

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

ELECTRIFICATION OF TRANSPORT ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА



Індекс 68641



## МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

# ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

## № 6 / 2013

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Передплатний індекс 68641

ДНІПРОПЕТРОВСЬК

## ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

## ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

ELECTRIFICATION OF TRANSPORT

науковий журнал

научный журнал

scientific journal

## **№ 6, 2013**

Видання Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Затверджений до друку Вченою радою університету протокол № 4 від 02.12.2013 р.

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

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

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

## ВІД УКРАЇНИ

технічний університет); (Запорізький національний П. Д. Андрієнко Гетьман Г. К. (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна); Гончаров Ю. П. (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»), Денисюк С. П. (Національний інститут»), політехнічний технічний університет України «Київський Танкевич Є. М. (Інститут електродинаміки Національної академії наук України), технічний університет), (Вінницький національний Д. Лежнюк П. Костін М. О. (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна), Панасенко М. В. (Державний науководослідний центр Укрзалізниці), Саєнко Ю. Л. (Приазовський державний технічний Ф. (Головне управління електрифікації Максимчук В. та університет), 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 Казахстантеміржоли, Казахстан); Сідоров О. О. (Омський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Васяк І. (Лодзинська політехніка, Інститут електроенергетики, Республіка Польща); Стележецкі Р. (Гданьський морський університет, Республіка Польща); Палечек Й. (Остравський технічний університет, Чешська республіка).

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

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

Видання виходить 2 рази на рік з червня 2011 р.

содержание ЗМІ	CT CONTENT
електропостачанн	я / power supply
Бардушко В. Д.	
Параметричний синтез системи паралельних є	мнісних компенсуючих пристроїв тягової
мережі в сучасних умовах	8
Бардушко В. Д.	Bardushko V. D.
Параметрический синтез системы параллель-	Parametric synthesis of the system of parallel
ных емкостных компенсирующих устройств в	capacitive compensating devices in traction
тяговой сети в современных условиях	network in modern conditions8
Бялонь А., Фурман Ю.	
Визначення відстані між варисторними обмеж	сувачами перенапруги для контактної мережі
3 кВ постійного струму в лабораторних умова	1414
Бялонь А., Фурман Ю.	Bialon A., Furman U.
Определение расстояния между варистор-	Laboratory method of determining optimal
ными ограничителями перенапряжений для	distance between varistor surge protectors on
контактной сети 3 кВ постоянного тока в	3 kV DC catenary14
лабораторных условиях14	
Галкін О. Г., Ковальов О. А.	
Застосування параметричної моделі відмов ел	ементів контактної мережі для прогнозуван-
ня їх життєвого циклу	20
Галкин А. Г., Ковалев А. А.	Galkin A. G., Kovalev A. A.
Применение параметрической модели отка-	The application of parametric failure model of
зов элементов контактной сети для прогно-	the contact systems elements for predicting
зирования их жизненного цикла	their life cycle20
Закарюкін В. П., Крюков А. В., Іванова К.	C
Аналіз схем симетрування на тягових підстан	ціях залізниць змінного струму26
Закарюкин В.П., Крюков А.В., Иванова Е.С.	Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Ivanova E.S.
Анализ схем симметрирования на тяговых под-	Analysis of balancing schemes for railway AC
станциях железных дорог переменного тока 26	traction substations26
Кім Є. Д.	
Оптимізація електричного поля високовольтн	ого полімерного прохідного ізолятора34
Ким Е. Д.	Kim E. D.
Оптимизация электрического поля высоко-	Optimization of high-voltage electric field of
вольтного полимерного проходного изоля-	polymer bushing insulator
тора	
Михаліченко П. Є.	
Вплив режиму короткого замикання в тяговій	мережі постійного струму на перепал
контактного проводу	40
Михаличенко П. Е.	Mihalichenko P. E.
Влияние режима короткого замыкания в	Impact of the short-circuit in DC traction net-
тяговой сети постоянного тока на пережог	work on burned through the contact wires40
контактного провода 40	
електромагнітна сумісність /	electromagnetic compatibility
Катков О. С., Годоренко В. А., Гюрютіков	
Аналіз впливу ступеня заряду ємностей комп	енсатора реактивної потужності на характе-
ристики електроенерги у споживача	Vather AS Todoropho V A
катков А. С., Годоренко Б. А.,	Nalkuv A.S. I UUOFCIIKU V.A., Tymmutikov A I
іюрютиков А. И.	I YUFYUIIKOV A.I. A maluria of the influence of the degree of charge
Анализ влияния степени заряда емкостеи	Analysis of the influence of the degree of charge
компенсатора реактивнои мощности на харак-	capacities of reactive power compensator on the
теристики электроэнергии у потребителя 4/	characteristics of electricity consumers47

Кузнецов В. В., Ніколенко А. В.	
Синтез динамічної електромагнітної моделі ас	инхронного двигуна, що працює в мережі
з неякісною електроенергією	
Кузнецов В. В., Николенко А. В.	Kuznetsov V. V., Nikolenko A. V.
Синтез динамической электромагнитной	Synthesis of a dynamic model of electromag-
модели асинхронного двигателя, работаю-	netic induction motor which operating in net-
щего в сетях с некачественной электро-	works with poor power quality52
энергией	
Сиченко В. Г.	
Якість напруги на шинах тягового навантажен Сыченко В. Г.	ня підстанцій постійного струму58 Sychenko V. G.
Качество напряжения на шинах тяговой	Voltage quality on traction load buses of DC
нагрузки подстанций постоянного тока 58	substations
Тодоренко В. А., Василенко С. К.	
Дослідження електромагнітних процесів у пар	алельному ВЧ компенсаторі реактивної
потужності в середовищі 1 Сад 6.2	$\mathbf{T}_{\mathbf{r}} \mathbf{J}_{\mathbf{r}} \mathbf{v}_{\mathbf{r}} \mathbf{h} \mathbf{v}_{\mathbf{r}} \mathbf{h} \mathbf{v}_{\mathbf{r}} \mathbf{h} \mathbf{h} \mathbf{v}_{\mathbf{r}} \mathbf{h} \mathbf{h} \mathbf{v}_{\mathbf{r}} \mathbf{h} \mathbf{h} \mathbf{v}_{\mathbf{r}} \mathbf{h} \mathbf{h} \mathbf{h} \mathbf{v}_{\mathbf{r}} \mathbf{h} \mathbf{h} \mathbf{h} \mathbf{h} \mathbf{h} \mathbf{h} \mathbf{h} $
Годоренко В. А., Василенко С. К.	I odorenko V. A., vasilenko S. K.
Исследование электромагнитных процессов	investigation of electromagnetic processes in
в параллельном ВЧ компенсаторе реактив-	parallel KF reactive power compensator in
нои мощности в среде 1 Сад 6.2 64	1 Cad 6.2 environment64
Кузненов В Г Босий Л О Кадашинков К	
Vправління транспортним потоком лля зменш	ення експлуатаційних витрат
електрифікованих запізниць	71
Кузненов ВГ Босый ЛА	Kuznetsov V. G., Bosiv D. O.,
Кулецов Бл., восын дл.,	Kalashnikov K. O.
Управление транспортным потоком для	Traffic management to reduce operating costs
уменьшения эксплуатационных расхолов	of electrified railways
электрифицированных железных дорог71	
автоматизація і діагностика	/ automation and diagnose
Галкін О. Г., Несенюк Т. А.	
Контроль і діагностика ізоляторів ліній електр	оопередач80
Галкин А. Г., Несенюк Т. А.	Galkin A. G., Nesenyuk T. A.
Контроль и диагностика изоляторов линий	Monitoring and diagnostics of power transmis-
электропередач 80	sion lines insulators80
Гнидюк А. Ф.	
Принципи моделювання теплових режимів ро	боти трансформатора86
Гнидюк А. Ф.	Gniduk A. F.
Принципы моделирования тепловых режи-	Principles of modeling of thermal modes of
мов работы трансформатора 86	the transformer86
Ляшук В. М., Дем'янюк І. В.	
Дослідження методів діагностування міжвитк	ової ізоляції в обмотках тягових сухих
трансформаторів	
Ляшук В. М., Демьянюк И. В.	Lyashuk V. M., Demyanuk I. V.
Исследование методов диагностирования	Investigation methods of diagnosing interturn
межвитковой изоляции в обмотках тяговых	insulation in the windings of traction dry trans-
сухих трансформаторов 90	formers
електрорухомий склад	/ electric rolling stock
Зінов'єв Г. С., Роженцева А. В., Суслова А.	<b>C.</b>
Порівняльний аналіз високовольтних перетво	рювачів перспективних електровозів
постійного струму	

Зиновьєв Г. С., Роженцева А. В, Суслова А. С. Сравнительный анализ высоковольтных пре- образователей перспективных электровозов постоянного тока	Zinoviev G. S., Rozhentseva A. V., Suslova A. S. Comparative analysis of high-voltage convert- ers prospective DC electric locomotives95				
Мельниченко О. В., Власьєвський С. В. Аварійні процеси на першій зоні регулювання змінного струму та забезпечення його працезл	напруги перетворювача електровоза атності101				
Мельниченко О. В., Власьевский С. В. Аварийные процессы на первой зоне регу- лирования напряжения преобразователя электровоза переменного тока и обеспече- ние его работоспособности	Melnichenko O. V., Vlasyevsky S. V. Emergency processes on the first control zone of voltage converter at AC electric locomotive and providing its operability10				
Сідоров О. О., Смердін А. М., Чепурко О. Є. Застосування СFD-методу для визначення аер та його аеродинамічного пристрою Сидоров О. А., Смердин А. Н., Чепурко А. Е. Применения CFD-метода для определения аэродинамических сил токоприемника и его аэродинамического устройства 113	одинамічних сил струмоприймача Sidorov O. A., Smerdin A. N., Chepurko A. E. Using CFD-method to determine the aerody- namic forces pantograph and aerodynamic de- vices				

#### УДК 621.331

#### В. Д. БАРДУШКО (ИрГУПС)

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

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЕМКОСТНЫХ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ТЯГОВОЙ СЕТИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Дальнейшее повышение энергетической эффективности дорог переменного тока средствами устройств поперечно-емкостной компенсации может быть реализовано с привлечением таких концепций, которые ранее были невозможны. Понятно, что наилучшие результаты можно получить при наличии регулируемых компенсирующих устройств (КУ) непосредственно на каждом электровозе. В этом случае, закон регулирования таких КУ сводился бы к поддержанию их емкостных токов, равных по модулю индуктивным тяговым токам, которые в каждый момент времени реализуются соответствующими электровозами (ЭПС). Однако, в ближайшее время вряд ли появятся дешевые, малогабаритные и с достаточной необходимой мощностью конденсаторные установки и средства их регулирования, которые могли бы быть смонтированы на каждом электровозе. Кроме того, во-первых, опыт эксплуатации показывает, что необходимость решения вопросов снижения реактивной мощности, с точки зрения экономического критерия, имеет место далеко не на всех межподстанционных зонах (МПЗ), обеспечивающих тягу поездов. Во-вторых, коэффициент использования таких КУ, если они появятся, по понятным причинам будет достаточно низким.

Многочисленные исследования [1, 2, 3], касающиеся повышения энергетической эффективности КУ, базируются на принципе, который предполагает одну КУ в МПЗ с неизменной координатой, равной примерно середине длины МПЗ. Однако, если новые технологии приведут к появлению новых дешевых и надежных конденсаторов, то КУ может быть выполнена распределенной вдоль МПЗ. Каждая отдельная батарея такой распределенной КУ может управляться на основе закона, непрерывно формируемого в ходе реального времени. Вид этого закона определяется значением координат ЭПС, располагающихся в МПЗ и их реактивных токов. Могут иметь место различные варианты распределенной КУ:

 все частичные батареи включены и имеют оптимальное с точки зрения энергетической эффективности емкостные токи, которые могут быть нерегулируемыми;

2) для большей эффективности, емкостные токи изменяются в зависимости от индуктивных токов ЭПС и ряда других факторов.

Ниже рассмотрен вопрос синтеза параметров распределенной в границах МПЗ КУ, для которой в каждый расчетный момент времени включена лишь одна батарея в той или иной координате. И координата, и ток КУ должны соответствовать минимуму целевой функции. То есть в каждый момент времени емкостной ток и координата включения КУ, должны отвечать критерию оптимизации. Таким образом, целевая функция, в качестве которой целесообразно принять потери электроэнергии в тяговой сети, является функцией двух переменных. Задачей анализа целевой функции является определение тока КУ (*Ik*) и координаты ее подключения (*y*) в МПЗ.

Упрощенный подход решения этой задачи может быть основан на методе равномерно распределенной нагрузки вдоль тяговой сети. Вид эпюры токов в тяговой сети [4], в этом случае имеет вид представленный на рис. 1.



Рис. 1. К определению закона изменения тока в тяговой сети расчетной МПЗ при отсутствии КУ для наиболее общего случая (*I*<sub>1</sub> ≠ *I*<sub>2</sub>).

Следует отметить, что этот метод будет тем точнее определять искомые параметры, чем выше размеры движения, то есть чем большее число поездов размещается в МПЗ. Это обстоятельство оправдывает использование метода равномерных нагрузок в ряде случаев, поскольку

<sup>©</sup> Бардушко В. Д., 2013

устройства компенсации реактивной мощности как раз и целесообразны при высоких размерах движения. Для дальнейшего анализа явлений в тяговой сети необходимо получить закон изменения тока вдоль межподстанционной зоны. Обращаясь к рис. 1, можно выразить погонную тяговую нагрузку через суммарную нагрузку от всех электропоездов (ЭПС) *I*, находящихся в межподстанционной зоне (МПЗ)

$$i=\frac{I}{\ell},$$

где  $I = I_1 + I_2$ ;  $I_1$ ;  $I_2$  - токи фидеров смежных подстанций, питающие расчетную МПЗ.

На основании первого закона Кирхгофа для узла следует  $I_1 - idx = 0$ . Тогда для произвольной точки *M* справедливо

$$I_{x} = I_{1} - \int_{0}^{x} i dx;$$

$$I_{x} = -\frac{I_{1} + I_{2}}{\ell} x + I_{1}.$$
(1)

Полезно заметить, что для частного случая справедливо

$$I_1 = I_2 = \frac{I}{2}; \quad I_x = -\frac{I}{\ell}x + \frac{I}{2}.$$

Выражение (1) с определенной степенью точности отражает закон изменения тока в границах МПЗ при отсутствии поперечного емкостного компенсирую-щего устройства (КУ). При наличии КУ в произвольной координате ее *у* расчетная схема трансформируется к виду, представленному на рис. 2.



Рис. 2. К определению закона изменения тока в тяговой сети расчетной МПЗ при наличии КУ.

Потери электроэнергии в тяговой сети зависят от параметров тяговой сети и протекающего по ней тока. При неизменных параметрах тяговой сети потери зависят от тока, величина ко-

© Бардушко В. Д., 2013

торого меняется вследствие изменения тяговой нагрузки и от тока УК. Ток УК, компенсируя реактивную составляющую, уменьшает потери в тяговой сети, величина которых, однако, не может снизиться до нуля, что означало бы прекращение передачи к электроподвижному составу электроэнергии.

Закон изменения тока вдоль тяговой сети в границах анализируемой МПЗ позволяет записать целевую функцию в виде двух составляющих (для упрощения анализа принято, что погонное сопротивление тяговой сети равно единице, что не влияет на ход анализа и получаемые результаты, связанные с оценкой координат и тока КУ)

$$\Delta P_{1} = \int_{0}^{y} \left( -\frac{I_{1} + I_{2}}{L} x + I_{1} - I_{k} \frac{L - y}{L} \right)^{2} dx;$$

$$\Delta P_{2} = \int_{y}^{L} \left( -\frac{I_{1} + I_{2}}{L} x + I_{1} + I_{k} \frac{L - y}{L} \right)^{2} dx.$$
(2)

Необходимость представления закона в виде двух составляющих определяется тем обстоятельством, что, как это видно из расчетной схемы на рис. 3, правее точки токораздела тока КУ, знак тока КУ меняется на противоположный и в отличие от тягового тока (уместно напомнить, что речь идет о реактивных составляющих), протекающего по тяговой сети, автоматически не может быть отражен формулой.



Рис. 3. К формированию целевой функции.

На рис. З ТТРТТ – точка токораздела реактивной составляющей тяговой нагрузки; ТТРКУ – точка токораздела тока КУ.

На основе выражения (2) целевая функция примет вид

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_1 + \Delta P_2. \tag{4}$$

Характер изменения потерь, выступающих в качестве целевой функции, носит квадратичный характер от токов, а потери увеличиваются с увеличением этих токов. Исходя из этих очеелектропостачання / power supply

видных физических представлений, можно отказаться от детального анализа целевой функции на экстремальные значения, поскольку становится ясным, что целевая функция от тока КУ является функцией параболического типа и имеет минимум.

Используя стандартные приемы анализа, можно получить искомые параметры как аргументы, соответствующие минимуму целевой функции по искомым параметрам. Частные производные искомым параметрам по

 $\frac{\partial}{\partial I_k}\Delta P_{\Sigma}$ ,  $\frac{\partial}{\partial y}\Delta P$ , очевидно, имеют вид, пред-

Значения тока КУ получается подстановкой

одного из корней (у) в последнее уравнение.

Значение (у) – обратной подстановкой. Ниже на

рис. 4 и рис. 5 представлена графическая ин-

потерь мощности от реактивных токов в тяговой

сети при наличии КУ-  $\Delta P_{\Sigma K Y}(y)$ ;  $\Delta P_{TC}(y)$ - то

Аналогично можно представить зависимость

терпретация анализируемой задачи.

же при отсутствии КУ (см. рис.6).

ставленные выражениями ниже

$$\begin{split} &\frac{\partial}{\partial I_k}\Delta P_{\Sigma} = \frac{\left(L-y\right)\cdot\left(2\cdot I_1\cdot y^2+2\cdot I_2\cdot y^2+I_1\cdot L^2\right)}{L^2} + \\ &+ \frac{\left(L-y\right)\left(2\cdot I_k\cdot L^2-I_2\cdot L^2-4\cdot I_1\cdot L\cdot y-2\cdot Ik\cdot L\cdot y\right)}{L^2};\\ &\frac{\partial}{\partial y}\Delta P = -\frac{I_k\left(6\cdot I_1\cdot y^2+6\cdot I_2\cdot y^2+5\cdot I_1\cdot L^2-I_2\cdot L^2\right)}{L^2} + \\ &+ \frac{I_k\left(2\cdot I_k\cdot L^2-I_2\cdot I_1\cdot L\cdot y-4\cdot I_2\cdot L\cdot y-2\cdot I_k\cdot L\cdot y\right)}{L^2}. \end{split}$$

Поскольку координата у входит в уравнения в третьей степени, то решение содержит три корня, приемлемым же является тот, который имеет физический смысл: во-первых координата не должна быть отрицательной и, во-вторых лежать внутри границ анализируемой МПЗ. Аналогично следует поступить и по отношению тока КУ, имеющего, как это показывает анализ уравнений, два корня.



Рис. 4. Графическая интерпретация изменения целевой функции от места подключения КУ

Таким образом, параметрами распределенной КУ, расчетная схема которой приведена на рис. 2, являются ее координата (у) и емкостной ток Ik(у).

Законы формирования тока КУ и ее координаты при упрощенном методе формируются на основе минимального объема информации, состоящей из характеристики МПЗ-ее длины L и токов фидеров смежных тяговых подстанций I1, I2, питающих анализируемую МПЗ.

© Бардушко В. Д., 2013

 $I_{k1} = 0;$ 



Рис. 5. Графическая интерпретация изменения целевой функции от соотношения токов тяговых подстанций



Рис. 6. Графическая интерпретация изменения целевой функции  $\Delta P_{\Sigma \kappa y}$  от тока компенсирующей

установки (прямая горизонтальная линия – потери мощности в тяговой сети при отсутствии КУ)



Рис. 7. К анализу формирования параметров и закона регулирования распределенной КУ по токам ЭПС и их координатам

Уточненный метод основывается на решении управляющей вычислительной машиной (УВМ) отдельных мгновенных схем, отстоящих на шаг дискретизации во времени  $\Delta t$ .

Для получения оптимальных параметров закона управления системой распределенной КУ целесообразно обратиться к схеме, приведенной на рис. 5.

Закон регулирования места включения (у) и емкостного тока Ik(у), как будет показано ниже, синтезируется на основании индуктивных токов ЭПС и их координат –  $x_j$ . Этот принцип требует привлечения информации о координатах ЭПС и их реактивных токах для любого момента времени, регулирования распределенной КУ. Поэтому реализация рассматриваемого способа повышения энергетической эффективности тяговых сетей переменного тока должна формиро-ваться с привлечением современных систем получения и передачи информации. Таковыми, например, являются ГЛОНАСС.

Принимая в качестве критерия минимальные потери в тяговой сети можно известным методом определить искомые параметры.

Также как и в предыдущем случае, целевой функцией являются потери мощности в тяговой

© Бардушко В. Д., 2013

сети, выражение для которых можно составить на основании схемы рис. 7.

$$\Delta P \mathbf{l} = \frac{x \mathbf{l} \cdot \left[ (I \mathbf{l} \cdot L + I 2 \cdot L + I 3 \cdot L + I 4 \cdot L - I_k \cdot L) \right]}{L^2} - \frac{(I \mathbf{l} \cdot x \mathbf{l} + I 2 \cdot x 2 + I 3 \cdot x 3 + I 4 \cdot x 4 - I_k \cdot y)}{L^2}$$

или, свернув

$$\Delta P \mathbf{1} = \frac{x \mathbf{1} \cdot \left[ L \cdot \left( \sum_{i=1}^{n} I i - \sum_{i=1}^{n} I i \cdot x i - I_{k} \left( L - y \right) \right) \right]^{2}}{L^{2}}$$

Аналогично

$$\Delta P4 = \frac{\left(x3 - y\right) \cdot \left[L \cdot \left(\sum_{i=3}^{n} Ii - \sum_{i=1}^{n} Ii \cdot xi - I_{k} \cdot y\right)\right]^{2}}{I_{k}^{2}};$$

$$\Delta P5 = \frac{(x3 - x4) \cdot \left[ L \cdot \left( \sum_{i=4}^{n} Ii - \sum_{i=1}^{n} Ii \cdot xi - I_{k} \cdot y \right) \right]^{2}}{I^{2}};$$

$$\Delta P6 = \frac{\left(x4 - L\right) \cdot \left[L \cdot \left(I_k \cdot y - \sum_{i=1}^n Ii \cdot xi\right)\right]^2}{L^2};$$

ISSN 2307-4221 Електрифікація транспорту, № 6. - 2013.

## $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P 1 + \Delta P 2 + \left| \Delta P 3 \right| + \left| \Delta P 4 \right| + \Delta P 5 + \Delta P 6.$

електропостачання / power supply

В выражении для  $\Delta P_{\Sigma}$  два его члена принимаются по абсолютной величине. Логика этого вытекает из анализа слагаемых  $\Delta P3$   $\Delta P4$ , в которых имеются множители (x2 - y) и (x3 - y). Ясно, что *y*, "пробегая" значения от 0 до *L*, приводит к ситуации, когда они могут быть отрицательными. Потери мощности отрицательными быть не могут, а поэтому  $\Delta P3$  и  $\Delta P4$  принимаются по абсолютной величине.

Искомые параметры определяются известным математическим методом, то есть решением уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial I_k} \Delta P_{\Sigma} = 0; \\ \frac{\partial}{\partial y} \Delta P_{\Sigma} = 0. \end{cases}$$

Анализ показывает, что выражения для рассмотренных четырех нагрузок (ЭПС) получаются очень громоздкими. Однако для  $I_k$  оно является менее сложным и поэтому целесообразно для каждой мгновенной схемы сначала определять оптимальный ток КУ и обратной подстановкой находить оптимальную координату включения той или иной секции распределенной КУ.

Геометрическая интерпретация результатов, приведенная на рис. 8, показывает, что при симметричных мгновенных схемах могут иметь место два минимума и, в этом случае, целесообразно полученную оптимальную мощность КУ разделить пополам и включить в местах минимума.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Герман, Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог [Текст]: учебное пособие / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. – М.: Транспортная книга, 2013. - 268 с.

2. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. - 183с.

3. Герман, Л. А. Особенности компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения железных дорог [Текст] / Л. А. Герман, Б. М. Бородулин // Электро. – 2010 – №3. – С. 50 – 52.

4. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрических железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528с.

Поступила в печать 14.10.2013.

Внутренний рецензент Сыченко В. Г.



Рис. 8. Вид целевой функции при характеристиках режима отдельной мгновенной схемы в МПЗ:  $L = 50 \ \kappa m$ ;  $I1 = 300 \ A$ ;  $I2 = 15 \ A$ ;  $I3 = 15 \ A$ ;  $I4 = 300 \ A$ ;  $x1 = 8.33 \ \kappa m$ ;  $x2 = 16.66 \ \kappa m$ ;  $x3 = 33.33 \ \kappa m$ ;  $x4 = 41.66 \ \kappa m$ 

При большем числе ЭПС в МПЗ выражения для параметров оптимизации распределенной КУ существенно усложняются. Анализ показывает, что в этом случае наиболее рациональным является вычисление на УВМ значений целевой функции  $\Delta P_{\Sigma}(y)$  с дальнейшим определением минимума простым перебором.

В заключение следует заметить, что приведенный анализ распространяется на случаи для двухстороннего питания тяговой сети однопутного участка или двухстороннего питании тяговой сети с полным параллельным соединением подвесок путей.

#### REFERENCES

1. German L. A., Serebryakov A. S. *Reguliruemye* ustanovki emkostnoy kompensatsii v sistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog: uchebnoe posobie [Position regulated capacitive compensation in traction power supply systems of railways: tutorial]. Moscow, Transportnaya kniga Publ., 2013. 268 p.

2. Borodulin B. M., German L. A., Nikolaev G. A. Kondensatornye ustanovki elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Capacitor units electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1983. 183 p.

3. German L. A., Borodulin B. M. Osobennosti kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Features reactive power compensation in traction power supply system of railways]. *Elektro* – Electro, 2010, no.3, pp.50-52.

4. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektricheskikh zheleznykh dorog* [Electricity electric railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.

Внешний рецензент Панасенко Н. В.

© Бардушко В. Д., 2013

електропостачання / power supply

Наилучшие результаты повышения энергетической эффективности дорог переменного тока средствами устройств поперечно-емкостной компенсации можно получить при наличии регулируемых компенсирующих устройств непосредственно на каждом электровозе.

Новые технологии приведут к появлению новых дешевых и надежных конденсаторов, компенсирующее устройства могут быть выполнены распределенными вдоль межподстанционной зоны. Каждая отдельная батарея такой распределенной компенсации может управляться на основе закона, непрерывно формируемого в ходе реального времени. Вид закона управления определяется значением координат электроподвижного состава, располагающихся в межподстанционной зоне и их реактивных токов.

В статье рассматривается вопрос потенциальной возможности повышения эффективности поперечноемкостных компенсаций на основе их регулирования в зависимости от мест размещения электроподвижного состава и его индуктивного электропотребления.

**Ключевые слова:** потери мощности, тяговая сеть, современные средства передачи информации, закон регулирования.

#### УДК 621.331

#### В. Д. БАРДУШКО (ІрГУПС)

Іркутський державний університет шляхів сполучення, кафедра Електропостачання залізничного транспорту, Росія, 664074, м. Іркутськ, вул. Чернишевського, 15, тел. +7 (3952) 63-83-45, ел. пошта: <u>barvadan@iriit.irk.ru</u>

## ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЄМНІСНИХ КОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

Найкращі результати підвищення енергетичної ефективності залізниць змінного струму за допомогою пристроїв поперечно-ємнісної компенсації можна отримати за наявності регульованих компенсуючих пристроїв безпосередньо на кожному електровозі.

Нові технології приведуть до появи нових дешевих і надійних конденсаторів, компенсуючі пристрої можуть бути виконані розподіленими уздовж міжпідстанційної зони. Кожна окрема батарея такої розподіленої компенсації може управлятись на основі закону, який формується безперервно в ході реального часу. Вид закону управління визначається значенням координат електрорухомого складу, який розташовується на міжпідстанційній зоні та їх реактивних струмів.

У статті розглядається питання потенційної можливості підвищення ефективності поперечно-ємнісних компенсацій на основі їх регулювання в залежності від місць розміщення електрорухомого складу і його індуктивного електроспоживання.

Ключові слова: втрати потужності, тягова мережа, сучасні засоби передачі інформації, закон регулювання.

Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

Зовнішній рецензент Панасенко М. В.

#### UDC 621.331

#### V. D. BARDUSHKO (IrGUPS)

Irkutsk State Transport University, Department of railway transport power supply, 15 Chernyshevskaya Street,, Irkutsk, Russia, 664074, tel.: +7 (3952) 63-83-45, e-mail: <u>barvadan@iriit.irk.ru</u>

## PARAMETRIC SYNTHESIS OF THE SYSTEM OF PARALLEL CAPACITIVE COMPENSATING DEVICES IN TRACTION NETWORK IN MODERN CONDITIONS

The best results to improve energy efficiency of AC railroads are capacitance compensation devices that can be controlled in the presence of compensating devices directly to each locomotive.

New technologies lead to new cheap and reliable capacitors, compensating devices can be made distributed along zone between traction substations. Each separate battery such distributed compensation can be controlled on the basis of law that continuously generated during real time. View of the control law is determined by the coordinates of electric rolling stock which ranging in zone between substations and reactive currents.

The article discusses the issue of potential opportunities to improve the efficiency of the transverse capacitive compensation on the basis of their regulation, depending on the placement of the electric rolling stock and its inductive energy consumption.

Keywords: Loss of power, traction network, modern means of information transmission, the law of regulation.

Internal reviewer Sychenko V. G.

External reviewer Panasenko N. V.

