд, графік руху, теорія функцій множин.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 656.212

O. YU. PAKHOV, N. A. LOGVINOVA (DNURT)

Department of Management of operational work, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan 2 Str., 49010, Dnepropetrovsk, Ukraine, tel.: + 38 (067) 524-43-22, e-mail: papahov0362@mail.ru, nata4ka@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0003-2357-8158, orcid.org/0000-0002-0730-247X

THE MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE FORMATION OF SINGLE-GROUP PLAN WITH THROUGH TRAINS USING SET THEORY

The aim of this work is to develop mathematical models and computational methods of the organization of traffic volumes in the freight trains on the basis of vector option in order to reduce car-hours of accumulation trains at service stations.

The main objective of the study is the organization and distribution of traffic volumes in the single-group through the train at stations with a minimum of technical costs of times for their accumulation. The object of research is the network of railway technical stations races-even the landfill. The subject of research is the organization of traffic volumes in the single-group through the train. The method of research is the theory of multiple functions. Scientific novelty lies in solving the problem of linear programming in boo-left variables using multiple functions leading to the search for a plurality of minimizing the objective function under certain restrictions on the elements of the set.

The necessary conditions for solving the problem of vector optimization in the calculation of the plan of forming single-group cross-train on the range selected network stations.

Keywords: organization of traffic volumes, the theory of multiple functions.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Lezhnuk P. D.*

О. І. СТАСЮК, Л. Л. ГОНЧАРОВА (ДЕТУТ)

Державний економіко-технологічний університет транспорту, кафедра «Автоматизація та комп'ютерно - інтегровані технології транспорту», 03049, Київ - 49, вул. Лукашевича, 19, тел.: 050-419-38-74, 050-419-38-74, ел. пошта: X177@rambler.ru, ktarael@jandex.ru

МЕТОДИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ІННОВАЦІЙНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ БОРТОВИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ЛОКОМОТИВІВ

Постановка проблеми

Залізничний транспорт є стратегічним сектором економіки держави, який суттєво впливає на розвиток фактично всіх галузей народного господарства. Збільшення, за останні роки, маси і швидкості потягів, стимулювало суттєве збільшення струму споживання на тягу який став близьким до струму короткого замикання, що привело до погіршення надійності роботи систем електропостачання і рівня безпеки транспортних та пасажирських перевезень [1,4]. Новітні досягнення в сфері комп'ютерних і комунікаційних технологій відкрили можливість проводити, в реальному часі, віддалений моніторинг і повний контроль та діагностику як наземних мереж електропостачання так і бортових енергосистем локомотивів включаючи процедуру їх місцезнаходження. Завдяки сучасним інтелектуальним технологіям стало можливим, в процесі функціонування систем життєдіяльності, проводити та ідентифікувати ряд режимних, параметричних і структурних відхилень і дефектів в енергосистемах локомотивів. Обробляти отримані первинні оперативні дані і по необхідній сукупності комплексу діагностичних параметрів, визначати причини і місце або сектори відхилень від режимів функціонування бортових енергосистем, а також представляти дані машиністу у вигляді рекомендацій, включаючи процедури формування та передачу комп'ютерної аварійної інформації на інші рівні диспетчерського керування. Базовий принцип функціонування бортових систем пов'язаний з необхідністю узгодженого, сумісного і періодичного рішення трьох домінуючих взаємопов'язаних задач, до яких відносяться контроль і діагностика енергосистем життєдіяльності, прогнозування надійності їх роботи та визначення ресурсу функціонування і реалізація сукупності процедур оперативного керування. Не зважаючи на відносну автономність цих задач і враховуючи той факт, що ці задачі знаходяться в загальносистемній єдності та взаємозалежності між собою вони відносяться до класу негарно формалізованих і погано структурованих [1,3]. В зв'язку з

чим, використання традиційних математичних моделей і методів при рішенні взаємозв'язаних задач діагностики, прогнозування і управління не завжди приводить до бажаного позитивного результату. Розв'язання проблем ефективного рішення сукупності погано формалізованих задач може бути реалізовано за рахунок використання більш сучасних моделей, методів і функцій аналізу орієнтованих на перспективні інформаційні технології. Такий підхід базується на концепції інтелектуалізації бортових комп'ютерних технологій шляхом використання інноваційних систем віддаленого моніторингу вузлів, сегментів і систем життєдіяльності локомотива [4-8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проведений авторами і вітчизняними та зарубіжними вченими аналіз показав, що на сьогоднішній день накопичено значний досвід в сфері прийняття рішень по оперативному керуванню з використанням сучасних комп'ютерних засобів для ідентифікації суттєвих динамічних збурень і аварійних режимів. В багатьох публікаціях акцентується увага на те, що забезпечення високого рівня спостережності динаміки аномальних режимів функціонування енергосистем і, відповідно, реалізації бистрої реакції на ці явища не було досягнуто за допомогою використання традиційних підходів і засобів [2,4]. Досвід експлуатації бортових комп'ютерних обчислювачів показав, що використання перспективних комп'ютерних технологій з застосуванням методів інтелектуалізації процедур високоточного синхронізованого вимірювання первинної інформації, для проведення післяаварійного аналізу окремих чи системних явищ, суттєво розширює функціональні можливості комп'ютерного інструментарію, а також різко зменшує аварійність енергосистем, мінімізує енергоспоживання і покращує якість функціонування та тривалість безперебійної роботи мереж життєзабезпечення локомотивів. В цьому плані, практичний інтерес представляють напрямки досліджень пов'язаних з роз-

робкою математичних моделей, методів і комп'ютерно-орієнтованих алгоритмів як природний розвиток бортових залізничних систем керування. Проведення інтеграції інтелектуальних методів для організації бортових залізничних систем відкриває можливість своєчасно проводити контроль і діагностику систем життєдіяльності локомотивів, враховуючи всілякі зв'язки між подіями, що дозволяє своєчасно ідентифікувати і ілюструвати несправності та реалізувати прогноз працеспроможності, включаючи процедури оцінювання ресурс.

Відокремлення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми

Задачі дослідження методів синтезу і експлуатації комп'ютерних систем, що забезпечують інтелектуальний моніторинг динаміки стану складного, схильного до ушкодження, і в той же час дуже важливого бортового комп'ютерного обладнання рухомого складу найшла відображення в стратегії розвитку залізничного транспорту. Сучасні інноваційні технології відкривають можливість проводити, під час руху, контроль і прогноз надійності роботи локомотивного парку та передавати, в реальному часі, інформацію про технічний стан з борту локомотива в стаціонарну систему обробки інформації з використанням каналів безпроводного зв'язку. Система моніторингу, реалізована подібним образом, дозволяє не тільки автоматизувати процес управління і виконувати контроль стану локомотивів, а також постійно проводити процедуру їх реєстрування з подальшим відображенням місця знаходження. Завдяки організації спільної роботи бортових і стаціонарних комп'ютерних систем відкривається унікальна можливість формувати і накопичувати базу даних про стан всіх локомотивів залізниць за весь період їх функціонування, оперативно отримувати детальну інформацію про несправності, відслідковувати історію функціонування стану локомотивів, створювати нову комп'ютерно-орієнтовану технологію обслуговування включаючи ремонт і контроль його виконання. Самим важливим, при цьому є те, що застосування таких комп'ютерних мереж відкриває можливість, на основі отриманої багатоаспектної об'єктивної інформації про стан комплексу технологічних процесів, які протікають при роботі локомотива, реалізувати інтелектуальну обробку первинних даних і на їх базі накопичувати нові знання про функціонування систем життєдіяльності рухомого складу. В науково-технічній літературі достатньо гли-

боко досліджені питання пов'язані з формуванням нових знань, про режими функціонування енергетичних об'єктів, шляхом використання інтелектуальних технологій експертних систем які базуються на сучасних базах знань і машинному виводі нової інформації. Основою теоретичної бази організації процесів інтелектуальної обробки інформації є математичний апарат теорії нечітких множин за допомогою якого реалізується процес вводу погано формалізованої інформації. В той же час, на думку багатьох вчених, застосування нечітких множин хоч і дозволяє автоматизувати процес формалізації і вводу інформації для інтелектуальної комп'ютерної обробки, але в самому методі існує великий елемент суб'єктивізму. Тому, на нашу думку, не розв'язаними раніше частинами загальної проблеми інтелектуальної обробки інформації є те, що в літературі мало уваги приділено розробці методів визначення суттєвої глибини інформативності первинної інформації при реєстрації динаміки швидкоплинних технологічних процесів, що протікають в складних енергетичних об'єктах [8,9]. Отримані, таким чином, нові знання шляхом інтелектуальної обробки високоінформативних первинних даних відкривають абсолютно нову якість в сфері керування і передбачати, з високою ймовірністю, негативний розвиток явищ і процесів [10].

Мета роботи

Метою роботи є розробка математичних моделей і методів визначення більш глибокого рівня інформативності не детермінованих стохастичних потоків первинної інформації, що відображає процес функціонування складних енергетичних об'єктів, як основи синтезу евристичних моделей формування нових знань і теоретичної бази інтелектуалізації інноваційних комп'ютерних технологій бортових систем моніторингу локомотивів.

Основний матеріал дослідження

Завдяки бурному розвитку інтегральних технологій виготовлення надвеликих інтегральних схем, а також застосуванню зверх швидкодіючих мікропроцесорних комплектів, відкрилась можливість організації необхідної або збиткової обчислювальної потужності в будь-якому сегменті складного енергетичного об'єкту, для реалізації оптимального процесу його функціонування, шляхом синтезу обчислювальних систем чи розподілених комп'ютерних мереж. В умовах стохастичного характеру вихідних по-

токів первинної інформації, що надходить з складних динамічних систем, до яких відносяться рухомий залізничний транспорт, ефективним представляється організація паралельного недетермінованого процесу її обробки, в розподілених комп'ютерних мережах, для формування раціональних процедур керування режимами функціонування динамічних систем, включаючи діагностування і прогнозу їх працездатності та відтворення роботоспроможності. Це можливо шляхом використання сучасних математичних моделей, методів і алгоритмів з інтелектуальними властивостями, що і визначає сутність іноваційного підходу формування комп'ютерних технологій бортових систем моніторингу локомотивів. Бортові комп'ютерні системи орієнтовані на проведення, в реальному часі, моніторингу технічного стану обладнання електропотягів, дозволяють миттєво реагувати на нештатні ситуації, своєчасно виявляти і одслідковувати появу несправностей, реалізувати контроль роботоспроможності шляхом обчислення комплексу показників експлуатації локомотивів та організовувати сукупність керуючих впливів включаючи формування рекомендацій і відповідної інформації. Комп'ютерні системи рухомого складу залізниць реєструють інформацію про вібрацію, температуру, тиск, швидкість руху по маршруту, динаміку напруги і струму який споживається на тягу та допоміжні електричні мережі, відслідковують положення органів керування, географічні координати локомотива, дані про стан підшипникових вузлів, пневматичної тормозної системи і ряд інших параметрів. При цьому, в процесі роботи розв'язується комплекс задач таких як: визначення технічного стану обладнання, що експлуатується; ідентифікація ймовірних причин зміни технічного стану обладнання локомотивів; визначення вузлів або сегментів обладнання, що привело до зміни технічного стану; формування аварійних сигналів при переході ключових параметрів обладнання за визначені ліміти; виявлення і оцінка ймовірного розвитку дефектів за часом; оперативний аналіз і прогноз функціонування обладнання по рівню шуму, вібрації, викидам шкідливих складових та інших екологічних характеристиках. Вся первинна інформація, після обробки, використовується для формування звітних документів та архівації у вигляді актів технічного стану як для кожного вагону так і потяга в цілому. Оброблені, відповідно бортовим алгоритмам, первинні дані виводяться на дисплей діагностичного контролера, що знаходиться в кабі-

ні локомотива, а також передаються в наземну обчислювальну мережу. В стаціонарній комп'ютерній системі проводиться більш глибока обробка інформації, в результаті чого формується сукупність документів нормативного характеру які передаються відповідальним за організацію перевезень, керівництву депо, залізниці та і іншим зацікавленим службам. До домінуючих показників, що характеризують якість функціонування локомотивів, можна віднести ряд параметрів пов'язаних з забезпеченням безпеки руху, а також мінімізації енергоспоживання. В зв'язку з цим, нові математичні моделі і комп'ютерні методи, орієнтовані на суттєве визначення інформативності із зареєстрованої первинної інформації, що відображає динамічні характеристики безпеки перевезень і енергозбереження, є основою організації бортових комп'ютерних архітектур з інтелектуальними властивостями. Такий підхід дозволяє, в процесі роботи бортового комп'ютерного комплексу, накопичувати нові знання про режими функціонування обладнання потягів і використовувати їх для покращення експлуатації, безпеки перевізного процесу, створення технологій енергозбереження і розробки більш якісного обладнання локомотивів нових поколінь. Синтез математичних моделей і методів з інтелектуальними властивостями, що відкривають можливість формувати нові знання про об'єкт, розглянемо на прикладі динаміки зміни напруги і струму, що споживається на тягу. Припустимо, що процес аномального чи аварійного режиму споживання електроенергії потягом представляється у вигляді зареєстрованої сукупності m миттєвих значень напруги $u(t_0), u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_j), \dots, u(t_m)$ і струму $i(t_0), i(t_1), i(t_2), \dots, i(t_j), \dots, i(t_m)$, на всьому інтервалі T , як показано на рис. 1.

Отримані дані $u(t_j), i(t_j)$, по суті представляють собою первинну інформацію, що відображає аномальний процес функціонування силового енергетичного обладнання і являється основою вторинної обробки для обчислення сукупності необхідних показників якості функціонування. На практиці, на основі отриманих первинних даних сукупності миттєвих значень напруги $u(t_0), u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_j), \dots, u(t_m)$ і струму $i(t_0), i(t_1), i(t_2), \dots, i(t_j), \dots, i(t_m)$ реалізується обробка їх згідно відповідних методів і алгоритмів.

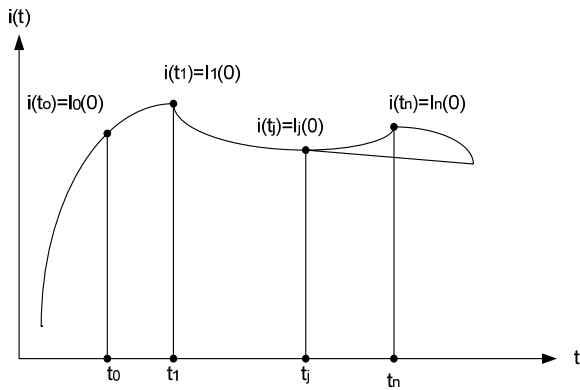


Рис. 1. Процес аномального чи аварійного режиму споживання електроенергії

Але, для визначення більш глибоких інформативних параметрів первинної інформації, зареєстрованої у вигляді $u(t_j)$, $i(t_j)$, з метою отримання нових знань про режими функціонування складних енергетичних об'єктів, необхідно провести дослідження в сфері синтезу математичних моделей і методів інтелектуалізації стохастичних процесів відображаючих режими функціонування систем локомотива. Для проведення процедур визначення значної глибини інформативності отриманих первинних даних значень напруги $u(t_0)$, $u(t_1)$, $u(t_2)$, ..., $u(t_j)$, ..., $u(t_m)$ і струму, $i(t_1)$, $i(t_2)$, ..., $i(t_j)$, ..., $i(t_m)$, використаємо сучасний математичний апарат диференціальних перетворень Пухова [3], які представляються наступною парою математичних виразів у вигляді:

$$X(k) = \frac{H^k}{K!} \left[\frac{d^k X(t)}{dt^k} \right]_{t=0} \quad \equiv \quad X(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k X(k) \quad (1)$$

де $X(t)$ – первонаочальна n - раз диференціюєма функція аргументу t , що має відповідні обмеження разом з усіма своїми похідними;

$X(K)$ – зображення функції - оригіналу $X(t)$ яке представляє собою дискретну функцію $X(K)$ цілочислового аргументу $k=0,1,2,\dots$;

H – масштабний коефіцієнт, який має ту ж розмірність що й аргумент t і, в більшості випадків, вибирається із умов $0 \leq t \leq H$, тобто на всьому діапазону функції оригіналу $X(t)$;

$\equiv$ – символ, що характеризує відповідність між оригіналом $X(t)$ і його диференціальним T - зображенням $X(K)$, ($k=0,1,2,\dots$).