© Бардушко В. Д., 2013

#### УДК 621.331.3

## А. БЯЛОНЬ, Ю. ФУРМАН (ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА, ВАРШАВА, СИЛЕЗСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ, КАТОВИЦЕ)

електропостачання / nower supply

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

Силезский политехнический институт, Кафедра транспорта, Сектор автоматики на транспорте, 40-019 Катовице, Польша, ул. Красинского 8, тел.: +48326034136, эл. почта: <u>andrzej.bialon@polsl.pl</u>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ВАРИСТОРНЫМИ ОГРАНИЧИТЕЛЯМИ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ 3 КВ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

#### Введение

Постоянное развитие сложных систем управления, которые в большой степени состоят из электронных устройств, ясно обусловлавливает необходимость обеспечения надежной защиты контактной сети от перенапряжений и, тем самым, ограничений уровней перенапряжений в устройствах СЦБ. Прежде всего, это связано с необходимостью ограничения перенапряжений на более низком, чем до сих пор, уровне. В связи с чем, по заказу Польских Железнодорожных Линий (АО ПКП ПЛК), в Институте железнодорожного транспорта выполнялись работы по созданию прототипа системы защиты контактной сети с применением вариограничителей сторных перенапряжений (ОПН). Для проектирования и внедрения в эксплуатацию данной системы велись трудоемкие испытания, как натурные, так и лабораторные. При этом необходимым являлось рассмотрение явления гашения перенапряжений контактной сетью в функции расстояния от источника удара. Возможно, это целесообразнее было бы выполнить в реальных условиях, но для экономии времени и финансов, были проведены лабораторные испытания на разработанной для данной цели лабораторной модели. Модель должна в максимальной степени отражать реальные условия, т.е. выполнять требования по распространению перенапряжений в эксплуатируемой контактной сети.

#### 1. Характеристика модели участка контактной сети

В фазе проектирования модели принято, что она должна соответствовать четырем основным критериям:

a) состоять из элементов со сосредоточенными параметрами, которые будут соответствовать участкам контактной сети длиной в один километр;

б) параметры составляющих элементов модели обязательно соответствуют единичным параметрам (L, R, C) 1 км контактной сети,

в) размещение индуктивных и емкостных элементов модели по отношению друг к другу не должно вызывать индуктивной и емкостной связи,

г) примененные элементы должны соответствовать необходимым уровням изоляции для взаимодействия с генератором импульсного напряжения с максимальной амплитудой 7 кВ.

Разработанная лабораторная модель восьмикилометрового участка контактной сети состоит из 8 индуктивных элементов и 8 поперечных емкостей (рис. 1). Следует подчеркнуть, что выбранная длина участка и значения электрических параметров отвечали погонным параметрам типовой контактной сети, применяемой на опытном кольце Института железнодорожного транспорта в г. Жмигруд.



электрическая система модели в км участка контактной сети

© Бялонь А., Фурман Ю., 2013

Индуктивный элемент, соответствующий 1 км контактной сети, изготовлен в виде катушки с ферритовым разомкнутым сердечником с большой магнитной проницаемостью. Катушка намотана медной проволокой с изоляцией 2 мм. Индуктивность намотанной катушки составляла около  $465 \pm 10 \mu$ Н и сопротивление 0,035  $\Omega$ . Конденсатор, представляющий погонную емкость, изготовлен из двух металлических плиток, разделенных диэлектриком. Емкость таким образом построенного конденсатора, составляла около 10,5 nF и могла регулироваться.

#### 2. Методика испытаний

Для испытаний использовался генератор, генерирующий импульсы формой 1,2/50µs и 10/700µs с максимальной амплитудой генерируемого ударного импульса 6,9 кВ. Принятый тестовый импульс 1,2/50µs характерен для перенапряжений, создаваемых в электрической цепи от магнитного поля, вызванного как ударом молнии, так и коммутационными перенапряжениями. Этот импульс широко применяется для исследования устойчивости электрических и электронных устройств. Реальное время воздействия удара молнии в контактную сеть или перенапряжений от волновых процессов может быть значительно большим. Поэтому проводились также испытания для импульса 10/700µs.

Для определения оптимального расстояния между ОПН в контактной сети, проводились измерения распространения ударного импульса на модели участка контактной сети с нагрузкой варистором. Как приведено на рис. 2, генератор импульсного напряжения (G) присоединен ко входу модели, а ОПН в конце модели.



Рис. 2. Схема измерительной системы при нанесении ударных импульсов для модели с нагрузкой варисторного ограничителя перенапряжений

Испытание заключалось в измерениях и регистрации амплитуды ударных импульсов в пунктах 1\_Z ÷ 9\_Z модели участка контактной сети. Форма амплитуд импульсов напряжения регистрировались с помощью безиндуктивного распределителя напряжения, а форма тока регистрировалась при помощи катушки Роговского.

В дальнейшем, для подробных испытаний зоны взаимодействия между ОПН, следовали измерения для различных конфигураций, в которых изменяется расстояние между варисторами и место введения ударных импульсов. В связи с этим были приняты два случая нанесения ударов относительно положения варисторов в разработанной модели:

© Бялонь А., Фурман Ю., 2013

а) удар посередине между варисторами при переменном расстоянии размещения варисторов, т.е.
 2, 4 и 6 км;

б) удар у входа модели, в которой один из варисторов находится в конце модели при расстоянии между варисторами 4 км.

Для первого варианта нанесения удара в измерительной системе, представленной на рис. 3, генератор импульсного напряжения присоединен в пункте 5\_Z, а на конечных зажимах модели нет нагрузки. Испытание заключалось в измерении и регистрации амплитуд ударных импульсов в пунктах 1\_Z ÷ 9\_Z для случая взаимного размещения варисторов в точках 2, 4 и 6 км.



Рис. 3. Схема измерительной системы при нанесении ударных импульсов для модели с нагрузкой варисторного ограничителя перенапряжений

Во втором варианте импульс вводился у входа модели (пункт 1\_Z). Как представлено на рис. 4, ОПН находятся в пункте 5\_Z и в конце модели (пункт 9\_Z), поэтому расстояние между ними составляло 4 км. Аналогично первому варианту, испытание заключалось в измерении и регистрации амплитуд ударных импульсов в пунктах 1\_Z по 9\_Z с использованием раньше упомянутых устройств.



Рис. 4. Схема измерительной системы при введении ударных импульсов для второго варианта

Примененные для испытаний ОПН имеют следующие параметры:

а) номинальный разрядный ток 8/20 µs – 10 kA;

б) максимальный разрядный ток 8/20 µs – 40 kA;

в) напряжение постоянной работы 440 V;

г) защитный уровень напряжения при 10 kA (8/20 µs) – 1460 V.

При выборе варисторов основной функцией являлась возможность обеспечения их полной проводимости при максимальной амплитуде импульсов, создаваемых примененным генератором.

#### 3. Результаты испытаний

Из анализа зарегистрированных амплитуд импульсов ударного напряжения в отдельных измерительных пунктах модели, разработаны характеристики размещения амплитуд ударных импульсов в функции расстояния для ранее охарактеризованных измерительных систем.

Из анализа характеристик, приведенных на рис. 5 следует, что им свойственны две характерные зоны. Зона, в которой нет активного воздействия варистора на амплитуды ударных

<sup>©</sup> Бялонь А., Фурман Ю., 2013

импульсов и зона ограничения амплитуд ударных импульсов ОПН. При ударах импульсом 10/700µs зона активного воздействия варистора на амплитуду ударного импульса удлиняется по сравнению с импульсом 1,2/50µs. Можно прийти к выводу, что зона активирования варистора увеличивается при росте времени роста ударного импульса.



Рис. 5. Распределение амплитуд ударных импульсов (1,2/50 и 10/700 µs) в функции расстояния от генератора для модели контактной сети с нагрузкой варистора

Предварительное определение расстояния между ОПН в контактной сети требует определения зоны распространения перенапряжений, распространяющихся в оба направления от места удара, когда к сети присоединены ОПН. Результаты измерений распространения ударных импульсов, приведенные на рис. 6 указывают, что при размещении ОПН на расстоянии 2 или 4 км друг от друга, гашение амплитуды ударного импульса от места удара к месту присоединения варисторов линейной формы. Зато при расстоянии, составляющем 6 км, оно нелинейной формы. Данное вытекает из факта, что

варисторы находятся на границе зоны воздействия на амплитуды ударного импульса.

В варианте удара у входа модели, где есть один варистор в конце модели линии, при расстоянии между варисторами 4 км, характеристика ограничения перенапряжений между варисторами, приведенная на рис. 7, иллюстрирует, что варистор, присоединенный в конце модели, является нагрузкой для ударных импульсов. Уровень ограничения ударных импульсов на участке между варисторами сохраняется на уровне напряжения ограничения примененных ОПН.



Рис. 6. Характеристики гашения ударных импульсов (10/700 µs) в модели контактной сети при размещении варисторов 2, 4 и 6 км для первого варианта нанесения удара





Рис. 7. Характеристики гашения ударных импульсов (10/700µs) в модели контактной сети при размещении варисторов 4км для второго варианта нанесения удара

#### Выводы

На основе анализа характеристик гашения амплитуд ударных импульсов варисторными ограничителями перенапряжений можно прийти к выводу, что оптимальное расстояние варисторов может составлять около 4 км. В случае однородной сети (без стрелок, пересечений, ответвлений) построенной в зоне с низкой изокеауричностью возможно пробовать увеличить расстояние.

Приведенные выводы получены на основе лабораторных испытаний на специально разработанной для этой цели модели. Их целесообразно уточнить в натурных испытаниях с применением варисторов для защиты от перенапряжений контактной сети при использовании генератора импульсного напряжения с импульсной амплитудой не менее 15 кВ.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Budowa i poligonowe badania prototypowego systemu ochrony przed przepięciami z ogranicznikami warystorowym. Praca IK 3889/10 Warszawa, 2011.

2. Białoń A., Laskowski M., Pajka P., Zawadka Ł., Koncepcja ochrony sieci trakcyjnej 3kV DC przed przepięciami pochodzenia atmosferycznego i komutacyjnego. TTS nr 9/2012. 3. Opracowanie nowego systemu ochrony sieci trakcyjnej przed przepięciami, badania eksploatacyjne nowego systemu, określenie lokalizacji podłączenia ochrony od urządzeń sterowania trakcja i urządzeń sterowania ruche.Etap1. Praca CNTK 4291/10 Warszawa, 2007.

4. Adamski D., Białoń A., Furman J., Kazimierczak A., Laskowski M., Zawadka Ł., *Problematyka tłumienności przepięć w sieci trakcyjnej3kVDC*. Logistyka 3/2012

5. Białoń A., Furman J., Surgest tests conducted in the contact system I lab environment Elektrifikacija transporta Ukraina 3/2012.

6. Mikulski, J. Młyńczak J., Pawelak. M. Ochrona antykradzieżowa sieci trakcyjnej. Computer systems aided science and engineering work in transport, mechanics and electrical engineering. TRANSCOMP 2010. 14th International conference, Zakopane, Poland, 6 XII - 9 XII 2010. Conference proceedings. [Dokument elektroniczny]. Poznań : Instytut Logistyki i Magazynowania, 2010, s. 2257-2265, (Logistyka; nr 6, dod.: Logistyka - nauka).

7. Ким Е.Д., Сыченко В.Г. Защита от перенапряжений тяговых сетей постоянного тока: методология выбора ОПН. Вестник Днепропетровского национального технического университета железнодорожного транспорта им. ак. В. Лазаряна, Вып. 37 – 2011, – с. 82-93

Поступила в печать 01.09.2013.

Внутренний рецензент Сыченко В. Г.

Внешний рецензент Васяк И.

Применение новых микропроцессорных устройств железнодорожной автоматики требует усовершенствования методологии и средств их защиты. Статья посвящена рассмотрению одного из аспектов данной проблемы, а, именно, усовершенствованию защиты от внешних и коммутационных перенапряжений при применении нового типа защитных устройств – варисторных ограничителей перенапряжения. В статье охарактеризована лабораторная модель участка контактной сети и описаны ее основные элементы, приведена методика испытаний, рассмотрены различные варианты предварительного размещения варисторных

© Бялонь А., Фурман Ю., 2013

ограничителей перенапряжений в контактной сети, затем представлены и проанализированы результаты испытаний. Из анализа характеристик гашения амплитуд ударных импульсов варисторными ограничителями перенапряжений показано, что оптимальное расстояние между ними может составлять порядка 4 км.

Ключевые слова: контактная сеть, перенапряжения, варистор, ограничитель перенапряжений, импульс.

#### УДК 621.331.3

### А. БЯЛОНЬ, Ю. ФУРМАН (ІНСТИТУТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ, ВАРШАВА, СІЛЕЗЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ, КАТОВІЦЕ)

Інститут залізничного транспорту, 04-275 Варшава, Польща, вул. Хлопіцького 50, тел.: +48 22 4731453, факс: +48 22 4731036, ел. пошта: <u>abialon@ikolej.pl</u>

Силезький політехнічний інститут, Кафедра транспорту, Сектор автоматики на транспорті, 40-019 Катовице, Польща, вул. Красинського 8, тел.: +48326034136, ел. пошта: <u>andrzej.bialon@polsl.pl</u>

## ВИЗНАЧЕННЯ ВІДСТАНІ МІЖ ВАРИСТОРНИМИ ОБМЕЖУВАЧАМИ ПЕРЕНАПРУГИ ДЛЯ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ З КВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

Застосування нових мікропроцесорних пристроїв залізничної автоматики вимагає удосконалення методології та засобів їх захисту. Стаття присвячена розгляду одного з аспектів даної проблеми, а саме, удосконалення захисту від зовнішніх і комутаційних перенапруг при застосуванні нового типу захисних пристроїв – варисторних обмежувачів перенапруги. У статті охарактеризована лабораторна модель ділянки контактної мережі та описано її основні елементи, наведено методику випробувань, розглянуті різні варіанти попереднього розміщення варисторних обмежувачів перенапруг в контактній мережі, представлені і проаналізовані результати випробувань. З аналізу характеристик гасіння амплітуд ударних імпульсів варисторних обмежувачами перенапруг показано, що оптимальна відстань між ними може становити близько 4 км.

Ключові слова: контактна мережа, перенапруги, варистор, обмежувач перенапруги, імпульс.

Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

Зовнішній рецензент Васяк І.

#### UDC 621.331.3

A. BIALON, U. FURMAN (INSTITUTE OF RAILWAYS, WARSAW, SILESIAN TECHNICAL UNIVERSITY, KATOWICE)

Institute of railways, 04-275 Warsaw, Poland, 50 Chlopitskogo Street, tel.: +48 22 4731453, fax: +48224731036, e-mail: <u>abialon@ikolej.pl</u>

Silesian technical university, Department of Transport, Transport Automation Sector, 40-019 Katowice, Poland, 8 Krasinskogo Street, tel.: +48326034136, e-mail: <u>andrzej.bialon@polsl.pl</u>

## LABORATORY METHOD OF DETERMINING OPTIMAL DISTANCE BETWEEN VARISTOR SURGE PROTECTORS ON 3 KV DC CATENARY

Application of new microprocessor devices railway automation requires improvement methodology and tools for their protection. The article discusses one aspect of the problem as well as the improvement of protection from external and switching surges in the application of a new type of protective devices which are varistor voltage limiters. The article described a laboratory model of the contact network and described its main elements, describes a method of testing the various options considered prior organize varistor overvoltage in the contact system, and then present and analyze the test results. From the analysis of the characteristics of the shock pulse amplitude blanking varistor surge arresters shown that the optimal distance between them can be about 4 km.

**Keywords:** contact network, overvoltage, varistor, overvoltage limiter, pulse.

Internal reviewer Sychenko V. G.

External reviewer Vasyak I.

<sup>©</sup> Бялонь А., Фурман Ю., 2013

#### УДК 621.332(076.5)

## А. Г. ГАЛКИН. А. А. КОВАЛЕВ (УРГУПС)

Уральский государственный университет путей сообщения, 620034, Россия, Екатеринбург, ул. Колмогорова 66, тел.: +7 (343) 221-25-27, эл. почта: <u>AGalkin@usurt.ru</u>, <u>AKovalev@usurt.ru</u>

електропостачання / power supply

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

#### Введение

В настоящее время компания ОАО «РЖД» завершает одну из долголетних реформ. Ответственность за железнодорожные перевозки отдаются дочерним компаниям, в ведомстве ОАО «РЖД» остается инфраструктурный комплекс.

Основным приоритетом при эксплуатации железных дорог всегда выступала надежность и экономичность. Чтобы этого достичь, необходимы большие капиталовложения в научноисследовательские и опытно-конструкторские работы.

Мировой опыт развития железных дорог велик, рекорды скорости движения поездов в других странах достигают 500 км/ч, и, как следствие, можно приобрести новые технологии там. Тем не менее, отличительные климатические условия России не позволяют это сделать без дополнительной адаптации к местности и учета реальных нагрузок, действующих на контактную сеть, являющейся главной в этом процессе.. На сегодняшний день отсутствуют инструменты, позволяющие принимать решения по конструкциям, их технической эксплуатации, ремонту и т.д. с учетом всего жизненного цикла.

Для развития высокоскоростного движения в России требуется применять новые организационные принципы, технологии и научнотехнические решения создания контактной сети на всех стадиях жизненного цикла с обеспечением требуемого качества и сдачи в эксплуатацию контактной сети под ключ с гарантийными обязательствами на длительный период.

Поэтому необходим переход на новый уровень проектирования, производства и строительства высокоскоростных магистралей (BCM) на базе современных принципов управления жизненным циклом наукоемкой продукции.

#### Постановка задачи

Главная система, без которой не реализуемы проекты ВСМ, является контактная сеть. Она состоит из отдельных элементов: контактный провод, несущий трос, опора, консоль, фиксатор, струна, зажимы и др. Все они являются восстанавливаемыми объектами. Однако, далеко не всегда к ним может применяться допущение о полном восстановлении, но на небольших промежутках времени это вполне справедливо.

Основным показателем надежности элементов контактной сети является интенсивность отказов. Классическая кривая интенсивности отказов от времени состоит из трех участков: приработка – *I*, нормальная работа – *II* и деградация - III [1]. Для того чтобы уменьшить время приработки необходимо устранять выявленные недочеты на стадии проектирования и монтажа как можно раньше. Второй участок, соответствует нормальному режиму работы объекта. Отказы появляются, например, из-за неблагоприятных внешних факторов (климатические условия). На ІІІ участке кривой интенсивности начинают сказываться постепенные отказы, вызванные деградационными процессами (износом, старением, разрегулировками).

Определить временные границы указанных трех этапов для системы токосъема высокоскоростных магистралей, на сегодняшний день, возможно только путем моделирования, т.к. значения интенсивности отказов современных устройств контактной сети еще не известны.

В связи с этим необходимо разработать математическую модель, позволяющую оценивать срок жизненного цикла системы токосъема в зависимости от возникающих в ней нагрузок.

#### Решение задачи

Момент времени, в который начинается *III* период наработки на вновь проектируемом участке контактной сети, предлагается определить при помощи моделирования жизненного цикла системы.

Все это необходимо для выбора оптимального срока контракта жизненного цикла, заключаемого со специальной проектной компанией [2].

Отказ одного из элементов контактной сети может привести к ее отказу в целом, что в свою очередь приводит к задержке поездов, и соответственно к незапланированным расходам.

```
© Галкин А. Г., Ковалев А. А., 2013
```

*ISSN 2307-4221* Електрифікація транспорту, № 6. - 2013.

Для установления причин отказа составим их классификацию (рис. 1) по 5 категориям: причине возникновения, характеру проявления, взаимосвязи, группам сложности и способу обнаружения.



Рис. 1. Классификация отказов

Основные элементы контактной сети можно отнести к восстанавливаемым объектам. На рис. 2 наглядно представлен процесс отказа и последующего восстановления одного элемента, входящего в состав единой сложной технической системы.



Рис. 2. Периоды работы восстанавливаемого объекта

Система начинает работать в момент времени t = 0 и продолжает работать до момента времени  $t_{p1}$ . После этого происходит восстановление объекта в течение времени  $t_{B1}$ . Затем система продолжит работать случайное время  $t_{p2}$ . Проработав некоторый промежуток времени, система (элемент системы) вновь выходит из строя в момент  $t_{p1} + t_{B1} + t_{p2}$  и восстанавливается в течение времени  $t_{b2}$ .

Интервалы времени между отказами представляют собой систему взаимно независимых случайных величин [3]. Моменты отказов или восстановлений образуют в каждом опыте ряд чисел, которые образуют случайный поток, названный процессом восстановления. Данный процесс является различным для элементов и продолжается в течение жизненного цикла системы или элемента, входящего в него. Основной характеристикой процесса восстановления является функция восстановления  $\Omega(t)$  и ее дифференциальная характеристика – плотность восстановления  $\omega(t)$ , определяемые по следующим формулам:

$$\Omega(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t), \qquad (1)$$

$$\omega(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t), \qquad (2)$$

где  $f_n(t)$ и  $F_n(t)$  – соответственно плотность и функция распределения наработки до *n*-го отказа.

В случае независимости наработок между отказами функции распределения  $F_n(t)$  наработок до *n*-го отказа находятся путем последовательного применения правила свертки для суммы двух случайных величин:

$$F_{n}(t) = F_{n-1}(t) \cdot F(\Delta t_{n}) = \int_{0}^{t} F_{n-1}(t - \Delta t) \cdot dF(\Delta t) , \quad (3)$$

Вычисление аналитических выражений для функции восстановления  $\Omega(t)$  и плотности восстановления  $\omega(t)$  невозможно из-за сложности математической формализации применяемых стратегий восстановления работоспособности технических систем и необходимости учета множества факторов, влияющих на замену элемента в системе. Свертка, приведенная в формуле (3) лишь для некоторых законов распределения вычисляется в конечном виде. В этих условиях наиболее эффективным методом расчета является метод Монте-Карло.

При эксплуатации контактной сети имеется возможность контролировать параметры и работоспособность ее объектов. Для аналитической связи характеристик, описывающих изменение параметров элементов, с показателями надежности предлагается применить модель отказа «параметр - поле допуска». Графическое изображение этой модели показано на рис. 3 [1].



Рис. 3. Модель отказа параметр – поле допуска

Сделаем допущения, что:

- закон распределения параметра f(x, t) во времени не изменяется;

– реализации  $x_i(t)$  и моментные функции параметров плотности распределения f(x, t) во времени изменяются монотонно;

 в начальный момент времени значения параметров находятся в границах поля допуска.

Тогда моментные функции параметров распределения f(x, t) аппроксимируются зависимостями

$$\xi(t) = a + b \cdot t , \qquad (4)$$

$$\xi(t) = a \cdot exp(b \cdot t), \qquad (5)$$

$$\xi(t) = a \cdot t^b , \qquad (6)$$

$$\xi(t) = a \cdot exp(b \cdot t) + c, \qquad (7)$$

$$\xi(t) = a \cdot t^b + c, \qquad (8)$$

где  $\xi(t)$  – моментная функция некоторого параметра распределения f(t);

*а*, *b*, *c* - коэффициенты регрессий.

Случайный процесс изменения параметра представлен сечениями, в которых располагаются кривые плотности распределения параметра в определенные моменты времени f(x, t). Границы поля допуска могут задаваться как неслучайной величиной  $x_{\text{доп}}$ , так и случайными величинами  $f(x_{\text{доп}})$ , а также случайными процессами  $f(t, x_{\text{доп}})$  (стационарными и нестационарными).

Наибольший интерес для практики представляет случай, когда изменение параметра описывается нестационарным случайным процессом, а граница поля допуска является неслучайной величиной. В этом случае граница поля допуска – предельная величина параметра, при которой объект становится неработоспособным.

Так, например, заявленный срок службы элементов контактной сети, согласно ПУТЭКС может быть один. В случае перехода к ВСМ, и повышению интенсивности движения поездов, увеличения нагрузки на всю системы граница поля допуска изменится.

Предложенную методику предлагается применять для определения срока службы новых конструкций контактной сети, которые будут применяться на скоростных и высокоскоростных участках с учетом изменения основных нагрузок.

Для того чтобы увеличить жизненный цикл всей системы, необходимо повысить надежность приведенных выше устройств по отдельности. Обрыв струны в цепной подвеске и падение опоры с подвеской одинаково квалифицируются как отказ контактной сети. В первом случае возможен пропуск локомотивов с опущенным токоприемником, то во втором он приведет к задержке поездов, которые равны [4].

$$E_{3ad} = N_{3ad} \cdot c_{\pi 0}, \qquad (9)$$

где N<sub>зад</sub> – количество задержанных поездов;

*с*<sub>по</sub> – величина приведенных затрат на остановку и задержку одного поезда на перегоне.

Основным критерием оптимальности является минимизация затрат на поддержание максимального срока службы объектов, при создании которых заключается контракт жизненного цикла.

В 2010 году в ОАО «Российские железные дороги» была развернута работа по гармонизации собственной нормативной базы с системой стандартов *RAMS*, широко применяемой на железных дорогах Евросоюза и Америки [5].

*RAMS* – это методология обеспечения безотказности (*Reliability*), готовности (*Availability*), ремонтопригодности (*Maintainability*) и безопасности (*Safety*) на железнодорожном транспорте. Представляет собой коллективный труд европейского сообщества, формализованный стандартами *EN* 50126 и *IEC* 62278.

Изначальная направленность RAMS на производителей технических средств не удовлетворяла целям ОАО «РЖД», которые ориентированы на эксплуатационную деятельность. Это привело к необходимости разработки показателей эксплуатационной надежности и безопасности объектов железнодорожного транспорта, увязанных с объемами выполняемой эксплуатационной работы и созданию на их основе Российской методологии Управления ресурсами, рисками и надежностью на всех стадиях жизненного цикла (УРРАН). Дополнительно к показателям, используемым в методологии RAMS, в систему УРРАН были включены показатели долговечности (durability) и экономики (economics). В настоящее время разработка и внедрение системы УРРАН реализуется в рамках управления инфраструктурой.

Таким образом, в системе УРРАН объекты инфраструктуры оцениваются следующими ключевыми показателями:

- а) долговечность:
- средним ресурсом;
- б) безотказность:

 средней наработкой до отказа (для невосстанавливаемых элементов);

© Галкин А. Г., Ковалев А. А., 2013

 средней наработкой на отказ (для восстанавливаемых элементов);

- интенсивностью отказов;

- в) готовность:
- коэффициентом простоя;
- г) ремонтопригодность:

- средним временем до восстановления;

д) безопасность:

- интенсивностью опасных отказов;
- средней наработкой на опасный отказ;

е) экономика:

- удельной трудоемкостью восстановления;

 удельной трудоемкостью технического содержания;

 фактическими удельными прямыми расходами на текущее содержание объекта инфраструктуры.

Надежность объектов инфраструктуры закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и «расходуется» при эксплуатации. Показатели системы УРРАН позволяют анализировать эффективность функционирования объектов инфраструктуры на всех стадиях жизненного цикла с различной глубиной детализации, включая планирование инвестиций. Данный анализ заключается в сопоставлении рассчитанных по результатам эксплуатации фактических показателей с показателями, рассчитанными при проектировании (так называемыми проектными) и с допустимыми показателями, установленными в соответствии с местными условиями.

Цель применения показателей УРРАН состоит в разработке и реализации конкретных мероприятий по управлению надежностью, безопасностью и ресурсами объектов инфраструктуры на различных стадиях жизненного цикла [6].

Методология оценки СЖЦ в хозяйствах электрификации и электроснабжения является инструментом, позволяющим принять экономически обоснованное решение при выборе альтернатив заключающихся в замене выработавшего назначенный производителем ресурс оборудования новым или обновлении, ремонте или продлении срока службы действующего оборудования.

В процессе оценки СЖЦ необходимо:

 определить состав и размер затрат жизненного цикла устройств, для которых возможно продление срока службы;

 сформировать перечень факторов, влияющих на СЖЦ и оценить количественные показатели степени их влияния;

 сформировать решающее правило для принятия решения о продлении срока службы

объекта электрификации и электроснабжения или его замене.

Затратами жизненного цикла объекта хозяйства электрификации и электроснабжения являются:

 затраты на приобретение и установку объекта (разработку и проектирование, материалы, логистику, строительство, наладку, тестирование);

затраты на текущее обслуживание и ремонт объекта (проведение регулярных осмотров, заработная плата персонала материалы, транспортировка, затраты, связанные с технологическими окнами);

 затраты, связанные с отказами объекта (ущерб от опасных отказов, внеплановые ремонтные работы, простои поездов и возможные штрафные санкции, вызванные отказами, недополученная прибыль);

- затраты, связанные с утилизацией объекта.

Экономическое обоснование решения при продлении назначенного срока службы объекта состоит в сравнении экономического эффекта двух вариантов: с продлением срока службы объекта и без него (объект своевременно выведен из эксплуатации). Выбор осуществляется в пользу решения, при реализации которого ожидаются наименьшие затраты жизненного цикла объекта.

При продлении срока службы важно учесть следующие составляющие его СЖЦ:

 затраты на оценку фактического состояния (для устройств, допускающих продление назначенного срока службы в зависимости от фактического технического состояния);

 затраты на документальное оформление продления срока службы (для устройств, допускающих продление назначенного срока службы в зависимости от фактического технического состояния);

 дополнительную стоимость текущего содержания для устройств с продленным сроком службы (по сравнению с плановыми затратами на текущее содержание для устройств, назначенный срок службы которых закончился);

 дополнительную стоимость плановых ремонтов устройств с продленным сроком службы (по сравнению с плановыми затратами на плановые ремонты устройств, назначенный срок службы которых не закончился).

Принимая во внимание указанные составляющие, расчет экономической эффективности продлении срока службы объекта, должно осуществляться на основании следующей функции [6]:

$$F = \overline{C} \times \overline{U}_3 - (1 + k_{MOM}) \cdot \overline{C} \times \overline{U}_{\Pi},$$

где СЖЦ<sub>3</sub> – среднегодовая стоимость жизненного цикла, руб.;

СЖЦ<sub>П</sub> – среднегодовая стоимость жизненного цикла несущего троса в случае продления срока его службы, руб.;

 $k_{\text{мод}} \in [0;0,2]$  – коэффициент модернизации, определяющий границы, в случае которых при незначительном преимуществе в пользу решения о продлении принимается решение о замене оборудования. Границы или значение данного коэффициента определяются на основе статистических методов Управлением электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД».

Решающее правило для принятия решения о продлении срока службы несущего троса, или его замене, выглядит следующим образом [6]:

1. Если  $F > 0 \leftrightarrow$  продление срока службы экономически эффективно;

2. Если  $F < 0 \leftrightarrow$  продление срока службы экономически неэффективно.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Галкін О. Г. Надійність і діагностика пристроїв тягового електропостачання: навч. посібник / О. Г. Галкін, О. В. Ефимов, О. О. Матусевич, В. Г. Кузнецов. – Дн-ськ: Вид-во Маковецький, 2009. – 248 с.

2. Галкин А. Г. Применение контракта жизненного цикла для инфраструктурного комплекса системы токосъема / А.Г. Галкин, А.А. Ковалев, А.В. Микава // Транспорт Урала. – 2012. – № 3 (34). – С. 85–90.

3. Бережная Е.В.Математические методы моделирования экономических систем: Учеб. пособие. / Е.В. Бережная, В.И. Бережной. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 432 с.

4. О методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены сложных технических систем железнодорожного транспорта: распоряжение ОАО «РЖД» от 27 декабря 2007 г. № 2459р.

5. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте (редакция 1.1) / Утверждена старшим вице-президентом ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем. 2010 г. – 132 с.

6. Методика оценки эффективности продления срока службы основных средств хозяйства электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» на основе методологии УРРАН / Утверждена старшим вице-президентом ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем. 2012 г. – 57 с. Не всегда продление ЖЦ изделия будет залогом повышения качества. Для достижения экономического эффекта предлагается разрабатывать методы и технологии позволяющие прогнозировать срок службы контактной сети в целом, предлагать реальные варианты сокращения СЖЦ и тем самым повышать надежность всего инфраструктурного комплекса.

#### Выводы

1. Повышение надежности устройств контактной сети в связи с переходом на высокоскоростное движения является актуальной задачей.

2. Для прогнозирования срока службы всего инфраструктурного комплекса системы токосъема рекомендуется использовать математическое моделирование на основе параметрических моделей с учетом различных значений нагрузок.

3. Проводить необходимые расчеты и определять оптимальный срок контракта жизненного цикла ИКСТ необходимо с учетом методологии УРРАН, разработанной в ОАО «РЖД».

#### REFERENCES

1. Galkin O.G., Efimov O.V., Matusevitch O.O., V.G. Kuznetsov *Nadiynist i diagnostika pristroiv traction elektropostachannya*: navch. posibnik / - Dn-sk: Makovetsky Publ. – 2009. – 248 p.

2. Galkin A.G., Kovalev A.A., Mikava A.V. Using lifecycle contract for infrastructure complex of current collection system // Transport of the Ural. - Ekaterinburg, 2012. -  $N_{2}$  3 (34). - P. 85-90.

3. Berezhnaya E.V., Berezhnoy V.I *Mathematical modeling of economic systems*: Manual. allowance. - 2nd ed., Rev. and add. – Moscow: Finance and Statistics, 2006. - 432 p

4. On the method of determining the value of the life cycle and the limit price of complex technical systems, rail transport: the disposal of OAO "Russian Railways" dated December 27, 2007 number 2459r

5. The concept of integrated management of reliability, risk management, life cycle cost of rail (version 1.1) / Approved by the Senior Vice President of JSC «Russian Railways». V.A. Gapanovich. 2010. 132 p.

6. Methods of assessing the effectiveness of extending the life of the fixed assets management electrification and power supply JSC "Russian Railways" on the basis of the methodology Urra / Approved by the Senior Vice President of JSC "Russian Railways". V.A. Gapanovich. 2012. 57 p.

Поступила в печать 21.10.2013.

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

Внешний рецензент Лежнюк П. Д.

Жизненный цикл контактной подвески, как и любой другой сложной технической системы напрямую зависит от надежности ее составных частей. Преждевременный отказ одного элемента контактной сети может привести к отказу подвески в целом. Внедрение усовершенствованных узлов и деталей, а также применение более надежных и долговечных элементов контактной подвески, несомненно, увеличивает

© Галкин А. Г., Ковалев А. А., 2013

електропостачання / power supply

жизненный цикл всего объекта. Тем не менее, при переходе к разработке проектов высокоскоростных магистралей, необходимо учитывать возникающие нагрузки, которых может не выдержать даже новейшее оборудование. В статье показаны основные математические выкладки, позволяющие спрогнозировать жизненный цикл изделий контактной сети на основе параметрической модели отказов, учитывающей возникающие нагрузки.

**Ключевые слова:** система токосъема, жизненный цикл, параметрическая модель, интенсивность отказов, контактная сеть, контракт жизненного цикла, срок службы.

## УДК 621.332(076.5)

О. Г. ГАЛКІН, О. А. КОВАЛЬОВ (УРГУПС)

Уральський державний університет шляхів сполучення, 620034, Росія, Єкатеринбург, вул. Колмогорова 66, тел.: +7 (343) 221-25-27, ел. пошта: <u>AGalkin@usurt.ru</u>, <u>AKovalev@usurt.ru</u>

## ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЇХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Життєвий цикл контактної підвіски, як і будь-який іншої складної технічної системи безпосередньо залежить від надійності її складових частин. Передчасна відмова одного елемента контактної мережі може призвести до відмови підвіски в цілому. Впровадження удосконалених вузлів і деталей, а також застосування більш надійних і довговічних елементів контактної підвіски, безсумнівно, збільшує життєвий цикл всього об'єкту. Тим не менш, при переході до розробки проектів високошвидкісних магістралей, необхідно враховувати виникаючі навантаження, яких може не витримати навіть новітнє обладнання. У статті показані основні математичні викладки, що дозволяють спрогнозувати життєвий цикл виробів контактної мережі на основі параметричної моделі відмов, враховуючі виникаючі навантаження.

Ключові слова: система струмознімання, життєвий цикл, параметрична модель, інтенсивність відмов, контактна мережа, контракт життєвого циклу, термін служби.

Внутрішній рецензент Гетьман Г. К.

Зовнішній рецензент Лежнюк П. Д.

#### UDC 621.332(076.5)

## A. G. GALKIN, A. A. KOVALEV (USURT)

Ural State University of Railway Transport, 620034, Russia, Ekaterinburg, 66 Kolmogorov Street, tel.: +7 (343) 221-25-27, e-mail: <u>AGalkin@usurt.ru</u>, <u>AKovalev@usurt.ru</u>

## THE APPLICATION OF PARAMETRIC FAILURE MODEL OF THE CONTACT SYSTEMS ELEMENTS FOR PREDICTING THEIR LIFE CYCLE

The life cycle of overhead catenary, like any other complex technical system depends on the reliability of its constituent parts. Premature failure of one element of a contact network failure may result in the suspension as a whole. The introduction of improved parts and components, as well as the use of more reliable and durable elements of overhead catenary, of course, increases the life cycle of the entire facility. However, the transition to the development of high-speed railways projects, it is necessary to take into account the stresses arising , which cannot withstand even the newest equipment. The paper shows the basic mathematical calculations, allowing to predict the life cycle of the product contact network based on a parametric model of failure, taking into account the stresses arising.

**Keywords:** current collection system, life cycle, a parametric model, the failure rate, the contact network, the contract life cycle service life.

Internal reviewer Getman G. K.

External reviewer Lezhnyuk P. D.

<sup>©</sup> Галкин А. Г., Ковалев А. А., 2013

#### УДК 621.311:621.331

#### В. П. ЗАКАРЮКИН, А. В. КРЮКОВ, Е. С. ИВАНОВА (ИРГУПС)

Иркутский государственный университет путей сообщения, Кафедра электроснабжения железнодорожного транспорта, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия, 664074, тел./факс: (3952) 638345, эл. почта: <u>and kryukov@mail.ru</u>

## АНАЛИЗ СХЕМ СИММЕТРИРОВАНИЯ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### Введение

Однофазные тяговые нагрузки электрифицированной железной дороги переменного тока создают существенную несимметрию в питающей трехфазной сети. Для снижения несимметрии традиционно применяется три типа тяговых подстанций (ТП) по фазировке подключения трансформаторов [1]. Такое присоединение ТП дает недостаточный эффект симметрирования, особенно для питающих электроэнергетических систем (ЭЭС) с мощностями коротких замыканий (КЗ) менее 1000 МВ·А. Одна из причин малой эффективности традиционного способа симметрирования состоит в наличии отдельных межподстанционных зон, расположенных на перевальных участках с резко выделяющимся энергопотреблением. Другая причина связана с неравномерностью движения поездов повышенной массы, вследствие чего нагрузки шести тяговых подстанций, образующих «винт», редко бывают сравнимыми по величине. Кроме того, точками присоединения тяговых подстанций к сетям 110-220 кВ являются вводы питающих ЛЭП 110-220 кВ, а не границы сетевого района, питающего группу тяговых подстанций. Эти обстоятельства приводят к росту одного из важнейших показателей качества электроэнергии – несимметрии напряжений питающей ЭЭС по обратной последовательности. Поэтому требуется разработка более эффективных технических решений по симметрированию тяговой нагрузки. Проблема несимметрии особенно серьезна для тяговых подстанций, питающихся от ЭЭС с малой мощностью КЗ.

#### Схемы симметрирования

Из известных схемных решений по снижению несимметрии, создаваемой тяговыми нагрузками, можно выделить следующие.

Схемы симметрирования двухфазной нагрузки путем формирования напряжений, отличающихся по фазе на 90°. Сюда относится схема Скотта с двумя однофазными трансформаторами (рис. 1), трехфазные трансформаторы Мамошина, Леблана, Кюбнера [2, 3], реализующие тот же эффект одним трехфазным трансформатором, двухфазные симметрирующие трансформаторы (ДСТ) Б. М. Бородулина (рис. 2) [4].

Применение схемы Скотта или трехфазных симметрирующих трансформаторов при модернизации требует замены существующего оборудования, что далеко не всегда приемлемо. Кроме того, трехфазные трансформаторы с большим количеством обмоток отличаются значительными напряжениями КЗ, что неблагоприятно сказывается на симметрирующем эффекте. В этом плане выгодно отличаются ДСТ, но их применение требует значительного увеличения трансформаторной мощности ТП. Достоинством ДСТ является возможность модернизации существующих ТП без смены силовых трансформаторов.

В целом же группа методов симметрирования с питанием плеч подстанций напряжениями, отличающихся по фазе на 90°, обладает существенным недостатком симметрирования только двух равных нагрузок.

Схемы симметрирования на базе индуктивных и емкостных элементов. Схемы симметрирования этого типа предполагают включение регулируемых реакторов и конденсаторных батарей на двух или на трех фазах трехфазной системы [5]. Наибольшее распространение получила схема Штайнмеца (рис. 3), наиболее эффективная при чисто активной нагрузке. В случае однофазной нагрузки в свободные фазы включаются реактор и батарея конденсаторов, реактивные мощности которых в  $\sqrt{3}$ раз меньше мощности симметрируемой нагрузки. Существенным достоинством схемы Штайнмеца является равенство номинальной трехфазной мощности трансформатора активной мощности однофазной нагрузки. Использование такой схемы на ТП в системе 1×25 кВ приведет к полному использованию мощности трансформатора для питания тяговой нагрузки.

Схема Штайнмеца обеспечивает симметрирование и активно-индуктивной нагрузки, однако общий коэффициент мощности при этом

<sup>©</sup> Закарюкин В. П. и др., 2013

снижается. Кроме того, для эффективного применения схемы требуется использование регулируемых индуктивно-емкостных элементов с высоким быстродействием. Разработанные в последние годы регулируемые источники РМ снижают остроту последней проблемы, однако стоимость такого оборудования остается высокой. Для симметрирования двухфазной тяговой нагрузки потребуется установка индуктивноемкостных элементов на три фазы с разработкой алгоритма управления ими с учетом необходимости компенсации реактивной мощности и симметрирования двух нагрузок.



Рис. 1. Схема симметрирования Скотта



Рис. 2. Схема ДСТ Бородулина



Рис. 3. Схема Штайнмеца для однофазной нагрузки

© Закарюкин В. П. и др., 2013

Симметрирование компенсацией реактивной мощности. Известным симметрирующим эффектом обладают установки поперечной компенсации, однако эффект этот обусловлен простым снижением потребляемого тягового тока при компенсации реактивной мощности, и, соответственно, применение компенсирующих установок не позволяет полностью устранить несимметрию, вызванную однофазными тяговыми нагрузками.

#### Постановка задачи и методика моделирования

Отсутствие до последнего времени эффективных методов и инструментов для анализа симметрирующих свойств различных схем не позволяло провести сравнительные оценки их эффективности при взаимодействии с электрической системой и при учете реальных параметров элементов таких схем. Разработанные в Ир-ГУПСе методы и алгоритмы определения и анализа сложнонесимметричных режимов [6...17] и реализованный на их основе программный комплекс «Fazonord-Качество» позволяют проводить расчеты установившихся режимов ЭЭС с любыми видами трансформаторов и многопроводными системами различных схем и конструкций с корректным учетом параметров и схем соединения обмоток и проводов.

Для сопоставления разных схем симметрирования необходимо обеспечить сходные условия подключения схем и учет параметров элементов симметрирования. Сопоставительные расчеты были проведены для ситуации подключения трансформаторов к одноцепной линии электропередачи (ЛЭП) длиной 100 км, выполненной проводом АС-300 и питающейся от шин бесконечной мощности. Такая сеть обеспечивает сравнительно высокую мощность короткого замыкания на шинах подстанции величиной 1200 МВ·А. Для устранения дополнительных эффектов несимметрии, вносимых ЛЭП, в модели линии предполагалось наличие полного цикла транспозиции.

Для анализа были выбраны три схемы симметрирования: схема Скотта с двумя однофазными трансформаторами, схема с трехфазным тяговым трансформатором и ДСТ Бородулина, и схема Штайнмеца. Расчетные схемы, реализованные средствами комплекса «Fazonord-Качество» показаны на рис. 4. Схемы с ДСТ и Штайнмеца построены с использованием тяговых трансформаторов 40 MB·A, 230/27.5 кВ.



Рис. 4. Исходные и расчетные схемы: а) схема Скотта; б) ДСТ Б.М. Бородулина; в) схема Штайнмеца

Однофазный трансформатор T1 схемы Скотта с напряжениями 110+110/27.5 кВ имеет параметры, соответствующие параметрам трансформатора ОРДТНЖ-25000/220, дополнительный трансформатор T2 с номинальными напряжениями 191/27.5 кВ и мощностью 10 МВ·А имеет напряжение короткого замыкания 7 %.

Модель ДСТ Бородулина построена по параметрам, представленным в статье [4]: первичные напряжения 27.5 кВ, вторичные 15.9 кВ, номинальная мощность 20 MB·A, напряжение короткого замыкания 6.5 %.

#### Результаты моделирования

Результаты представлены в табл. 1, 2 и 3 и на рис. 5...8.

Для определения показателей несимметрии проведены расчеты режимов при увеличении нагрузки 1 ( $P_1$ ) от 2 МВт до 20 МВт при нулевой нагрузке 2 ( $P_2$ ), и далее при увеличении последней до 20 МВт. Последние столбцы таб-

<sup>©</sup> Закарюкин В. П. и др., 2013

лиц 1, 2 представляют несимметрию при различии нагрузок плеч питания на 10 %, а последний столбец табл. 3 представляет несимметрию

при отклонении параметров симметрирующих элементов схемы Штайнмеца на 10 % от оптимального значения.

Таблица 1

Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности первичных напряжений и токов трансформаторов схемы Скотта

$P_1$ , MBT	2	4	10	15	20	20	20	20	20
<i>P</i> <sub>2</sub> , МВт	0	0	0	0	0	10	15	20	18
$k_{2U}, \%$	0,16	0,32	0,83	1,26	1,71	0,87	0,43	0,09	0,17
$k_{2I}, \%$	98,1	99,3	99,7	99,8	99,8	34,2	14,6	3,18	5,61

Таблица 2

Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности первичных напряжений и токов трехфазного трансформатора схемы с ДСТ

$P_1$ , MBт	2	4	10	15	20	20	20	20	20
<i>P</i> <sub>2</sub> , МВт	0	0	0	0	0	10	15	20	18
$k_{2U}$ , %	0,15	0,31	0,82	1,25	1,7	0,85	0,41	0,16	0,16
$k_{2I}, \%$	93,5	97,6	99,1	99,2	99,3	33,9	14,3	4,3	5,6

Таблица 3

Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности первичных напряжений и токов трехфазного трансформатора схемы Штайнмеца

$P_1$ , MBT	2	4	10	15	20	20	20	20	20
<i>P</i> <sub>2</sub> , МВт	0	0	0	0	0	10	15	20	20
$k_{2U}, \%$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,16
<i>k</i> <sub>21</sub> , %	3,9	2,0	0,76	0,35	0,22	0,26	0,2	0,34	4,4



Помимо представленных в таблицах результатов обнаружилось, что схема с ДСТ показывает наибольшее снижение напряжения на нагрузке. Схема Скотта характеризуется наименьшим снижением уровней напряжений 27.5 кВ в нагрузочных режимах. Небольшие значения несимметрии напряжений в расчетах обусловлены сравнительно мощной питающей ЭЭС. Схемы Скотта и ДСТ при чисто активных нагрузках

© Закарюкин В. П. и др., 2013

показали практически одинаковые результаты с коэффициентами несимметрии по обратной последовательности токов около 100 % для однофазной нагрузки, в то время как схема Штайнмеца демонстрирует значения несимметрии токов не более нескольких процентов. Расстройка режима от оптимального на 10 % увеличивает несимметрию незначительно, причем все три схемы в этом плане сопоставимы.







Рис. 7. Зависимость коэффициента несимметрии напряжений от мощности нагрузки 2 при *P*<sub>1</sub>=20 МВт



Рис. 8. Зависимость коэффициента несимметрии токов от мощности нагрузки 2 при *P*<sub>1</sub>=20 МВт

Отдельную проблему представляют собой высшие гармоники, генерируемые электроподвижным составом переменного тока. Гармоники, кратные трем, проникают в питающую сеть из-за наличия однофазной или двухфазной нелинейной нагрузки, а повышенный уровень гармонических искажений на стороне 27.5 кВ может представлять проблему для емкостных элементов схемы Штайнмеца.

Очевидно, что из трех рассмотренных выше технических решений по симметрированию схема Штайнмеца является наиболее предпочтительной, поскольку она не требует равенства мощностей плеч питания тяговой подстанции и обеспечивает одновременную компенсацию реактивной мощности.

Для этой схемы потребуется регулируемые элементы для трех фаз. Элемент фазы AB, где по схеме рис. 4 присоединены элементы  $Q_L$  и  $Q_C$ , требует изменения реактивной мощности в пределах от генерации до потребления. Если ориентироваться на активную мощность плеча 20 MBT, то диапазон регулирования мощности фазы AB составит от минус 12 Мвар до плюс 12 Мвар. Элемент  $Q_L$  фазы BC для подстанции I типа по фазировке из-за необходимости компенсации реактивной мощности этой фазы работает в облегченном режиме. Однако ввиду необходимости компенсации нагрузки 1 при отсутствии нагрузки 2 он должен обеспечить также и реактивную генерацию, с ориентировочным изменением реактивной мощности для всех режимов в пределах ±12 Мвар. Элемент *Q*<sub>C</sub> фазы AC для подстанции I типа должен только генерировать реактивную мощность в соответствии с идеологией схемы рис. 3 и обеспечивать компенсацию тяговой нагрузки плеча. Таким образом, ориентировочные границы регулирования двух фаз должны быть в пределах ±12 Мвар, а для третьей фазы потребуется генерация реактивной мощности в пределах от 0 до 24 Мвар.

Алгоритм регулирования схемы Штайнмеца требует измерения значений активной и реактивной мощностей нагрузок плеч питания подстанции на основной частоте и может включать следующие этапы.

1. По значению нагрузки плеча 1 вычисляется необходимая генерация реактивной мощности в этом плече для полной компенсации реактивной мощности.

2. То же делается и для плеча 2.

3. По величинам активного потребления плеч вычисляется необходимая генерация или потребление реактивной мощности в смежных фазах.

 К требуемой генерации для условия симметрирования активной мощности добавляется реактивная мощность плеча питания, включенного параллельно рассматриваемой фазе (ВС и АС).

5. Из требуемой генерации плеча АВ вычитается индуктивная мощность, необходимая для симметрирования нагрузки 1.

6. По текущим значениям напряжений фаз определяются величины реактивных сопротивлений элементов, и производится соответствующее регулирование.

#### Заключение

1. Из рассмотренных технических решений по симметрированию двухфазной тяговой нагрузки железной дороги переменного тока наиболее предпочтительной является схема Штайнмеца. Эта схема обладает следующими преимуществами:

 возможность симметрирования как двухфазной, так и однофазной нагрузки;

 одновременная компенсация реактивной мощности;

 полное использование номинальной мощности трехфазного трансформатора;

 невысокая чувствительность к погрешностям регулирования параметров схемы.

© Закарюкин В. П. и др., 2013

2. Для реализации симметрирующей схемы Штайнмеца требуется подключение к фазам 27.5 кВ тягового трансформатора мощностью 40 MBA двух регулируемых реактивных эле-

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

2. Мамошин Р. Р. Трансформаторы тяговых подстанций с повышенным симметрирующим эффектом / Р. Р. Мамошин, Б. М. Бородулин, А. Я. Зельвянский, А. Ф. Титов // Вестник ВНИИЖТ, 1989. – № 4. – С. 22-25.

3. Шалимов М. Г. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог / М. Г. Шалимов, Г. П. Маслов, Г. С. Магай. – Омск, 2002. – 49 с.

4. Бородулин Б. М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока / Б. М Бородулин // Вестник ВНИИЖТ, 2003. – № 2.

 Шидловский А.К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. – Киев: Наукова думка, 1985. – 268 с.

 Закарюкин В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Иркут. ун-т, 2005. – 273 с.

7. Крюков А.В., Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин. – Иркутск: Ир-ГУПС, 2011. – 170 с.

 Крюков А.В. Моделирование систем электроснабжения железных дорог переменного тока / А.В. Крюков, В. П. Закарюкин, С. М. Асташин // Проблемы энергетики, 2008. – № 3-4. – С. 134-140.

9. Закарюкин В.П. Моделирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения железных дорог / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2008. – № 3. – С. 93-99.

10. Крюков А. В. Моделирование систем тягового электроснабжения в фазных координатах / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2009. – № 1. – С. 284-288.

11. Закарюкин В.П. Токораспределение в проводах линий электропередачи с расщепленными проводами / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Проблемы энергетики, 2010. – № 1-2. – С. 54-61.

12. Крюков А. В. Расчет электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями электрифицированных железных дорог / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, Н.В. Буякова // Вестник ИрГТУ, 2011. – №1 (48). – С.148-152.

13. Закарюкин В.П. Моделирование многообмоточных трансформаторов в фазных координатах / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Электротехника, 2008. – № 5. – С. 56-61.

© Закарюкин В. П. и др., 2013

ментов с пределами регулирования в диапазоне от минус 12 Мвар до плюс 12 Мвар и одного с пределами реактивной генерации 0...24 Мвар.

#### REFERENCES

1. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Electricity electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.

2. Mamoshin R. R., Borodulin B. M., Zel'vyanskiy A. Ya., Titov A. F. *Transformatory tyagovykh podstantsiy s povyshennym simmetriruyushchim effektom* [Transformers traction substations with increased effect of balancing]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT], 1989, no.4, pp.22-25.

3. Shalimov M. G., Maslov G. P., Magay G. S. *Sov*remennoe sostoyanie i puti sovershenstvovaniya sistem elektrosnabzheniya elektricheskikh zheleznykh dorog [Current state and ways to improve power transmission electric railways]. Omsk, 2002. 49 p.

4. Borodulin B. M. Simmetrirovanie tokov i napryazheniy na deystvuyushchikh tyagovykh podstantsiyakh peremennogo toka [Balancing currents and voltages at the existing traction substations AC]. Vestnik VNIIZhT [Bulletin of VNIIZhT], 2003, no.2.

5. Shidlovskiy A. K., Kuznetsov V. G. *Povyshenie* kachestva energii v elektricheskikh setyakh [Improving the quality of energy in electric networks]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1985. 268 p.

6. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Slozhnonesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh system* [Difficult unbalance modes of electrical systems]. Irkutsk, Irkutsk University Publ., 2005. 273 p.

7. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. *Metody* sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka [Co-simulation methods and systems of external electric traction railways AC]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2011. 170 p.

8. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Astashin S. M. *Modelirovanie sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* [Simulation of AC railway systems AC]. *Problemy energetiki* [Problems of Energy], 2008, no.3-4, pp.134-140.

9. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Modelirovanie nesinusoidal'nykh rezhimov v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Simulation of non-sinusoidal regimes in power systems railways]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of Rostov State University of Railways], 2008, no.3, pp.93-99.

10. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P. *Modelirovanie* sistem tyagovogo elektrosnabzheniya v faznykh koordinatakh [Modeling systems traction power in phase coordinates]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East], 2009, no.1, pp.284-288.

11. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Tokoraspredelenie v provodakh liniy elektroperedachi s rasshcheplennymi provodami* [Current distribution in the wires of power lines with bundled conductors]. *Problemy energetiki* [Problems of Energy], 2010, no. 1-2, pp. 54-61.

12. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Buyakova N. V. Raschet elektromagnitnykh poley, sozdavaemykh tyagovymi setyami elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Calculation of the electromagnetic fields generated by traction 14. Закарюкин В.П. Моделирование многоамперных шинопроводов / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, В. Ю. Соколов // Проблемы энергетики, 2009. – №3-4. – С. 65-73.

15. Крюков А.В. Управление системами тягового электроснабжения железных дорог / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, Н. А. Абрамов // Управление большими системами. Вып. 29. М.: ИПУ РАН, 2010. – С. 201-213.

16. Крюков А. В. Определение наведенных напряжений с учетом несинусоидальности токов контактной сети железных дорог переменного тока / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, Д. С. Кобычев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2009. –№2. – С.315-319.

17. Закарюкин В. П. Параметрическая идентификация элементов системы электроснабжения железной дороги переменного тока / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, М. С. Шульгин // Вестник РГУПС, 2013. – № 2(50). – С. 37-47.

Поступила в печать 14.10.2013.

**Ключевые слова:** системы электроснабжения железных дорог, симметрирующие трансформаторы.

networks electrified railways]. *Vestnik IrGTU* [Bulletin of IrGTU], 2011, no.1(48), pp.148-152.

13. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Modelirovanie mnogoobmotochnykh transformatorov v faznykh koordinatakh [Modeling multiwinding phase transformers coordinates]. Elektrotekhnika [Electrical], 2008, no.5, pp.56-61.

14. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Sokolov V. Yu. *Modelirovanie mnogoampernykh shinoprovodov* [Modeling high current busbars]. *Problemy energetiki* [Problems of Energy], 2009, no.3-4, pp.65-73.

15. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Abramov N. A. Upravlenie sistemami tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog [Traction power supply systems management of railways]. Upravlenie bol'shimi sistemami [Managing large systems], 2010, no.29, pp.201-213.

16. Kryukov A. V., Zakaryukin V. P., Kobychev D. S. *Opredelenie navedennykh napryazheniy s uchetom nesinusoidal'nosti tokov kontaktnoy seti zheleznykh dorog peremennogo toka* [Determination induced voltages based on non-sinusoidal currents contact network of railways AC]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific transport problems of Siberia and the Far East], 2009, no.2, pp.315-319.

17. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Shul'gin M. S. *Parametricheskaya identifikatsiya elementov sistemy elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi peremennogo toka* [Parametric identification of elements of the system power supply railway AC]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of RGUPS], 2013, no.2 (50), pp.37-47.

#### Внутренний рецензент Сыченко В. Г.

Внешний рецензент Саенко Ю. Л.

На основе компьютерного моделирования с помощью программного комплекса «Fazonord-Качество» проанализированы схемы симметрирования двухфазных тяговых нагрузок железных дорог переменного тока. Рассматривались схемы Скотта и Штайнмеца, а также двухфазные симметрирующие трансформаторы Б.М. Бородулина.

Показано, что наиболее предпочтительной является схема Штайнмеца, обладающая следующими преимуществами: возможностью симметрирования как двухфазной, так и однофазной нагрузки; снижением реактивного электропотребления; полным использованием номинальной мощности трехфазного трансформатора; невысокой чувствительностью к погрешностям регулирования параметров схемы. Выявлено, что для реализации схемы Штайнмеца требуется подключение к фазам 27.5 кВ тягового трансформатора трех регулируемых реактивных элементов.

Работа выполнена в рамках плана научных исследований по направлению "Интеллектуальные сети (Smart Grid) для эффективной энергетической системы будущего" (договор № 11.G34.31.0044 от 27.10.2011).

#### УДК 621.311:621.331

#### В. П. ЗАКАРЮКІН, А. В. КРЮКОВ, К. С. ІВАНОВА (ІРГУПС)

Іркутський державний університет шляхів сполучення, Кафедра електропостачання залізничного транспорту, вул. Чернишевського, 15, Іркутськ, Росія, 664074, тел./факс: (3952) 638345, ел. пошта: <u>and kryukov@mail.ru</u>

## АНАЛІЗ СХЕМ СИМЕТРУВАННЯ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ

На основі комп'ютерного моделювання за допомогою програмного комплексу "Fazonord-Якість" проаналізовані схеми симетрування двофазних тягових навантажень залізниць змінного струму. Розглядались схеми Скотта і Штайнмеца, а також двофазні симетруючі трансформатори Б. М. Бородуліна.

Показано, що найбільш прийнятною є схема Штайнмеца, оскільки має наступні переваги: можливість симетрування як двофазного, так і однофазного навантаження; зниженням реактивного електроспоживання; повне використанням номінальної потужності трифазного трансформатора; невисока чутливість до похибок регулювання параметрів схеми. Виявлено, що для реалізації схеми Штайнмеца потрібно підключення до фаз 27.5 кВ тягового трансформатора трьох регульованих реактивних елементів.

Робота виконана у рамках плану наукових досліджень за напрямом "Інтелектуальні мережі (Smart Grid) для ефективної енергетичної системи майбутнього" (Договір № 11.G34.31.0044 від 27.10.2011).

Ключові слова: системи електропостачання залізниць, симетруючі трансформатори.

Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

Зовнішній рецензент Саєнко Ю. Л.

© Закарюкин В. П. и др., 2013

#### UDC 621.311:621.331

## V. P. ZAKARYUKIN, A. V. KRYUKOV, E. S. IVANOVA (IRSURT)

Irkutsk State Transport University, Department of railway transport power supply, 15 Chernyshevskaya Street, Irkutsk, Russia, 664074, phone/fax: (3952) 638345, e-mail: <u>and kryukov@mail.ru</u>

## ANALYSIS OF BALANCING SCHEMES FOR RAILWAY AC TRACTION SUBSTATIONS

Two-phase traction loadings balancing schemes for alternating current railway were analyzed by means of the computer modeling with program «Fazonord-Kachestvo». Scott and Shtaynmets's schemes, and also two-phase symmetrizing transformers B. M. Borodulin were considered.