В математичній залежності (1) вираз, що знаходиться ліворуч від символу $\equiv$ представляє собою пряме диференціальне перетворення. Завдяки прямому диференційному перетворенню, на основі функції-оригіналу $X(t)$, формується T - зображення дискретної функції $X(K)$ цілочислового аргументу $k=0,1,2,\dots$. Праворуч математичної залежності (1) – записано математичний вираз, що дозволяє за значенням T -дискрет функції цілочислового аргументу $X(K)$ $k=0,1,2,\dots$ одержати функції - оригіналу $X(t)$.

Використавши пряме диференціальне перетворення (1) запишемо для функції струму $i(t)$ наступний вираз

$$I(k_0) = \frac{H^k}{k!} \left[\frac{d^k i(t)}{dt^k} \right]_{t=t_0} \equiv i(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k I_0(k). \quad (2)$$

На основі виразу (2) для кожного значення струму $i(t_j)$ в точках $t_0, t_1, t_2, \dots, t_j, \dots, t_m$ зформуємо систему алгебраїчних рівнянь n -го порядку

$$\begin{aligned} \frac{t_1}{H} I_0(1) + \left(\frac{t_1}{H} \right)^2 I_0(2) + \left(\frac{t_1}{H} \right)^3 I_0(3) + \dots + \left(\frac{t_1}{H} \right)^n I_0(n) &= i(t_1) - I_0(0) \\ \frac{t_2}{H} I_0(1) + \left(\frac{t_2}{H} \right)^2 I_0(2) + \left(\frac{t_2}{H} \right)^3 I_0(3) + \dots + \left(\frac{t_2}{H} \right)^n I_0(n) &= i(t_2) - I_0(0) \\ \frac{t_n}{H} I_0(1) + \left(\frac{t_n}{H} \right)^2 I_0(2) + \left(\frac{t_n}{H} \right)^3 I_0(3) + \dots + \left(\frac{t_n}{H} \right)^n I_0(n) &= i(t_n) - I_0(0). \end{aligned} \quad (3)$$

Оскільки, на основі прямих диференціальних перетворень, згідно (1) мають місце наступні рівності $i(t_0) = I_0(0)$, $i(t_1) = I_1(0)$, ...

$i(t_n) = I_n(0)$, то розв'язавши систему (3) отримаємо спектр дискрет $I_0(0)$, $I_0(1)$, $I_0(2)$, ..., $I_0(k)$ T -функції, що є T -зображенням $i(t)$ в точці t_0 . Не трудно замітити, що функція $i(t)$ представляється в t_0 не тільки величиною її миттєвого значення $i(t_0) = I_0(0)$, а і сукупністю T -дискрет

$I_0(1)$, $I_0(2)$, ..., $I_0(k)$ які, по суті, еквівалентні відповідно комплексу похідних в цій же точці, але обчислені аналітичним шляхом. Цей факт, відкриває широкі можливості визна-

чення сукупності нових інформативних параметрів стохастичних процесів, що відображають режими функціонування складних енергетичних об'єктів. Маючи широкий набір T -дискрет $I_s(k)$ в кожній точці $s=0,1,..n$ стохастичного процесу $i(t)$ можна проводити спектральний аналіз аномальних режимів енергетичних систем для ідентифікації типу і місця аварії, реалізувати кореляційний аналіз і, відповідно, відслідковувати, в реальному часі, силові обладнання рухомого складу залізниць.

На основі математичної моделі (3) можна сформулювати n математичних T -моделей виду [3].

$$\frac{t_{js+1}}{H} I_s(1) + \left(\frac{t_{jsH}}{H} \right)^2 I_s(2) + \left(\frac{t_{jsH}}{H} \right)^3 I_s(3) + \dots + \left(\frac{t_{js+1}}{H} \right)^n = i(t_{sH}) - I_s(0),$$

$$j = 1, 2, \dots, n, \quad s = 0, 1, \dots, n-1,$$

і визначити спектр дискрет представлених у вигляді

$$I_0(0), I_0(1), I_0(2), \dots, I_0(k);$$

$$I_1(0), I_1(1), I_1(2), \dots, I_1(k); \dots$$

$I_n(0), I_n(1), I_n(2), \dots, I_n(k)$. Отримані T -дискрети $I_s(k)$, $s=0,1,..n$, $k=0,1,2,..$, є основою організації інтелектуального обчислювального процесу для визначення нових знань про режими функціонування складних об'єктів. Запишемо отриману первинну інформацію у вигляді множин, що представляють сукупність T -дискрет для струму $I_s(k)$, напруги $U_s(k)$ та всіх інших r параметрів $Z_s^r(k)$ які відображають режим функціонування складних систем локомотиву

$$\begin{aligned} \{I_0(k)\} &\in G_i^0 \neq \emptyset, \\ \{I_1(k)\} &\in G_i^1 \neq \emptyset, \\ \{I_n(k)\} &\in G_i^n \neq \emptyset; \\ \{U_0(k)\} &\in G_u^0 \neq \emptyset, \\ \{U_1(k)\} &\in G_u^1 \neq \emptyset, \\ \{U_n(k)\} &\in G_u^n \neq \emptyset; \\ \{Z_0^r(k)\} &\in G_r^0 \neq \emptyset, \\ \{Z_1^r(k)\} &\in G_r^1 \neq \emptyset, \\ \{Z_n^r(k)\} &\in G_r^n \neq \emptyset. \end{aligned} \quad (5)$$

На основі математичного виразу (5) сформуємо наступні множини

$$G^i = G_i^0 \cup G_i^1 \cup \dots \cup G_i^n, \quad (6)$$

$$G^u = G_u^0 \cup G_u^1 \cup \dots \cup G_u^n, G^r = G_r^0 \cup G_r^1 \cup \dots \cup G_r^f, \quad r = 1, 2, \dots, f,$$

і, на їх базі, запишемо множину G

$$G = G^i \cup G^u \cup_{r=1}^f G^r, \quad (7)$$

$$r = 1, 2, \dots, f,$$

яка, по суті і є теоретичною основою інтелектуалізації інноваційних комп'ютерних технологій в енергетиці.

Після отримання первинної інформації, що поступає з складного енергетичного об'єкту, і представлення її у вигляді T -дискрет

$$I_0(0), I_0(1), I_0(2), \dots, I_0(k);$$

$$I_1(0), I_1(1), I_1(2), \dots, I_1(k);$$

$$I_n(0), I_n(1), I_n(2), \dots, I_n(k),$$

як множина G , згідно (5), загальний обчислювальний процес в області диференціальних зображень може бути представлений наступним чином

$$x^1 = \varphi_1(x(t)), \quad x^2(k) = \varphi_2(x^1(k)), \dots$$

$$x^l(k) = \varphi_l(x^l(k)), \dots \quad (8)$$

На основі виразу (8), можна зробити вивід, що в процесі обчислень, на кожному етапі, використовуються значення T -функцій $x^l(k)$ і результатом обчислень також формується новий T -спектр функцій $x^f(k)$. В тих випадках, коли необхідно отримати проміжну інформацію $x^l(t)$, для оперативного прийняття рішень або формування керуючих впливів, то застосовується зворотне диференціальне перетворення, згідно виразу (1), представлене в загальному вигляді як

$$x^l(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k x^l(k), \quad (9)$$

або відповідно для значення струму

$$i(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left(\frac{t}{H} \right)^k I(k). \quad (10)$$

Розглянемо приклад проведення спектрального аналізу первинної інформації представленій в сфері диференційних зображень і методи організації інтелектуального обчислювального процесу [3]. На практиці найшли широке застосування інтегральні перетворення Фур'є з кінцевими і безкінечними границями. Пряме перетворення Фур'є на кінцевому проміжку $(0, T)$ має вигляд

$$x_\gamma = \frac{j^2}{T} \int_0^T e^{-j\gamma\omega t} x(t) dt, \quad (11)$$

$j^2 = -1$,
або, відповідно

$$I_\gamma = \frac{j^2}{T} \int_0^T e^{-j\gamma\omega t} i(t) dt \quad (12)$$

де I_γ – комплексна амплітуда γ гармоніки струму, при чому $I_\gamma = I_\gamma e^{j\gamma\omega t}$; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – частота основної гармоніки струму.

Підставимо значення $i(t)$ із виразу (10) в (12) отримаємо наступну математичну залежність

$$I_\gamma = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{I(k)}{H^k} \left(\frac{j^2}{T} \int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt \right). \quad (13)$$

Оскільки значення інтегралу може бути записано як

$$\int_0^T t^k e^{-j\gamma\omega t} dt = \frac{k!(-1)^k}{(-j\gamma\omega)^{k+1}} \left(1 - \sum_{m=0}^{m=k} \frac{(-j\gamma\omega t)^m}{m!} \right), \quad (14)$$

то підставивши значення інтегралу із виразу (14) в залежність (13) отримаємо математичну модель завдяки якій відкриває можливість, на основі T -спектру функцій $I(k)$ визначати набір комплексних амплітуд γ х гармоніки I_γ

$$I_\gamma = \frac{1}{\pi\gamma} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{k!}{(j\gamma\omega H)^k} \left[\sum_{m=0}^{m=k} \left(\frac{T}{H} \right)^m \frac{(-j\gamma\omega t)^m}{m!} - 1 \right] I(k). \quad (15)$$

Поступаючи аналогічним чином, та зробивши еквівалентні перетворення на основі зворотніх перетворень Фур'є, можна синтезувати математичну модель для визначення не тільки

I_γ , а також в сфері зображень T -спектри $I_\gamma(k)$ проміжних обчислень для реалізації подальшої обробки інформації згідно (8).

Висновки

1. Проведений аналіз сучасних методів інтелектуальної обробки інформації, в процесі керування складними електротехнічними об'єктами показав, що одним із основних напрямків формування нових знань, про режими їх функціонування, є розробка методів визначення глибокого рівня інформативності стохастичних потоків первинної інформації, що відображають процеси функціонування енергетичних систем і являються основою інтелектуалізації інноваційних комп'ютерних технологій.

2. На основі математичного апарату диференційних перетворень, запропоновані методи, що відкривають можливість представляти стохастичні первинні дані про об'єкти керування в сфері зображень у вигляді T -спектрів, завдяки чому відкривається можливість суттєво підвищити рівень інформативності первинної інформації.

3. Запропоновані методи формування диференційних математичних моделей процесів обробки інформації представлені у вигляді T -спектрів стохастичних процесів технічних систем обладнання локомотивів як основи інтелектуалізації інноваційних комп'ютерних технологій.

4. Запропоновано способи формування первинних даних в сфері зображень у вигляді множин, що представляють собою сукупність T -дискрет і наведені методи організації, на основі інтегрального перетворення Фур'є, інтелектуального обчислювального процесу проведення спектрального аналізу первинної інформації представлені в сфері диференційних зображень для визначення нового інформаційного складу аномального режиму системи керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стогній Б.С. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України. / Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В. Денисюк С.П.; Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2011, Часина 1. – С. 5-20.

REFERENCES

1. Stohniy B.S., Kyrylenko O. V., Prakhovnyk A. V., Denysyuk S. P. Intelktual'ni elektrychni merezhi: svitovyy dosvid i perspektyvy Ukrainy [Smart grids: world experience and prospects of Ukraine]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy* [Proceedings of the Institute of Electrodynam-

2. Стогній Б.С. Технологічний базис інтелектуальної об'єднаної електричної системи України. / Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Баталов А.Г.; Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2011, Часина 1. – С. 20-31.

3. Стасюк О.І. Методи організації інтелектуальних електричних мереж залізниць на основі концепції SMART Grid// Гончарова Л.Л., Максимчук В.Ф. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал, Харків – 2014, № 2 –С.29 –37.

4. Пухов Г.Е. Преобразование Тейлора и их применение в электротехнике и электронике./ Пухов Г.Е.; Киев «Наукова думка» 1978 г. С.259.

5. Стасюк О.І. Методи комп'ютерної інтелектуалізації режимів функціонування тягових мереж залізниць// Стасюк О.І., Гончарова Л.Л., Максимчук В.Ф., Голуб Г.М., Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал, Харків – 2013, № 5 –С.29 –36.

6. Стасюк О.І. Математичні моделі і методи організації інтелектуальних мереж постачання електроенергії на тягу залізничному транспорту // Стасюк О.І., Гончарова Л.Л., Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал, № 3, 2015 –С.25-31.

7. Стасюк О.І. Принципи і методи комп'ютерної інтелектуалізації мереж електропостачання залізниць/ Стасюк О.І., Гончарова Л.Л., Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, науково-технічний журнал, № 2, 2016 –С.25-31.

8. Стасюк О.І. Підвищення надійності моніторингу допустимості навантажень контрольованих перетинів енергосистем // Стасюк О.І., Буткевич О.Ф., Левконюк А.В. Технічна електродинаміка, Київ – 2014, №2 – С.56-67.

9. Щербакова А.В. Интеллектуальная обработка информации в среде WEB-2.0// Щербакова А.В., Нарышкин В.С., Системы обработки информации, Харьковский национальный экономический университет, Харьков, выпуск 2, 2011 –С226-229.

10. Журавлев Ю.И. Об интеллектуальных методах обработки информации// Журавлев Ю.И., Открытая кафедра, Отделение математических наук РАН, Московский гуманитарный университет, №2 , 2014 - С 305-309.

Надійшла до друку 02.03.2016.

Ключові слова: математичні моделі, диференційні перетворення, методи, інтелектуалізація, стохастичні процеси, оптимізація, інтелектуальна обробка інформації, Т-спектри.

ics of NAS of Ukraine], 2011, vol. 1, pp. 5 – 20.

2. Stohniy B.S., Kyrylenko O. V., Denysyuk S. P., Batalov A. H. Tekhnolohichnyy bazys intelektual'noyi ob'yednanoyi elektrychnoyi systemy Ukrayiny [The technological basis of intellectual united electrical system of Ukraine]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrayiny* [Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine], 2011, vol. 1, pp. 20 – 31.

3. Stasyuk O.I., Honcharova L.L., Maksymchuk V.F. Metody orhanizatsiyi intelektual'nykh elektrychnykh merezh zaliznyts' na osnovi kontseptsii SMART Grid [Methods of intelligent electrical networks of railways on the concept of SMART Grid]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti, naukovo-tekhnichnyy zhurnal* [Information controlling systems for rail transport, scientific journal], 2014, no. 2, pp. 29 – 37.