It is shown that the most preferable is Shtaynmets's scheme with the following advantages: possibility of balancing both two-phase and single-phase loading; decreasing of reactive power; full use of transformer rated power; low sensitivity to errors of parameters regulation. It is revealed that implementation of the Shtaynmets's scheme requires three adjustable reactive elements on 27.5 kV bases.

Work is performed within the plan of scientific researches "Intellectual Networks (Smart Grid) for an Effective Power System of the Future" (Contract No. 11.G34.31.0044 of 27.10.2011).

Keywords: systems of railroad power supply, symmetrizing transformers.

Internal reviewer Sychenko V. G.

External reviewer Saenko U. L.

Шановні колеги!

Фахівцями кафедри "Електропостачання залізниць" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна підготовлена до друку монографія

## ПРОТИКОРОЗІЙНИЙ ЗАХИСТ СУМІЖНИХ ПРИСТРОЇВ У СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

СИЧЕНКО В.Г., ДЬЯКОВ В.О., КОЛЕСНИК Д.Р., ПОЛЯХ О.М. Монографія / За загальною редакцією д.т.н. Сиченка В. Г. – Дн-ськ: Вид-во Маковецький, 2013. – 402 с.

Монографія присвячена розгляду механізмів виникнення та розвитку корозійних процесів у пристроях інфраструктури тягового електропостачання та методів і засобів їх протикорозійного захисту. У монографії висвітлені результати багаторічних досліджень в області протикорозійного захисту суміжних пристроїв, виконаних на кафедрі Електропостачання залізниць ДНУЗТ ім. ак. Лазаряна та результати спільних робіт по захисту залізобетонних конструкцій, виконаних останнім часом спільно з фахівцями ДерждорНДІ та КНУБА.

Монографія призначена для працівників електрифікованих залізниць, може бути корисна проектувальникам, викладачам вищих навчальних закладів і технікумів, а також студентам, що навчаються за спеціальністю "Електрифікація залізниць".

За довідками звертатись у редколегію.

<sup>©</sup> Закарюкин В. П. и др., 2013

#### УДК 621.331.3

#### Е. Д. КИМ (УИПА)

Украинская инженерно-педагогическая академия, отделение электротехнологического факультета, 84100, г. Славянск, Донецкая обл., ул. Добровольского, 1, тел.: (06262) 3-33-34

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПОЛИМЕРНОГО ПРОХОДНОГО ИЗОЛЯТОРА

#### Введение

Целесообразность создания проходных высоковольтных изоляторов с полимерной изоляцией обусловлена, прежде всего, простою их монтажа и обслуживания, а также сравнительно низкой себестоимостью, поскольку отсутствует дорогостоящий и при этом хрупкий фарфоровый элемент. Как известно, смолы полиэфирные и эпоксидные, используемые при изготовлении стеклопластиковых труб и стержней, имеют такую же прочность на разрыв, что и фарфор. В тоже время удельная энергия на развитие трещины, на два порядка больше, чем у фарфора [1]. Вследствие этого можно прогнозировать, что при замене в проходном изоляторе хрупкой фарфоровой рубашки аналогичным элементом из пластичных материалов, из стеклопластиковой трубы с внешней резиновой оболочкой, механическое разрушение, обусловленное различными внешними факторами, в том числе динамическим нагревом токопровода, практически можно исключить. Вместе с тем опыт разработки и эксплуатации полимерных проходных изоляторов показывает необходимость поиска конструктивных и технологических возможностей повышения внутренней электрической прочности.

Рассмотрим полимерные проходные изоляторы с цилиндрическим токопроводом. Изоляционное тело, охватывающее концентрически токопровод, выполняется из двух составляющих: из механически прочной опорной цилиндрической втулки, представляющей собой стеклопластиковую трубу, и из эластичной изоляции, из кремнийорганической резины. Резиной целиком заполняется пространство между токоповодом и опорной втулкой. Ею покрывают внешнюю поверхность втулки, и заполняется монолитно с защитным покрытием промежуток втулка – фланец. Принимаемая мера по герметизации для полимерных изоляторов обусловлена необходимостью защиты стеклопластиковой втулки от конденсации атмосферной влаги на ее поверхности и минимизации очагов электрического повреждения изоляции. Таким образом, проходной изолятор можно представить, как изоляцию цилиндрического конденсаторного типа (рис. 1).



Рис. 1. Макет полимерного проходного изолятора

Известно, что на распределение электрического поля в многослойном изоляционном промежутке, в данном случае, токопровод – заземляемый фланец, существенное влияние оказывают диэлектрические характеристики составных элементов изоляции и соотношение их толщин. Кроме того, максимальные значения напряженности электрического поля, что имеет место у поверхности электродов: у токопровода и фланца, также зависят от взаимного расположения и их конфигурации.

Ранее было показано, что для оценки максимальной напряженности поля в серединной области изолятора, на поверхности токопровода напротив фланца, достаточно воспользоваться уравнением поля цилиндрического конденсатора [2]:

С учетом  $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ 

По данным измерений диэлектрическая проницаемость резин  $\mathcal{E}_1$  заметно меньше чем  $\mathcal{E}_2$  стеклопластиковой изоляции, поэтому вторая слагаемая в знаменателе (2) всегда имеет отрицательное значение. По этой причине, чем меньше это значение, тем меньше окажется максимальная напряженность поля у поверхности токопровода, т.е., можно записать следующее условие минимума

Из соотношения (3) вытекает, что для снижения поля у токопровода необходимо применять изоляционные материалы с близкими диэлектрическими проницаемостями или как можно уменьшить толщину опорной трубы:

$$\frac{\left(1 - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) \cdot \ln r_2}{r_1} \sim \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_2} \cdot \frac{\Delta r}{r_1} \to 0$$
 (1)

где  $\Delta \varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1; \Delta r = r_2 - r_1$ 

Для инженерной практики удобнее пользоваться условием, учитывающим общее изоляционное расстояние между электродами  $\Delta R$ 

$$\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta \mathbf{R}} < \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \tag{2}$$

при соблюдении которого можно ожидать, что напряженность поля в резине на поверхности токопровода незначительно будет отличаться от возможной минимальной величины. Оно было получено на основе плоскопараллельной модели электрического поля изолятора [2]. Правомерность критерия (5) оптимального выбора соотношений между диэлектрическими характеристиками и геометрическими параметрами была подтверждена проведением численных расчетов с помощью математических моделей электростатического поля с комплексной проводимостью исследуемой области для реальных проходных изоляторов на классы напряжения 10-35 кВ.

На рис. 2 приведен пример распределения радиальной напряженности поля в изоляции в поперечном направлении (см. рис. 1), начиная от токопровода т. *а* и заканчивая торца фланца изолятора с полусферическим профилем т. *b*. При расчете были приняты следующие параметры высоковольтного проходного изолятора с номинальным напряжением 35 кВ.

Таблица 1

Цопражание		Примечание		
папряжение	Резина	Стеклопластик	Воздух	
U = 25 кВ	$\varepsilon_1 = 2,5;$	$\epsilon_2 = 38;$	$\varepsilon_{B} = 1;$	σ – удельная прово-
	$\sigma_1 = 1 \times 10^{-13}$	$\sigma_2 = 1 \times 10^{-12}$	$\sigma_{\rm B} = 1 \times 10^{-16}$	димость, См/м



© Ким Е. Д., 2013

ISSN 2307-4221 Електрифікація транспорту, № 6. - 2013.

График распределения поля наглядно иллюстрирует последствие значительной разницы величин диэлектрической проницаемости резины и стеклопластика, отмечаемое вытеснением поля из объема опорной трубки в сторону резиновых оболочек. Из рис. 2 (кривая 1) также видно, что максимальная напряженность поля у торца фланца намного превосходит поле у токопровода, что обусловлено краевым эффектом.

Как известно, краевой эффект удается существенно смягчить увеличивая радиус кривизны, в данном случае, торцевой части электрода. Количественная оценка сравниваемых полей представлена на рис. 3 в виде распределений напряженностей вдоль наиболее электрически нагруженных поверхностей краев электрода [2]. Величины поля на этом рисунке приведены относительных единицах, относительно в наибольшей напряженности на поверхности края фланца с измененным профилем (зависимость 2). Это сделано для того чтобы наглядно представить уровень возможного выравнивания поля. Как можно заключить по рис. 3, посредством оптимизации формы краев фланца по образцу электрода Роговского [3] удается уменьшить напряженности поля ниже наибольшей напряженности поля на поверхности токопровода:





Рис. 3. Распределение напряженности поля вдоль поверхности краев фланца

В качестве другого способа выравнивания напряженности поля в области торца фланца может быть предложено применение экранирующих обкладок, как таковое предусмотрено в высоковольтных вводах с бумажно - масляной изоляцией [4]. Технология изготовления проходных полимерных изоляторов не позволяет изолирующее тело вести более двух обкладок в виде тонких проводящих покрытий на внутренней и внешней поверхностях опорного элемента. Расчеты показывают, что для снижения напряженности поля у торца фланца до уровня напряженности на поверхности токопровода (6) можно ограничиться только одной экранирующей обкладкой на внешней стороне стеклопластикового диэлектрика. Как отмечалось выше (см. рис. 2) стеклопластик нагружен электрически значительно слабее, чем резиновая изоляция и этим обстоятельством объясняется неэффективность второй выравнивающей обкладки. Более того технически непросто нанести на внутренней поверхности опорной втулки покрытие с заданной длиной.

Качественно эффект выравнивания поля проводящим подслоем (экранирующей обкладкой) можно оценить соотношением разностей потенциалов промежутков токопровод – обкладка,  $\Delta \phi_{0,2}$  и обкладка – фланец,  $\Delta \phi_{2,3}$ , иными словами, соотношением емкостей этих промежутков С<sub>0 2</sub> и С<sub>2 3</sub> :

$$\frac{\Delta \varphi_{2,3}}{\Delta \varphi_{0,2}} = \frac{C_{0,2}}{C_{2,3}} \to \min$$
(3)

При заданных диэлектрических характеристиках емкость цилиндрического конденсатора зависит от толщины изоляционной прослойки и от длины электродов: чем тоньше изоляция и чем длиннее электроды, тем больше емкость. Очевидно, величина емкости промежутка токопровод – обкладка C<sub>0,2</sub> возрастает непрерывно с увеличением длины проводящей обкладки, в

<sup>©</sup> Ким Е. Д., 2013

тоже время наибольшая емкость  $C_{2,3}$  промежутка обкладка – фланец практически ограничивается осевой длиной фланца. Поэтому, для того чтобы следовать условию (7), требуется наносить проводящий слой на опорную трубу на длину примерно равную длине фланца. Следует предостеречь, что введение проводящего элемента может привести к образованию очагов повышенной электрической напряженности в теле изоляции, поэтому во избежание такого явления целесообразно наносить демпфируюцие кольцевые покрытия на краях экрана из слабо проводящей резины  $\sigma \approx 1.10^{-7}$  См / м На рис. 4 представлены зависимости максимальной напряженности поля на поверхности торца фланца (кривая 1) и напряженности у края проводящей обкладки (кривая 2) от параметра, определяющего протяженность этой обкладки относительно фланца. А на рис.2 пунктирными линиями (кривая 2) иллюстрирован результат выравнивания поля в наиболее напряженном участке внутренней изоляции введением проводящей обкладки до уровня, соответствующего с условием (6).



Рис. 4. Зависимости максимальных напряженностей поля на краях фланца и обкладки от взаимного их расположения

Как показывают расчеты, место расположения опорной трубы слабо сказывается на величину максимальной напряженности электрического поля у поверхности торцов фланца. В тоже время, как вытекает из условия (4), чем больше радиус опорной втулки  $r_1$  при выбранной толщине ее стенки  $\Delta r$  тем ниже напряженность у токопровода. Основной функцией опорного элемента является придание необходимой механической устойчивости изолятора к изгибающему возмущению. Поэтому и с этой точки зрения при заданной толщине стенки диаметр трубы должен быть с учетом технологической возможности как можно большой, что увеличивает момент сопротивления этого элемента.

В настоящее время большинство производителей высоковольтных полимерных изоляторов применяют так называемую твердую резину, HTV. Из-за высокой вязкости исходного материала резина инжектируется в пресс-форму при высоком давлении, порядка 150-250 бар и по-

© Ким Е. Д., 2013

лимеризация изоляторов осуществляется на 400-500 тонных машинах. С применением двухкомпонентных эластомеров LSR - жидких силиконовых резин упрощается реализация конструкторских решений, направленных на повышение надежности изоляторов, в том числе, внутренней электрической прочности. Низкая вязкость сырья из жидких резин позволяет при относительно невысоком избыточном давлении (не более 50 бар) добиться полной герметизации узких зазоров между опорным элементом и фланцем, исключить наличие воздушных щелей в изоляции, на поверхностях составных элементов изолятора. Кроме того, как показывает опыт, с применением жидкой резины просто решается задача однооперационной заливки резинных оболочек, что исключается вероятность попадания загрязнений в технологических стыках при многоразовой заливке.
#### Выводы

При разработке высоковольтных проходных полимерных изоляторов с целью повышения внутренней электрической прочности рекомендуется:

предпочтительно выбирать материалы изоляции с близкими диэлектрическими проницаемостями, а соотношения толщин составляющих изоляцию элементов определять в обратной зависимости от их диэлектрических проницаемостей согласно условиям (4), (5). При этом зазор между опорным элементом и внутренней поверхностью фланца должна быть минимальная;

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гордон, Дж. Конструкции, или почему не ломаются вещи [Текст] / Дж. Гордон. - М.: Издательство "Мир", 1980. - 327 с.

2. Ким Е.Д., Назаренко А.В., Карюк Д.Г. Исследование электрического поля высоковольтного проходного изолятора с полимерной изоляцией [Текст] / Е.Д. Ким, А.В. Назаренко, Д.Г. Карюк // Вестник ХГПУ «ХПИ».- 2013.- Выпуск 17.- с. 93-99.

 Техника высоких напряжений. [Текст] под ред. М.В. Костенко. – М.: «Высшая школа». – 1973. – 528 с.

4. Патент RU(11)2423765(13)С1(51). Способ подбора профиля поверхности электродов для высо-ковольтных разрядников. Юрьев А.Л., Никола-ев Д. П., Эльяш С.Л. – 2006.

#### Поступила в печать 16.10.2013.

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

 увеличивать радиус кривизны торцевой части фланца или предусмотреть экранирующую обкладку нанесением проводящего покрытия на наружной поверхности опорного изоляционного элемента на противоположном от фланца участке с осевою длиною, близкой длине фланца; по краям обкладки нанести слабопроводящее покрытие;

минимизировать технологические факторы, которые могут внести инородные включения в изоляции, особенно, в промежутке фланец – токопровод. В этой связи предпочтительнее использовать в качестве герметизирующей элемента и защитной оболочки материалы с низкой вязкостью.

#### REFERENCES

1. Gordon. Dzh. *Konstruktsii, ili pochemu ne lomayutsya veshchi* [Design, or why do not break things]. Moscow, Mir Publ., 1980. 327 p.

2. Kim E.D., Nazarenko A.V., Karyuk D.G. Issledovanie elektricheskogo polya vysokovol'tnogo prokhodnogo izolyatora s polimernoy izolyatsiey [Research of the electric field of high voltage bushing polymer insulated]. Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Kharkov State Polytechnic University], 2013, no 17, pp. 93-99.

3. Kostenko M.V. *Tekhnika vysokikh napryazheniy* [Technics of high pressure]. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 1973. 528 p.

4. Yur'ev A.L., Nikolaev D.P., El'yash C.L. *Sposob* podbora profilya poverkhnosti elektrodov dlya vysokovol'tnykh razryadnikov [The method of selection of the surface profile of electrodes for high-voltage arresters.]. Patent no RU(11)2423765(13)C1(51).

#### Внешний рецензент Андриенко П. Д.

Разработка высоковольтных проходных изоляторов с применением полимерных диэлектрических материалов обусловлена низкой удельной энергоемкостью при их изготовлении и устойчивостью к механическим воздействиям в сравнении с фарфоровыми изоляторами. Вместе с тем существует проблемы раннего отказа полимерных изоляторов по причине пробоя изоляции, что требует поиска конструктивных и технологических путей повышения внутренней электрической прочности.

Приведены результаты аналитического исследования электрического поля высоковольтного проходного изолятора с полимерной изоляцией на основе многослойной модели цилиндрического и плоскопараллельного конденсаторов, а также численных решений уравнения Лапласа для комплексной проводимости рассматриваемых областей. Обоснованы оптимальные соотношения между геометрическими параметрами и диэлектрическими характеристиками материалов составных элементов изолятора по критерии минимума наибольшей напряженности поля у поверхности токопровода. Показано возможность существенного демпфирования краевого эффекта поля на стороне торцов фланца выполнением профиля торцов с большим радиусом кривизны по аналогии электрода Роговского. Предложены практические рекомендации по выравниванию распределения напряженности поля у фланца введением экранирующей обкладки путем нанесения проводящего покрытия на наружной поверхности опорной втулки изолятора, дано обоснование наилучшего места расположения покрытия и его протяженности относительно фланца.

Ключевые слова: изолятор, полимер, электрическое поле, отказ, технология, покрытие.

<sup>©</sup> Ким Е. Д., 2013

### УДК 621.331.3

### Е. Д. КІМ (УІПА)

Українська інженерно-педагогічна академія, відділення електротехнологічного факультету, 84100, м. Слов'янськ, Донецька обл., вул. Добровольського, 1, тел.: (06262) 3-33-34

# ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ПОЛІМЕРНОГО ПРОХІДНОГО ІЗОЛЯТОРА

Розробка високовольтних прохідних ізоляторів із застосуванням полімерних діелектричних матеріалів обумовлена низькою питомою енергоємністю при їх виготовленні і стійкістю до механічних впливів в порівнянні з фарфоровими ізоляторами. Разом з тим існують проблеми ранньої відмови полімерних ізоляторів з причини пробою ізоляції, що вимагає пошуку конструктивних і технологічних шляхів підвищення внутрішньої електричної міцності.

Наведено результати аналітичного дослідження електричного поля високовольтного прохідного ізолятора з полімерною ізоляцією на основі багатошарової моделі циліндричного і плоскопараллельного конденсаторів, а також численних рішень рівняння Лапласа для комплексної провідності розглянутих областей. Обґрунтовано оптимальні співвідношення між геометричними параметрами і діелектричними характеристиками матеріалів складових елементів ізолятора по критерії мінімуму найбільшої напруженості поля у поверхні струмопроводу. Показано можливість істотного демпфірування крайового ефекту поля на стороні торців фланця виконанням профілю торців з великим радіусом кривизни по аналогії електрода Роговського. Запропоновано практичні рекомендації щодо вирівнювання розподілу напруженості поля у фланця введенням екрануючої обкладки шляхом нанесення провідного покриття на зовнішній поверхні опорної втулки ізолятора, дано обґрунтування найкращого місця розташування покриття та його протяжності відносно фланця.

Ключові слова: ізолятор, полімер, електричне поле, відмова, технологія, покриття.

Внутрішній рецензент Гетьман Г. К.

Зовнішній рецензент Андрієнко П. Д.

## UDC 621.331.3

#### E. D. KIM (UESPPI)

Ukrainian Educational-Scientific Professional Pedagogics Institute, Electrotechnological faculty office, 84100, Slovyansk, Donetsk region, 1 Dobrovolskogo Street, tel.: (06262) 3-33-34

# **OPTIMIZATION OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC FIELD OF POLYMER BUSHING INSULATOR**

Development of high voltage bushings using polymeric dielectric materials due to low specific energy in their production and resistance to mechanical stress compared with porcelain insulators. However, there is the problem of early failure of polymeric insulators due to insulation breakdown, which requires the search for constructive and technological ways to improve the internal electrical resistance.

The results of an analytical study of the high-voltage electric field of the output insulator polymer insulated multilayer models of cylindrical and plane-parallel capacitors, as well as numerical solutions of the Laplace equation for the conduction of a comprehensive consideration of areas. The optimal ratio between the geometric parameters and dielectric properties of composite materials insulator elements for minimum criteria for the highest field strength at the surface of the conductor. Shown the possibility of significant damping of the edge effect of the field on the side of the torus samples flange execution profile ends with a large radius of curvature along the lines of the Rogowski electrode. Practical recommendations for equalizing the distribution of the field intensity at the flange introduction shielding electrode by applying a conductive coating on the outer surface of the bearing sleeve insulator, provide a rationale for the best places locations of the coating and its length relative to the flange.

Keywords: insulator, polymer, electric field, failure, technology, cover.

Internal reviewer Getman G. K.

External reviewer Andrienko P. D.

© Ким Е. Д., 2013

### УДК 621.332.3:621.311

### П. Є. МИХАЛІЧЕНКО (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, кафедра «Електротехніки та електромеханіки», вул. Лазаряна 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна, тел.: +38(056)373-15-37, ел. пошта: <u>miha pavel@mail.ru</u>

електропостачання / power supply

# ВПЛИВ РЕЖИМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ПЕРЕПАЛ КОНТАКТНОГО ПРОВОДУ

#### Вступ

Ця робота є продовженням і розвитком досліджень [1-5] аварійного режиму короткого замикання (КЗ) в пристроях системи електричної тяги (СЕТ) постійного струму.

Режим КЗ в тяговій мережі (ТМ) з електрорухомим складом (ЕРС) є найбільш небезпечним з енергетичної точки зору аварійним режимом в досліджуваній системі електротяги. Цей режим супроводжується різким зниженням напруги на струмоприймачі ЕРС, що рухається, в результаті чого його тягові двигуни (ТЕД) переходять в генераторний режим. Необхідною умовою виникнення цього режиму є те, щоб результуюча генераторна проти-е.р.с. ТЕД перевищувала напругу на струмоприймачі. Імовірність виникнення режиму КЗ в ТМ і максимальні значення генераторних струмів залежать від схеми живлення (консольна, двостороння, вузлова чи паралельна) і параметрів TM, а також взаємного розташування КЗ і ЕРС на фідерній зоні.

Електрорухомий склад в генераторному режимі являє собою рухоме джерело електроенергії (джерело струму), яке, поряд зі стаціонарними існуючими тяговими підстанціями (ТП), живить місце КЗ в ТМ. Під час цього аварійного режиму до місця КЗ від ЕРС передається уся електромагнітна енергія, що була накопичена в магнітній системі ТЕД до режиму КЗ. Отже, генеруючий ЕРС, по суті, являє собою додаткову рухому ТП, струм якої є причиною термічних пошкоджень контактного проводу (КП). Крім цього, вони викликають пошкодження також іскрових проміжків у колі заземлення опор ТМ. Часті також випадки пошкодження апаратури на самому генеруючому ЕРС. Тому дослідження зазначеного режиму і, як результат, впливу генераторних струмів на перепал КП, є важливою актуальною задачею при оцінці надійності експлуатації СЕТ [6].

### Математична модель процесів у режимі КЗ

Згідно з [6], процеси, що виникають при переході ТЕД в момент КЗ в ТМ в генераторний режим, достатньо складні і практично мало досліджені. І тому в публікаціях [7, 8] наведено лише орієнтовно характери зміни (і лише) напруги на струмоприймачі і фідерні струми; інші величини не вивчались. Тому далі методом математичного чисельного моделювання дослідимо закономірності впливу режиму КЗ в ТМ на процеси генераторних струмів й тим самим на перепал КП.

На рис. 1 і 2 представлені схеми заміщення всієї СЕТ у режимі КЗ і відповідно схеми заміщення групи ТЕД ЕРС при повному і послабленому збудженнях. Позначення елементів на цих схемах такі ж як і в роботах [1-5].

Повна математична модель процесів в режимі КЗ в ТМ, згідно рис. 1 і 2, являє собою таку систему рівнянь:

$$(R_{\mathrm{T\Pi 1}} + R_{\mathrm{\Pi C1}} + R_{3\mathrm{P1}} + R_{\mathrm{K1}} + R_{\mathrm{P1}} + R_{\mathrm{o1}}) \cdot i_{\mathrm{l}} + (L_{\mathrm{TT1}} + L_{3\mathrm{P1}} + L_{\mathrm{K1}} + L_{\mathrm{P1}} + L_{\mathrm{o1}}) \frac{di_{\mathrm{l}}}{dt} + R_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-1}} \cdot i_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-1}} + (L_{\mathrm{TT1}} + L_{3\mathrm{P1}} + L_{\mathrm{K1}} + L_{\mathrm{P1}} + L_{\mathrm{o1}}) \frac{di_{\mathrm{l}}}{dt} + R_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-1}} \cdot i_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-1}} + (L_{\mathrm{TT1}} + L_{3\mathrm{P1}} + L_{\mathrm{K1}} + L_{\mathrm{P1}} + L_{\mathrm{o1}}) \frac{di_{\mathrm{l}}}{dt} + R_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-1}} \cdot i_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-1}} + (L_{\mathrm{TT1}} + L_{3\mathrm{P1}} + L_{\mathrm{K1}} + L_{\mathrm{P1}} + L_{\mathrm{O1}}) \frac{di_{\mathrm{l}}}{dt} + R_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-1}} \cdot i_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-1}} + (L_{\mathrm{TT1}} + L_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-2}} + L_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-2}}) \frac{di_{\mathrm{i}\mathrm{m}\mathrm{1-2}}}{dt} = E_{\mathrm{\PiC1}};$$

$$\left( R_{\text{T}\Pi2} + R_{\Pi\text{C}2} + R_{3\text{P}2} + R_{\text{K}2} + R_{\text{P}2} + R_{02} \right) \cdot i_2 + \left( L_{\text{T}T2} + L_{3\text{P}2} + L_{\text{K}2} + L_{\text{P}2} + L_{02} \right) \frac{di_2}{dt} + R_{\text{im}2-1} \cdot i_{\text{im}2-1} + L_{1} + L_{1} + L_{1} + L_{1} + R_{1} + L_{1} + L_{1} + R_{1} + R_{1} + R_{1} + R_{1} + L_{1} + L_{1} + L_{1} + R_{1} + R_{1} + R_{1} + R_{1} + R_{1} + L_{1} + L_{1} + R_{1} + R_{1$$

<sup>©</sup> Михаліченко П. €., 2013



Рис. 1. Схема заміщення системи електричної тяги постійного струму в режимі КЗ в ТМ

<sup>©</sup> Михаліченко П. Є., 2013

#### електропостачання / power supp



Рис. 2. Схема заміщення групи ТЕД ЕРС постійного струму: а – при послабленні збудження; б – при повному збудженні

В системі (1)-(10) прийняті такі позначення:  $R_{T\Pi 1}, R_{T\Pi 2}$  – вхідні опори ТП;  $L_{TT1}, L_{TT2}$  – індуктивності обмоток тягових трансформаторів відповідних ТП;  $R_{3P1}$ ,  $R_{3P2}$ ,  $L_{3P1}$ ,  $L_{3P2}$  – активні опори та індуктивності згладжуючих реакторів відповідних ТП;  $R_{K1}$ ,  $R_{K2}$ ,  $R_{Ke\kappa}$ ,  $L_{K1}$ ,  $L_{K2}$ ,  $L_{Ke\kappa}$  – активні опори та індуктивності КП відповідних ділянок ТМ; *R*<sub>P1</sub>, *R*<sub>P2</sub>, *R*<sub>Pek</sub>, *L*<sub>P1</sub>, *L*<sub>P2</sub>, *L*<sub>Pek</sub> – активні опори та індуктивності рейок відповідних ділянок ТМ;  $R_{o1}$ ,  $R_{o2}$ ,  $L_{o1}$ ,  $L_{o2}$  – активні опори та індуктивності відсасуючих фідерів відповідних ТП; *R*<sub>іш</sub>, *R*<sub>рв</sub>, *L*<sub>іш</sub>, *L*<sub>рв</sub> – активні опори та індуктивності індуктивних шунтів і розмагнічуючих витків відповідних ШВ підстанцій; R<sub>я</sub>, L<sub>я</sub> – активний опір та індуктивність обмотки якоря ТЕД (включно з додатковими полюсами і компенсаційними обмотками); R<sub>3</sub> – активний опір обмотки збудження ТЕД; р – кількість пар полюсів ТЕД;  $\sigma_3$ ,  $\omega_3$  – коефіцієнт розсіювання та кількість витків обмотки збудження ТЕД;  $E_{\Pi C1}$ ,  $E_{\Pi C2}$  – електрорушійні сили відповідних ТП;  $i_1$ ,  $i_2$  – струми фідерів ТП;  $i_{im}$ ,  $i_{pb}$  – струми у вітках індуктивного шунта та розмагнічуючого витка ШВ ТП;  $i_{g_1}$ ,  $i_{g_2}$  – струми якорів ТЕД;  $\Phi_1 \dots \Phi_8$  – основні магнітні потоки відповідних ТЕД;  $i_{31}...i_{34}$  – струми в обмотках збудження ТЕД;  $i_{e\kappa}$  струм на ділянці ТМ від ЕРС до точки КЗ; *i*<sub>вх1</sub>...*i*<sub>вх8</sub> – вихрові струми в станині відповідних ТЕД; *i*<sub>µ1</sub>...*i*<sub>µ8</sub> – струми намагнічення відповідних ТЕД.

### Результати та аналіз чисельних розрахунків

Чисельні розрахунки математичної моделі виконано методом Адамса, для таких режимів і припущень: живлення фідерних зон двостороннє; працюючий на ділянці електровоз – серії ДЕ1; схема з'єднання ТЕД – «СП»; струм ТЕД номінальний, 565 А; збудження ТЕД – повне і послаблене різного ступеня; швидкість електровозу визначається за електромеханічними характеристиками; відстань між ТП1 і ТП2 – l=20 км; відстань від точки КЗ до ТП1 –  $l_{1\kappa}=5$  км; відстань від ЕРС до точки КЗ –  $l_{e\kappa}=5$  км. Значення необхідних для розрахунку параметрів приведені в роботах автора [1-5].

Характер зміни отриманих в результаті розрахунків перехідних величин у режимах ПЗ1-ПЗ4 такий же, як і у режимі повного збудження, але значення цих величин дещо інші. У режимі ПЗ на будь-якій ступені для схеми рис. 2, на початку часового інтервалу а зміни (0,12...0,15 с) спостерігається менша швидкість загасання  $\Phi(t)$  (рис. 3), а, отже, і проти-е.р.с. Це пояснюється тим, що струм у контурі «обмотка збудження – шунтуюча вітка», підтримуючи  $\Phi(t)$ , в основному зменшує ступінь його загасання за рахунок «розряду» індуктивного шунта через обмотку збудження. Демпферуюча дія вихрових струмів на основний потік невелика, оскільки зменшення власне  $\Phi_{\text{max}}$  і  $d\Phi/dt$  обумовлює і зменшення вихрових струмів на ПЗ у порівнянні з режимом повного збудження (рис. 4). В результаті зазначеного в режимах ПЗ створюється більшої тривалості і більша різниця між проти-е.р.с. ТЕД і напругою на струмоприймачі, що й обумовлює більш тривалий генераторний струм і з більшим у 1,4...2,2 рази максимальним значенням (до 880 А на ПЗ4 проти 400 А на повному збуджені) (рис. 5).



<sup>©</sup> Михаліченко П. €., 2013



Рис. 5. Часові залежності генераторного струму електровозу для умов рис. 3

Як відомо [6], імовірність і ступінь термічних пошкоджень (зокрема, термін перепалу КП) оцінюється: кількістю електрики Q (амперсекунд,  $I \cdot t$ ), що пройшла в місці КЗ при нещільному (дуговому, відкритій електричній дузі) контакті; кількістю теплової енергії W ( $A^{2} \cdot c$ ,  $I^{2} \cdot t$ ), що виділяється в місці контакту, - при щільному (бездуговому) контакті. В таблиці відповідно для досліджених вище режимів КЗ визначено:  $Q_{\kappa}$  ( $A \cdot c$ ) і  $W_{\kappa}$  ( $A^{2} \cdot c$ ) – загальні кількості відповідно електрики і теплової енергії, що виділились в місці КЗ від ТП і генеруючого ЕРС;  $Q_{\Gamma}$  ( $A \cdot c$ ) і  $W_{\Gamma}$  ( $A^{2} \cdot c$ ) – відповідно кількість електрики і теплової енергії, що виділились висці КЗ від ТП і генеруючого ЕРС;  $Q_{\Gamma}$  ( $A \cdot c$ ) і  $W_{\Gamma}$  ( $A^{2} \cdot c$ ) – відповідно кількість електрики і теплової енергії, що виділились висці КЗ від ТП і генеруючого ЕРС;  $Q_{\Gamma}$  ( $A \cdot c$ ) і  $W_{\Gamma}$  ( $A^{2} \cdot c$ ) – відповідно кількість електрики і теплової енергії, що виділились лише від генеруючого ЕРС.

Таблиця

Енергетичні параметри генераторного струму і струму в точці КЗ

Ступінь ПЗ Кількість електрики і теплоти	Ш	1131	1132	1133	1134	II33+VD
$Q_{\rm K} = \int i_{\rm K}(t) dt ,$ A·c	366,5	902,6	1391,1	1856,2	2143,9	288,4
$Q_{\Gamma} = \int i_{\Gamma}(t) dt ,$ A·c	76,9	239,7	339,1	339,7	436,4	41,1
$W_{\rm K} = \int i_{\rm K}^2(t) dt ,$ $A^2 \cdot c$	$1,58.10^{6}$	$3,66.10^{6}$	$5, 3 \cdot 10^{6}$	$6,52 \cdot 10^{5}$	7,67.10 <sup>6</sup>	$1,2.10^{6}$
$W_{\Gamma} = \int i_{\Gamma}^{2}(t) dt ,$ A <sup>2</sup> ·c	$9,26 \cdot 10^4$	$3,95 \cdot 10^{5}$	$4,93 \cdot 10^{5}$	$3,37.10^{5}$	$5,14 \cdot 10^{5}$	$3,2.10^4$
$Q_{\Gamma} / Q_{K}, \%$	20,97	26,6	24,4	18,3	20,3	14,6
$W_{\Gamma}/W_{K}$ ,%	5,84	10,8	9,3	5,17	6,7	2,7

© Михаліченко П. Є., 2013

Із порівняння даних цієї таблиці із запозиченими з [6] граничними знгаченнями, за умов перепалу КП, терміну часу (рис. 82, [6]) його перепалу та кількістю електрики (рис. 83, [6]) (I·t), випливає, що для перепалу проводу 2МФ-100 при струмі 1000 А достатньо 1154 А.с., при 2000 А - 769 А·с, при 3000 - 1077 А·с. Для проводу МФ-100 ці значення значно менші. Із порівняння даних таблиці і рисунків випливає також таке: навіть на першій позиції ПЗ1 в точці КЗ можливий перепал і обрив КП, а з підвищенням ступеня ПЗ кількість електрики і виділеного тепла в точці КЗ збільшується, тим самим збільшується імовірність руйнування ТМ. Частка кількості електрики від дії генераторних струмів складає 20...25%; з поглибленням послаблення збудження відсоткова частка впливу генеруючого ЕРС зменшується.

Результати приведеного вище аналізу вимагають розробки методів і засобів, які переривають або не допускають виникнення режиму генерації. Ці засоби і методи повинні базуватись виходячи із основної причини, яка обумовлює виникнення генераторного режиму, а саме, із характеру і зміни в часі основного магнітного потоку  $\Phi(t)$ , точніше, із швидкісті  $d\Phi/dt$ , яка значно менше швидкості зменшення напруги на струмоприймачі  $dU_{\rm e}/dt$ . Тобто, потрібно пришвидшити процес загасання основного магнітного потоку. Для цього в цій роботі пропонується спосіб гасіння магнітного поля з використанням запираючого діода VD, увімкненого послідовно з шунтуючим резистором (рис. 2, а). Цей метод був запропонований А. Л. Лазановським для обмеження генераторних струмів на електровозах змінного струму серії ВЛ60 [9, 10]. Принцип дії такої схеми полягає у наступному. При переході ТЕД під час КЗ в генераторний режим шунтуюча вітка заперта для генераторного струму, тому струм практично від самого початку аварійного режиму змушений протікати по обмотці збудження головних полюсів: двигун веде себе як при повному збуджені. Напрям цього струму зустрічний до напрямку струму збудження, завдяки цьому відбувається інтенсивне розмагнічення двигуна і величина генераторного струму зростає лише до невеликого значення.

Автором даної роботи створено математичну модель для перевірки ефективності роботи вищезазначеної схеми (з вмиканням діода, рис. 2, а) під час перехідного процесу в ЕРС постійного струму; прийнято, що діод ідеальний. Згідно методу миттєвих схем, моделювання проводили в 4 етапи. На першому етапі графічне представлення системи тягового електропостачання постійного струму в режимі КЗ (рис. 1) доповнюємо схемою заміщення групи двигунів (ГТЕД), представленій на рис. 2, а. Система диференціальних рівнянь, що описує електромагнітні процеси на першому етапі моделювання, нічим не відрізняється від системи (1)-(10). В момент досягнення струмом шунтуючої вітки значення рівного 0 діод запирається і схема ГТЕД рис. 2, а змінюється на схему рис. 2, б. Відповідно для такої схеми система рівнянь (1)-(10) дещо змінюється, а саме, струм якоря протікає по обмотці збудження  $i_3=i_8$ , а також  $i_m=0$ . Математичну модель розраховано для послаблення збудження ПЗЗ.

На рис. 6 в одній системі координат виконано порівняння часових залежностей струму електровозу: при повному збуджені; послаблені збудження ПЗЗ; послабленні збудження ПЗЗ з використанням запираючого діода VD (далі такі схеми будемо позначати ПП, ПЗЗ, ПЗЗ+VD відповідно). Порівнюючи часові залежності генераторного струму електровоза, а також чисельні значення кількості електрики, яка генерується в цих трьох випадках (таблиця), можна зробити висновок, що використання запираючого діода у шунтуючій вітці значно полегшує перебіг досліджуваного аварійного перехідного процесу. Кількість електрики  $Q_{\rm VD}$ , яку генерує електровоз зі схемою ПЗЗ+VD, майже в 10 разів менше кількості електрики при роботі за схемою ПЗЗ, і навіть менше, ніж у схемі ПП. Тривалість генераторного режиму найменша для схеми ПЗ3+VD, це можна пояснити тим,

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михаліченко П.Є. Вплив режиму короткого замикання в тяговій мережі постійного струму на перехідні електромагнітні процеси в електрорухомому складі / П.Є. Михаліченко, Т.М. Міщенко, М.О. Костін // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – № 4. – С. 63-66.

2. Михаліченко П.Є. Вплив пасивних фільтрів на електромагнітний стан в режимі короткого замикання в системі тягового електропостачання постійного струму/ П.Є. Михаліченко// Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2010. – Ч. 2 – С. 195-200.

3. Костин Н.А. Математическое моделирование переходных аварийных электромагнитных процессов в системе электрической тяги постоянного тока. 1. Короткое замыкание без тяговой нагрузки/ Н.А. Костин, П.Е. Михаличенко// Вісник ДІІТа. – 2007. – Вип. 17.– С. 66-71.

4. Михаліченко П.Є. Математичне моделювання перехідних аварійних електромагнітних процесів в системі електричної тяги постійного струму. 2. Кощо до виникнення КЗ магнітне поле ТЕД вже було послаблено на 57%, а після запирання діода схема ГТЕД змінилася (рис. 2, б) і процеси продовжили протікати, як при ПП. Слід зазначити, що також зменшилася в 6,4 рази кількість електрики, що проходить через точку КЗ, а тому практично малоймовірно, що виникне перепал КП.





#### Висновки

1. Режим КЗ в ТМ є енергетично небезпечним аварійним режимом для СЕТ постійного струму.

2. Схема послаблення збудження ГТЕД з використанням запираючого діода VD є достатньо дієвою для зменшення впливу генераторних струмів на TM; її можна застосовувати на EPC постійного струму з традиційною контакторно-реостатною системою керування серієсними ТЕД.

#### REFERENCES

P. E., 1. Mihalichenko Mishhenko T. M., Kostin M. O. Vplyv rezhymu korotkoho zamykannya v tyahovij merezhi postijnoho strumu na perexidni elektromahnitni procesy v elektroruxomomu skladi [The influence of the short circuit condition in the contact system on electromagnetic processes in direct current electric train] // Elektrotexnika i Elektromexanika - Sci-Tech. magazine *«Electrical* Engineering k Electromechanics», 2010, No. 4, pp. 63-66.

2. Mihalichenko, P.E. Vplyv pasyvnyx filtriv na elektromahnitnyj stan v rezhymi korotkoho zamykan-nya v systemi tyahovoho elektropostachannya postijnoho strumu [Influence passive filter on electromagnetic condition in mode of the short circuit in system of tractive supply of the direct current] // Texnichna elektrodyna-mika. Tem. vyp. «Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist» - Sci-Tech. magazine Technical electrodynamics. «Power electronics & efficiency», 2010, Ch. 2, pp. 195-200.

3. Kostin, N.A., Mihalichenko P. E. Matematicheskoe modelirovanie perehodnyih avariynyih elektro-

<sup>©</sup> Михаліченко П. Є., 2013

роткое замыкание з електрорухомим складом/ П.С. Михаліченко// Вісник ДІІТа. – 2010. – Вип. 32. – С. 175-179.

5. Михаліченко П.Є. Математичне моделювання перехідних аварійних електромагнітних процесів в системі електричної тяги постійного струму/ П.Є. Михаліченко, М.О. Костін// Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. – 2008. – Ч. 2 – С. 31-35.

6. Сердинов С.М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог/ С.М. Сердинов. – М.: Транспорт, 1985. – 301 с.

7. Векслер М.И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания/ М. И. Векслер. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.

8. Пупынин В.Н. Защита и отключение тяговых сетей в аварийных режимах: диссертация доктора технических наук [Текст] / В. Н. Пупынин.– М.: МИИТ, 1986. –340 с.

9. Тушканов, Б. А. Магистральные электровозы переменного тока ВЛ60 и ВЛ80/ Б.А. Тушканов, В.И. Бочаров, В.В. Крузе.– М.: Транспорт, 1964. – 555 с.

10. Марченко Ю.В. Обслуживание и эксплуатацияэлектровозов ВЛ60 и ВЛ80/ Ю.В. Марченко.– М.: Транспорт, 1965. – 255 с.

Надійшла до друку 25.03.2013.

Ключові слова: система електричної тяги, електрорухомий склад, тяговий електричний двигун, математична модель, коротке замикання, обмотка збудження, кількість електрики, магнітний потік, перехідний процес, перехідний струм.

Внутрішній рецензент Костін М. О.

magnitnyih protses-sov v sisteme elektricheskoy tyagi postoyannogo toka. 1. Korotkoe zamyikanie bez tyagovoy nagruzki [Mathematical simulation of transient emergency electromagnetic processes-owls in the system of the electric traction DC. 1. Short circuit without the traction load] // Visnyk DNUZT - News DNUZT, 2007, Vyp. 17, pp. 66-71

4. Mihalichenko P. E. Matematychne modelyuvannya perexidnyx avarijnyx elektromahnitnyx procesiv v systemi elektrychnoyi tyahy postijnoho strumu. 2. Korotke zamykannya z elektroruxomym skladom [Mathematical simulation of transient emergency electromagnetic processes in the system of the electric traction DC. 2. Short circu with traction load] // Visnyk DNUZT - News DNUZT, 2010, Vyp. 32, pp. 175-179.

5. Mihalichenko P. E., Kostin M. O. Matematychne modelyuvannya perexidnyx avarijnyx elektromahnitnyx procesiv v systemi elektrychnoyi tyahy postijnoho strumu [Mathematical simulation of transient emergency electromagnetic processes in the system of the electric traction DC] // Texnichna elektrodynamika. Tem. vyp. «Problemy suchasnoyi elektrotexniky» -Technical electro-dynamics. Theme issue. Problems of modern electrical engineering, 2008, Ch. 2, pp. 31-35.

6. Serdinov S. M. *Povyishenie nadezhnosti ustroystv elektrosnabzheniya elektrifitsirovannyih zheleznyih dorog* [Increasing to reliability device supply of the electrified railways]. Moscow: Transport, 1985. 301 p.

7. Veksler M. I. Zaschita tyagovoy seti postoyannogo toka ot tokov korotkogo zamyikaniya [Protection of direct current traction network from short circuit currents]. Moscow: Transport, 1976. 120 p.

8. Pupyinin V.N. Zaschita i otklyuchenie tyagovyih setey v avariynyih rezhimah: thesis for a Doctor's degree [Protection and disabling traction networks in emergency modes]. Moscow: MIIT, 1986. 340 p.

9. Tushkanov B. A., Bocharov V.I., Kruze V.V. *Magistralnyie elektrovozyi peremennogo toka VL60 i VL80* [Mainline electric locomotives of alternating current VL60 and VL80]. Moscow: Transport, 1964. 555 p.

10. Marchenko Y.V. *Obsluzhivanie i ekspluatatsiyaelektrovozov VL60 i VL80* [Maintenance and operation of electric locomotives VL60 and VL80] Moscow: Transport, 1965. 255 p.

#### Зовнішній рецензент Саєнко Ю. Л.

Дослідження аварійних режимів короткого замикання в системі електричної тяги постійного струму і до сьогодні є актуальною задачею. Цей режим супроводжується протіканням надструмів і є надзвичайно небезпечним в такій потужній системі. Метою роботи є виявлення умов та механізму виникнення генераторних струмів і відповідно розробка заходів щодо зменшення їх впливу на протікання цього аварійного режиму. Дуже важливо оцінити величину і тривалість генераторних струмів в усіх режимах ведення електрорухомого складу постійного струму. Особливо це стосується режимів ослаблення поля, оскільки в шунтуючій вітці обмотки збудження присутній індуктивний елемент який накопичує велику кількість електромагнітної енергії. Під час перехідного процесу ця енергія вивільняється через точку короткого замикання. При цьому збільшується нагрів елементів контактної мережі. Дослідження короткого замикання в тяговій мережі при наявності електровозів на фідерній зоні було виконано шляхом математичного моделювання. Для цього було створено схему заміщення розглядуваної системи і для неї записано систему рівнянь електромагнітного стану. За результатами моделювання було встановлено, що у випадку ведення поїзда при послабленому збуджені кількість електрики і теплоти, що протікає через точку короткого замикання, не просто спричинить нагрів контактного проводу, а викличе його механічне руйнування. Для уникнення такого негативного явища необхідно зменшити вплив індуктивного елементу шунтуючої вітки. Для вирішення цієї проблеми автором запропоновано використання запираючого діода в цій вітці. Використання такого заходу дозволяє значно зменшити тривалість і максимальне значення генераторного струму що виділяє електровоз постійного струму. Отже зменшуються пошкодження елементів контактної мережі.

© Михаліченко П. Є., 2013

# УДК 621.332.3:621.311

# П. Е. МИХАЛИЧЕНКО (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, кафедра «Электротехники и электромеханики», ул. Лазаряна 2, г. Днепропетровск, 49010, Украина, тел.: +38(056)373-15-37, эл. почта: miha\_pavel@mail.ru

# ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПЕРЕЖОГ КОНТАКТНОГО ПРОВОДА

Исследование аварийных режимов короткого замыкания в системе электрической тяги постоянного тока и сегодня актуально. Для этого режима характерно протекание сверхтоков и поэтому он является очень опасным для такой мощной системы. Целью работы является определение условий и механизма возникновения генераторных токов и как следствие разработка средств уменьшения их влияния на протекание аварийного процесса. Важно оценить значение и продолжительность генераторных токов в различных режимах ведения электроподвижного состава постоянного тока. Особенно это касается режимов ослабления поля, поскольку в шунтирующей ветви обмотки возбуждения присутствует индуктивный элемент. Этот элемент способен накапливать большое количество электромагнитной энергии. Во время переходного процесса эта энергия высвобождается через точку короткого замыкания. При этом увеличивается нагрев элементов контактной сети. Исследование короткого замыкания в тяговой сети при наличии электровозов на фидерной зоне было выполнено математическим моделированием. Для этого была создана схема замещения рассматриваемой системы и для нее записана система уравнений электромагнитного состояния. Результаты моделирования показали, что в случае ведения поезда при ослаблении возбуждения количество электричества и теплоты, которые протекают через точку короткого замыкания, не только нагревает контактный провод, но может даже вызвать его механическое разрушение. Чтобы не допустить этого, необходимо уменьшить влияние индуктивного элемента шунтирующей ветви. Для реализации этого средства предложено использовать запирающий диод в этой ветви. Это средство позволяет уменьшить продолжительность и максимальное значение генераторного тока, который выделяет электровоз постоянного тока. Таким образом, уменьшаются повреждения контактной сети.

Ключевые слова: система электрической тяги, электроподвижной состав, тяговый электрический двигатель, математическая модель, короткое замыкание, обмотка возбуждения, количество электричества, магнитный поток, переходный процесс, переходный ток.

Внутренний рецензент Костин Н. А.

Внешний рецензент Саенко Ю. Л.

# UDC 621.332.3:621.311

## P. E. MIHALICHENKO (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Ac. V. Lazarian, Department of Electrical engineering and electromechanics, 2 Lazarian Street, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel.: +38(056)373-15-37, e-mail: miha\_pavel@mail.ru

# IMPACT OF THE SHORT-CIRCUIT IN DC TRACTION NETWORK ON BURNED THROUGH THE CONTACT WIRES

Study of emergency short circuit in the system of electronic electric traction and DC relevant today. For this regime is characterized by a leak overcurrents and therefore it is very dangerous for such a powerful system. The aim of the work is the determination of the conditions and mechanism of occurrence of the generator current, and as a consequence of the development of the means of reducing their impact on the flow of accidention process. It is Important to assess the value and duration of the generator of the currents in a variety of modes of electric rolling stock permanent strength of the current. This especially concerns the mode of the weakening of the field, because in shunting branches of the field there is an inductive element. This element is able to accumulate a large amount of electromagnetic energy. During the transition process of this energy is released through the point of a short circuit. This increases the heating elements of the contact network. Study of the short circuit in traction network in the presence of electric locomotives on the feeder zone was performed mathematical modeling. For this scheme was set up replacement of the system and for it is written system of equations of the electromagnetic with standing. The simulation results have shown that in the case of a train when attenuation of excitation of the amount of electricity and heat, which flow through the point of the shortcircuit not only heats the contact wire, but may even cause it to mechanical destruction. To prevent this, it is necessary to reduce the influence of inductive element shunting branches. For realization of this equipment offered to the use of barrier diode in this branch. This tool allows you to reduce to the duration and the maximum value of the generator current, which allocates the electric locomotive of direct current. Thus, the reduced damage the contact network.

**Keywords:** electric traction system, electric locomotive, electric traction motor, mathematical model, short circuit, excitation winding, quantity of electricity, magnetic flux, transient, transient current.

Internal reviewer Kostin N. A.

External reviewer Saenko U. L.

© Михаліченко П. Є., 2013

#### електромагнітна сумісність / electromagnetic compatibility

# УДК 621.311

# О. С. КАТКОВ, В. А. ТОДОРЕНКО, О. І. ТЮРЮТІКОВ (НТУУ «КПІ»)

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, тел.: (044) 454-94-32, ел. пошта: <u>ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua</u> <u>hte@el.ntu-kpi.kiev.ua</u>

# АНАЛІЗ ВПЛИВУ СТУПЕНЯ ЗАРЯДУ ЄМНОСТЕЙ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У СПОЖИВАЧА

### Вступ

Компенсатори реактивної потужності (КРП) знайшли своє застосування в системах де джерела живлення працюють на індуктивне або активно-індуктивне навантаження [1].

Особливою рисою традиційних систем компенсації реактивної потужності є те, що величина реактивної потужності визначається по струму і напрузі тільки однієї фази. Такий підхід є прийнятним для електричних систем з симетричними навантаженням та мережею. Разом з тим на практиці система фазових напруг, навантажень, ємності компенсуючих конденсаторів не є симетричними [2,3].

Аналіз літературних джерел показав, що недостатньо дослідженим є вплив комутації компенсуючих ємностей на форми напруги на навантаженні та споживаного струму. Разом з тим до сучасних систем компенсації реактивної потужності ставляться вимоги не лише по відношенню до компенсації реактивної потужності, але а й по забезпеченню споживача електроенергією з визначеними державним стандартом параметрами.

Метою даної роботи було дослідження впливу при комутаціях ступеню заряду компенсуючих ємностей на форму напруги мережі живлення. Дослідження проводилося симулятивним методом з використанням моделі КРМ. Фіксація результатів забезпечувалась за допомогою відповідних пристроїв реєстрації, які було введено в модель системи, що використовувалась в попередніх дослідженнях [2,3].

Моделювання системи з компенсатором реактивної потужності та пристроями фіксації форми напруги та струму в навантаженні



Рис. 1. Модель системи з реєстраторами форми напруги та струму на навантаженні

Під час моделювання було отримано осцилограми напруги на навантаженні та струму через навантаження. Для цього до моделі системи, яка ілюструє роботу регульованого компенсатора реактивної потужності [2], було введено моделі пристроїв фіксації осцилограм відповідних електричних величин.

© Катков О. С. та ін., 2013

При дослідженні розглядалися три варіанти початкового стану трифазової компенсуючої ємності:

 повний розряд всіх трьох секцій компенсуючої ємності;

 повний розряд двох секцій, та заряд однієї секції до напруги відповідної фази мережі живлення;  повний розряд однієї секції, та заряд двох секції до напруги відповідних фаз мережі живлення.

На першому етапі розглядався випадок, коли перед комутацією ємності повністю розряджені.

На рис.2 приведено осцилограми напруги та струму на навантаженні лише в одній з трьох віток. Наведені осцилограми засвідчили, що в момент комутації трифазової ємності напруга на навантаженні провалюється до нульового рівня.

Щодо форми споживаного струму варто зазначити, що сучасні системи компенсації реактивної потужності використовують на інтервалі комутації додаткові опори малого номіналу. Ці опори обмежують амплітуду імпульсу струму при комутації ємностей.



Рис. 2. Осцилограми напруги та струму на навантаженні

Результати моделювання показали, що комутація компенсуючих ємностей в КРП може спотворювати форму напруги на навантаженні. Для ряду споживачів ця особливість роботи КРП може нести загрозу аварії.

Спотворення форми напруги на навантаженні при комутації компенсуючих ємностей пояснюється тим, що ємності, які входять до складу компенсатора реактивної потужності перед комутацією незаряджені. Тобто – підключення компенсуючих ємностей до системи можна умовно поділити на два етапи – заряд компенсуючих ємностей та безпосередньо компенсація реактивної енергії, що її споживає навантаження.

Виходячи з результатів моделювання було зроблено висновок, що комутація незаряджених ємностей є небажаною.

Аналіз результатів моделювання показав необхідність пошуку шляхів усунення стрибкоподібних змін напруги та струму у навантаженні при комутації компенсуючих ємностей.

Враховуючи, що сучасні системи компенсації є регульованими, то вирішення проблеми заряду ємностей перед їх комутацією є дуже важливим. Тому, на підставі досліджень що описані в [2, 3], а також вищеописаного моделювання були сформульовані необхідні критерії, яким має відповідати сучасна регульована компенсаційна установка:

 система керування компенсатором реактивної потужності має враховувати зміну величини та характеру навантаження;

• має враховуватись розбаланс фазових напруг;

 повинна бути реалізована можливість автоматичного відключення КРП, якщо відбувся обрив однієї з фаз живлення;

 величина споживаної навантаженням реактивної потужності має визначатися за струмом і напругою всіх трьох фаз, на відміну від традиційних систем компенсації, в яких аналіз ведеться лише однієї фази;

 необхідно враховувати стан компенсуючих ємностей, тобто контролювати ступінь їх заряду безпосередньо перед комутацією.

На основі зроблених висновків, були промодельовані наступні режими роботи системи за умови існування початкового заряду в компенсуючих ємностях.

Розглядалися два випадки:

• одна з компенсуючих ємностей попередньо заряджена, а дві інші розряджені.

• дві ємності попередньо заряджені.

Далі приведено осцилограми, отримані в результаті моделювання, описаних вище ситуацій.

На рис.3 приведено осцилограми напруги та струму на навантаженні лише в одній з трьох віток, які отримані для варіанту комутації ємності у якій одна секція попередньо заряджені та дві розряджені.

Якщо проаналізувати отримані осцилограми та порівняти їх з осцилограмами попередньої симуляції (рис.2), то можна побачити, що початковий заряд однієї компенсуючої ємності позитивно вплинув на стрибок напруги та струму у навантаженні в момент комутації. Але зявився перехідний процес перезаряду ємності у початковий момент часу. Зберігся провал напруги до нульового значення у фазах де комутується незаряджена емність. Проте такий провал відсутній у фазі, де комутується попередньо заряджена ємність.

Якщо ж говорити про роботу компенсатора реактивної потужності, то вона жодним чином не змінилася.

На рис. 4 приведено осцилограми напруги та струму на навантаженні лише в одній з трьох віток, які отримані для варіанту комутації єм-

<sup>©</sup> Катков О. С. та ін., 2013

ності у якій дві секції попередньо заряджені а одна розряджена.

Також була промодельована система, в якій попередній заряд компенсуючих ємностей обумовлювався значенням напруги живлення в момент комутації. Оскільки ємності з'єднані трикутником, то задавати модна початковий заряд для двох з трьох секцій компенсуючих ємностей. Попередній заряд вводився для секцій компенсатора реактивної потужності, що комутувались до фаз A та C.



Рис. 3. Осцилограми напруги та струму у навантаженні, за умови попереднього заряду однієї з компенсуючих ємностей



Рис. 4. Осцилограми напруги та струму у навантаженні, за умови, що дві компенсуючі ємності заряджені

Аналіз осцилограм, отриманих на попередніх етапах моделювання, вказав з якими початковими зарядами ємностей необхідно промоделювати систему. Загалом, запропонований підхід до вирішення проблеми стрибків напруги при комутації полягає в тому, щоб безпосередньо перед комутацією, напруга на ємностях була максимально наближена до напруги на відповідній фазі. Моделювання підтвердило правильність обраного напрямку вирішення проблеми стрибкоподібної зміни напруги на навантаженні при комутації компенсуючих ємностей. На рис.5 наведено осцилограму напруг на навантаженні по всіх трьох фазах.



Рис. 5. Осцилограма напруги на навантаженні по трьом фазам, за умови заряду компенсуючих ємностей по фазам А та С

Як видно з осцилограми (рис.5) при комутації ємностей з попереднім зарядом, який відповідає напрузі джерела у момент часу безпосередньо перед комутацією – деформація напруги на навантаженні майже відсутня.

На основі симуляції базової досліджуваної системи, характерною рисою якої є максимальне зближення величини напруг на навантаженні та на ємностях, зроблено висновок, що комутувати компенсуючи ємності до системи необхідно в момент часу, коли різниця між фазною напругою та напругою на відповідній секції конденсаторів мінімальна. Це дозволяє максимально знизити рівень спотворення форми напруги при використанні КРП.

#### © Катков О. С. та ін., 2013

# Висновки

Аналіз результатів симуляції показує можливість виникнення режиму роботи, що характеризується збільшенням амплітудного значення напруги та струму в момент комутації. Це негативний аспект, який необхідно враховувати при проектуванні відповідних систем керування компенсатором реактивної потужності.

Проведений аналіз впливу роботи компенсатора реактивної потужності на форму напруги та струму у споживача показав можливість виникнення суттєвих спотворень форми напруги на навантаженні та споживаного струму при використанні класичних схем побудови компенсаторів. Це потребує розробки адаптивних систем керування регульованих КРМ, де забезпечується попередній заряд компенсуючих ємностей.

#### електромагнітна сумісність / electromagnetic compatibility

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Катков, А. С. Компенсация реактивной мощности компенсаторами на конденсаторных батареях [Текст] / А. С. Катков // Збірник статей IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «Електроніка-2011». - Київ, 2011.

2. Катков, О.С. Моделювання несиметричних режимів роботи компенсаторів реактивної потужності у середовищі Simulink пакету Matlab [Текст] / О. С. Катков, В. А. Тодоренко, О. І. Тюрютіков // Науковий журнал «Електрифікація транспорту». – 2011. – №2. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011.

3. Катков, А. С. Моделирование регулируемых конденсаторных компенсаторов реактивной мощности [Текст] / А. С. Катков, В. В. Перекрест, В. А. Тодоренко, А. И. Тюрютиков // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте: IV Междунар. научно-практической конф., 15-19 февраля 2011 г., пгт. Чинадиево. – Д.: ДИИТ, 2011. – 98 с.

Надійшла до друку 29.04.2013.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, моделювання, електронні системи, заряд ємностей.