4. Pukhov H. E. *Preobrazovanyy Teylora y ykh prymerenye v elektrotekhnike y elektronike* [Transformation Taylor and their use in electrical engineering and electronics]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1978. 259 p.

5. Stasyuk O.I., Honcharova L.L., Maksymchuk V.F., Holub H.M. Metody komp'yuternoyi intelektualizatsiyi rezhymiv funktsionuvannya tyahovykh merezh zaliznyts' [Metodi komp'yuternoї intelektualizatsii rezhymiv funktsionuvannya Pulling trammel zaliznyts]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti, naukovo-tekhnichnyy zhurnal* [Information controlling systems for rail transport, scientific journal], 2013, no. 5, pp. 29 – 36.

6. Stasyuk O.I., Honcharova L.L. Matematychni modeli i metody orhanizatsiyi intelektual'nykh merezh postachannya elektroenerhiyi na tyahu zaliznychnomu transportu [Mathematical models and methods of intelligent networks supply electricity for traction rail transport]. *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti, naukovo-tekhnichnyy zhurnal* [Information controlling systems for rail transport, scientific journal], 2015, no. 3, pp. 25 – 31.

7. Stasyuk O.I., Honcharova L.L. Pryntsypy i metody komp'yuternoyi intelektualizatsiyi merezh elektropostachannya zaliznyts' [Principles and methods of intellectualization of computer power supply networks of railways] *Informatsiyno-keruyuchi systemy na zaliznychnomu transporti, naukovo-tekhnichnyy zhurnal* [Information controlling systems for rail transport, scientific journal], 2016, no. 2, pp. 25 – 31.

8. Stasyuk O.I., Butkevych O.F., Levkonyuk A.V. Pidvyshchennya nadiynosti monitorynhu dopustymosti zavantzhen' kontrol'ovanykh peretyniv enerhosystem [Stasiuk OI Increased reliability monitoring admissibility downloads intersections controlled power systems]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodynamics], 2014, no. 2, pp. 56 – 67.

9. Shcherbakova A.V., V.S. Naryshkyn Intellektual'naya obrabotka ynformatsyy v srede WEB-2.0 [Intelligent processing of information in the WEB-2.0 environment]. *Sistemy obrabotky ynformatsyy* [Information processing systems], 2011, vol. 2, pp. 226 – 229.

10. Zhuravlev Yu.Y. Ob intelektual'nykh metodakh obrabotky ynformatsyy [About Intelligent methods of information processing]. *Otkrytaya kafedra* [Open Department], 2014, no. 2, pp. 305 – 309.

Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

Зовнішній рецензент Денисюк С. П.

© Стасюк О. І., Гончарова Л. Л., 2016

Наведено результати аналізу сучасного стану наукових досліджень в сфері інтелектуальної обробки інформації в процесі керування складними електротехнічними об'єктами, показано, що актуальною проблемою є створення математичних моделей і методів визначення суттєвого рівня інформативності стохастичних потоків первинної інформації, що відображають процеси функціонування енергетичних систем. Запропоновано використання математичного апарату диференціальних перетворень для представлення первинної інформації в сфері диференціальних зображень у вигляді Т-спектрів, що дозволяє суттєво визначити рівень інформативності інформаційних даних з метою формування нових знань. Запропоновано методи синтезу диференціальних математичних моделей для обробки первинних даних у вигляді Т-спектрів, як основи інтелектуалізації інноваційних комп'ютерних технологій. Розглянуто способи організації Т-спектрів первинних даних у вигляді множин і використання їх для організації інтелектуального обчислювального процесу при реалізації спектрального аналізу на основі інтегрального перетворення Фур'є, для визначенні сукупності нових інформаційних компонентів аномальних режимів функціонування систем обладнання локомотивів.

УДК 621.331.3

А. И. СТАСЮК, Л. Л. ГОНЧАРОВА (ГЭТУТ)

Государственный экономико-технологический университет транспорта, кафедра «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии транспорта», 03049, Киев-49, ул. Лукашевича, 19, тел.: 050-419-38-74, 050-419-38-74, эл. почта: X177@rambler.ru, ktarael@jandex.ru

МЕТОДЫ ИНТЕЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БОРТОВЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ЛОКОМОТИВОВ

Приведены результаты анализа современного состояния научных исследований в сфере интеллектуальной обработки информации в процессе управления сложными электротехническими объектами, показано, что актуальной проблемой есть создание математических моделей и методов определения значительного уровня информативности стохастических потоков первичной информации, которая отображает процессы функционирования энергетических систем. Предложено использование математического аппарата дифференциальных преобразований для представления первичной информации в области дифференциальных изображений в виде Т-спектров, что открывает возможность значительного определения уровня информативности данных с целью определения новых знаний. Предложены методы синтеза дифференциальных математических моделей для обработки первичных данных в виде Т-спектров, как основы интеллектуализации инновационных компьютерных технологий. Рассмотрены способы организации Т-спектров первичных данных в виде множеств и применение их для организации интеллектуального вычислительного процесса реализации спектрального анализа на основе интегральных преобразований Фурье, для определения совокупности новых информационных компонентов аномальных режимов в процессе функционирования систем оборудования локомотивов.

Ключевые слова: математические модели, дифференциальные преобразования, методы, интеллектуализация, стохастические процессы, оптимизация, интеллектуальная обработка информации, Т-спектры.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.331.3

A. I. STASYUK, L. L. GONCHAROVA (SETUT)

State Economic and Technological University of Transport, Department of Automation and computer-integrated transport technologies, 03049, Kyiv-49, Lukashevich 19 Str., tel.: 050-419-38-74, 050-419-38-74, e-mail: X177@rambler.ru, ktarael@jandex.ru

METHODS OF INTELLECTUALIZATION OF INNOVATIVE COMPUTER TECHNOLOGIES OF ONBOARD SYSTEMS OF MONITORING OF LOCOMOTIVES

Results of the analysis of a current state of scientific researches are given in the sphere of intellectual information processing in the course of an control by difficult electro technical objects, is shown that creation of mathematical models and methods of determination of considerable level of informational content of stochastic flows of primary information which displays processes of functioning of power systems is an actual problem. Use of mathematical apparatus the differential of transformations for submission of primary information in the field of differential images in the form of T-ranges that opens possibility of considerable determination of level of informational content of data with the purpose of definition new *knowledge* is offered. Methods of synthesis of differential mathematical models for processing of primary data in the form of T-ranges, as bases of intellectualization of innovative computer technologies are offered. Ways of the organization of T-ranges of primary data in the form of sets and their application for the organization of intellectual computing process of implementation of the spectral analysis on the basis of integrated conversions of Fourier, for definition of a general of new information components of the abnormal modes in the course of functioning of systems of the equipment of locomotives are considered.

Keywords: mathematical models, differential transformations, methods, intellectualization, stochastic processes, optimization, intellectual processing of information, T-ranges.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*External reviewer *Denisyuk S. P.*

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

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Введение

Передачу электроэнергии по однопроводной линии впервые предложил и осуществил Никола Тесла. В 1893 г. он показал, что нет необходимости использовать два проводника для передачи электрической энергии и практически была обоснована передача энергии через одиночный проводник без возврата [1]. Его система включала источник мощных импульсов, который подключался к первичной обмотке трансформатора Теслы. Высоковольтный выход трансформатора через одиночный провод соединялся с входом приемного трансформатора. Эта идея лежит и в основе принципа работы резонансной однопроводной линии электропередачи (РО ЛЭП) [2], которая включает: источник электрической энергии, преобразователь частоты ПЧ1, резонансный контур (C1, T1), собственно однопроводную ЛЭП (в виде одножильного высоковольтного кабеля) ОЛ, приемный резонансный контур (C2, T2), преобразователь частоты ПЧ2, к которому присоединяется одно- или трехфазная нагрузка (рис.1).

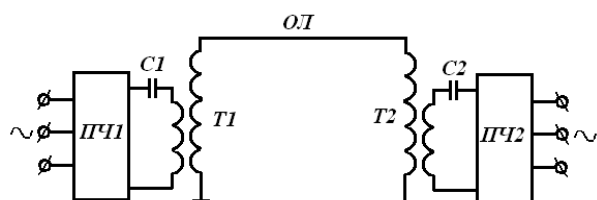


Рис. 1. Схема резонансной однопроводной ЛЭП

Источник электроэнергии – обычная трехфазная сеть, либо, в автономных системах, генератор переменного тока повышенной частоты. ПЧ1 служит для преобразования напряжения промышленной частоты в напряжение повышенной частоты в пределах 1-100 кГц.

Напряжение расчетной повышенной частоты подается в резонансный контур, включающий конденсатор C1 и модифицированный трансформатор Теслы T1. При расчетном соотношении индуктивностей «первичной» и «вторичной» обмоток и емкостей, включающих также и межвитковую емкость трансформатора T1, при соответствующей частоте в последнем

возникает резонанс напряжений. Условие возникновения резонанса в системе определяется общеизвестным выражением $T = 2\sqrt{LC}$.

При этом обязательно выполнение условия равенства произведений индуктивностей и емкостей в передающем и приемном контурах: $L_1 C_1 = L_2 C_2$.

Ток в высоковольтной обмотке сдвинут по отношению к напряжению на 90 град. Один вывод этой обмотки может быть заземлен, либо свободен. К другому выводу присоединяется одножильный кабель ОЛ расчетной длины. Длина ОЛ, включая длины кабеля, высоковольтных обмоток передающего и приемного трансформаторов, должна соответствовать целому числу полуволн $\lambda/2$, либо четверти волны тока. Длина линии l , резонансная частота f_0 , длина волны λ и скорость её распространения c_n связаны соотношениями: $l = n \lambda/2$; $f_0 = c_n/2l$; $\lambda = 2 l / n$, где n – натуральное число: 1, 2, 3, 4. Выходное напряжение передающего трансформатора Теслы равно напряжению линии и находится, в зависимости от передаваемой мощности и частоты, в пределах от единиц до 100 кВ и более.

Конец линии ОЛ присоединяется к входу высоковольтной обмотки приемного трансформатора Теслы T2, также работающего в резонансном режиме с частотой f_0 . К его «первичной» («низковольтной») обмотке подключают преобразователь частоты ПЧ2, на выходе которого получается требуемое трехфазное напряжение промышленной частоты.

Область частот 1-100 кГц наиболее пригодна для передачи электрической энергии по однопроводному волноводу в силу ограничений, которые накладывают потери на излучение из-за антенного эффекта.

При указанных выше соотношениях в линии возникают падающая и отраженная волны, и как результирующая – стоячая волна. Стоячие волны напряжения u и реактивного тока i_p резонансной линии длиной l_n показаны на рис. 2.

Для случая, приведенного на рис. 2, длина линии l_n равна двум длинам волны 2λ . Например, при частоте 1 кГц $\lambda = 300$ км, следовательно, $l_n = 600$ км.

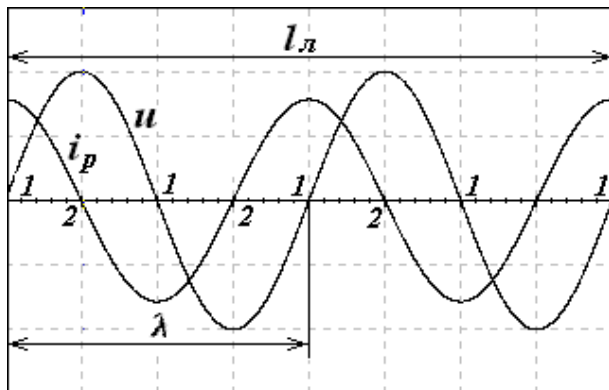


Рис. 2. Стоячие волны напряжения и тока резонансной линии

Пучности реактивного тока i_p линии наблюдаются в точках 1 , в том числе – на зажимах источника электроэнергии и на зажимах электроприемника. В точках 1 имеются узлы напряжения u , в том числе в начале линии и в его конце. Другими словами, потенциалы в начале линии и его конце равны нулю. Поэтому начала высоковольтных обмоток трансформатора могут быть заземлены, что обычно и делается на практике.

Трансформаторы, используемые в рассматриваемой системе, выполнены в виде многослойной высоковольтной катушки, поверх которой наматывается несколько витков толстой первичной обмотки, поэтому традиционное для трансформатора Теслы условие неравенства взаимных индуктивностей первичной и вторичной обмоток не выполняется, т.е. $L_{12} \approx L_{21}$.

Поскольку резонансная однопроводниковая линия разомкнута, в ней нет активного тока, следовательно, электрические потери в линии можно принимать равными нулю. Ток линии является реактивным током перезарядки собственной емкости линии или, по Максвеллу, током смещения.

В принципе, передача электроэнергии от передающего трансформатора Теслы к приемному может осуществляться по сколь угодно тонкому проводу, а также и без провода.

Этот опыт в известной мере проясняет сущность разрядного реактивного тока, или тока смещения, который генерируется трансформатором Теслы, передается, в виде стоячей волны и преодолевает в данном случае два воздушных промежутка: большой – между двумя трансформаторами Теслы и малый – между трансформатором и цилиндром.

Указанные явления имеют место только в линии, длина которой кратна длине полуволны или четверти волны тока. Именно в такой линии возникает стоячая волна, как результат сложения падающей и отраженной волн. Резонанс, необходимый для возбуждения трансформаторов Теслы,

обеспечивает с одной стороны максимальную отдачу энергии, с другой – появление в линии преимущественно, либо исключительно реактивного тока, который не связан с джоулевыми потерями в обмотках трансформаторов и в линии. Это возможно в том случае, когда ток полностью или почти полностью выходит за пределы проводника и не взаимодействует, как это принято считать, с кристаллической решеткой металла провода. На то обстоятельство, что *основные* электромагнитные процессы при «протекании» тока происходят не в проводе, а в пространстве вокруг него, указывал ещё академик В.Ф. Миткевич в своем классическом труде «Магнитный поток и его преобразования».

Стоячая волна передающей антенны (волновода) представляет собой совокупность непрерывно сменяющих друг друга положительных и отрицательных зарядов с длиной волны λ . Эти заряды поляризуют окружающее пространство, вызывая в нем появление объемных, соответственно, отрицательных и положительных зарядов следующих вдоль волновода от источника к приемнику друг за другом.

Основное отличие РО ЛЭП от передающей антенны или волновода заключается в разнице частот. При радиочастотах происходит излучение энергии, тогда как при частотах в диапазоне 1-100 кГц излучение РО ЛЭП ничтожно мало, а энергия передается вдоль провода к приемнику. В системе РО ЛЭП совокупность непрерывно сменяющих друг друга положительных и отрицательных зарядов пространственно напоминающих вихревые тороиды, движутся вдоль волновода. В какой-то мере этот процесс иллюстрирует рис.3. Внутренний диаметр тороида близок к диаметру провода, а внешний определяется, по нашему мнению, частотой, величиной напряжения и плотностью зарядов внутри вихря, или, другими словами, величиной тока смещения. Ток смещения однопроводной линии можно в первом приближении определить выражением [2] $i_c = 2\pi (C_0/CT) d\rho/dz$, где: ρ – объемный заряд, К; C_0 – емкость линии, Ф; C – скорость распространения волны, м/с; T – период волны, с; z – координатная ось линии.