#### Внутрішній рецензент Кузнецов В. Г.

#### REFERENCES

1. Katkov A. S. Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti kompensatorami na kondensatornykh batareyakh [Compensation of reactive power compensators for capacitor banks]. Zbirnik statey IV Mizhnarodnoï naukovo-tekhnichnoï konferentsiï molodikh vchenikh «Elektronika-2011» [Collection of Articles IV International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "Electronics 2011"], 2011.

2. Katkov O.S., Todorenko V. A., Tyuryutikov O. I. Modelyuvannya nesimetrichnikh rezhimiv roboti kompensatoriv reaktivnoï potuzhnosti u seredovishchi Simulink paketu Matlab [Modeling asymmetric modes of reactive power compensators in an environment Simulink package Matlab]. Elektrifikatsiya transportu – Electrification of transport, 2011, no.2.

3. Katkov A. S., Perekrest V. V., Todorenko V. A., Tyuryutikov A. I. Modelirovanie reguliruemykh kondensatornykh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti [Simulation of controlled capacitor reactive power compensators]. Elektromagnitnaya sovmestimost' i bezopasnost' na zheleznodorozhnom transporte: IV Mezhdunar. nauchnoprakticheskoy konf., 15-19 fevralya 2011 g., pgt. Chinadievo [EMC and safety in railway transport: IV Intern. Scientific and Practical Conference., 15-19 February 2011, village. Chinadievo]. Dnipropetrovsk, 2011, p. 98.

#### Зовнішній рецензент Андрієнко П. Д.

В даній статті розглядається проблема компенсації реактивної потужності. Для з'ясування факторів, що впливають на роботу компенсатора реактивної потужності, а також для наочності отриманих результатів дослідження використовувався метод комп'ютерного моделювання електронних систем. Метою даного дослідження є з'ясування як величина початкового заряду компенсуючих ємностей впливає на характеристики електроенергії у споживача, зокрема на форму напруги та струму. Було розглянуто трифазну електронну систему, до складу якої входить регульований компенсатор реактивної потужності. Аналіз системи з компенсатором реактивної потужності проведено за допомогою додатку Simulink пакету Matlab. Проведено аналіз впливу компенсаційного пристрою на форму струму та напруги у навантаженні, за умов, що перед комутацією до системи, компенсуючі ємності повністю розряджені та два варіанти попереднього заряду ємностей. За результатами моделювання електронної системи з регульованим компенсатором реактивної потужності повністю розряджені та два варіанти попереднього заряду ємностей. За результатами моделювання електронної системи з регульованим компенсатором реактивної потужності зроблено висновок, що можливе виникнення суттєвих спотворень форми напруги на навантаженні та споживаного струму при використанні класичних схем побудови компенсаторів.

# УДК 621.311

## А. С. КАТКОВ, В. А. ТОДОРЕНКО, А. И. ТЮРЮТИКОВ (НТУУ «КПИ»)

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», 03056, Киев, пр-т Победы, 37, тел.: (044) 454-94-32, эл. почта: <u>ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua</u> <u>hte@el.ntu-kpi.kiev.ua</u>

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ЗАРЯДА ЕМКОСТЕИ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ У ПОТРЕБИТЕЛЯ

В данной статье рассматривается проблема компенсации реактивной мощности. Для выяснения факторов, влияющих на работу компенсатора реактивной мощности, а также для наглядности полученных результатов исследования использовался метод компьютерного моделирования электронных систем. Целью данного исследования является выяснение как величина начального заряда компенсирующих емкостей влияет на характеристики электроэнергии у потребителя, в частности на форму напряжения и тока. Были рассмотрены трехфазную электронную систему, в состав которой входит регулируемый компенсатор реактивной мощности. Анализ с компенсатором реактивной мощности проведен с помощью приложения Simulink пакета Matlab. Проведен анализ влияния компенсационного устройства на форму тока и напряжения в нагрузке, при условии, что перед коммутацией в систему, компенсирующие емкости неработоспособны и два варианта предварительного заряда емкостей. По результатам моделирования электронной системы с регулируемым компенсатором реактивной напряжения на нагрузке и потребляемого тока при использовании классических схем построения компенсаторов.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, моделирование, электронные системы, заряд емкостей.

Внутренний рецензент Кузнецов В. Г.

Внешний рецензент Андриенко П. Д.

© Катков О. С. та ін., 2013

# UDC 621.311

# A. S. KATKOV, V. A. TODORENKO, A. I. TYURYUTIKOV (NTU "KPI")

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 03056, Kyiv, 37 Peremogy Ave, tel.: (044) 454-94-32, e-mail: <u>ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua</u> <u>hte@el.ntu-kpi.kiev.ua</u>

# ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE DEGREE OF CHARGE CAPACITIES OF REACTIVE POWER COMPENSATOR ON THE CHARACTERISTICS OF ELECTRICITY CONSUMERS

This paper addresses the problem of reactive power compensation. To determine the factors that affect the reactive power compensator, and for clarity the results study the method of computer simulation of electronic systems. The purpose of this study is to clarify how the value of the initial charge compensating capacitances affect the characteristics of electricity consumers, particularly in the form of voltage and current. Were considered three-phase electronic system comprising an adjustable reactive power compensator. The analysis of the compensation of reactive power held by application package Simulink Matlab. The analysis of the impact of the compensation device to shape current and voltage in the load, provided that before switching to the system, compensating capacitance is fully discharged and the two previous versions of the charge volume. According to the simulation of electronic systems with variable reactive power compensator concluded that may cause significant distortions form the load voltage and current consumption when using the classical scheme of the compensators.

Keywords: reactive power compensation, simulation, electronic systems, capacitors charge.

Internal reviewer Kuznetsov V. G.

External reviewer Andrienko P. D.

Шановні колеги!

Фахівцями кафедри "Електропостачання залізниць" Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна підготовлена до друку монографія

# ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ГОСПОДАРСТВІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

ДЕНИСЮК С. П., КУЗНЕЦОВ В. Г., СИЧЕНКО В. Г., КРУПИН-СЬКИЙ О. М. Навчальний посібник. – Дн-ськ: Вид-во Маковецький, 2013. – 416 с.

У навчальному посібнику висвітлені питання розвитку енергозбереження в тягових мережах залізничного транспорту, механізми регулювання відносин у сфері енергозбереження в Європейському союзі і в Україні. Наведені відомості про основи енергетичного менеджменту та нормування витрат паливноенергетичних ресурсів, описано методологію енергетичного аудиту дистанцій електропостачання. Детально розглядаються питання розрахунку втрат електроенергії в елементах системи тягового електропостачання та напрямки енергозбереження в господарстві енергопостачання залізничного транспорту.

Посібник призначений працівникам електрифікованих залізниць, може бути корисним проектувальникам, викладачам вищих навчальних закладів і технікумів, а також студентам, що навчаються за спеціальністю "Електрифікація залізниць". За довідками звертатись у редколегію.

<sup>©</sup> Катков О. С. та ін., 2013

# УДК 621.31

# В. В. КУЗНЕЦОВ, А. В. НИКОЛЕНКО (НМетАУ)

Кафедра электротехники и электропривода Национальной металлургической академии Украины, пр-т Гагарина, 4, г. Днепропетровск, 49600, Украина, тел.: (056) 374-84-46, ел. пошта: <u>wit\_jane2000@mail.ru</u>

# СИНТЕЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В СЕТЯХ С НЕКАЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЕЙ

#### Введение

Моделирование электромеханических систем, как известно, позволяет на предпроектной стадии оценить протекающие в них процессы. На основе этих данных могут быть скорректированы параметры силовых установок и систем управления ими. Для асинхронного электродвигателя как такового все это перестало быть проблемой с появлением специализированного программного обеспечения (т.н. САD-программ). Оно позволяет строить графики переходных процессов, получать зависимости требуемых параметров от входных факторов и т.д.

Однако, ситуация усложняется, когда необходимо учитывать качественные показатели входного напряжения, такие как несимметрия и несинусоидальность. Проблема заключается в том, что сама модель в этом случае становится зачастую неадекватной в силу принятых допущений. В случае же использования более сложных аналогов, описание процессов настолько усложняется, что поиск требуемых зависимостей становится вообще невозможным.

Между тем, допущение о симметрии и синусоидальности питающего напряжения сейчас только в редких случаях является полностью обоснованным. В цехах промышленных предприятий в одной сети с асинхронными двигателями (АД) зачастую эксплуатируются мощные потребители, искажающие форму и нарушающие симметрию напряжения в цеховой сети. Причины возникновения указанных нарушений и несинусоидальности напряжения проанализированы в работах [1,2].

Известно также негативное влияние некачественного питания на эксплуатационные характеристики асинхронных машин [3-6]. Снижение качества питающего напряжения приводит к пульсации момента, развиваемого двигателем, падению пускового и критического моментов АД, повышению вибрации, преждевременному износу подшипников и элементов зубчатых передач, повышению потерь в стали из-за высших гармонических составляющих поля в зазоре, снижению таких энергетических показателей работы асинхронных двигателей как коэффициент полезного действия и коэффициент мощности. Для оценки вышеуказанных негативных факторов необходима математическая модель, которая позволяла бы анализировать энергетическую эффективность АД с короткозамкнутым ротором при различных значениях всех показателей качества электрической энергии в сети [7].

#### Цель исследований

Целью данной работы является синтез математического аналога асинхронного двигателя, характеризующего изменение его энергетических показателей при различных значениях всех показателей качества питающего напряжения и апробация его программной реализации.

#### Материал и результаты исследований

Известно несколько подходов, позволяющих учесть параметры питающего напряжения при моделировании процессов в электромеханических системах [8]. Так при несинусоидальности питающего напряжения в классическом варианте выполняется его спектральный анализ, затем требуемые уравнения записываются для каждой гармоники с учётом её амплитуды и фазы. Эти уравнения решатся аналитически или численно, а искомая величина находится как геометрическая сумма всех гармонических составляющих.

В случае несимметрии питающего напряжения используется метод симметричных составляющих. Недостатком такого подхода является существенное усложнение системы уравнений, описывающих объект. Кроме того, в случае несинусоидального питания необходимо определять симметричные составляющие для каждой учитываемой гармоники. Тогда, в случае если последних будет, например, 10 при несимметричном питании, для каждого базового уравнения, описывающего систему, нужно составить уже 30 уравнений. Для упрощения же их записи, предлагается использовать дифференциальные уравнения, записанные относительно пространственно-временных комплексов (ПВК) [3].

© Кузнецов В. В., Николенко А. В., 2013

Пространственно-временной комплекс, т.н. обобщённый вектор, для любой изменяющейся величины Y рассчитывается следующим образом:

$$\underline{Y} = \frac{2}{3} \Big( Y_A + \alpha Y_B + \alpha^2 Y_C \Big), \tag{1}$$

где *Y<sub>A</sub>*, *Y<sub>B</sub>*, *Y<sub>C</sub>* – значения рассматриваемой величины по фазам. Проекции этого комплекса на оси фаз соответствуют указанным значениям.

Записанные относительно ПВК уравнения Парка – Горева [3], являющиеся основой известных моделей АД, имеют вид:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1 R_1 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d \underline{\Psi}_1}{dt}, \qquad (2)$$

$$0 = \underline{I}_2 R_2 + \underline{I}_0 R_0 + \frac{d\underline{\Psi}_2}{dt} - j\omega_r \underline{\Psi}_2 \qquad (3)$$

где <u>U</u><sub>1</sub> – ПВК напряжения статора,

 $I_1, I_2, I_0$  – ПВК токов статора, ротора, и тока намагничивания,  $\Psi_1, \Psi_2$  – ПВК потокосцеплений статора и ротора,  $\omega_m$  – угловая скорость вращения АД,  $R_1, R_2$  – активные сопротивления статора и ротора.

Необходимо учитывать, что на динамические и энергетические показатели асинхронных двигателей существенное влияние оказывает насыщение магнитопровода, которое обусловлено предельной ориентацией магнитных диполей в материале последнего, и, таким образом, прекращения роста магнитного потока с ростом тока намагничивания, как это показано на рис. 1 [9].



Рис. 1. Зависимость главного магнитного потока от тока намагничивания

Существуют различные методы учета этого влияния [3,10,11]. Наилучшее сочетание точности и простоты расчетов дает использование зависимости главной взаимной индуктивности от величины тока намагничивания  $L_{12}=f(I_0)$ . Например, в [12] приведена зависимость индуктивности от тока намагничивания для асин-

© Кузнецов В. В., Николенко А. В., 2013

хронных электродвигателей общепромышленного исполнения рис. 2.

Такая зависимость может быть описана полиномиальными функциями четных степеней [12]. Величина индуктивности ветви намагничивания без учета эффекта насыщения приведена в справочной литературе [13], либо может быть примерно определена по результатам опыта холостого хода [14]. Определение же коэффициентов полиномиальной зависимости индуктивности от величины тока намагничивания является самостоятельной задачей. Для моделирования нами взято уравнение из [15].

Таким образом, в уравнениях для определения потокосцепления необходимо записывать:

$$\underline{\Psi}_1 = \underline{I}_1 \cdot \underline{L}_1 + \underline{L}_{12} (I_0) \cdot \underline{I}_2 \tag{4}$$

$$\underline{\Psi}_2 = \underline{I}_2 \cdot \underline{L}_2 + \underline{L}_{12} (I_0) \cdot \underline{I}_1 \tag{5}$$

Структурная схема объекта моделирования, отражающая уравнения (2) и (3) с учетом (4) и (5), представлена на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема асинхронного двигателя как объекта моделирования

Использование пространственно-временных комплексов характерно для многих моделей. Так как в них учитываются мгновенные значения токов и напряжений, отпадает необходимость спектрального анализа и записи уравнений для каждой гармоники. Кроме того, поскольку такие уравнения фактически являются свёрнутой записью всех трёх фаз, в них учитывается и возможная несимметрия питающего напряжения. Рассматриваемая система является, фактически, универсальной моделью, позволяющей анализировать процессы как в установившихся, так и в переходных режимах (пуск, выбег, изменение нагрузки).

Аналитическое решение системы уравнений (2), (3) затруднено и связано с рядом существенных допущений [3]. В таких случаях прибегают к известным численным методам, суть которых сводится к представлению бесконечно малых приращений искомой функции некоторыми конечными приращениями (метод Эйлера) и представлением уравнений в форме Коши [16].

# Переменными состояния моделируемого объекта в рассматриваемом случае являются скорость асинхронного двигателя, а также пространственно-временные комплексы потокосцепления статора и ротора. Для нахождения последних исходная система уравнений дополнена известными зависимостями

$$M = \frac{3}{2} p_{\tau} L_{12} \operatorname{Im}(\underline{I}_{1}^{*} \underline{I}_{2})$$
 (6)

електромагнітна сумісність / electromagnetic compatibility

$$M - M_c = J \frac{d\omega_m}{dt} \tag{7}$$

где  $M_c$  – момент статический; J – момент инерции механической части привода;

 $p_{\tau}$  – число пар полюсов.

Программная реализация такой модели АД, работающего в условиях некачественного питания, апробирована путем описания процесса пуска, наброса нагрузки и установившегося режима двигателя типа МТКН 112-6 мощностью 5,3 кВт, характеризующегося следующими значениями: U<sub>1н</sub>=310 В, n<sub>ном</sub>=875 об/мин, R<sub>2</sub>=2,19 Ом, J=0,08 кг·м<sup>2</sup>, R<sub>1</sub>=1,61 Ом, R<sub>0</sub>=6,2 Ом, L<sub>1</sub><sub>σ</sub>=0,00362 Гн, L<sub>2</sub><sub>σ</sub>=0,00365 Гн, L<sub>12</sub>=0,294 Гн. В качестве питания в первом случае использовано соответствующее показателям качества, по сути идеальное, трехфазное напряжение, во втором - несимметричное несинусоидальное, соответствующее реальному, показатели которого представлены в таблице 1. Годографы ПВК указанных напряжений представлены на рис. 4. из которых видно, что несимметричное питание обусловливает эллиптическую форму годографа, а несинусоидальноть искажает его форму.

#### Таблица 1

Показатели качества питающего напряжения

Отклонение напряжения по	Α	11,2
фазам, %	В	18,8
	С	1,0
Коэффициенты гармониче-	2	5,8
ских составляющих, %	3	0,83
	4	1,69
	5	0,03
	6	2,78
	7	0,03
	8	0,08
	9	0,23
	10	0,04



Рис. 4. Годографы пространственно-временных комплексов напряжения, соответствующего показателям качества (а) и несимметричного несинусоидального напряжения (б)

Ниже приведены полученные графики основных координат двигателя. Наличие гармонических составляющих в питании АД приводит, как видно, к возникновению пульсаций момента.



Рис. 5. Момент и скорость АД при пуске и набросе нагрузки при идеальном (а) и несимметричном несинусоидальном (б) питающем напряжении

© Кузнецов В. В., Николенко А. В., 2013

Мгновенные значения токов статора и ротора имеют форму, представленную на рис. 6, а годограф момента асинхронного двигателя в течение одного оборота имеет вид, показаний на рис. 7.



Рис. 6. Токи статора и ротора при идеальном (а) и некачественном (б) питании в установившемся режиме

Таблица 2 Энергетические показатели АД при его некачественном питании

			Питание	
		Синусо-	несинусои-	
Показатели	Ед.	идальное	дальное,	
		питание	несимме-	
			тричное	
Электрические	Вт	491.3	108 3	
потери в статоре	DI 491,5		т70,5	
Электрические	Вт	652.2	661,5	
потери в роторе	DI	032,2		
Потери в стали	Вт	89,2	90	
Суммарные по-	Dm	1225	1250	
тери	DI	1255	1230	
КПД	%	81,4	81,2	
Коэффициент	0.0	0.98	0.0	
мощности	0.6.	0,98	0,9	

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий [Текст] / И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000.

2. Качан, Ю. Г. О количественной оценке качества электрической энергии в сетях промышленных предприятий [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип.84. – Д. – С. 9–16.

© Кузнецов В. В., Николенко А. В., 2013



Рис. 7. Годограф момента АД при идеальном (а) и некачественном (б) питании в установившемся режиме

#### Выводы

Рассмотренная нами универсальная модель асинхронного двигателя позволяет анализировать статические и динамические процессы в электромеханической системе при несинусоидальном и несимметричном питании статора. Она дает возможность исследовать как установившиеся, так и переходные режимы асинхронного двигателя.

Несимметричное и несинусоидальное питание АД приводит к появлению пульсаций токов статора и ротора, а также момента, развиваемого двигателем. В результате ухудшаются энергетические показатели его работы.

#### REFERENCES

1. Zhezhelenko I. V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher harmonics in power systems of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000.

2. Kachan Yu. G., Nikolenko A. V., Kuznetsov V. V. O kolichestvennoy otsenke kachestva elektricheskoy energii v setyakh promyshlennykh predpriyatiy [On a quantitative evaluation of the quality of electric power networks in industrial enterprises]. Girnicha elektromekhanika ta avtomatika: Nauk.-tekhn. zb. [Min-

3. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины [Текст] / А. В. Иванов-Смоленский. - М.: Энергия, 1980.

4. Колб, А. А. Теорія електроприводу [Текст]: Навчальний посібник / А. А. Колб, А. А. Колб. – Д.: НГУ, 2006.

5. Качан, Ю. Г. О влиянии гармонического состава питающего напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип.83. – Д. – С. 113 - 117.

6. Качан, Ю. Г. О технико-экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2008. – Вип.80. – Д. – С. 58-62.

7. Качан, Ю. Г. О моделях функционирования асинхронного двигателя в условиях некачественного питания [Текст] / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2008. – Вип.81. – Д. – С .51-54.

8. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1973.

9. Важнов, А. И. Электрические машины [Текст] / А. И. Важнов. – Л.: «Энергия», 1968. – 768 с.

10. Родькин, Д. И. Системы динамического нагружения электрических двигателей при их испытаниях (теория, исследование и разработка) : дис. д. т. н. / Д. И. Родькин. – Криворожский технический ун-т. – Кривой Рог, 1994. – 307 л.+прил. 204 л.

11. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей [Текст] / И. А. Сыромятников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 396 с.

12. Огарь, В. А. Оценка нелинейности индуктивности катушки со сталью энергетическим методом [Текст] / В. А. Огарь //Вестник КрГПУ. – 2004. – Вып. 2/2004 (25). – С. 78-84.

13. Вешеневский, С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе [Текст]: изд. 6-е, исправленное / С. Н. Вешеневский – М.: Энергия, 1977. – 431с.

14. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.

15. Kerkman, O. Steady-State and Transient Analyses of an Induction Machine with Saturation of the Magnetizing Branch / O. Kerkman, J. Russel //IEEE Transactions on Industry Applications. – 1985. – Vol. 21. – Pp.226-234.

16. Башарин, А. В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ [Текст]: учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, Ю. В. Постников. - 3-е изд. - Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд-ние, 1990.

Поступила в печать 28.05.2013.

ing Electromechanics and Automation: Science and Technology Collection], 2010, no.84, pp.9-16.

3. Ivanov-Smolensky A. V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical Machines]. Moscow, Energiya Publ., 1980.

4. Kolb A., Kolb A. *Teoriya elektroprivodu: Navchal'niy posibnik* [Theory of electric: Manual]. Dnipropetrovsk, National Mining University Publ., 2006.

5. Kachan Yu. G., Nikolenko A. V., Kuznetsov V. V. O vliyanii garmonicheskogo sostava pitayushchego napryazheniya na energeticheskie pokazateli asinkhronnogo dvigatelya [Influence of the harmonic content of the supply voltage on the energy performance of the induction motor]. Girnicha elektromekhanika ta avtomatika: Nauk.-tekhn. zb. [Mining Electromechanics and Automation: Science and Technology Collection], 2009, no.83, pp.113-117.

6. Kachan Yu. G., Nikolenko A. V., Kuznetsov V. V. O tekhniko-ekonomicheskoy tselesoobraznosti raboty asinkhronnykh dvigateley v setyakh s nekachestvennoy elektroenergiey [On the feasibility of asynchronous motors in networks with poor electricity]. Girnicha elektromekhanika ta avtomatika: Nauk.-tekhn. zb. [Mining Electromechanics and Automation: Science and Technology Collection], 2008, no.80, pp.58-62.

7. Kachan Yu. G., Nikolenko A. V., Kuznetsov V. V. O modelyakh funktsionirovaniya asinkhronnogo dvigatelya v usloviyakh nekachestvennogo pitaniya [Models of asynchronous motor functioning in conditions of poor nutrition]. Girnicha elektromekhanika ta avtomatika: Nauk.-tekhn. zb. [Mining Electromechanics and Automation: Science and Technology Collection], 2008, no.81, pp.51-54.

8. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theory of Electrical Engineering]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973.

9. Vazhnov A. I. Elektricheskie mashiny [Electrical Machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1968. 768 p.

10. Rodkin D. I. Sistemy dinamicheskogo nagruzheniya elektricheskikh dvigateley pri ikh ispytaniyakh (teoriya, issledovanie i razrabotka). Dr., Dis. [Systems dynamic loading of electric motors in their tests (theory, research and development). Dr. Sci.Diss]. Krivoy Rog, 1994. 511 p.

11. Syromjatnikov I. A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley* [Modes of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 396 p.

12. Ogar' V. A. Otsenka nelineynosti induktivnosti katushki so stal'yu energeticheskim metodom [Score nonlinearity inductor with steel energy method]. Vestnik KrGPU [Bulletin of KrGPU], 2004, no.25, pp.78-84.

13. Veshenevskiy S. N. *Kharakteristiki dvigateley v elektroprivode* [Engine characteristics to the drive]. Moscow, Energiya Publ., 1977. 431 p.

14. GOST 7217-87. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya*. *Dvigateli asinkhronnye*. *Metody ispytaniy* [State Standard 7217-87. Rotating electrical machines. Asynchronous motors. test methods].

15. Kerkman, O. Steady-State and Transient Analyses of an Induction Machine with Saturation of the Magnetizing Branch / O. Kerkman, J. Russel //IEEE Transactions on Industry Applications. – 1985. – Vol. 21. – Pp.226-234.

16. Basharin A. V., Postnikov Yu.V. *Primery rascheta avtomatizirovannogo elektroprivoda na EVM* [Examples of the calculation of the drive on a computeraided]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1990.

© Кузнецов В. В., Николенко А. В., 2013

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

Внешний рецензент Гончаров Ю. П.

Целью работы является синтез математического аналога асинхронного двигателя, характеризующего изменение его энергетических показателей при различных значениях всех показателей качества питающего напряжения и апробация его программной реализации.

Для решения проблемы с адекватностью модели в силу принятых допущений и, в тоже время, во избежание ее более сложных аналогов при моделировании электромеханических систем, разработана модель трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, удобная для анализа изменения его энергетических показателей при различных значениях всех показателей качества питающего напряжения.Универсальность модели асинхронного двигателя позволяет анализировать статические и динамические процессы в электромеханической системе при несинусоидальном и несимметричном питании статора, а также дает возможность исследовать как установившиеся, так и переходные режимы асинхронного двигателя.

**Ключевые слова:** математическая модель, асинхронный двигатель, качество питания, показатели энергоэффективности.

# УДК 621.31

#### В. В. КУЗНЕЦОВ, А. В. НІКОЛЕНКО (НМетАУ)

Кафедра електротехніки і електроприводу Національної металургійної академії України, пр. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна, тел.: (056) 374-84-46, ел. пошта: <u>wit\_jane2000@mail.ru</u>

# СИНТЕЗ ДИНАМІЧНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА,ЯКИЙ ПРАЦЮЄ В МЕРЕЖАХ З НЕЯКІСНОЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЄЮ

Метою роботи є синтез математичного аналога асинхронного двигуна, який характеризується зміною енергетичних показників при різних значення усіх показників якості живлячої напруги і апробація його програмної реалізації.

Для вирішення проблеми з адекватністю моделі в силу прийнятих припущень і, в той же час, щоб уникнути її більш складних аналогів при моделюванні електромеханічних систем, розроблена модель трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором зручна для аналізу зміни його енергетичних показників при різних значеннях всіх показників якості живлячої напруги. Універсальність моделі асинхронного двигуна дозволяє аналізувати статичні і динамічні процеси в електромеханічної системі при несинусоїдної і несиметричному живленні статора, а також дає можливість досліджувати як усталені, так і перехідні режими асинхронного двигуна.

Ключові слова: математична модель, асинхронний двигун, якість живлення, показники енергоефективності.

Внутрішній рецензент Гетьман Г. К.

Зовнішній рецензент Гончаров Ю. П.

## UDC 621.31

## V. V. KUZNETSOV, A. V. NIKOLENKO (NMetAU)

The department of electrical engineering and the National Metallurgical Academy of Ukraine, 4 Gagarina Ave, Dnepropetrovsk, 49600, Ukraine Tel.: (056) 374-84-46, e-mail: <u>wit jane2000@mail.ru</u>

# SYNTHESIS DYNAMIC ELECTROMAGNETIC MODEL OF ASYNCHRONOUS MOTOR, WORKS IN NETWORKS WITH POOR ELECTRICITY

The aim of the work is the synthesis of mathematical analog of the induction motor, which characterizes the change in its energy performance for different values of quality indicators for power on and testing its software implementation.

To solve the problem of the adequacy of the model because of the assumptions adopted and, at the same time avoiding more complex analogies in modeling of electromechanical systems, the model of three-phase asynchronous motor with squirrel cage is suitable for the analysis of changes in its energy performance for different values of the indexes of the quality of the supply voltage. Universality of the induction motor model allows us to analyze the static and dynamic processes in the electromechanical system at nonsinusoidal and unbalanced nutrition stator, and also gives the opportunity to explore how to install, and transient modes of induction motor.

Keywords: mathematical model induction motor, power quality, energy efficiency.

Internal reviewer Getman G. K.

External reviewer Goncharov U. P.

© Кузнецов В. В., Николенко А. В., 2013

# UDC 621.321, 621.311

### V. G. SYCHENKO (DNURT)

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: elsnz@mail.ru

електромагнітна сумісність / electromagnetic compatibility

# VOLTAGE QUALITY ON TRACTION LOAD BUSES OF DC SUBSTATIONS

#### Introduction

Voltage mode on buses of the DC 3,3 KV traction substation influences to opeating characteristics of functioning of the electric railways. Thus, dinamic character of voltage leads to conventionality of using the existing norms of voltage levels. These norms need the new estimation criterias of power supplies quality on the DC traction lines. The level of voltage and voltage deviation on traction lines are the most important indicators of power quality for traction power supply systems that give a power to rolling stock. The efforts of specialists over the past decades [1] were directed to ensuring

the necessary level of voltage and minimizing its deviations. In order to investigate the voltage modes the authors have widely used statistical experimental studies [2, 3]. This allows to define the numerical characteristics of the voltage on the DC bus, which can be used for building a intelligent system for controlling the modes of traction lines.

### The analysis of experimental researches of voltage modes

The selective results of experimental researches of voltage deviations on traction substations are showed on fig. 1, and statistical characteristics are shown in tab. 1.





Table 1

Mo	Paramatars	Number of substation			
JN≌			5	6	11
1	Mathematical expectation $M(\delta U_y)$ , % / V	<u>7,98</u> 263,38	<u>5,41</u> 178,52	<u>7,71</u> 254,28	<u>7,93</u> 261,82
2	Mode $Mo(\delta U_y)$ , % / V	<u>8,48</u> 280,00	<u>5,47</u> 192,36	<u>9,23</u> 304,48	<u>7,88</u> 260,00
3	Median $Me(\delta U_y)$ , % / V	<u>8,06</u> 266,00	<u>5,47</u> 180,41	<u>7,83</u> 258,25	<u>7,91</u> 261,00
4	Variance $D(\delta U_y)$ , % <sup>2/</sup> V <sup>2</sup>	<u>5,68</u> 6180,27	<u>1,09</u> 1185,08	<u>1,70</u> 1850,87	<u>1,25</u> 1361,69
5	Standard deviation $\sigma(\delta U_y)$ , % / V	<u>2,38</u> 78,61	<u>1,04</u> 34,42	$\frac{1,30}{43,02}$	<u>1,12</u> 36,90
6	Asymmetry $As(\delta U_y)$	-0,74	-0,33	-1,09	0,21
7	Excess $Ex(\delta U_y)$	1,40	-0,17	1,92	1,82

## Numerical characteristics of voltage deviation on 3,3 KV feeders

<sup>©</sup> Sychenko V. G., 2013

The sharp changes of voltage on buses (fig. 1) corresponds to the following modes of substation: inverter condition -a leap upwards, a rectifier condition -a leap downwards, or changing the traction loads.

The analysis of the obtained results shows that numerical characteristics of a of  $\Delta U$  distribution differ insignificantly for each given substation (tab. 1). In other words their empirical distributions have a symmetric character. (fig. 2). It's impossible to find the analytical distribution of voltage for all interval of observation. It is necessary to notice that during calculations of modes of traction power supply systems it's widely used a normal distribution for the description of regularity changes of voltage. At the same time, this approach is approximate and not allows us to gain a necessary accuracy during regulating the modes of operation (tab. 2).



Pic. 2. The empirical distributions of voltage deviations on feeder 3,3 κV for four different substations

Table 2

№	Sub- station	Parameters of the normal distribution	Pearson criterion, $\chi^2_e$	The critical value, $\chi^2_{cr}$	Result
1	S	$\sigma = 72,299 \ M = 3538,9$	1401,4	21,026	Hypothesis is rejected
2	L	$\sigma = 80,842 \ M = 3569,2$	3547,0	22,362	Hypothesis is rejected
3	Sin	$\sigma = 34,425  M = 3478,5$	52,709	21,026	Hypothesis is rejected
4	N	$\sigma = 43,2$ $M = 3557,2$	10993,0	26,296	Hypothesis is rejected
5	El	$\sigma = 130,57$ $M = 3348,8$	728,82	22,362	Hypothesis is rejected

Numerical characteristics of voltage deviation on 3,3 KV feeders

The problem of selection the most appropriate distribution law of the voltage exists also on highvoltage lines [4]. It was proposed to determine its day interval sequences using Instant probability densities, which allowed him to apply a normal distribution for each clock time with their statistical characteristics. Unfortunately, this approach to description of the regularity changes of voltage on the traction substation buses didn't give for us the necessary result . Tabl.3 shows the example of distribution law selection of voltage on the buses for one of given substations.

© Sychenko V. G., 2013

No			Criterion,	The critical	Recult
h.	Distribution law	Parameters	$\chi^2_p$	value, $\chi^2_{KP}$	(+ / -)
1	Weibull	$\alpha = 159,53  \beta = 3521,9$	5,89	14,07	+
2	Hi-square	$v = 248 \ \beta = 3244$	18,03	14,07	-
3	Lognormal	$\sigma = 0,0932$ $\mu = 5,4675$ $\gamma = 3235$	5,1	14,07	+
4	Weibull	$\alpha = 205, 69 \ \beta = 3479, 5$	3,85	14,07	+
5	Beta	$\alpha_1 = 2,7217 \ \alpha_2 = 3,359$	5,08	14,07	+
	· · ·	a = 3411,9 $b = 3521,4$		-	
6	Lognormal	$\sigma = 0,02396 \ \mu = 6,9619 \ \gamma = 2369,5$	5,95	14,07	+
7	Log - logistical	$\alpha = 205, 38 \ \beta = 3438, 4$	14,06	14,07	+
8	Relej	$\sigma = 47,584$ $\gamma = 3388,6$	13,78	14,07	+
9	Inverse gaussian	$\lambda = 6,33 \cdot 10^8 \ \mu = 8672,8 \ \gamma = -5223,6$	7,79	14,07	+
10	Weibull	$\alpha = 167, 17 \beta = 3482, 6$	8,22	14,07	+
11	The normal	$\sigma = 20,422 \ \mu = 3457,7$	8,27	14,07	+
12	Relej	$\sigma = 47,095 \ \gamma = 3410$	10,3	14,07	+
13	Weibull	$\alpha = 167, 17 \beta = 3482, 6$	8,22	14,07	+
14	Normal	$\sigma = 18,744 \ \mu = 3484,1$	4,5	14,07	+
15	Logistic	$\alpha = 5,8694 \ \beta = 81,562 \ \gamma = 3412,9$	30,92	14,07	_
16	Normal	$\sigma = 17,325 \ \mu = 3502,9$	6,31	14,07	+
17	Normal	$\sigma = 16,13 \ \mu = 3523,2$	4,81	14,07	+
18	Beta	$\alpha_1 = 1,6859 \ \alpha_2 = 1,5137$	01.00	14.07	
		a = 3438, 6  b = 3551, 7	21,08	14,07	_
19	Log - logistical	$\alpha = 210, 49 \beta = 3486, 2$	29,06	14,07	—
20	Weibull	$\alpha = 257,83 \ \beta = 3523,6$	31,01	14,07	_
21	Logistic	$\alpha = 34,463 \ \beta = 468,03 \ \gamma = 3026,9$	12,69	14,07	+
22	Erlang	$m = 380 \ \beta = 1,7967 \ \gamma = 2796,6$	33,70	14,07	_
23	Weibull	$\alpha = 150, 64 \beta = 3490, 1$	31,01	14,07	_
24	Log - logistical	$\alpha = 218, 6 \beta = 3466, 0$	3,46	14,07	+

Selection of the best distribution law of voltage on substation S

Fig.3 shows the correlation plot of voltage on buses 3.3 kV on traction substations. We can see that they contain explicitly expressed periodic structure. So, the original signal contains nonrandom periodic structure. By means of the Fourier analysis it's demonstrated that harmonics with maximum amplitudes in the range to 1 Hz, first of all, have periods 24, 12, 8 and 4 hour. This approach also became the methodological basis for description of regularity of voltage changes on buses of the DC traction substations [5].

# The analysis of experimental researches of voltage harmonics

The analysis of the experimental data shows that the spectrum of the rectified voltage on 3,3  $\kappa$ V buses of the traction substations contains a wide spectrum of the harmonics, including canonical and not canonical harmonics. So, it is actually impossible to establish a connection between changing of operational modes of traction substations and spectrum, as well as to assess the level of mutual influence of external power supply system and traction one. As an example, fig. 4-9 shows the typical spectrums of voltage 3.3 kV in different modes of traction substation equipment.

© Sychenko V. G., 2013





Pic. 4. Spectrum of Voltage 3,3 κV, rectified mode



Pic. 6. Spectrum of voltage 3,3 κV, rectified mode (The filter is disconnected)







Pic. 5. Spectrum of voltage 3,3 κV, invertor mode







© Sychenko V. G., 2013

# The analysis of experimental researches of voltage harmonics

Analysis of the long-term results of experimental studies of the voltage modes on DC railways performed at the Department of "Power supply of railways" allows to make the following conclusions:

- the voltage modes on buses of the traction substations, as well as on feeders of traction substation are defined by random factors and have a weak correlation between each others;

- the numerical characteristics of the distribution laws of  $\Delta U$  differ only a little between each others for each of the given substantions. Thus, their empirical distributions have the symmetric shape. Investigation of the voltage distribution law for all interval is a complex task. Therefore, it's better using the analytical expressions in the polynomial form for the tasks of the regulation of modes on traction lines;

- the spectrum of rectified voltage on 3,3 kV buses of traction substations contains a wide amount of harmonics including canonical and not canonical ones. Thus, it's actually impossible to find out a correlation between changing of operational modes of traction substations and spectrums.

Internal reviewer Kuznetsov V. G.

#### REFERENCES

1. Sychenko V. G. Pokaznyky jakosti elektrozhyvlennja u tjagovyh merezhah postijnogo strumu [Quality Indicators traction power in DC networks]. Praci Inctytutu elektrodynamiky NAN Ukrai'ny. Special'nyj vypusk. Chastyna 2 [Proceedings Intstytutu Electrodynamics of NAS of Ukraine. Special Issue. Part 2], 2011, pp. 5-13.

2. Miroshnichenko R. I. *Rezhimy raboty elektrifitsirovannykh uchastkov* [Modes electrified sections]. Moscow, Transport Publ., 1982. 207 p.

3. Markvardt G.G. *Primenenie teorii veroyatnostey i vychislitel'noy tekhniki v sisteme energosnabzheniya* [Application of probability theory and computer technology in the power supply system]. Moscow, ransport Publ., 1972. 224 p.

4. Dovgalyuk O. M. Otsenka zakona raspredeleniya funktsii napryazheniya v pitayushchikh elektricheskikh setyakh [Evaluation of the distribution law of the stress function in the supply of electrical networks]. Svitlotekhnika ta elektroenergetika – Light and electricity, 2008, no.1, pp.70-75.

5. Sychenko V. G. Metodologiya modelirovaniya otkloneniy napryazheniya v podsistemakh tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka [Modeling methodology voltage deviations in the subsystems of the traction power supply DC]. Girnicha elektromekhanika ta avtomatika. Naukovo-tekhnichniy zbirnik NGU [Mining Electromechanics and Automation. Scientific and technical collection NMU], 2012, no.89, pp.48-53.

#### External reviewer Denisuk S. P.

Voltage is one of the parameters of the traction power grid mode, and affects the energy performance of its functioning. Characteristics of electricity transmission networks are pulling for a change of the consumers and change their operation modes, restrictions imposed by train each other depending on their relative position, as well as limitations due to ensuring the transportation process. Voltage level at the traction substation buses and hence on the current collectors locomotives, depends not only on changes in traction load, but also from changes in load and foreign consumers district energy system, while the nature of factors that affect the voltage is nonlinear and non-stationary. At the same voltage level as an indicator of the quality of the functioning of the traction power supply system must be regarded as a parameter, which optimizes the transmission and consumption of electricity for electric rolling stock. In this regard, the regulation voltage in traction network has always been one of the most important practical tasks. To answer how to manage stress regime in the traction power supply system can be divided into three groups: local, zonal control and centralized management. Their use is intended to achieve the overall optimum. The development of modern computing technology provides the possibility of recording the parameters modes networks with more accurate and high-speed devices, and also used for data processing and rapid means of modern microprocessor and computer technology. This allows spanning more productively use the results to adjust the parameters of their operation modes. When running on energy saving measures today questions of optimal control mode voltage are of particular relevance. For optimum operation control traction networks necessary to perform analysis of their functioning in real time. One component of this process is an assessment of the law of distribution bus voltage traction substation, as one of the main parameters of the regime.

Keywords: voltage quality, direct current, traction load, substation, statistic, distribution law.

<sup>©</sup> Sychenko V. G., 2013

#### електромагнітна сумісність / electromagnetic compatibility

# УДК 621.321, 621.311

# В. Г. СИЧЕНКО (ДНУЗТ)

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: <u>elsnz@mail.ru</u>

# ЯКІСТЬ НАПРУГИ НА ШИНАХ ТЯГОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПІДСТАНЦІЙ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Напруга є одним з параметрів режиму тягової електричної мережі, та впливає на енергетичні показники її функціонування. Особливостями передачі електроенергії по тяговій мережі є зміна положення споживачів і зміна режимів їх роботи, обмеження, що накладаються поїздами один на одного залежно від їх взаємного розташування, а також обмеження пов'язані, загалом, із забезпеченням перевізного процесу. Рівень напруги на шинах тягової підстанції і, отже, на струмоприймачах електровозів, залежить не лише від зміни тягового навантаження, але і від зміни навантаження районних споживачів і живлячої енергосистеми, при цьому характер чинників, що впливають на напругу, є нелінійним і нестаціонарним. При цьому рівень напруги, як показник якості функціонування системи тягового електропостачання, повинен розглядатися як деякий параметр, що оптимізує передачу і споживання електроенергії для електрорухомого складу. У зв'язку з цим регулювання напруги в тяговій мережі завжди було одним з важливих практичних завдань. На сьогоднішній день способи управління режимом напруги в системі тягового електропостачання можуть бути розділені на три групи: місцеве управління, зонне управління та централізоване управління. Їх застосування передбачає досягнення загального оптимуму. Розвиток сучасної обчислювальної техніки дає можливість реєстрації параметрів режимів роботи мереж за допомогою більш точних та швидкодіючих приладів, а також використовувати для їх обробки сучасні і швидкодіючі засоби мікропроцесорної і комп'ютерної техніки. Це дозволяє більше продуктивно використовувати отримані результати для коригування параметрів режимів їх роботи. В умовах виконуваних на сьогодні заходів по енергозбереженню питання оптимального керування режимом напруги мають особливу актуальність. Для оптимального управління режимами роботи тягових мереж необхідно виконувати аналіз функціонування їх в реальному часі. Однією із складових цього процесу є оцінка закону розподілу напруги на шинах тягової підстанції, як одного з головних параметрів режиму.

Ключові слова: якість напруги, постійний струм, тягове навантаження, підстанція, статистика, закон розподілу.

Внутрішній рецензент Кузнецов В. Г.

Зовнішній рецензент Денисюк С. П.

# УДК 621.321, 621.311

### В. Г. СЫЧЕНКО (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, Кафедра Электроснабжение железных дорог, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: <u>elsnz@mail.ru</u>

# КАЧЕСТВО НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Напряжение является одним из параметров режима тяговой электрической сети, и влияет на энергетические показатели ее функционирования. Особенностями передачи электроэнергии по тяговой сети являются изменение положения потребителей и изменение режимов их работы, ограничения, которые накладываются поездами друг на друга в зависимости от их взаимного расположения, а также ограничения обусловленные, в целом, с обеспечением перевозочного процесса. Уровень напряжения на шинах тяговой подстанции и, следовательно, на токоприемниках электровозов, зависит не только от изменения тяговой нагрузки, но и от изменения нагрузки районных потребителей и внешней энергосистемы, при этом характер факторов, которые влияют на напряжение, является нелинейным и нестационарным. При этом уровень напряжения, как показатель качества функционирования системы тягового электроснабжения, должен рассматриваться как некоторый параметр, который оптимизирует передачу и потребление электроэнергии для электроподвижного состава. В связи с этим регулирование напряжения в тяговой сети всегда было одним из важных практических заданий. На сегодняшний день способы управления режимом напряжения в системе тягового электроснабжения могут быть разделены на три группы: местное управление, зонное управление и централизованное управление. Их применение предусматривает достижение общего оптимума. Развитие современной вычислительной техники обуславливает возможность регистрации параметров режимов работы сетей с помощью более точных и быстродействующих приборов, а также использовать для их обработки современные и быстродействующие средства микропроцессорной и компьютерной техники. Это позволяет болеее производительно использовать полученные результаты для корректировки параметров режимов их работы. При выполняемых на сегодня мероприятий по энергосбережению вопросы оптимального управления режимом напряжения имеют особенную актуальность. Для оптимального управления режимами работы тяговых сетей необходимо выполнять анализ функционирования их в реальном времени. Одной из составляющих этого процесса есть оценка закона распределения напряжения на шинах тяговой подстанции, как одного из главных параметров режима.

Ключевые слова: качество напряжения, постоянный ток, тяговая нагрузка, подстанция, статистика, закон распределения.

Внутренний рецензент Кузнецов В. Г.

Внешний рецензент Денисюк С. П.

© Sychenko V. G., 2013

# УДК 621.311

### В. А. ТОДОРЕНКО, С. К. ВАСИЛЕНКО (НТУУ «КПИ»)

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», 03056, Киев, пр-т Победы, 37, тел.: (044) 454-94-32, эл. почта: <u>ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua</u>

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВЧ КОМПЕНСАТОРЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СРЕДЕ ТСАД 6.2

Для большинства электрических устройств первичным источником электрической энергии является электрическая сеть 220 В, 50 Гц. Но далеко не все нагрузки являются чисто активными, что ведет к потреблению тока, форма которого и/или фаза не совпадают с синусоидальным напряжением сети. В случае RL или RC нагрузки ток источника питания сохраняет синусоидальную форму, но сдвигается по фазе в ту или иную сторону (в зависимости от типа нагрузки). Для нагрузки DRC-типа (диодный выпрямитель, С-фильтр, нагрузка), ток источника питания имеет вид коротких импульсов, амплитуда которых, в зависимости от параметров нагрузки и сопротивления сети, может в десятки раз превышать действующее значение тока.

Искажение формы тока, либо смещение его по фазе, относительно питающего напряжения, приводит к увеличению потерь в линии электропередачи, ухудшению условий работы генератора электрической энергии, искажению синусоидальной формы напряжения в сети.

В настоящее время, для устранения таких явлений, широко применяются высокочастотные компенсаторы реактивной мощности (корректоры коэффициента мощности), включаемые параллельно либо последовательно с нагрузкой.

Высокочастотные компенсаторы реактивной мощности можно классифицировать по следующим признакам:

• по способу включения:

- параллельные (включаются параллельно с нагрузкой),

- последовательные (включаются последовательно с нагрузкой).

• по характеру выходного напряжения:

- с выходом на постоянном токе (только последовательные),

- с выходом на переменном токе.

Преимуществом параллельных компенсаторов является более высокий КПД. Это объясняется тем, что в отличие от последовательных, в параллельных компенсаторах часть энергии без преобразования передается от источника в нагрузку. Преимуществом последовательных компенсаторов является возможность коррекции формы выходного напряжения.

В настоящее время наиболее развитым является направление последовательных компенсаторов с выходом на постоянном токе[1-6]. В таких компенсаторах сигналы управления формируются специализированной микросхемой (PFC-контроллером). Существующие контроллеры реализуют управление релейного типа, ШИМ, либо ШИМ с учетом тока дросселя. Данные микросхемы выпускаются фирмами Philips, Thomson, Motorola, Siemens, Linear-Technology. Основными недостатками таких компенсаторов являются узкий круг нагрузок, т.к. на их выходе постоянное напряжение, несинусоидальная форма потребляемого тока, изза использования в качестве задающего сигнала напряжения источника питания. Высокочастотные компенсаторы с выходом на переменном токе выполняются по двухзвенной структуре (корректор и инвертор). Такие схемы содержат избыточные элементы в силовой части, что ведет к удорожанию и увеличению массогабаритных показателей.

В данной работе исследованы электромагнитные процессы в параллельном ВЧ компенсаторе реактивной мощности с выходом на переменном токе, работающем на нагрузку DRC-типа. Для такой нагрузки характерно резкое изменение режима работы от холостого хода до максимальных токов. Рассмотрена модель системы управления, реализующая релейный принцип управления, изза ограниченных возможностей пакета TCAD 6.2 по формированию моделей с широтноимпульсными модуляторами.

#### Функциональная схема устройства

Функциональная схема параллельного компенсатора реактивной мощности с выходом на переменном токе приведена на рис.1, где: Д1 – Д3 – датчики, Р – регулятор, К1 – К2 – компараторы, ФИ1 – ФИ2 – формирователи импульсов, ГОСН – генератор опорного синусоидального напряжения, М – модулятор, СУ – система управления. Силовая часть представляет собой

<sup>©</sup> Тодоренко В. А., Василенко С. К., 2013

реверсивный преобразователь, выполненный на транзисторах (VT1 – VT4) и диодах (VD1 – VD4), в одну из диагоналей которого, последовательно с дросселем L1, включена сеть, а в другую – накопительный элемент (конденсатор C1).

Система управления, является замкнутой системой релейного типа, реализующей отрицательную обратную связь по отклонению входного тока от опорного синусоидального, с каналом подчиненного управления, корректирующего амплитуду опорного синусоидального напряжения в зависимости от величины нагрузки. Система управления параллельного компенсатора (рис.1), содержит только два канала управления: канал стабилизации формы входного тока и подчиненный канал формирования амплитуды входного тока.



#### Работа силовой части на интервалах

Период работы схемы, для DRC-нагрузки (рис.2), можно разделить на шесть интервалов: 1) 0..t1, 2) t1..t2, 3) t2..T/2, 4) T/2..t3, 5) t3..t4, 6) t4..T.

На первом и третьем интервалах реверсивный преобразователь обеспечивает отбор электрической энергии от источника питания и передачу ее в накопительный конденсатор С1. На этих интервалах работают выделенные элементы схемы, представленной на рис.3,а. Схема представляет собой преобразователь повышающего типа, нагруженный на накопительный конденсатор С1.

На втором интервале реверсивный преобразователь обеспечивает передачу электрической энергии от накопительного конденсатора С1 в нагрузку. Эквивалентная схема преобразователя на данном интервале представлена на рис.3,б. Схема представляет собой преобразователь понижающего типа, источником энергии в котором является накопительный конденсатор C1.

На четвертом и шестом интервалах реверсивный преобразователь обеспечивает отбор электрической энергии от источника питания и передачу ее в накопительный конденсатор С1. На данном интервале работают выделенные элементы схемы, представленной на рис.3,в. Схема представляет собой преобразователь повышающего типа, нагруженный на накопительный конденсатор С1.

На пятом интервале реверсивный преобразователь обеспечивает передачу электрической энергии от накопительного конденсатора C1 в нагрузку.

Эквивалентная схема преобразователя представлена на рис.3, г. Схема представляет собой преобразователь понижающего типа, в котором источником энергии является накопительный конденсатор C1.

<sup>©</sup> Тодоренко В. А., Василенко С. К., 2013



# Работа системы управления

Напряжение с датчика входного напряжения (Д1) (рис.1) подается на компаратор (К1), где

сравнивается с напряжением нулевого уровня. Напряжение с выхода К1 поступает на формирователь импульсов (ФИ1), который формирует

© Тодоренко В. А., Василенко С. К., 2013

сигналы управления НЧ ключами VT3 и VT4, работающих поочередно (рис.2, UynpVT3(t) и UyпpVT4(t)). Это же напряжение синхронизирует работу генератора опорного синусоидального напряжения (ГОСН). С выхода ГОСН снимается синусоидальное напряжение постоянной амплитуды по частоте и фазе совпадающее с напряжением источника питания. Опорное напряжение поступает на один из входов модулятора (М). На второй вход М поступает модулирующее напряжение (напряжение обратной связи канала коррекции амплитуды входного тока), которое пропорционально среднему значению напряжения на накопительном конденсаторе С1. Данное напряжение снимается с датчика ДЗ и регулируется пропорционально-интегральным регулятором Р. Из выходного напряжения модулятора вычитается напряжение, пропорциональное напряжению датчика тока источника (Д2). Сигнал ошибки, снимаемый с сумматора, подается на компаратор К2. Ширина зоны нечувствительности гистерезисной характеристики компаратора определяет максимальную величину отклонения входного тока от синусоидальной формы. Сигналы с выхода компаратора поступают на формирователь импульсов (ФИ2), формирующий сигналы управления ВЧ транзисторами VT1 и VT2, работающих в противофазе (рис.3, UyпpVT1(t) и UyпpVT2(t)).

Как видно из временных диаграмм приведенных на рис.2, при формировании сигналов управления ВЧ транзисторами необходимо определять моменты времени t1 – t4. Это требует использования цепей сравнения токов нагрузки и источника. Альтернативным способом решения этой задачи является непрерывная подача сигналов управления на транзисторы VT1, VT2 (рис.2, U'yпpVT1(t) и U'ynpVT2(t)).

# Моделирование электромагнитных процессов

В данной статье приведены результаты исследования электромагнитных процессов в схеме для квазиустановившегося режима и для скачкообразного наброса нагрузки.

Электромагнитные процессы были исследованы при ненулевых начальных условиях.

Для исследования электромагнитных процессов был использован пакет TCad 6.2.

ТСаd-модель устройства приведена на рис.4.

Краткое описание элементов, используемых в TCad-модели приведено в табл.1. При проведении исследования модель системы управления постепенно усложнялась. На первом этапе была проведена симуляция электромагнитных процессов в компенсаторе, содержащем лишь канал формирования синусоидальной формы входного тока. Результаты моделирования показали, что при изменении уровня выходной мощности компенсатора необходимо перестрауровень опорного синусоидального ивать напряжения в системе управления для поддержания требуемой формы входного тока. Поэтому на втором этапе была разработана двухконтурная модель компенсатора, в которую был введен второй канал регулирования, обеспечивающий адаптацию уровня опорного синусоидального напряжения, в зависимости от мощности нагрузки.

Такая TCad-модель содержит модель компенсатора и DRC-нагрузки со скачкообразно изменяемым сопротивлением резистора. Модель компенсатора состоит из силовой части и системы управления.

Система управления в свою очередь содержит два канала: канал формирования формы входного тока и канал формирования амплитуды входного тока.

Результаты исследования приведены на рис.5. в виде временных диаграмм токов и напряжений.

Электромагнитные процессы в схеме были исследованы при следующих параметрах и начальных условиях: интервал исследования 200мс; шаг исследования 0.01 мс; амплитуда напряжения сети 311 В; частота напряжения питающей сети 50 Гц; внутреннее сопротивление питающей сети 0.1 Ом; активное сопротивление ключевых элементов схемы в открытом состоянии 0.3 Ом, в закрытом состоянии 0.1 Мом; активное сопротивление нагрузки 55 Ом (0<t<100мс), 5 Ом (100<t<200мс); величина емкости фильтрующего конденсатора в цепи нагрузки 5000 мкФ; величина индуктивности дросселей 1.5мГн; величина емкости накопительного конденсатора в преобразователе компенсатора 8000 мкФ; начальное напряжение на фильтрующем конденсаторе 0 В; начальное напряжение на накопительном конденсаторе 700 В; начальная величина тока дросселя 0 А.

<sup>©</sup> Тодоренко В. А., Василенко С. К., 2013



#### Рис. 4.



Элемент	Название	Элемент	Название
Ì	Датчик напряжения	Þ	Трехвходовый сумматор
<b>↓</b> E	Источник опорного напряже- ния	<u>ل</u>	Умножитель
<b>↓</b>	Источник скачкообразного напряжения	+NOT+	Логический элемент «нет»
	Компаратор		Вольтметр, выводящий информацию на экран
¥	Указатель цепи съема тока	<b>*</b>	Амперметр, выводящий информацию на экран
þ	Двухвходовый сумматор	+[A]+	Амперметр, выводящий информацию в файл
+	Одновходовый сумматор	ļ	Вольтметр, выводящий информацию в файл



© Тодоренко В. А., Василенко С. К., 2013

ISSN 2307-4221 Електрифікація транспорту, № 6. - 2013.



Рис. 5 (продолжение)

#### Выводы

Для обеспечения синусоидальной формы тока, потребляемого от источника электроэнергии, система управления параллельного компенсатора должна содержать контуры формирования формы тока и адаптации его амплитуды, в зависимости от величины мощности нагрузки.

В начальный момент времени, после подключения нагрузки, ток заряда фильтрующей емкости может превысить максимально допустимый ток должна содержать контуры форми-

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Булатов О.Г. Принципы построения быстродействующих компенсаторов реактивной мощности [Текст] / О.Г. Булатов, В.А. Шитов, Электротехника.-1989.-№7.-с.5-9.

2. Глушков В.М. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий [Текст]/ В.М Глушков, В.П. Грибин – М.: Энергия, 1975. - 104с.

 Константинов Б.А. Коэффициент мощности и способы его улучшения на промышленных предприятиях.

4. Поспелов Г.Е. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах. - 1983.

5. Todorenko V.A., Nguyen Lu Hai Tung, Rusinski J. A power factor conditioner with uninterruptible power supply capability. 4 Szkola – Konferencja Elektrotechnika Prady Niesinusoidalne. 18 – 20 czerwca 1998 Zielona Gora.

6. Strzelecki. A new method of alternating voltage control with utilised series active power filter. 2nd International Scientific and Technical conference on Unconventional Electromechanical and Electrotechnical systems. 15 - 17 December 1996 Szczecin and Miedzyzdroje, Poland.

рования формы тока и адаптации его амплитуды, в зависимости от величины мощности нагрузки.

В начальный момент времени, после подачи напряжения питания на параллельный компенсатор, ток заряда накопительной емкости может превысить максимально допустимый ток компенсатора. Для исключения аварийных режимов работы, в систему управления необходимо вводить цепи ограничения тока заряда накопительного конденсатора компенсатора

#### REFERENCES

1. Bulatov O.G. *Printsipy postroeniya bystrodeystvuyushchikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti* [Principles of construction of high-speed reactive power compensators]. Elektrotekhnika Publ., 1989, no. 7, pp. 5-9.

2. Glushkov V.M., Gribin V.P. Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriyatiy [Reactive power compensation in the electrical installations of industrial enterprises]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 104 p.

3. Konstantinov B.A. Koeffitsient moshchnosti i sposoby ego uluchsheniya na promyshlennykh predpriyatiyakh [Power factor, and methods of its improvement at the industrial enterprises]

4. Pospelov G.E. Kompensiruyushchie i reguliruyushchie ustroystva v elektricheskikh sistemakh [Compensating and control devices in electrical systems]. 1983.

5. Todorenko V.A., Nguyen Lu Hai Tung, Rusinski J. A power factor conditioner with uninterruptible power supply capability. 4 Szkola – Konferencja Elektrotechnika Prady Niesinusoidalne. 18 – 20 czerwca 1998 Zielona Gora.

6. Strzelecki. A new method of alternating voltage

© Тодоренко В. А., Василенко С. К., 2013

Поступила в печать 29.04.2013.

control with utilised series active power filter. 2nd International Scientific and Technical conference on Unconventional Electromechanical and Electrotechnical systems. 15 - 17 December 1996 Szczecin and Miedzyzdroje, Poland.

Внутренний рецензент Костин Н. А.

Внешний рецензент Гончаров Ю. П.

В статье рассмотрен параллельный ВЧ компенсатор реактивной мощности с выходом на переменном токе. Показаны преимущества и недостатки параллельных и последовательных ВЧ компенсаторов реактивной мощности. Подана функциональная схема параллельного ВЧ компенсатора реактивной мощности с выходом на переменном токе. Описана силовая часть схемы и ее работа на интервалах; структура и функционирование системы управления ВЧ компенсатором. Приведены результаты исследования с использованием среды TCad 6.2 электромагнитных процессов в схеме для квазиустановившегося режима и для скачкообразного наброса нагрузки при ненулевых начальных условиях. Приведены схема TCad-модели и короткое описание ее элементов.

**Ключевые слова:** электромагнитный процесс, реактивная мощность, компенсатор, высокая частота, моделирование.

# УДК 621.311

### В. А. ТОДОРЕНКО, С. К. ВАСИЛЕНКО (НТУУ «КПІ»)

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 03056, Київ, пр-т Перемоги, 37, тел.: (044) 454-94-32, ел. пошта: <u>ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua</u> <u>hte@el.ntu-kpi.kiev.ua</u>

# ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ПАРАЛЕЛЬНОМУ ВЧ КОМПЕНСАТОРІ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СЕРЕДОВИЩІ ТСАД 6.2

У статті розглянуто паралельний ВЧ компенсатор реактивної потужності з виходом на змінному струмі. Показано переваги і недоліки паралельних і послідовних ВЧ компенсаторів реактивної потужності. Подана функціональна схема паралельного ВЧ компенсатора реактивної потужності з виходом на змінному струмі. Описана силова частина схеми і її робота на інтервалах; структура і функціонування системи управління ВЧ компенсатором. Наведено результати дослідження з використанням середовища TCad 6.2 електромагнітних процесів у схемі для квазіустановленого режиму і для стрибкоподібного набросу навантаження при ненульових початкових умовах. Наведено схема TCad - моделі і короткий опис її елементів.