Каждый из движущихся объемных зарядов обладает собственным магнитным полем, как это условно представлено на рис. 3, а, причем полюса этих динамических магнитов в узлах тока – одноименные. На рис. 3,б показаны тороиды 1, 2 и 3, которые опять-таки условно могут дать представление об увеличении объемных зарядов (т.е. увеличение пучности тока) и соответствующих магнитных полях по мере роста реактивного тока и, соответственно, передаваемой мощности.

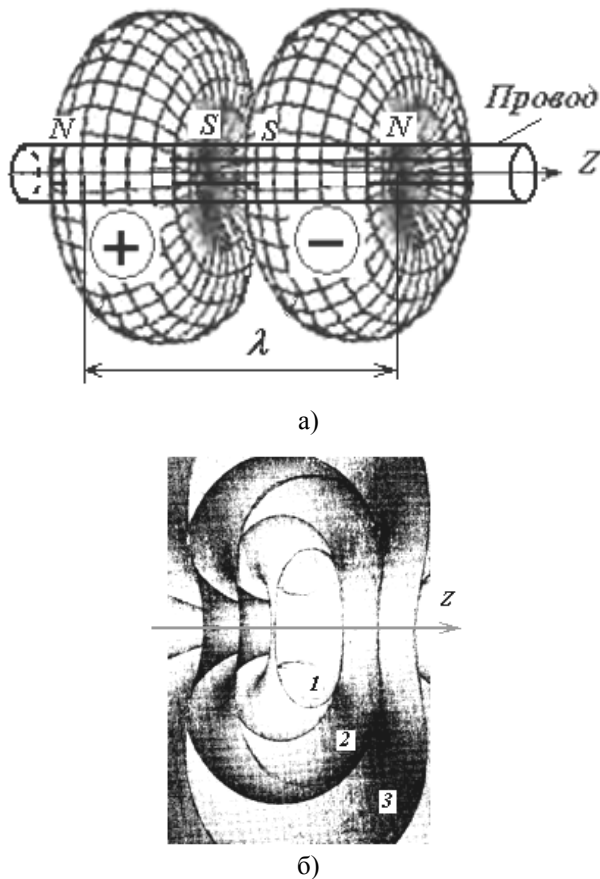


Рис. 3. Модели движения зарядов и магнитных полей вдоль проводника РО ЛЭП

Поверхности тороидов 1, 2, 3 и т.д. можно представить как совокупность «эквипотенциальных» магнитных силовых линий. Эти магнитные поля с одной стороны как бы «упаковывают» каждый объемный заряд, а с другой стороны, в силу взаимного отталкивания магнитных полюсов и отталкивания всего пакета от источника энергии – обеспечивают движение вдоль провода с осью Z со скоростью $c_n = 2 l f_0$. Генерирование такого рода тороидальных вихрей разноименных зарядов с собственными магнитными полями обеспечивает, как отмечал ещё Тесла, *безвозвратную передачу* электроэнергии от источника к приемнику.

Таким образом, в случае с РО ЛЭП мы имеем дело с продольными волнами, которые проходят не по сечению провода, а вдоль его поверхности, не входя в него. Из этого, в частности, следует, что для РО ЛЭП не имеет принципиального значения активное сопротивление провода и его сечение, т.е. в качестве проводника для неё можно использовать, например, тонкий стальной провод или трос, заключенные в изолирующую оболочку, либо подвешенный на высоковольтных изоляторах, как это делал Тесла.

В то же время для процессов передачи электроэнергии по этой линии значение имеет её собственная емкость и частота. Другими словами, однопроводная линия при идеальной настройке в номинальном режиме ведет себя как проводник без потерь. Для подтверждения этого представления при передаче по опытной резонансной линии электроэнергии мощностью 30 кВт, использовался наряду с кабелем с диаметром жилы 1,3 мм кусок провода диаметром 0,08 мм, который не испытывал существенного нагрева.

Отмеченные особенности объясняют и весьма высокие плотности передаваемой мощности и тока, невозможные в обычных ЛЭП. Так, эффективная плотность тока в линии при передаваемой мощности 20 кВт составила 600 А/мм^2 , а удельная электрическая мощность, передаваемая по линии – 4 МВт/мм^2 . Изложенные особенности позволяют считать, что РО ЛЭП – это линия, обладающая высокотемпературной квазисверхпроводимостью [2].

Очевидно, при высоких частотах волны будут излучаться в окружающее пространство, как это имеет место в обычной передающей антенне. Однако в указанном выше диапазоне частот эти потери невелики. Исследования [2] показали, что потери на излучение для линии, передающей 20 кВт, при частоте 3,4 кГц составили всего 102 Вт, т.е. $P_{изл} = 0,005 P_n$.

В целом потери в системе РО ЛЭП складываются из электрических потерь в преобразователях ПЧ1 и ПЧ2 и потерь на излучение. КПД современных преобразователей весьма высок. Поэтому интегральный КПД РО ЛЭП в сравнении с обычной ЛЭП может достигать до 94-96%. Потери в системе существенно снижаются, если в качестве источника электроэнергии непосредственно используется генератор повышенной частоты (1-50 кГц), приводимый во вращение первичным двигателем – дизелем или турбиной.

РО ЛЭП состоит из простых и надежных узлов. Воздушный трансформатор Теслы во всех отношениях проще и дешевле масляного. Применение генераторов повышенной частоты могло бы исключить преобразователи частоты и приблизить КПД РО ЛЭП к величинам порядка 98-99 %. Но и с применением ПЧ РО ЛЭП обеспечивают колоссальную экономию электроэнергии. Одножильный кабель, уложенный в землю, требует минимального отвода земли, не сопряжен с экологическими проблемами.

РО ЛЭП обеспечивают высокую надежность электроснабжения, поскольку в них в принципе невозможно межфазное короткое замыкание, кабельным РО ЛЭП не страшны стихийные бед-

ствия: снегопад, гололед, ветры и т.д. Капитальные затраты на сооружение таких систем в несколько раз меньше, чем для обычных высоковольтных ЛЭП. РО ЛЭП – это высоковольтные системы – они хороши в качестве распределительных сетей. Однако наиболее эффективными из-за малых потерь являются дальние и сверхдальние РО ЛЭП. Такой подход может изменить идеологию энергоснабжения народного хозяйства: генерирующие мощности можно будет располагать непосредственно у месторождений, а вместо энергоносителей с их громоздкими и крайне дорогими системами транспортировки, передавать электрическую энергию, как наиболее универсальную для использования, по простой и надежной РО ЛЭП на любые расстояния с минимальными издержками.

Постановка задачи и её решение

В электротехнике общепринято анализировать распространение волн вдоль линии на основе решения телеграфных уравнений. Представляя телеграфные уравнения в матричной форме [3], можно применить специфические матричные методы решения, которые хорошо реализуются на ЭВМ.

Определение телеграфных уравнений в матричной форме выглядит следующим образом.

Обозначим столбцовые матрицы напряжений и токов в проводах:

$$\|U\| = \begin{pmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} \quad \|I\| = \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

Представим уравнение для комплексной амплитуды потенциала k -го провода

$$U_K = \frac{j}{2\pi \cdot \varpi \cdot \varepsilon_0} \sum_{i=1}^n N_{ik} \frac{dI_i}{dx}, \quad (2)$$

$$(k=1, 2, \dots, n)$$

и уравнение

$$\sum_{i=1}^n B_{ik} \cdot I_i = 0, \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

где I_i – ток в i -м проводе; ω – круговая частота;

$$\begin{aligned} B_{KK} &= -\xi \cdot N_{KK} + F_{KK} + M_K; \\ B_{iK} &= -\xi \cdot N_{iK} + F_{iK} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} N_{iK} &= \ln \frac{r'_{ik}}{r_{ik}}; \\ N_{KK} &= \ln \frac{2h_K}{r_K} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} r_{ik} &= \sqrt{(h_i - h_k)^2 + (b_i - b_k)^2} \\ r'_{ik} &= \sqrt{(h_i + h_k)^2 + (b_i - b_k)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_{ik} &= 2 \int_0^\infty \frac{1}{v + \sqrt{v^2 - (k_3^2 - k_0^2)}} \times \\ &\times e^{-v(h_p + h_{ik})} \cdot \cos v(b_p - b_{ik}) \cdot dv \end{aligned} \quad (7)$$

$$k_i = \omega \cdot \sqrt{\varepsilon_i \mu_i} \text{ - волновое число;}$$

в матричной форме

$$\|U\| = \frac{j}{2\pi \cdot \omega \cdot \varepsilon_0} \|N\| \frac{d}{dx} \|I\| \quad (8)$$

$$\|B\| \|I\| = 0 \quad (9)$$

где $\|N\|$ – квадратная симметричная ($N_{ik} = N_{ki}$) матрица, члены которой определяются формулами (5);

$\|F\|$ – квадратная симметричная матрица, члены которой определяются выражением (7);

$\|M\|$ – диагональная матрица, ее члены определяются формулами

$$M_K = \frac{2\pi}{j\omega\mu_0} Z_{k \text{ внутр}} \quad (10)$$

$$Z_{k \text{ внутр}} = \frac{k_1 \rho_1 J_0(k_1 r_1)}{2\pi \cdot r_1 J_1(k_1 r_1)} \quad (11)$$

J_0 и J_1 – функции Бесселя 1-го рода нулевого и 1-го порядков (индексы «1» при k , ρ и r показывают, что эти величины относятся к первому проводу).

После дифференцирования (8) по x :

$$-\frac{d}{dx} \|U\| = -\frac{\gamma^2}{k_0^2} \cdot \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \|N\| \|I\| \quad (12)$$

Умножив уравнение (9) на величину $\frac{j\omega\mu_0}{2\pi}$ и сложив результат с правой частью (12):

$$-\frac{d}{dx}\|U\| = \|Z\| \|I\| \quad (13)$$

Здесь квадратная симметричная матрица погонных сопротивлений линии:

$$\|Z\| = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}(\|N\| + \|F\| + \|M\|) \quad (14)$$

В этом выражении матрица $\|N\|$ характеризует внешние собственные и взаимные индуктивные сопротивления проводов при идеальной проводимости земли, матрица $\|F\|$ - дополнительные внешние собственные и взаимные сопротивления проводов, возникшие из-за конечной проводимости земли, а матрица $\|M\|$ - собственные внутренние сопротивления проводов.

Из уравнения (8) получим:

$$-\frac{d}{dx}\|I\| = \|Y\| \|U\| \quad (15)$$

Здесь квадратная симметричная матрица погонных проводимостей земли:

$$Y = 2\pi\epsilon_0 j\omega \cdot \|N\|^{-1} \quad (16)$$

где $\|N\|^{-1}$ - матрица, обратная матрице $\|N\|$.

Итак, из уравнений Максвелла получены обычные телеграфные уравнения линии (13) и (15) в матричной форме.

Для решения уравнений (13) и (15), преобразуем их, исключая из них матрицы токов и напряжений:

$$\frac{d^2\|U\|}{dx^2} = \|P\| \|U\|; \quad \frac{d^2\|I\|}{dx^2} = \|P'\| \|I\| \quad (17)$$

где обозначено:

$$\|P\| = \|Z\| \|Y\|; \quad \|P'\| = \|Y\| \|Z\| \quad (18)$$

Штрих сверху - знак транспозиции матрицы.

Решение уравнения (17) в матричном виде для напряжений на проводах n -проводной линии, написанное по аналогии с решением для двухпроводной линии, имеет вид:

$$\|U\| = e^{-\|G\|X} \|B_1\| + e^{\|G\|X} \|B_2\| = \|U_{nad}\| + \|U_{omp}\| \quad (19)$$

Здесь квадратная недиагональная матрица коэффициентов распространения;

$$\|G\| = (\|Z\| \|Y\|)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

где $e^{-\|G\|X}$, $e^{\|G\|X}$ - экспоненциальные функции от квадратной матрицы $\|G\|X$, которые так же являются квадратными матрицами; $\|B_1\|, \|B_2\|$ - столбцовые матрицы постоянных интегрирования.

Главной трудностью является вычисление функции от матрицы. Для этого предварительно необходимо определить все собственные значения матрицы $\|P\|$, то есть найти все коэффициенты распространения волновых каналов. Однако непосредственная диагонализация этой матрицы связана с серьезными вычислительными трудностями, так как коэффициенты распространения различных волновых каналов мало отличаются по модулю друг от друга. Решение существенно упрощается, если преобразовать матрицу $\|P\|$ так, чтобы при диагонализации получать матрицу не коэффициентов распространения, а малых относительных поправок, учитывающих влияние потерь.

Из уравнений (18), (14) и (16) следует:

$$\|P\| = \gamma_0^2 (\|1\| + \|T\|) \quad (21)$$

где

$$\|T\| = (\|F\| + \|M\|)\|N\|^{-1} \quad (22)$$

$\|1\|$ - диагональная единичная матрица.

Подставляя выражения (21) в уравнение

$$\|\lambda\|^{-1} \|P\| \|\lambda\| = \|\gamma^2\| \quad (23)$$

где $\|\gamma^2\|$ - диагональная матрица собственных значений;

$\|\lambda\|$ - квадратная матрица собственных векторов, получаем

$$\|\lambda\|^{-1} \|T\| \|\lambda\| = \|\xi\| \quad (24)$$

где диагональная матрица малых относительных поправок, которая определена как матрица собственных значений матрицы $\|T\|$

$$\|\xi\| = \frac{1}{\gamma_0^2} \|\gamma^2\| - \|1\| \quad (25)$$

Диагонализация этой матрицы производилась по алгоритму «COMLR2». Смысл этого алгоритма заключается в следующем. Сначала исходная матрица приводится к верхнетреугольной матрице (форме Хесенберга). Затем вычисляются собственные значения и собственные векторы произвольной матрицы ($n \times n$).

Из выражения (25) получаем

$$\|\gamma\|^2 = \gamma_0^2 (\|\xi\| + \|1\|) \quad (26)$$

где коэффициент распространения линии без потерь:

$$\gamma_0 = jk_0 \quad (k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu} = \frac{2\pi}{3} 10^{-8} f) \quad (27)$$

Используя выражение для вычисления функции от матрицы (20), можно записать

$$\|\Gamma\| = \|\lambda\| \|\gamma\| \|\lambda\|^{-1} \quad (28)$$

где $\|\gamma\|$ - диагональная матрица, члены которой являются квадратными корнями из членов матрицы $\|\gamma^2\|$.

Квадратная матрица фазных волновых сопротивлений вычисляется по формуле

$$\|Z_0\| = \|\Gamma\|^{-1} \|Z\| \quad (29)$$

При $x = l$ и $x = 0$ из уравнений (19) с использованием (29) имеем:

$$\left. \begin{aligned} \|U_K\| &= e^{-\|\Gamma\|l} \|B_1\| + e^{\|\Gamma\|l} \|B_2\| \\ \|Z_0\| \|I_K\| &= e^{-\|\Gamma\|l} \|B_1\| - e^{\|\Gamma\|l} \|B_2\| \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

$$\left. \begin{aligned} \|U_K\| &= \|B_1\| + \|B_2\| \\ \|Z_0\| \|I_K\| &= \|B_1\| + \|B_2\| \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Определяя матрицы B_1 и B_2 из уравнений (25) и подставляя результаты в (31), после преобразования получаем матричные телеграфные уравнения фазных токов и напряжений в начале и конце симметричного многополюсника, где

$$\left. \begin{aligned} \text{ch } \|\Gamma\|l &= \|\lambda\| \text{ch } \|\gamma\|l \|\lambda\|^{-1} \\ \text{sh } \|\Gamma\|l &= \|\lambda\| \text{sh } \|\gamma\|l \|\lambda\|^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Связь между напряжениями и токами в начале и конце многопроводной линии (в общем случае $2n+1$ -полюсника) может быть пред-

ставлена разными типами матричных уравнений, из которых наиболее употребляемыми являются:

$$\left. \begin{aligned} \|U_H\| &= \|A_{11}\| \|U_K\| + \|A_{12}\| \|I_K\| \\ \|I_H\| &= \|A_{21}\| \|U_K\| + \|A_{22}\| \|I_K\| \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

$$\left. \begin{aligned} \|I_H\| &= \|Y_{11}\| \|U_H\| + \|Y_{12}\| \|U_K\| \\ \|I_K\| &= \|Y_{21}\| \|U_H\| + \|Y_{22}\| \|U_K\| \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$\left. \begin{aligned} \|U_H\| &= \|Z_{11}\| \|I_H\| + \|Z_{12}\| \|I_K\| \\ \|U_K\| &= \|Z_{21}\| \|I_H\| + \|Z_{22}\| \|I_K\| \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Поскольку все эти уравнения могут описывать один и тот же $2n+1$ -полюсник, между блоками матриц $\|A\|$, $\|Y\|$ и $\|Z\|$ существует линейная зависимость. Так, например, можно записать

$$\left. \begin{aligned} \|Y_{11}\| &= \|A_{22}\| \|A_{12}\|^{-1} \\ \|Y_{12}\| &= \|A_{21}\| - \|A_{22}\| \|A_{12}\|^{-1} \|A_{11}\| \\ \|Y_{21}\| &= \|A_{12}\|^{-1} \\ \|Y_{22}\| &= -\|A_{12}\|^{-1} \|A_{11}\| \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Известно, что цепочечное соединение многополюсников удобнее всего описываются зависимостью типа $\|A\|$, параллельное - зависимостью $\|Y\|$ и последовательное - зависимостью типа $\|Z\|$.

Для однотипного соединения m -полюсников результирующая матрица эквивалентного многополюсника определяется:

$$\|A_{\text{рез}}\| = \prod_{i=1}^m \|A_i\| \quad (37)$$

Для того, чтобы рассчитать величины токов и напряжений полюсов $2n+1$ - полюсника, необходимо задать для него граничные условия. В наиболее общем виде граничные условия на входе и на выходе $2n+1$ -полюсника задаются с помощью полных $n+1$ -полюсников, активных для передающего и пассивных для приемного конца.

Нагрузка представляется в виде матрицы $\|Y_k\|$, которая выглядит следующим образом:

$$Y = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n Y_{1i} & -Y_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & -Y_{1n} \\ -Y_{12} & \sum_{i=1}^n Y_{2i} & \cdot & \cdot & \cdot & -Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & & & \vdots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & & & \sum_{i=1}^n Y_{ni} & \end{pmatrix} \quad (38)$$

где $Y_{Ki} = Y_{iK}$ - проводимость между k -м и i -м полюсами $n+1$ -полюсника.

В общем виде нагрузка задается с помощью элементов R , L и C .

Выражение для матричной входной проводимости запишется

$$\|Y_{BX}\| = (\|A_{21}\| + \|A_{22}\| \|Y_K\|) \times (\|A_{11}\| + \|A_{12}\| \|Y_K\|)^{-1} \quad (39)$$

Схема полного активного $n+1$ -полюсника отличается от схемы пассивного тем, что его ветви содержат источники э.д.с. или источники тока.

Таким образом, зная входную проводимость линии (39) можно получить напряжение в ее начале

$$\|U_H\| = (\|I\| + \|Z_\Gamma\| \|Y_{BX}\|)^{-1} \|E\| \quad (40)$$

и далее можно определить все оставшиеся токи и напряжения в начале и конце линии:

$$\|U_K\| = (\|A_{11}\| + \|A_{12}\| \|Y_K\|^{-1}) \cdot \|U_H\| \quad (41)$$

$$\|I_H\| = (\|A_{21}\| + \|A_{22}\| \|Y_K\|) \cdot \|U_K\| \quad (42)$$

$$\|I_K\| = \|Y_K\| \|U_K\| \quad (43)$$

При заданной схеме транспозиции можно написать следующие равенства

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Tesla N. World System of wireless Transmission of Energy. Telegraph and Telephone Age, Oct, 16. 1927. Published in a book: Nikola Tesla. Selected works. Articles. Beograd, 1999, p. 280.
2. Стребков, Д. С. Резонансные методы передачи и применения электрической энергии. Изд.3-е /

$$\left. \begin{aligned} \|U_H\| &= \|N_T\| \|U_K\| \\ \|I_H\| &= \|N_T\| \|I_K\| \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

где $\|N_T\|$ - матрица n -го порядка идеально-го преобразователя напряжений (токов).

В матрице $\|N_T\|$ элементы, лежащие на пересечении i -й строки и k -го столбца (i - номер провода до транспозиции, k - после транспозиции), равны единице, а остальные равны нулю.

Так как транспозиция не накладывает никакой связи между матрицами напряжений и токов проводов, то матрицы типа $\|A\|$ для транспозиции имеют квазидиагональную структуру:

$$\begin{aligned} \|A_{11}\| &= \|N_T\|; & \|A_{12}\| &= 0 \\ \|A_{21}\| &= 0; & \|A_{22}\| &= \|N_T\| \end{aligned} \quad (45)$$

В исходные данные вносится расчетная схема замещения. Определяются для данной схемы конкретные значения параметров ветвей нагрузки и источников напряжения, а также характеристики проводов линий.

Зная токи и напряжения в любой заданной точке резонансной однопроводной линии по методике изложенной в [4] определяются наведенные напряжения в смежной линии и электромагнитное влияние на коммуникации связи и цепи железнодорожной автоматики.

Заключение

Резонансные однопроводные системы обеспечивают передачу электроэнергии по единственному, весьма тонкому проводнику с минимальными потерями энергии. Они являются высокотехнологичными ресурсо- и энергосберегающими системами, и открывают возможности для тотальной замены ими существующих многофазных высоковольтных ЛЭП.

Методика распространения электромагнитных колебаний вдоль линий электропитания и смежных линий даёт возможность проводить обоснование электромагнитной совместимости линий электропитания с окружающей средой, инфраструктурой, коммуникациями связи и цепями железнодорожной автоматики.

REFERENCES

1. Tesla N. World System of wireless Transmission of Energy. Telegraph and Telephone Age, Oct, 16. 1927. Published in a book: Nikola Tesla. Selected works. Articles. Beograd, 1999, p. 280.
2. Strebkov D. S., Nekrasov A.V. *Rezonansnye metody peredachi i primeneniya elektricheskoy energii*

Д. С. Стребков, А. И. Некрасов. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. - 352 с.

3. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость. Учебник для студентов высших технических учебных заведений / М.П. Бадер. - М.: Транспорт, 2002 г. - 640 с.

[Resonance methods of transmission and use of electric energy]. Moscow, 2008. 280 p.

3. Bader M. P. *Elektromagnitnaya sovmestimost'. Uchebnik dlya studentov vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeniy* [Electromagnetic compatibility. A textbook for students of higher technical educational institutions]. Moscow, Transport Publ., 2002. 640 p.

Поступила в печать 25.02.2016.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

Рассмотрены резонансные однопроводные системы, которые обеспечивают передачу электроэнергии по единственному, весьма тонкому проводнику с минимальными потерями энергии. Проведенные исследования показывают, что они являются высокотехнологичными энергосберегающими системами, и открывают возможности для тотальной замены ими существующих многофазных высоковольтных ЛЭП.

Приведена методика распространения электромагнитных колебаний вдоль линий электрообеспечения и смежных линий, которая даёт возможность проводить обоснование электромагнитной совместимости линий электрообеспечения с окружающей средой, инфраструктурой, коммуникациями связи и цепями железнодорожной автоматики.

Ключевые слова: передача электрической энергии электромагнитными полями, резонансные однопроводные системы, высокотехнологичные энергосберегающие системы, распространение электромагнитных колебаний, электромагнитная совместимость.

УДК 621.331.3

М. П. БАДЬОР (МДУШС)

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: badior@mail.ru

ПЕРЕДАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ І ЇХ ВПЛИВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Розглянуто резонансні однопровідні системи, які забезпечують передачу електроенергії по єдиному, досить тонкому провіднику з мінімальними втратами енергії. Проведені дослідження показують, що вони є високотехнологічними енергозберігаючими системами, і відкривають можливості для тотальної заміни ними існуючих багатофазних високовольтних ЛЕП.

Наведена методика поширення електромагнітних коливань уздовж ліній електропостачання і суміжних ліній, яка дає можливість проводити обґрунтування електромагнітної сумісності ліній електропостачання з навколишнім середовищем, інфраструктурою, комунікаціями зв'язку і ланцюгами залізничної автоматики.

Ключові слова: передача електричної енергії електромагнітними полями, резонансні однопровідні системи, високотехнологічні енергозберігаючі системи, поширення електромагнітних коливань, електромагнітна сумісність.

Внутрішній рецензент *Костин М. О.*

Зовнішній рецензент *Саенко Ю. Л.*

UDC 621.331.3

M. P. BADJOR (MSURE)

Department of Energy supply of electric railways, Moscow State University of Railway Engineering, 9 Obraztsova Street, build. 9, Moscow, Russia Federation, 127994, tel.: (495) 684-22-87, e-mail: badior@mail.ru

TRANSMISSION OF ELECTRICAL ENERGY BY ELECTROMAGNETIC FIELDS AND ENVIRONMENTAL IMPACT

Review of the resonant single-conductor systems that enable the transmission of electricity on a extremely thin single wires with minimal loss of energy. Researches have shown that they are a high-tech energy-saving systems, and offer opportunities for a total replacement of the existing multi-phase high-voltage power lines.

The technique of propagation of electromagnetic waves along the power lines and related lines, which makes it possible to carry out study of electromagnetic compatibility of power supply lines to the environment, infrastructure, communications links and chains of railway automation.

Keywords: transmission of electrical energy by electromagnetic fields, resonant single-conductor systems, high-tech energy-saving system, the spread of electromagnetic waves, electromagnetic compatibility.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*

А. БЯЛОНЬ, Д. АДАМСКИ, Ю. ФУРМАН (ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА)

Институт железнодорожного транспорта, 04-275 Варшава, Польша, ул. Хлопицкого 50,
тел.: +48 22 4731453, эл. почта: abialon@ikolej.pl, dadamski@ikolej.pl, jfurman@ikolej.pl

ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСОВ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ДОПУСКАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОМЕХ

Резонансные явления в контактной сети

Участок контактной сети должен рассматриваться в качестве длинной линии. Это обусловлено большим, по сравнению с длиной волны распространения, расстоянием между начальной и конечной точками контактной сети, особенно при наличии высших гармоник [1].

Явления, происходящие в длинной линии, определяются дифференциальными уравнениями с частными производными:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} &= R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} &= G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}\end{aligned}\quad (1)$$

где R_0 – удельное активное сопротивление Ом/км;

L_0 – удельная индуктивность Гн/км;

C_0 – удельная емкость Ф/км;

G_0 – удельная проводимость См/км.

Удельные параметры R_0 , L_0 , C_0 , G_0 не известны заранее и будут вычислены на основе измерений [2].

В стационарном состоянии, при переходе от мгновенного значения $u(t)$, $i(t)$ к комплексным эффективным значениям U , I , частной производной по отношению к времени, например $\partial i / \partial t$, отвечает произведение эффективного значения тока I и сомножителя $j\omega$, а частной производной по отношению к расстоянию, например $\partial i / \partial x$, отвечает производная dI/dx , поскольку величина I является функцией расстояния, а не времени [3].

В связи с этим системе уравнений (1) в стационарном состоянии отвечает следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dU}{dx} &= (R_0 + j\omega L_0)I \\ \frac{dI}{dx} &= (G_0 + j\omega C_0)U\end{aligned}\quad (2)$$

где $R_0 + j\omega L_0 = Z_0$ – удельное комплексное продольное сопротивление линии Ом/км;

$G_0 + j\omega C_0 = Y_0$ – удельная полная комплексная поперечная проводимость линии См/км.

В случае приложения воздействия в виде синусоидального переменного (например, от генератора синусоидальных сигналов) напряжения в контактной сети, распределение его вдоль сети (при измерении расстояния x от конечной точки линии) будет определяться по зависимости:

$$\begin{bmatrix} U(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch \gamma x & Z_C sh \gamma x \\ \frac{1}{Z_C} sh \gamma x & ch \gamma x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

где x – координата длины, измеряемая от конечной точки, км; U_2 , I_2 – напряжение и ток в конце;

$U(x)$, $I(x)$ – напряжение и ток в точке x ;

$\gamma = \alpha + j\beta$ – постоянная распространения;

α – постоянная затухания;

β – фазовая постоянная;

Z_C – волновое сопротивление.

В случае измерений расстояния x с начальной точки линии распределение напряжения вдоль сети будет определяться по зависимости:

$$\begin{bmatrix} U(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch \gamma x & -Z_C sh \gamma x \\ -\frac{1}{Z_C} sh \gamma x & ch \gamma x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

где x – координата длины, измеряемая от начальной точки в км;

U_1 , I_1 – напряжение и ток в начале линии;

$U(x)$, $I(x)$ – напряжение и ток в точке x .

В режиме короткого замыкания линии $U_2=0$, что после подстановки в формулу (3) дает:

$$\begin{aligned}U_k(x) &= Z_C I_2 sh \gamma x \\ I_k(x) &= I_2 ch \gamma x\end{aligned}\quad (5)$$

Индекс « k » обозначает состояние короткого замыкания.

Аналогично, подставляя $I_2 = 0$, получим для холостого хода:

$$\begin{aligned} U_0(x) &= U_2 \operatorname{ch} \gamma x \\ I_0(x) &= \frac{1}{Z_C} U_2 \operatorname{sh} \gamma x \end{aligned} \quad (6)$$

Индекс «0» обозначает состояние холостого хода.

Приведенные выше формулы позволяют теоретически вычислить значения напряжений и токов в контактной сети [4]. Эти величины будут проиллюстрированы на диаграммах.

Волновое сопротивление вычисляется по формуле:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_o + j\omega L_o}{G_o + j\omega C_o}} = |Z_c| \cdot e^{j\varphi_c} \quad (7)$$

где Z_c – волновое сопротивление;
 R_o, L_o, G_o, C_o – удельные параметры линии;
 φ_c – аргумент волнового сопротивления.

При нагрузке линии волновым сопротивлением не возникает обратная волна. Ток и напряжение будут меняться монотонно, увеличиваясь экспоненциально по мере приближения к генератору:

$$\begin{aligned} \underline{U}(x) &= \underline{U}_2 \cdot e^{\gamma x} \\ \underline{I}(x) &= \underline{I}_2 \cdot e^{\gamma x} \end{aligned} \quad (8)$$

Вычисления проводились для контактной сети Опытного кольца – Жмигруд.

Для определения уровней напряжений в избранных пунктах контактной сети было проведено компьютерное моделирование на модели контактной сети как цепи четырех-полюсников типа П [5, 6], которая представлена на рис. 1.

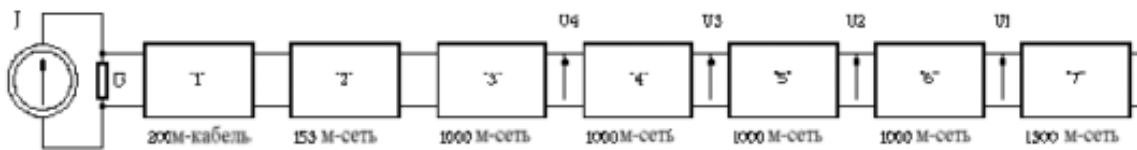


Рис. 1. Модель контактной сети

Таблица 1

f [Гц]	Удельные параметры контактной сети			Удельные параметры фидера питания и отсасывающего кабеля		
	Ck [μF/км]	Lk [mH/км]	Rk [Ω/км]	Cs [nF/км]	Ls [mH/км]	Rs [Ω/км]
320	1,64	0,4	2,42	18	1,17	0,54
800	1,55	0,8	3,62	18	1,13	0,84
1600	1,8	0,84	4,53	18	1,08	1,64
3600	1,8	0,8	3,94	18	1,03	3,97
6000	1,8	0,68	10	18	1,02	4
9000	2	0,65	15	18	1,02	4,5

В модели учитывались удельные параметры R, L, C контактной сети, а также удельные параметры фидеров питания контактной сети (КС) и отсасывающего фидера (ОФ). Для каждой частоты были приняты соответствующие параметры четырехполюсников. Моделирование проводилось для следующих удельных параметров (измеренных для этой цели, табл. 1).

Контактная сеть была замкнута на рельс в конце модели участка. На рис. 2 представлена упрощенная схема модели, в которой обозначены точки определения уровней напряжений.

На основе построенной модели контактной сети с учетом удельных параметров R, L, C проводились вычисления на компьютере. Модель включала десять четырехполюсников типа П, имитирующих определенные участки контактной сети, индуктивность тяговой подстанции; фильтр подстанции. Схема модели представлена на рис. 3. Вычисления по модели проводились для ее нескольких конфигураций:

- с фильтрами подстанции и без них;
- участок с односторонним и двухсторонним питанием;
- электровоз (токовое воздействие

с переменной частотой ($0 \div 30$ кГц) находится в конце и посередине исследуемого участка.

В модели принято, что на участке тяговой сети (ТС) находится один электровоз. Моделирование проводилось для следующих параметров модели (см. табл. 2).

Некоторые результаты вычислений представлены на графиках (рис. 4-6) для системы питания и секционирования Опытного кольца – Жмигруд.

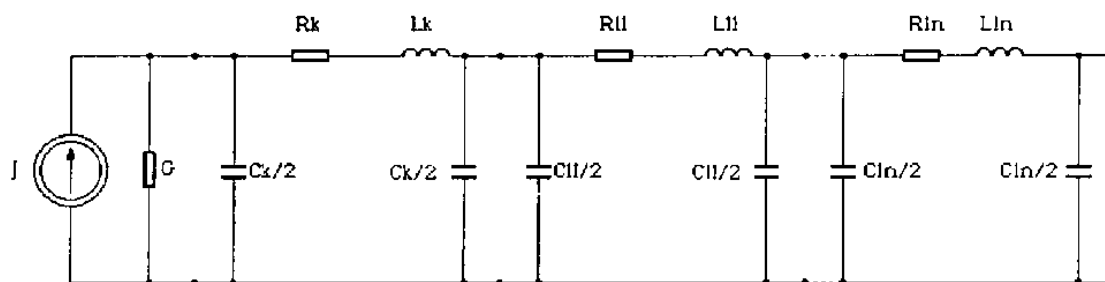


Рис. 2. Упрощенная модель контактной сети

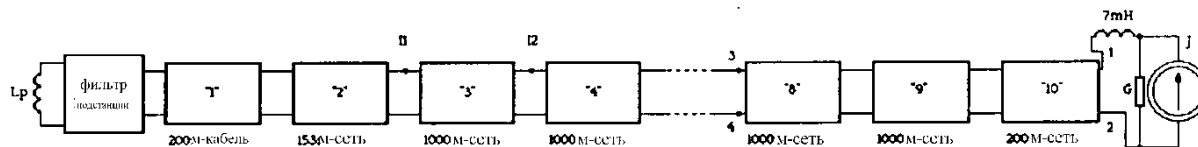


Рис. 3. Модель контактной сети, использованная для вычислений

Таблица 2

Электрические параметры модели

№ п.п.	Параметры	Значение параметра		
1	Индуктивность подстанции	$L = 1,75 \text{ мГн}$		
2	Параметры фильтра подстанции	$C1 = 40 \text{ мФ}$ $L1 = 0,44 \text{ мГн}$ $RL1 = 0,072 \text{ Ом}$	$C2 = 90 \text{ мФ}$ $L2 = 0,78 \text{ мГн}$ $RL2 = 0,23 \text{ Ом}$	$C3 = 100 \text{ мФ}$
3	Удельные параметры кабеля питания	$C = 1,8 \text{ мФ/км}; L = 0,8 \text{ мФ/км}; R = 9,25 \text{ Ом/км}$		
4	Удельные параметры контактной сети	$C = 18 \text{ нФ/км}; L = 1,2 \text{ мГн/км}; R = 5,6 \text{ Ом/км}$		

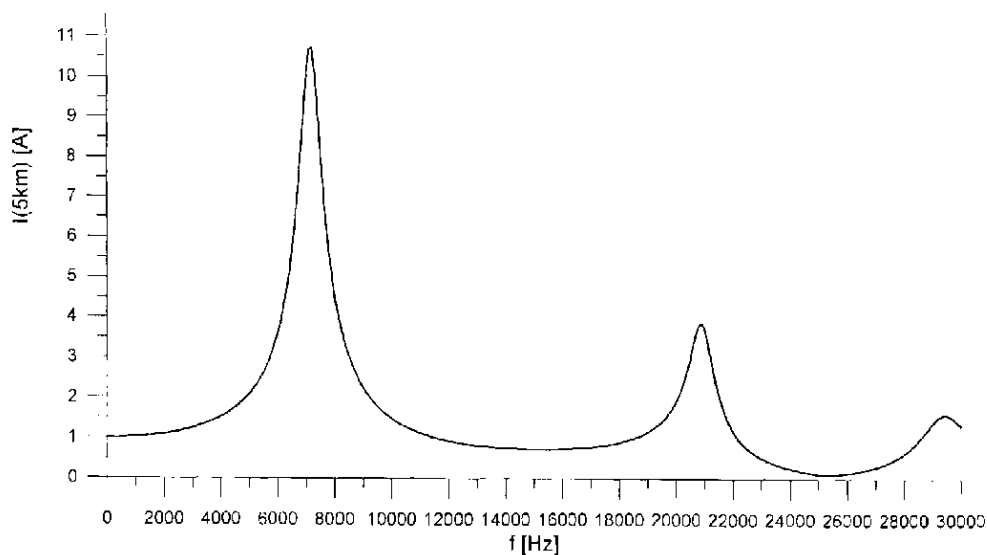


Рис. 4. Ток сети на 5 км в функции частоты, генерирующий источник в конце участка, фильтр подстанции включен

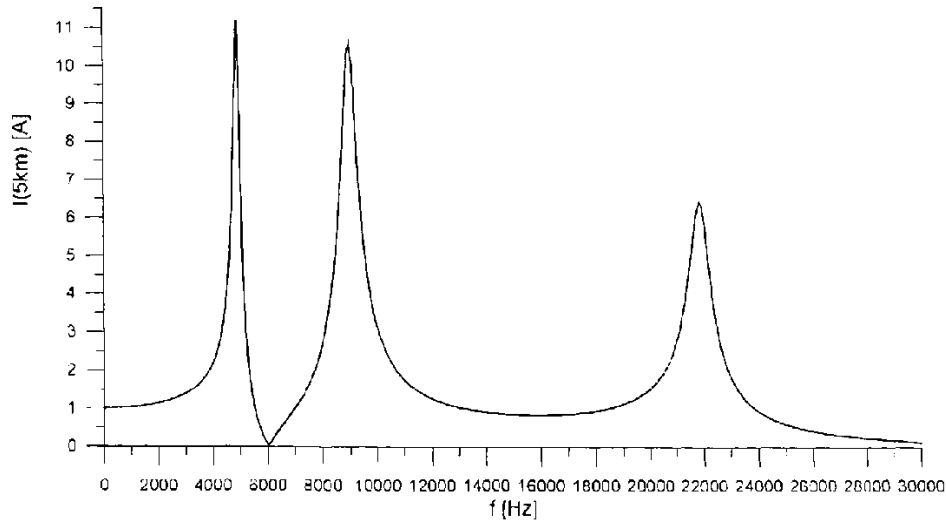


Рис. 5. Ток сети на 5 км в функции частоты, генерирующий источник в конце участка, фильтр подстанции отключен

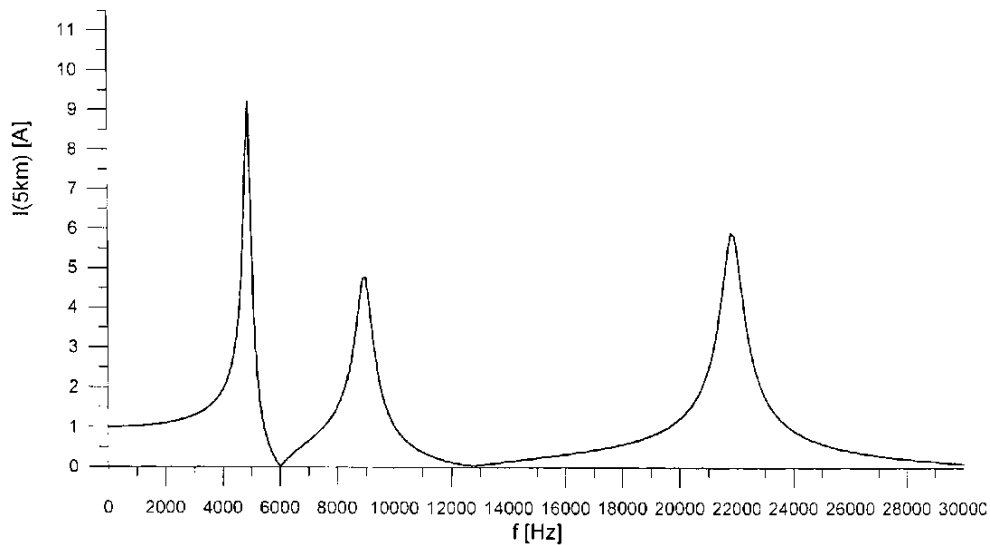


Рис. 6. Ток сети на 7 км в функции частоты, генерирующий источник по середине участка, фильтр подстанции отключен

Из приведенных данных моделирования следует, что для системы с односторонним питанием с включенным фильтром подстанции, в ТС возникают резонансные частоты 7,2 кГц и 20,9 кГц, соответствующие им кратности составляют 11,4 и 9,14 для локомотива в конце участка, а также 7,3 и 7,9 – для локомотива в середине участка. Для той же схемы с отключенным фильтром подстанции возникают резонансные частоты 4,9 кГц, 9,0 кГц и 21,8 кГц, кратность которых составляет 13,2, 9,9 и 11,3 для локомотива в конце участка, а также 10,9, 4,5 и 10,4 для локомотива в середине участка. Для схемы участка с двусторонним питанием с включенным фильтром подстанции, в ТС возникает резонансная частота 13,4 кГц и кратность 1,0 для локомотива в конце участка, а также 8,2 кГц для локомотива в середине участка. В аналогичном случае, но с отключенным фильтром подстанции, в ТС

возникают резонансные частоты 5,2 кГц и 16,4 кГц, кратность которых составляет соответственно 5,9 и 2,1 для локомотива в конце участка а также 7,4 и 9,7 для локомотива посередине участка.

Резонансные частоты зависят от схемы электропитания и длины участка, а амплитуды – от координаты поезда. В случае одностороннего питания с одним локомотивом, которое имеет место на Опытном кольце, возникает резонанс в диапазоне 5÷9,4 кГц для частоты 7,2 кГц. В случае двустороннего питания резонанс передвигается к 13,4 кГц и происходит в диапазоне 13,2÷13,6 кГц.

Измерения, для подтверждения расчетов, проводились на Опытном кольце в городе Жмигруд. Испытуемая сеть была отключена от шин ТП. На тяговой подстанции на исследуемый участок ТС подавался синусоидальный ток с управляемой частотой при помощи генератора

с усилителем. В конце было осуществлено гальваническое соединение КС и обратной цепи. Вдоль исследуемого участка контактной сети двигалась автодрезина с двигателем внутреннего сгорания, что облегчало измерения напряжений между контактной сетью и обратной цепью в избранных точках. Из этого вытекает, что испытания проводились в функции времени и пути (расстояния). Благодаря радиосвязи была обеспечена синхронизация измерений.

Результаты измерений сравнивались с результатами вычислений на модели. Из этого сравнения следует, что результаты вычисления близки к измеренным значениям. Разница составляет от 0,58% до 5,9%. Результаты измерений при частоте 3600 Гц отличаются от вычисленных значений (ошибка около 7÷10%) – это обусловлено резонансной частотой этого участка сети и вытекающими из этого измерительными ошибками.

Теоретический анализ, показал, что участок длиной в 5,43 км уже можно считать длинной линией с распределенными параметрами. Вычисления на модели и измерения очень близки друг другу, при условии правильного принятия удельных параметров контактной сети. Моделирование контактной сети как цепи из четырехполосников типа П является хорошим методом оценки явлений, возникающих в контактной сети как линии большой длины.

Из результатов проведенного моделирования следует, что в испытуемой ТС, длиной в 5,43 км, при одностороннем питании появляются резонансные частоты 7,2 кГц и 20,9 кГц при соответственно 11 и 9 кратном усилении тока. Зато при двухстороннем питании, в анализируемом диапазоне выступает, одна резонансная частота 13,4 кГц.

Представленные выше частотные характеристики кольца в г. Жмигруд относятся к случаю, в котором на моделируемом участке находится только один локомотив (такие условия возникают во время пробных поездок по опытному кольцу).

Влияние на уровень помех

Поскольку резонансные частоты в контактной сети – как правило, выше, чем 1000 Гц, необходимо считаться с их воздействием на работу рельсовых цепей, работающих на частотах выше 1 кГц, то есть на рельсовые цепи, работающие в диапазоне 1÷3 кГц и цепи, работающие в полосе 7÷16 кГц и 20÷36 кГц. Для этих типов рельсовых цепей явление резонанса в контактной сети влияет на уровень допускаемых параметров помех. Полученные из измерений допус-

каемые параметры возмущений определяют в соответствии с формулой

$$A_{\text{ДР}} = A_{\text{Д}} \cdot Q^{-1} \quad (9)$$

где: $A_{\text{др}}$ – допускаемая величина с резонансом; $A_{\text{д}}$ – допускаемая величина без резонанса;

Q – добротность тяговой сети.

Уравнение (9) справедливо для предельных значений амплитуд помех, для которых частота совпадает с резонансной частотой тяговой сети. Другими словами, расстояние от допустимой амплитуды помех для частоты, совпадающей с частотой резонанса, должно быть увеличено в соответствии с формулой

$$C_{\text{Р}} = C \cdot Q \quad (10)$$

где: $C_{\text{р}}$ – расстояние от помех с резонансом;

C – расстояние от помех с резонансом;

Q – добротность тяговой сети.

Выводы

Резонансы в контактной сети влияют на уровень помех в рельсовых цепях, работающих на частотах выше 1 кГц. Существование резонансов влияет также на приемлемые величины параметров помех для рельсовых цепей и определения расстояния помех от рабочих сигналов рельсовых цепей.

Резонансные явления в контактной сети должны быть приняты во внимание при определении допустимых параметров помех для электропоездов и рельсовых цепей. Кроме того, при разработке новых типов рельсовых цепей при выборе частоты их работы должны быть учтены явления резонанса в тяговой сети.

REFERENCES

1. Sychenko, V. G. *Modeljuvannja elektromagnitnyh procesiv u tjavovij merezhi postijnogo strumu* [Simulation of electromagnetic processes in power network of DC]. *Visnyk Dnipropetrovs'kogo nacional'nogo tehnicznego universytetu zaliznychnogo transportu im. ak. V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National Technical University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, vol. 38, pp. 73-76.
2. Określenie dopuszczalnych poziomów i parametrów zakłóceń dla urządzeń sterowania ruchem kolejowym / Praca IK 4430/10. Warszawa, 2011.
3. Białoń A. Badanie kompatybilności elektromagnetycznej taboru z urządzeniami wykrywania pociągu z uwzględnieniem normy EN 50238 Problemy Kolejnictwa, z.152 / A. Białoń, D. Adamski, P. Pajka // Warszawa, 2011.
4. Untersuchung der Beeinflussung von Glaisstromkreisen. Frage A 122 / Bericht nr 9. Utrecht, 1973.

5. Białoń A. Dopuszczalne parametry zakłóceń dla obwodów torowych stosowanych na PKP/ A. Białoń, J. Furman, A. Kazimierzczak, Ł. Zawadka // Logistyka 6, 2011.

6. Białoń A. Emisja zaburzeń radioelektrycznych emitowanych przez tabor kolejowy Problemy

kolejnictwa, z 152/ A. Białoń, A. Dłużniewski, Ł. John // Warszawa, 2011. - S. 51-66

Поступила в печать 29.03.2016.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

При оценке уровней тяговых помех в рельсовых цепях должны быть приняты во внимание не только помехи, вызванные постоянной составляющей тягового тока, но и вызванные его переменной составляющей. Переменный компонент стал играть более важную роль при внедрении на электровозах импульсного управления мощностью и скоростью поезда. Уровень помех в системе тяговая подстанция–электровоз–тяговая подстанция зависит в первую очередь от удельных параметров контактной сети и ее конфигурации, параметров тяговой подстанции и электровоза. Электровоз и тяговая подстанция являются источниками помех, а их уровень зависит от расстояния между ними. В определенных ситуациях организации железнодорожного движения, при определенных расстояниях между тяговой подстанцией и электровозом, а также при взаимном расположении электровозов может происходить увеличение уровня помех. Это обусловлено существованием резонансов в контактной сети.

Ключевые слова: контактная сеть, электромагнитные помехи, резонанс, волновое сопротивление, модель.

УДК 621.331.3

БЯЛОНЬ, АДАМСКИ Д., Ю. ФУРМАН (ИНСТИТУТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ)

Институт залізничного транспорту, 04-275 Варшава, Польша, вул. Хлопського 50, тел.: +48 22 4731453, e-mail: abialon@ikolej.pl, dadamski@ikolej.pl, jfurman@ikolej.pl.

ВПЛИВ РЕЗОНАНСІВ У КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ НА ДОПУСТИМІ ПАРАМЕТРИ ПЕРЕШКОД

При оцінці рівнів тягових завад в рейкових колах повинні бути прийняті в увагу не тільки перешкоди, викликані постійної складової тягового струму, але і викликані його змінної складової. Змінний компонент став грати більш важливу роль при впровадженні на електровозах імпульсного керування потужністю і швидкістю поїзда. Рівень перешкод в системі тягова підстанція–електровоз–тягова підстанція залежить в першу чергу від питомих параметрів контактно́ї мережі та її конфігурації, параметрів тягової підстанції та електровоза. Електровоз і тягова підстанція є джерелами перешкод, а їх рівень залежить від відстані між ними. У певних ситуаціях організації залізничного руху, при певних відстанях між тяговою підстанцією і електровозом, а також при взаємному розташуванні електровозу може відбуватися збільшення рівня перешкод. Це обумовлено існуванням резонансів в контактній мережі.

Ключові слова: контактна мережа, електромагнітні перешкоди, резонанс, хвильовий опір, модель.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Саенко Ю. Л.*

UDC 621.331.3

A. BIAŁOŃ, D. ADAMSKI, Ju. FURMAN (INSTYTUT KOLEJNICTWA)

Instytut Kolejnictwa, 50 Chłopickiego Str., 04-275 Warsaw, Poland, abialon@ikolej.pl, dadamski@ikolej.pl, jfurman@ikolej.pl.

THE INFLUENCE OF RESONANCES IN THE CONTACT NETWORK ON THE ALLOWABLE INTERFERENCE PARAMETERS

When assessing levels of traction interference in rail circuits must be taken into account not only interference caused by DC component of traction current, but caused by its variable component. The AC component began to play a more important role in the implementation of the electric pulse controlling the power and speed of the train. The noise level in the system of traction substation–electric–traction substation depends primarily on the specific parameters of a contact network and its configuration parameters of traction substation and electric locomotive. Locomotive and traction sub-station are interference sources, and their level depends on the distance between them. In certain situations, the organization of rail traffic, at certain distance the deposits between the traction substation and electric locomotive, as well as at a mutual location, electric locomotive can increase the level of interference. This is due to the existence of resonances in the contact network.

Keywords: contact network, electromagnetic interference, resonance, impedance, model.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*

Ю. Л. САЕНКО (ПГТУ), Д. Н. КАЛЮЖНЫЙ, С. В. СВЕРГУНЕНКО (ХНУГХ)

Приазовский государственный технический университет, кафедра Электрификации промышленных предприятий, Украина, 87500, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7, тел.: (0629) 44-65-51, эл. почта: yurisavenko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, кафедра Систем электроснабжения и электропотребления городов, Украина, 61002, г. Харьков, ул. Революции, 12, тел.: 050-560-68-35, 050-302-43-43, эл. почта: KalyuzhnyiDN@gmail.com, sergey.svergunenko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-7374-0734, orcid.org/0000-0002-4586-5046

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ ВКЛАДОВ ЛИНЕЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ В ИСКАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Постановка проблемы

Одной из главных составляющих проблемы качества электрической энергии (КЭ) является задача распределения фактических вкладов различных источников искажений (ИИ) в искажения напряжений в точке общего присоединения (ТОП). Актуальность этого вопроса наиболее наглядно отображают имеющиеся финансовые потери потребителей и поставщиков электрической энергии (ЭЭ). Так, по данным [1] за одно событие понижения КЭ экономический ущерб для некоторых потребителей может достигать 3 800 000 евро. В государственном масштабе суммарные ежегодные экономические убытки составляют 10-20 млрд дол. [2]. Очевидно, что задача распределения ФВ требует адекватного и точного решения при возникновении вопроса компенсации финансовых потерь потерпевшей стороне.

Анализ последних исследований и публикаций

В общем случае ФВ линейных (не искажающих синусоидальную форму кривой напряжения) ИИ в искажения напряжений в ТОП распределяется согласно следующей математической модели [3]:

$$\sum_{i=1}^n U_{иски} = A^T \times Y_{неиск}^{-1} \times \sum_{i=1}^n \hat{I}_{иски} \quad (1)$$

где $U_{иски}$ – матрица искаженных частей напряжений СЭС, которая обусловлена действием i -го ИИ; A – матрица инцидентий; $Y_{неиск}$ – матрица собственных и взаимных проводимостей, характеризующая неискажающие части элементов СЭС и ее потребителей

[4]; $\hat{I}_{иски}$ – матрица-столбец искажающих узловых токов, характеризующая i -й ИИ; n – общее количество ИИ.

Характерной особенностью математической модели (1) является учет распределенного характера ИИ в СЭС. С одной стороны, это позволяет избавиться от недостатков традиционных методов распределения ФВ, основанных на результатах локальных измерений [5, 6]. В частности, от пренебрежения взаимным влиянием различных ИИ друг на друга, а также получения дополнительной информации о параметрах схем замещения потребителей ЭЭ и ИП в координатах, отличных от фазных. С другой стороны, усложняет практическую реализацию, так как требует построения распределенной в пространстве и синхронизированной во времени измерительной системы. Учитывая преимущества обоих подходов, целесообразным является эквивалентное приведение распределенной математической модели определения ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП (1) к случаю локальных измерений.

Цель исследования

Разработка эквивалентного приведения распределенной математической модели определения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений в ТОП к частному случаю локальных измерений.

Основные материалы исследования

При локальных измерениях СЭС относительно ТОП рассматривается в виде, где с одной стороны подключен потребитель ЭЭ (рис. 1), а с другой – эквивалентная СЭС.



Рис. 1. Представление СЭС относительно ТОП в случае локальных измерений

Для приведения распределенной математической модели определения ФВ (1) к случаю локальных измерений (рис. 1) рассмотрим исходную СЭС как структуру, состоящую из сколь угодно сложной электрической сети (ЭС) с неограниченным количеством источников питания (ИП) и потребителей ЭЭ (рис. 2).

Согласно методу узловых потенциалов схема замещения СЭС рис. 2 описывается следующим уравнением узловых потенциалов:

$$\mathbf{Y}_{\text{неиск}} \left(\vec{\Phi}_{\text{неиск}} + \sum_{i=1}^n \vec{\Phi}_{\text{иск}i} \right) = \vec{\mathbf{I}}_{\text{неиск}} + \sum_{i=1}^n \vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}i}, \quad (2)$$

где $\vec{\Phi}_{\text{неиск}}$ – матрица-столбец неискаженных частей узловых потенциалов; $\vec{\Phi}_{\text{иск}i}$ – матрица-столбец искаженных частей узловых потенциалов, характеризующая ФВ i -го ИИ; $\vec{\mathbf{I}}_{\text{неиск}}$ – матрица-столбец неискажающих узловых токов, характеризующая неискажающие части ИП; $\vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}i}$ – матрица-столбец искажающих узловых токов, характеризующая i -й ИИ.

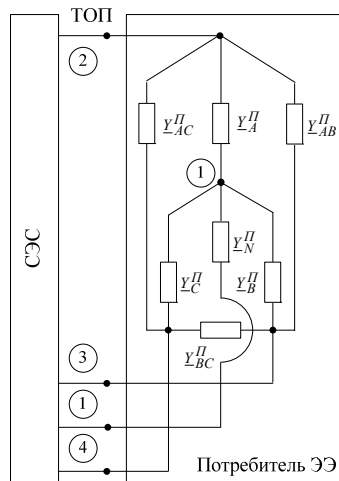


Рис. 2. Схема замещения исходной СЭС с одним выделенным потребителем ЭЭ относительно ТОП

Если произвести нумерацию всех независимых узлов исходной схемы замещения (рис. 2) таким образом, чтобы в конце этого списка оказались узлы, относящиеся к СЭС, то уравнение

(2) можно записать с помощью блок матриц в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{aa} & \mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{ab} \\ \mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{ba} & \mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{bb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{\Phi}_{\text{неиск}}^a + \vec{\Phi}_{\text{иск}}^a \\ \vec{\Phi}_{\text{неиск}}^b + \sum_{j=1}^k \vec{\Phi}_{\text{иск}j}^b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{\mathbf{I}}_{\text{неиск}}^a + \vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}}^a \\ \vec{\mathbf{I}}_{\text{неиск}}^b + \sum_{j=1}^k \vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}j}^b \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где символ «a» соответствует группе узлов, относящихся к схеме замещения потребителя ЭЭ П (рис.2); символ «b» – группа оставшихся узлов; k – количество ИИ со стороны СЭС.

После математических преобразований уравнения (3) получаем следующую зависимость:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{\Pi\P} + \mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{\text{ЭЭС}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vec{\Phi}_{\text{неиск}}^{\Pi} + \vec{\Phi}_{\text{иск}}^{\Pi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{\mathbf{I}}_{\text{неиск}}^{\Pi} + \vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}}^{\Pi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \vec{\mathbf{I}}_{\text{неиск}}^{\text{СЭС}} + \vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}}^{\text{СЭС}} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{\text{СЭС}}$ – матрица узловых проводимостей, которая характеризует неискажающие части элементов эквивалентной СЭС; $\vec{\mathbf{I}}_{\text{неиск}}^{\text{СЭС}}$ – матрица-столбец неискажающих узловых токов, характеризующая неискажающие части ИП эквивалентной СЭС; $\vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}}^{\text{СЭС}}$ – матрица-столбец искажающих узловых токов, которая характеризует общую искажающую часть эквивалентной СЭС:

$$\mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{\text{СЭС}} = -\mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{ab} \left(\mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{bb} \right)^{-1} \mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{ba} \quad (5)$$

$$\mathbf{I}_{\text{неиск}}^{\text{СЭС}} = -\mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{ab} \left(\mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{bb} \right)^{-1} \mathbf{I}_{\text{неиск}}^b \quad (6)$$

$$\vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}}^{\text{СЭС}} = -\mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{ab} \left(\mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{bb} \right)^{-1} \sum_{j=1}^k \vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}j}^b \quad (7)$$

Применяя принцип наложения к (4), получаем математическую модель распределения ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП для частного случая локальных измерений:

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{U}}_{\text{иск}}^{\Pi} + \vec{\mathbf{U}}_{\text{иск}}^{\text{СЭС}} &= \\ &= \mathbf{A}^T \left(\mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{\Pi\P} + \mathbf{Y}_{\text{неиск}}^{\text{СЭС}} \right)^{-1} \left(\vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}}^{\Pi} + \vec{\mathbf{I}}_{\text{иск}}^{\text{СЭС}} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Из последнего выражения следует, что адекватность распределения ФВ по данным локальных измерений, в первую очередь, будет зависеть от возможности определения двух составляющих: $\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}$ и $\hat{\mathbf{I}}_{иск}^{СЭС}$. Так как эти две величины по результатам локальных измерений в общем случае не могут быть определены, целесообразным является максимальное исключение влияния $\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}$ и $\hat{\mathbf{I}}_{иск}^{СЭС}$ на процедуру распределения ФВ. Используя следующий алгоритм, удастся исключить только одну из этих составляющих:

1. Определяем ФВ ИИ, относящегося только к потребителю ЭЭ П:

$$\vec{\mathbf{U}}_{иск}^П = \mathbf{A}^T (\mathbf{Y}_{неиск}^П + \mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС})^{-1} \hat{\mathbf{I}}_{иск}^П \quad (9)$$

2. Определяем ФВ СЭС как невязку суммы ФВ всех ИИ:

$$\vec{\mathbf{U}}_{иск}^{СЭС} = \vec{\mathbf{U}}_{иск}^{изм} - \vec{\mathbf{U}}_{иск}^П \quad (10)$$

где $\vec{\mathbf{U}}_{иск}^{изм}$ - матрица-столбец искаженных частей напряжений, элементы которой определены по результатам локальных измерений в ТОП.

Как следует из (9), основной проблемой практической реализации распределения ФВ линейных ИИ в искажения напряжений в ТОП по результатам локальных измерений является неизвестная информация о параметрах пассивных неискажающих элементов эквивалентной СЭС ($\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}$). Поиск способа адекватного определения параметров эквивалентной СЭС является ключом к решению данной проблемы.

В заключении рассмотрим структуру схемы замещения эквивалентной СЭС, которая вытекает из анализа матриц $\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}$ и $\hat{\mathbf{I}}_{иск}^{СЭС}$. Во-первых, размерности матриц $\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}$ и $\hat{\mathbf{I}}_{иск}^{СЭС}$ будут составлять (4×4) и (4×1) соответственно. Из чего следует, что количество независимых узлов в схеме замещения эквивалентной СЭС должно равняться четырем. Во-вторых, согласно методу узловых потенциалов [7] матрицы узловых проводимостей и токов формируются по общему количеству узлов без одного (зависимого узла). Следовательно, для адекватного представления схемы замещения эквивалентной СЭС в ней должен быть учтен дополнительный зависимый узел.

С учетом вышеизложенного, схема замещения эквивалентной СЭС будет иметь вид, пред-

ставленный на рис. 3, где дополнительный зависимый узел обозначен номером 0.

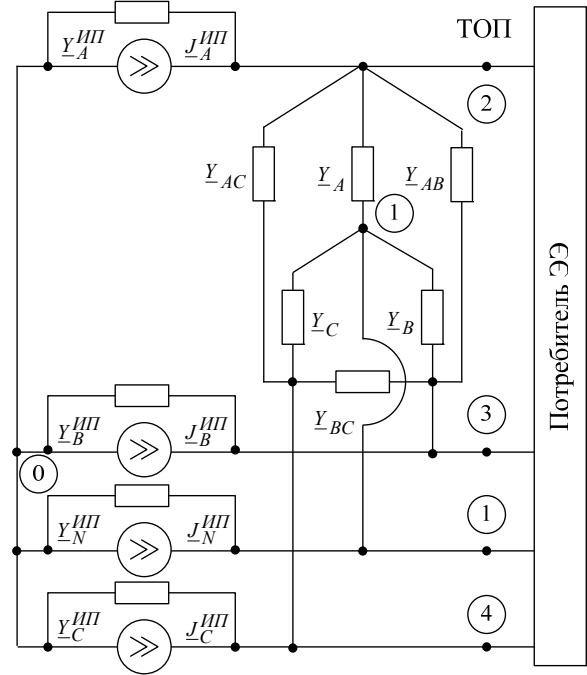


Рис. 3. Структура схемы замещения эквивалентной СЭС

Соответствие между элементами схемы замещения эквивалентной СЭС и элементами матриц $\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}$ и $\hat{\mathbf{I}}_{иск}^{СЭС}$ определяются следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \underline{J}_A^{ИП} &= \hat{\mathbf{I}}_{неиск}^{СЭС}(2,1), \quad \underline{J}_B^{ИП} = \hat{\mathbf{I}}_{неиск}^{СЭС}(3,1), \\ \underline{J}_C^{ИП} &= \hat{\mathbf{I}}_{неиск}^{СЭС}(4,1), \quad \underline{J}_N^{ИП} = \hat{\mathbf{I}}_{неиск}^{СЭС}(1,1), \\ \underline{Y}_A &= -\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}(1,2), \quad \underline{Y}_B = -\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}(1,3), \\ \underline{Y}_C &= -\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}(1,4), \quad \underline{Y}_{AB} = -\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}(2,3), \\ \underline{Y}_{AC} &= -\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}(2,4), \quad \underline{Y}_{BC} = -\mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}(3,4), \\ \underline{Y}_A^{ИП} &= \mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}(2,2) - (\underline{Y}_A^{СЭС} + \underline{Y}_{AB}^{СЭС} + \underline{Y}_{AC}^{СЭС}), \\ \underline{Y}_B^{ИП} &= \mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}(3,3) - (\underline{Y}_B + \underline{Y}_{AB} + \underline{Y}_{BC}), \\ \underline{Y}_C^{ИП} &= \mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}(4,4) - (\underline{Y}_C + \underline{Y}_{BC} + \underline{Y}_{AC}), \\ \underline{Y}_N^{ИП} &= \mathbf{Y}_{неиск}^{СЭС}(1,1) - (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C). \end{aligned}$$

Как видно из рис.3, в схеме замещения эквивалентной СЭС условно можно выделить ИП и

часть СЭС, определяемую ЭС с подключенными к ней потребителями ЭЭ.

С теоретической точки зрения полученная структура схемы замещения эквивалентной СЭС должна быть использована при разработке новых и совершенствовании существующих методов распределения ФВ по данным локальных измерений.

Выводы

1. Предложена эквивалентная математическая модель распределения ФВ линейных ИИ в искажение напряжений в ТОП, применимая к частному случаю локальных измерений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чэпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии / Д. Чэпмэн // Энергосбережение. – 2004. – № 1. – С. 66–69.
2. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
3. Саенко, Ю. Л. Принцип наложения в математической модели распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный // Электрификация транспорта. – 2015. – № 10. – С. 124–128.
4. Калюжный, Д. Н. Представление линейных источников искажений в математических моделях распределения их фактических вкладов в искажение напряжений в точке общего присоединения / Д. Калюжный // Энергосбережение Энергетика Энергоаудит. – 2015. – № 11(142). – С. 19–25.
5. Саенко, Ю. Л. Анализ методов определения фактических вкладов в понижение качества электрической энергии по несимметрии и несинусоидальности напряжений / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный // Электрификация транспорта. – 2015. – № 9. – С. 123–133.
6. Y. Sayenko. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages / Y. Sayenko, D. Kalyuzhnyi // IX Miedzynarodowe sympozjum Kompatybilnosc elektromagnetyczna w elektrotechnice i elektronice EMC'. - 2015. S. 84-88.
7. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов / Л. А. Бессонов. – 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1973. – 752 с.

Поступила в печать 21.03.2016.

Внутренний рецензент Кузнецов В. Г.

2. Основной проблемой практической реализации распределения ФВ по данным локальных измерений является неизвестная информация о параметрах пассивных неискажающих элементов эквивалентной ЭЭС. 3. Ключом к решению проблемы практической реализации распределения ФВ по данным локальных измерений является способ адекватного определения параметров схемы замещения эквивалентной СЭС. 4. Определена структура схемы замещения эквивалентной СЭС, которая должна использоваться при решении задачи распределения ФВ по данным локальных измерений.

REFERENCES

1. Chepmen D. Tsena nizkogo kachestva elektroenergii. [Price low power quality]. *Energoberezhenie – Energy Saving*, 2004, no.1, pp. 66–69.
2. Zhezhelenko I. V., Sayenko Yu. L. *Kachestvo elektroenergii na promyshlennukh predpriatiiakh* [Power quality in industrial plants.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 261 p.
3. Sayenko, Yu. L., Kalyuzhnyi, D. N. Printsip nalozheniya v matematicheskoy modeli raspredeleniya fakticheskikh vkladov lineynykh istochnikov iskazheniy v iskazheniya napryazheniy v tochke obshchego prisoedineniya. [Superposition principle in mathematical models of the factual contribution distribution of linear sources of distortion in voltage distortion at the point of common coupling]. *Elektrifikatsiya transporta – Electrification of transport*, 2015, no. 10, pp. 124–128.
4. Kalyuzhnyi, D. N. Predstavlenie lineynykh istochnikov iskazheniy v matematicheskikh modelyakh raspredeleniya ih fakticheskikh vkladov v iskazhenie napryazheniy v tochke obshchego prisoedineniya. [Presentation of linear sources of distortion in the mathematical models of their factual contribution distribution in voltage distortion at the point of common coupling]. *Energoberezhenie Energetika Energoaudit - Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2015, no. 11(142), pp. 19–25.
5. Sayenko, Yu. L., Kalyuzhnyi, D. N. Analiz metodov opredeleniya fakticheskikh vkladov v ponizhenie kachestva elektricheskoy energii po nesimmetrii i nesinusoidalnosti. [The analysis of methods for determining the factual contribution to lowering the power quality through asymmetry and non-sinusoidal voltage]. *Elektrifikatsiya transporta – Electrification of transport*, 2015, no. 9, pp. 123–133.
6. Y. Sayenko, D. Kalyuzhnyi. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages. - IX Miedzynarodowe sympozjum Kompatybilnosc elektromagnetyczna w elektrotechnice i elektronice EMC'2015. S. 84-88.
7. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theory of electrical engineering.]. – Moscow, «Vussh. shkola» Publ., 1973. 752 p.

Внешний рецензент Танкевич Е. Н.

Потребление и передача электроэнергии пониженного качества вызывает у субъектов рынка электроэнергии дополнительные финансовые потери, величина которых может во много раз превышать ее стоимость. При возникновении такой ситуации возникает вопрос о распределении финансовой компенсации потерпевшей стороне между всеми участниками этого события. Проведенные исследования показали, что адекватное решение этой задачи возможно на основе распределенной математической модели определения фактических вкладов в искажения напряжений в точке общего присоединения. Так как ее применение требует построения распределенной в пространстве и синхронизированной во времени измерительной системы, что с практической точки зрения является сложной задачей, целесообразным будет приведение распределенной математической модели определения фактических вкладов к случаю локальных измерений. В статье представлены результаты данного приведения, которое базируется на матричном методе преобразования схем замещения электрических цепей. Полученная математическая модель применима для описания точки общего присоединения, где с одной стороны подключен потребитель электроэнергии, а с другой – эквивалентная система электроснабжения. В ходе эквивалентных преобразований определена структура схемы замещения эквивалентной системы электроснабжения.

В целом результаты представленных исследований могут быть использованы при разработке методов и средств распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения по данным локальных измерений.

Ключевые слова: качество электрической энергии, точка общего присоединения, фактический вклад, локальные измерения.

УДК 621.31

Ю. Л. САЄНКО (ПДТУ), Д. М. КАЛЮЖНИЙ, С. В. СВЕРГУНЕНКО (ХНУМГ)

Приазовський державний технічний університет, кафедра Електрифікації промислових підприємств, Україна, 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7, тел.: (0629) 44-65-51, ел. пошта: yurisayenko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Харківський національний університет міського господарства імені А. Н. Бекетова, кафедра Систем електропостачання та електроспоживання міст, Україна, 61002, м. Харків, вул. Революції, 12, тел.: 050-560-68-35, ел. пошта: KalyuzhnyiDN@gmail.com, sergey.svergunenko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-7374-0734, orcid.org/0000-0002-4586-5046

РОЗПОДІЛ ФАКТИЧНИХ ВНЕСКІВ ЛІНІЙНИХ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕНЬ В СПОТВОРЕННЯ НАПРУГИ В ТОЧЦІ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ ЗА ДАНИМИ ЛОКАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Споживання і передача електроенергії зниженої якості викликає у суб'єктів ринку електроенергії додаткові фінансові втрати, величина яких може у багато разів перевищувати її вартість. При виникненні такої ситуації виникає питання про розподіл фінансової компенсації потерпілій стороні між всіма учасниками цієї події. Проведені дослідження показали, що адекватне рішення цієї задачі можливе на основі розподіленої математичної моделі визначення фактичних внесків до спотворення напруги в точці загального приєднання. Так як її застосування вимагає побудови розподіленої в просторі та синхронізованої у часі вимірювальної системи, що з практичної точки зору є складним завданням, доцільним буде приведення розподіленої математичної моделі визначення фактичних внесків до випадку локальних вимірювань. У статті представлені результати даного приведення, яке базується на матричному методі перетворення схем заміщення електричних ланцюгів. Отримана математична модель використовується для опису точки загального приєднання, де з одного боку підключений споживач електроенергії, а з іншого – еквівалентна система електропостачання. В ході еквівалентних перетворень визначена структура еквівалентної схеми заміщення системи електропостачання.

В цілому результати представлених досліджень можуть бути використані при розробці методів і засобів розподілу фактичних внесків лінійних джерел спотворень в спотворення напруги в точці загального приєднання за даними локальних вимірювань.

Ключові слова: якість електричної енергії, точка загального приєднання, фактичний внесок, локальні вимірювання.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Танкевич Є. М.*

UDC 621.31

YU. L. SAENKO (PSTU), D. M. KALYUZHNIY, S. V. SVERGUNENKO (NUUE)

Pryazovsky State Technical University, Department of Industrial Electrical Power Supply,
Ukraine, 87500, Mariupol, 7 Universytets'ka, tel.: (0629)-44-65-51, e-mail: YuriSayenko@gmail.ru,
ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Department of electrical supply and energy
consumption systems of cities, Ukraine, 61002, Kharkiv, 12 Revolutsii, tel.: 050-560-68-35,
e-mail: KalyuzhniyDN@gmail.com, sergey.svergunenko@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-7374-0734,
orcid.org/0000-0002-4586-5046

FACTUAL CONTRIBUTION DISTRIBUTION OF LINEAR SOURCES OF DISTORTION IN VOLTAGE DISTORTION AT THE POINT OF COMMON COUPLING ACCORDING TO THE DATA OF LOCAL MEASUREMENTS

Consumption and transmission of electrical energy of low quality cause additional financial losses of market participants of electrical energy, the value of which can be many times greater than its cost. In the event of such a situation, the question of the allocation of financial compensation to the injured party among all the participants of this event is arising. Conducted studies have shown that an adequate solution to this problem is possible based on a distributed mathematical model of factual contributions determination factual contribution in voltage distortion at the point of common coupling. Since its application requires the construction of a measuring system distributed in space and synchronized to the time, which is a difficult task from a practical point of view, it is appropriate to reduce distributed mathematical model of factual contributions determination to the case of local measurements. The article presents the results of this reduction, which is based on the matrix method equivalent schemes of electric circuits. The presented mathematical model which was obtained in such a way can be used to describe point of common coupling, where one side is connected to the consumer, and the other is an equivalent power supply system. During the equivalent transformations the structure of the equivalent circuit of equivalent power supply system is determined. The results of presented research can be used in the development of methods and means of factual contribution distribution of linear sources of distortion in voltage distortion at the point of common coupling according to local measurements figures.

Keywords: power quality, factual contribution, point of common coupling, local measurement.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Tankevich E. M.*

**ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ
ТРАНСПОРТУ**

науковий журнал

**ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ
ТРАНСПОРТА**

научный журнал

**ELECTRIFICATION
OF TRANSPORT**

scientific journal

Свідоцтво про державну реєстрацію № 17327 – 6097P від 14.10.2010 р.

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

Передплатний індекс 68641

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

Передрук матеріалів здійснюється тільки з дозволу редакції

Члени редакційної колегії здійснюють рецензування та редагування статей

Статті друкуються українською, російською та англійською мовами

Журнал представлений у науково-метричних та реферативних базах даних

INDEX  COPERNICUS
I N T E R N A T I O N A L


URAN



 **український реферативний журнал**
"Д Ж Е Р Е Л О"

Редактор: Сиченко В. Г.
Комп'ютерна верстка: Босий Д. О.

Поштова адреса:
49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2
ДНУЗТ, кафедра «Електропостачання залізниць»,
тел.: (056) 373-19-11, факс.: (0562) 47-16-74
E-mail: elpostz@i.ua URL: <http://etr.diit.edu.ua/>

Формат 60×84 ¹/₈ Ум. др. арк. 14,8. Зам. № 224.
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