**Ключові слова:** електромагнітний процес, реактивна потужність, компенсатор, висока частота, моделювання.

Внутрішній рецензент Костін М. О.

Зовнішній рецензент Гончаров Ю. П.

## UDC 621.311

V. A. TODORENKO, S. K. VASILENKO (NTU "KPI")

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 03056, Kyiv, 37 Peremogy Ave, tel.: (044) 454-94-32, e-mail: <u>ikar@fel.ntu-kpi.kiev.ua</u> <u>hte@el.ntu-kpi.kiev.ua</u>

# INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN PARALLEL RF REACTIVE POWER COMPENSATOR IN TCAD 6.2 ENVIRONMENT

The article describes the parallel HF reactive power compensator with access to the AC. The advantages and disadvantages of parallel and serial HF reactive power compensators. Filed a functional diagram of the parallel RF reactive power compensator with access to the AC. Described power of the circuit and its work at intervals, and the structure and functioning of the control system HF compensator. The results of studies of the environment using 6.2 TCad electromagnetic processes in the scheme for quasi-steady mode and load-on for non-zero initial conditions. Presents a schematic diagram TCad model and a short description of its elements.

Keywords: electromagnetic process, reactive power, compensator, high frequency, simulation.

Internal reviewer Kostin M. O.

External reviewer Goncharov U. P.

<sup>©</sup> Тодоренко В. А., Василенко С. К., 2013

# УДК 621.331

# В. Г. КУЗНЕЦОВ, Д. О. БОСИЙ, К. О. КАЛАШНИКОВ (ДНУЗТ)

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

енергозбереження /energy saving

# УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

### Вступ

У зв'язку з постійним підвищенням вартості електроенергії не втрачає своєї актуальності задача зменшення втрат електроенергії та власного її споживання електрифікованим залізничним транспортом. В загальному електроенергетичному балансі України споживання електроенергії транспортом знаходиться на 4-му місці після промисловості, населення, та комунальнопобутових споживачів, таким чином тяговими підстанціями електрифікованого транспорту виконується переробка майже 6 % електричної енергії. Економія навіть незначного відсотка споживання електроенергії викликає відчутну економію коштів. Споживання електроенергії залізницями в першу чергу залежить від організації перевізного процесу та значною мірою визначається узгодженою роботою усіх підрозділів: станцій, локомотивних і вагонних депо, дистанцій колії, сигналізації та зв'язку, дистанцій електропостачання, що забезпечується рухом поїздів за чітко визначеним графіком.

Особливість роботи систем тягового електропостачання обумовлюється характером зміни навантажень від електрорухомого складу. При чому, в процесі руху змінюється взаємне розташування поїздів, струм і швидкість кожного окремого поїзду, оскільки поїзд в кожен момент часу знаходиться на різному елементі поздовжнього профілю, який створює свій вплив на основний опір руху. Все це викликає зміну навантажень тягових підстанцій і впливає на величину втрат електроенергії в контактній мережі.

Метою даної роботи є дослідження впливу параметрів графіку руху поїздів, який визначає навантаження системи тягового електропостачання, на втрати електроенергії в контактній мережі.

#### Огляд літератури

Поставленій проблематиці присвячена досить велика кількість робіт провідних вчених [1, 2], проте задача зменшення втрат електроенергії в контактній мережі за рахунок управління транспортним потоком до цього часу не реалізована.

В роботі [3] проведені дослідження втрат електроенергії в контактній мережі з врахуванням дислокації поїздів. Проте в реальних умовах підтримувати оптимальні відстані між поїзлами, які змінюються в кожен момент часу. практично неможливо за умови відсутності інформації у машиністів електровозі про знаходження інших рухомих складів за пристроями супутникової навігації. Тому виникає задача усереднення дислокацій поїздів до середнього міжпоїзного інтервалу, який відповідатиме мінімуму втрат електричної енергії. Управляючим параметром в роботі [4] розглядається міжпоїзний інтервал. Унаслідок нерівномірності руху поїздів, фактичні розміри руху не завжди перевищують наявну пропускну спроможність Таким чином, у графіку руху ділянки. з'являється резерв вільного часу, який надає можливості регулювання міжпоїзного інтервалу в певних межах. Обмеженнями в поставленій задачі мінімізації втрат електроенергії повинні бути найменша величина інтервалу між поїздами за умовами безпеки руху та сумарний час пропуску заданого пакету поїздів. За умовами надійності роботи рейкових кіл довжина блок-ділянки повинна бути не меншою 1,0 км і не більше 3,0 км. Окрім цього, мінімальний міжпоїзний інтервал повинен враховувати обмеження за умовами роботи системи електропостачання [5] і враховувати:

- потужність обладнання тягових підстанцій;
- нагрівання проводів контактної мережі;
- рівень напруги на струмоприймачі електрорухомого складу.

#### Постановка задачі

Для досягнення поставленої мети проведемо дослідження величини втрат електроенергії на прикладі реальної ділянки електрифікованої залізниці за допомогою імітаційного моделювання. Вихідними даними для моделювання задамося наступними:

довжина міжпідстанційної зони – 18 км;

– питомий опір контактної мережі  $r_0 = 0.07$  Ом/км;

переріз контактної підвіски – 412 мм<sup>2</sup>;

<sup>©</sup> Кузнецов В. Г. та ін., 2013

- схема живлення вузлова;
- кількість категорій поїздів 4;
- вага поїздів 1250, 1400, 3000, 5000 т;
- типи електровозів ЧС7, ВЛ8, ДЕ1;

 тягові розрахунки для заданого профілю, вказаної ваги та типів електровозів.

Характеристики обраних категорій поїздів приведені в табл. 1. Тягові розрахунки, які представляють собою залежності струму електровозу та швидкості поїзду з урахуванням існуючих обмежень від координати місцезнаходження поїзда, приведені на рис. 1.

Таблиця 1

Характеристики поїздів різних категорій

N⁰	Характеристика		
категорії	Vozoronia	Вага	Тип
поїзду	категорія	брутто, т	електровозу
1	Пасажирський, швидкий	1250	ЧС-7
2	Вантажний	1400	ВЛ-8
3	Вантажний	3000	ДЭ-1
4	Вантажний	5000	ВЛ-8



різних категорій: 1 – пасажирський 1250 т;
2 – вантажний 1400 т; 3 – вантажний 3000 т;
4 – вантажний 5000 т

Необхідно розглянути можливі способи управління транспортним потоком через регулювання параметрів графіку руху поїздів та оцінити зниження втрат електроенергії в контактній мережі. Для цього авторами розроблена спеціальна програма «Автоматизована система складання енергоефективного графіку руху поїздів «Поток», яка призначена для складання таких графіків руху, що дозволяють досягти рівномірного завантаження тягових підстанцій, зменшення втрат електроенергії в контактній мережі та, в цілому, підвищення ефективності роботи системи тягового електропостачання [10].

Виділимо наступні режими управління транспортним потоком: вирівнювання інтенсивності руху поїздів; впорядковування послідовності відправлення поїздів; регулювання інтервалу попутного слідування; часовий зсув пакету поїздів.

Вирівнювання інтенсивності руху поїздів

Для оцінки впливу нерівномірності руху поїздів на величину втрат електроенергії, розглянемо два випадки пропуску однакової кількості поїздів з різною погодинною інтенсивністю та однаковою. Нехай у першому випадку графік руху поїздів матиме вигляд, зображений на рис. 2, з якого видно, що за першу годину виконано пропуск 10 поїздів, за другу – 7, за третю – 4. Графік руху у другому випадку матиме вигляд, представлений на рис. 3, де інтенсивність руху рівномірна і складає 7 поїздів на годину. Для цих розрахунків приймається, що графік руху складається з однотипних поїздів.



Рис. 2. Графік руху поїздів з різною погодинною інтенсивністю

За допомогою спеціалізованої імітаційної моделі виконані розрахунки показників системи тягового електропостачання та отримані часові залежності втрат електроенергії для виконаних графіків руху. Отримані результати свідчать, що втрати електроенергії в контактній мережі змінюються в межах від 450 до 1340 кВт·год. Інтегральна величина втрат електроенергії на 3-годинному інтервалі складає 2 833,6 кВт·год.

Результати розрахунку рівномірного графіку руху (рис. 3) показують, що втрати електроенергії за кожну годину однакові, за винятком першої, і складають 925,7 кВт-год. Менші значення втрат першої години обумовлені нульовими початковими умовами при виконанні моделювання. Сумарні втрати електроенергії в контактній мережі при пропуску 21-го поїзда ділянкою склали 2 588,1 кВт-год, що на 8,7 % менше попереднього випадку.

<sup>©</sup> Кузнецов В. Г. та ін., 2013



На рис. 4 приведені залежності миттєвих втрат для розглянутих варіантів пропуску поїздів. Максимальні значення втрат потужності складають 2 814,4 і 1 337,2 кВт відповідно для кожного варіанту.



Рис. 4. Миттєві втрати потужності для варіантів графіків руху: 1 – нерівномірний; 2 – рівномірний

Інтегруючи значення миттєвих втрат потужності в часі, отримаємо інтегральну величину втрат електроенергії в контактній мережі (рис. 5), аналіз яких наочно показує зниження втрат у випадку застосування рівномірного графіку руху, а постійний кут нахилу кривої втрат електроенергії вказує на більш рівномірне завантаження системи тягового електропостачання.



Рис. 5. Втрати електроенергії в контактній мережі ділянки: 1 – нерівномірний графік; 2 – рівномірний

В результаті порівняння отриманих значень приходимо до висновку, що одна і та ж кількість поїздів може бути пропущена ділянкою за один і той же час з різними втратами електроенергії, які залежать від параметрів потоку поїздів. Таким чином, при управлінні потоком поїздів необхідно коригувати його показники з метою створення рівномірного завантаження системи тягового електропостачання та зменшення втрат електроенергії в контактній мережі.

© Кузнецов В. Г. та ін., 2013

#### Впорядковування послідовності відправлення поїздів

Для дослідження впливу послідовності відправлення поїздів на втрати електроенергії в контактній мережі розглянемо варіанти пропуску пакету поїздів 4-х обраних категорій з інтервалами 6, 10 і 20 хв.

Як відомо з комбінаторики, загальна кількість перестановок визначається факторіалом кількості об'єктів, тому для нашого випадку  $4! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 = 24$ перестановки. Іншими словами виконати пропуск пакету поїздів 4-х категорій можна виконати 24-ма способами. Для збереження інформації про склад перестановки в різних режимах застосовується поняття лексикографічного порядку. Тобто, перестановці під № 1 відповідає послідовність категорій поїздів 1, 2, 3, 4, перестановці № 2 – 1, 2, 4, 3, перестановці № 3 – 1, 3, 2, 4, і так далі, і для № 24 – 4, 3, 2, 1. Дотримуючись такого лексикографічного порядку можна виконати і зворотне перетворення.

Досліджуючи закономірність зміни втрат електроенергії від схеми живлення та варіантів розташування поїздів для значення інтервалу попутного слідування 10 хв., отримані значення втрат, які приведені на рис. 6. Найменше значення втрат електроенергії при дотриманні однакового рівня напруг на шинах суміжних підстанцій приходиться на паралельну схему живлення і складає 184,7 тис. кВт год. При цьому розташування мінімуму втрат при різних схемах живлення не змінюється, а змінюється лише його абсолютне значення.

Для міжпоїзних інтервалів 6 і 20 хв. варіанти розташування поїздів, які відповідають мінімуму втрат електроенергії змінюються незначно. Так, наприклад, для інтервалу 6 хв., мінімум приходиться на розстановку № 1 – 246,1 тис. кВт год, для інтервалу 20 хв. – на № 3 – 246,3 тис. кВт год.

На рис. 7 представлені втрати електроенергії для різних значень міжпоїзних інтервалів при застосуванні вузлової схеми живлення.

За результатами розрахунків видно, що мінімум втрат потужності припадає на розташування категорій поїздів № 3. Крім того, спостерігається що при зменшенні інтервалу попутного слідування, за інших рівних умов, втрати електроенергії в контактній мережі зростають. В ідеальному випадку найнижчий рівень втрат потужності в контактній мережі буде при міжпоїзному інтервалі, який дорівнює часу ходу поїзда міжпідстанційною зоною, тобто коли на міжпідстанційній зоні знаходиться лише один поїзд. Проте в реальних умовах експлуатації цей критерій сильно обмежить пропускну спроможність ділянки і значно перевищить сумарний час пропуску необхідної кількості поїздів.






Окремо виконувались дослідження величини власного споживання електроенергії на тягу поїздів. Аналізуючи отримані результати підтверджено відомий факт, що витрата електроенергії безпосередньо електровозами не залежить від схеми живлення контактної мережі. Таке явище є недоліком застосування імітаційного моделювання із припущенням, що режим напруги не впливає на тягово-енергетичні характеристики рухомого складу і не враховується взаємний вплив потужних тягових навантажень, які пов'язані між собою через систему тягового електропостачання.

Незважаючи на вказані припущення, отримані досить цікаві закономірності. Зокрема, встановлено, що варіант розташування категорій поїздів з мінімальними втратами електроенергії не завжди співпадає з варіантом, який забезпечує мінімальні втрати електроенергії. Проаналізуємо детальніше закономірності зміни витрат електроенергії відносно трьох інтервалів попутного слідування 6, 10 і 20 хв. на прикладі двосторонньої схеми живлення.

У випадку пропуску пакету поїздів з мінімально можливим інтервалом 6 хв., картина розподілу витрат електроенергії за номером розстановки має явний розрив мінімальних значень відносно інших (рис. 8).

Найменшу витрату електроенергії мають перші 6 розстановок, які в порядку зростання першої, розташовуються наступним чином: 3, 9, 15, 7, 1 и 13. Максимальний розкид значень серед цих розстановок складає менше 1 % і приймається у якості шуканої множини рішень. Загальною закономірністю вказаних розстановок є слідування останнім поїзду найбільшої ваги, оскільки в інших випадках швидкість більш швидких поїздів буде обмежуватись важковаговим складом, що призведе до збільшення часу пропуску пакету та відповідно витрати електроенергії.

У випадку середнього інтервалу руху 10 хв., картина розподілу витрат електроенергії виглядає більш розмазаною і не має явних розривів максимальних і мінімальних значень (рис. 8). Найкращими з точки зору витрати електроенергії у даному випадку можна виділити 3 розстановки: 11, 20 і 5. Вони характеризуються послідовним чергуванням ваги поїздів, а саме легкий – важкий – легкий – важкий або важкий – легкий – важкий – легкий. При цьому, найбільш важковаговий склад має слідувати спочатку

<sup>©</sup> Кузнецов В. Г. та ін., 2013

першим або другим. Більш високі значення витрат електроенергії мають розстановки, у яких співпадають категорії, тобто легкий – легкий або важкий – важкий. Максимум витрат електроенергії припадає на комбінації різнотипних поїздів за вагою, в яких важковаговий поїзд слідує останнім.

Картина розподілу витрати електроенергії у випадку максимального інтервалу при пакетному пропуску поїздів має вигляд, протилежний випадку з мінімальним інтервалом (рис. 8). Що характерно тепер ті розстановки, в яких за мінімального інтервалу спостерігались низькі значення витрати електроенергії, відповідають найбільш високим значенням витрати. Пояснюється це тим, що більш швидкому поїзду достатньо міжпоїзного інтервалу, щоб не обмежувати свою швидкість через наявність попереду більш повільного. Саме в цьому випадку для досягнення мінімуму витрат електроенергії необхідно відправляти поїзди в порядку зменшення ваги, розстановка № 24 і є тому підтвердженням.



Рис. 8. Витрати електроенергії при пропуску пакету різнотипних поїздів з різними інтервалами

#### Регулювання інтервалу попутного слідування

В приведених раніше дослідженнях міжпоїзний інтервал у пакеті поїздів приймався постійним. Виконаємо дослідження впливу зміни міжпоїзного інтервалу для поїздів у пакеті за інших рівних умов. У якості обмеження задамо фіксований час пропуску заданої кількості поїздів ділянкою. За відсутності такого обмеження оптимізація міжпоїзних інтервалів призводить до їх збільшення до величини часу ходу кожного поїзда ділянкою, і, як наслідок, до незрівнянних варіантів.

Розглянемо варіанти пропуску 3-х типів поїздів вагою 1400, 3000 і 5000 т у парному і непарному напрямках. В якості схеми живлення приймемо вузлову. Розглянемо по-черзі кожен з режимів оптимізації, вважаючи інші параметри незмінними.

В режимі пошуку послідовності відправлення поїздів кількість варіантів визначається факторіалом і в даній задачі дорівнює 6. Результати розрахунків для однієї колії при рівних умовах на іншій колії з інтервалом 10 хв. приведені в табл. 2.

© Кузнецов В. Г. та ін., 2013

Як видно з табл. 2, оптимальним буде послідовність відправлення 3, 1, 5 непарною колією і 6, 2, 4 парною. Прийнята нумерація поїздів відповідає розподілу їх ваги у порядку збільшення.

Визначимо оптимальні інтервали між кожним поїздом у пакеті парної і непарної колії з обмеженням сумарного часу пропуску пакету. Формалізуємо задачу, уводячи позначення на графіку руху поїздів в загальному виді (рис. 9).

Таблиця 2

D	•••	•	• • • •	•
RTNOTH D	LOUTOLTUIN	MONONN	TRAIN THURSE	THATTAN
DIDAIN D	коптактии	MCDCAI	ΔΟυκυμιάσυι	діліяпки
L		- <b>I</b>	<b>F1</b>	

№ п/п	Послідовність відправлення поїздів, 1-а колія	Втрати, тис. кВт·год	Послідовність відправлення поїздів, 2-а колія	Втрати, тис. кВт·год
1	135	538.3	246	443
2	153	647.9	264	441.2
3	315	522.5	426	447.8
4	351	608.5	462	458.5
5	513	712.4	624	437
6	531	749.5	642	445.9



Рис. 9. Розрахункова схема параметрів руху поїздів

3 рис. 9 видно, що час пропуску пакету поїздів *T* в загальному виді визначається виразом

$$T = \Delta t_1 + J_1 + J_2 + (t_4 - t_3), \qquad (1)$$

де  $\Delta t_1$  – затримка часу відправлення першого поїзду в пакеті, хв;

J<sub>1</sub>, J<sub>2</sub> – міжпоїзні інтервали, хв;

 $(t_4 - t_3)$  – час ходу останнього поїзду в пакеті. хв.

Таким чином, враховуючи прийняте обмеження, отримаємо рівняння, яке визначає незалежні параметри графіку руху

$$\Delta t_1 + J_1 + J_2 = T - (t_4 - t_3) = const.$$
 (2)

В загальному випадку рівняння (2) має нескінченну множину рішень, якщо обмежити область рішень цілими числами, матимемо діафантове рівняння з кількістю змінних, що дорівнює кількості поїздів у пакеті, тобто в нашому випадку – 3.

Достатньо швидко рівняння (2) можна вирішити, реалізуючи перебір можливих значень за допомогою трьох вкладених циклів. Проте для більшої універсальності, тобто для будь-якої кількості поїздів, необхідно застосувати рекурсивній підхід з глибиною рекурсії, що дорівнює кількості змінних у рівнянні.

Приймаючи обмеження часу пропуску пакету рівне 1 год і вважаючи мінімальний інтервал руху 6 хв, для розрахункової ділянки матимемо 276 комбінацій, що задовольняють рівняння (2), для кожного з яких виконаємо моделювання та визначимо втрати електроенергії в контактній мережі.

З рис. 10 видно, що мінімальне значення втрат електроенергії відповідає порядковому номеру 240, набір параметрів непарного пакету якого виглядає наступним чином: 10; 12; 12. Для парного пакету, використовуючи аналогічний підхід, отриманий набір параметрів 0; 24; 10. Результати розрахунку можуть бути також інтерпретовані у вигляді ліній рівня тривимірної функції, який приведено на рис. 11 для парного пакету.







для параметрів графіків руху парного пакету

З рис. 11 наочно видно, що мінімум приходиться при нульовому часовому зсуві і першому інтервалі  $J_1 = 24$  хв. Другий інтервал визначається з рівняння (2) шляхом віднімання від обмеження T необхідних доданків, і в результаті, отримуємо  $J_2 = 10$  хв.

Отримані параметри графіку руху означають, що для досягнення мінімуму втрат електроенергії перший поїзд непарного пакету необхідно відправити із затримкою 10 хв, далі через кожні 12 хв відправляти наступні поїзди. Для парного пакету перший поїзд треба відправити одразу, а наступні через 24 і 10 хв відповідно.

#### Часовий зсув пакету поїздів

Приведені результати оптимізації графіку руху неявно враховують часовий зсув парного і непарного пакетів, при цьому дотримується прийняте обмеження часу пропуску. Призначення часового зсуву полягає у знаходженні можливого мінімуму втрати при подальших часових зсувах без обмеження часу пропуску.

Отримані результати (рис. 12) показують, що при часовому зсуві непарного пакету можливо ще знизити втрати електроенергії, при цьому час пропуску збільшиться лише на 2 хв і складе 1 год 02 хв.

<sup>©</sup> Кузнецов В. Г. та ін., 2013



Рис. 12. Втрати електроенергії при часовому зсуві пакетів поїздів: 1– непарного; 2 – парного

Для подальших часових зсувів до 10-12 хв парного і непарного пакетів спостерігається збільшення втрат електроенергії. Істотного зниження втрат можна також досягти при порівняно більших часових зсувах, що відповідно збільшить і час пропуску пакету поїздів ділянкою.

В результаті енергоефективний графік з точки зору мінімуму втрат електроенергії в тяговій мережі, що враховує впорядкування відправлення різнотипних категорій поїздів, оптимальні інтервали слідування та часовий зсув парного і непарного пакетів матиме вигляд, представлений на рис. 13.



Рис. 13. Енергоефективний графік руху поїздів

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Доманская, Г. А. Энергосберегающие технологии тягового электроснабжения железных дорог с учетом режимов работы питающих их энергосистем: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.22.09 / Г. А. Доманская. – Д., 2007. – 25 с.

2. Землянов, В. Б. Энергооптимальные технологии анализа и регулирования электропотребления на тягу поездов: автореф. дис....канд. техн. наук: 05.22.09 / В. Б. Землянов. – Д., 2000. – 23 с.

3. Кузнецов, В. Г. Исследование факторов, определяющих величину потерь мощности в тяговой сети / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Вісник Національного технічного університету «X∏I» – 2012. – № 18. – C. 62-67.

4. Митрофанов, А. Н. Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов / А. Н. Митрофанов; Самарская гос. акад. путей сообщения. - Самара. - 2005, -168 с.

5. Эксплуатационные требования к параметрам устройств энергоснабжения железных дорог, элек-

2. Zemlyanov V. B. Energooptimal'nye tekhnologii analiza i regulirovaniya elektropotrebleniya na tyagu poezdov. Authoref. Kand, Diss. [Energy optimal technology analysis and regulation of electricity for traction. Authoref. Cand. Sci. Diss.] Dnipropetrovsk, 2000. 23 p.

3. Kuznetsov V. G., Kalashnikov K. A. Issledovanie faktorov, opredelyayushchikh velichinu poter' moshchnosti v tyagovoy seti [Study of the factors determining the magnitude of the power loss in traction network]. Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI» [Bulletin of National Technical University "KhPI"], 2012, no.18, pp. 62-67.

4. Mitrofanov A. N. Modelirovanie protsessov

© Кузнецов В. Г. та ін., 2013

Висновки

1. Для електрифікованих залізниць України характерна нерівномірність руху поїздів, при чому фактичні розміри не завжди перевищують наявних пропускних спроможностей ділянок. Графіки руху поїздів мають резерв вільного часу, який надає можливість виконувати регулювання міжпоїзного інтервалу в певних межах.

2. При вирішенні задачі оптимізації графіків руху поїздів слід дотримуватись обмежень інтервалу попутного слідування. Мінімальний інтервал повинен враховувати обмеження за умовами безпеки руху та умов роботи систем тягового електропостачання. Також слід обмежувати сумарний час пропуску пакету поїздів за умовами техніко-економічних міркувань.

3. Зменшити експлуатаційні витрати залізниць можна шляхом економії витрат електроенергії на тягу поїздів та зниження втрат електроенергії в контактній мережі. Для зменшення втрат електроенергії в залежності від умов експлуатації та резервів у графіках руху доцільно застосовувати вирівнювання інтенсивності руху поїздів, впорядковування послідовності відправлення поїздів, регулювання інтервалу попутного слідування та часовий зсув пакету поїздів.

4. Кількісно величина зміни втрат електроенергії в залежності від послідовності відправлення поїздів складає 20..23 %, від регулювання інтервалів між поїздами 23..27 %. Таким чином, оптимізація режимів системи тягового електропостачання за рахунок складання енергоефективних графіків руху дозволить зменшити втрати електроенергії на 2-3 % від загальної витрати електроенергії на тягу поїздів.

#### REFERENCES

1. Domanskaya G. A. Energosberegayushchie tekhnologii tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznykh dorog s uchetom rezhimov raboty pitayushchikh ikh energosistemReference. Authoref. Kand, Diss. [Traction power energy saving technologies railways considering modes of feeding their power systems. Authoref. Cand. Sci. Diss.]. Dnipropetrovsk, 2007. 25 p.

трифицированных на постоянном токе [Текст]: сб. науч. тр. / ВНИИЖТ – Москва: Трансжелдориздат, 1959. – 234 с.

6. Гульден, Я. Перечислительная комбинаторика / Я. Гульден, Д. Джексон. – М.: Наука, 1990. – 504 с.

7. Кузнецов, В. Г. Оптимизация потерь электроэнергии в контактной сети железнодорожного транспорта / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Праці інституту електродинаміки. – 2012. – № 33. – С.18-21.

8. Кузнецов, В. Г. Уменьшение потерь электроэнергии в контактной сети за счёт регулирования графика движения поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Технічна електродинаміка. Темат. випуск: силова електроніка та енергоефективність. Ч.3.-2012.-С.107-110.

9. Логвінова, Н. О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н. О. Логвінова, Д. О. Босий, О. М. Полях // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – № 42. – С. 110-113.

10. Комп'ютерна програма «Автоматизована система складання енергоефективного графіку руху поїздів «Поток»: А.с. 48202. Україна / Калашников К.О., Кузнецов В.Г., Босий Д.О. Зареєстровано 05.03.2013 р. К.: ДСІВУ, 2013.

Надійшла до друку 30.09.2013.

prognozirovaniya i upravleniya elektropotrebleniem tyagi poezdov [Modeling processes forecasting and energy management traction trains]. Samara, 2005. 168 p.

5. Ekspluatatsionnye trebovaniya k parametram ustroystv energosnabzheniya zheleznykh dorog, elektrifitsirovannykh na postoyannom toke [Performance requirements for device parameters supply railways, electrified DC]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1959. 234 p.

6. Gul'den Ya., Dzhekson D. *Perechislitel'naya kombinatorika* [Enumerative combinatorics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 504 p.

7. Kuznetsov V. G., Kalashnikov K. A., Bosiy D. A. Optimizatsiya poter' elektroenergii v kontaktnoy seti zheleznodorozhnogo transporta [Optimization of energy losses in catenary of rail transport]. *Pratsi institutu elektrodinamiki* [Proceedings of the Institute of Electrodynamics], 2012, no.33, pp.18-21.

8. Kuznetsov V. G., Kalashnikov K. A., Bosiy D. A. Umen'shenie poter' elektroenergii v kontaktnoy seti za schet regulirovaniya grafika dvizheniya poezdov [Reduction of electricity losses in the contact system by adjusting train schedule]. *Tekhnichna elektrodinamika. Temat. vipusk: silova elektronika ta energoefektivnist'. Chast 3* [Technical electrodynamics. Theme Issue: power electronics and energy efficiency. Part 3], 2012, pp. 107-110.

9. Logvinova N. O., Bosiy D. A., Polyakh A. N. Zmenshennya ekspluatatsiynikh vitrat za dopomogoyu energooptimal'nogo rukhu poïzdiv [Reduce operating costs by using energy optymal trains]. *Visnik Dnipropetrovs'kogo nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named. acad. V. Lazaryan], 2012, no.42, pp. 110-113.

10. Kalashnikov K. A., Kuznetsov V. G., Bosiy D. A. *Komp'yuterna programa «Avtomatizovana sistema skladannya energoefektivnogo grafiku rukhu poyizdiv «Potok»* [Computer program "Automated system for folding energy efficient train schedule "Flow"]. Patent, no. 48202, 2013.

#### Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

Зовнішній рецензент Панасенко М. В.

Режим роботи систем тягового електропостачання обумовлюється характером зміни навантажень від електрорухомого складу. В процесі руху поїздів змінюється їх взаємне розташування, струм і швидкість кожного окремого поїзду, оскільки поїзд в кожен момент часу знаходиться на різному елементі поздовжнього профілю, який створює свій вплив на основний опір руху. Все це викликає зміну навантажень тягових підстанцій і впливає на величину втрат електроенергії в контактній мережі.

Метою роботи є дослідження впливу параметрів графіку руху поїздів, який визначає навантаження системи тягового електропостачання, на втрати електроенергії в контактній мережі.

В статті розглядається питання можливості зниження витрат електроенергії на тягу поїздів та зниження втрат електроенергії в контактній мережі електрифікованих залізниць шляхом управління графіком руху поїздів. Вказано що існуючі розміри руху мають резерв для постановки та вирішення задачі оптимізації параметрів графіку руху. Виконано розрахунки на прикладі реальної ділянки, які показують можливу величину економії електричної енергії. Досліджено вплив вирівнювання інтенсивності руху поїздів, впорядкування послідовності відправлення поїздів, регулювання інтервалу попутного слідування та часового зсуву пакету поїздів на втрати електричної енергії в контактній мережі.

**Ключові слова:** електроенергія, втрати, контактна мережа, графік руху, міжпоїзний інтервал, оптимізація, моделювання.

#### УДК 621.331.3

## В. Г. КУЗНЕЦОВ, Д. А. БОСЫЙ, К. А. КАЛАШНИКОВ (ДНУЖТ)

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

## УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМ ПОТОКОМ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Режим работы систем тягового электроснабжения обусловлен характером изменения нагрузок от электроподвижного состава. В процессе движения поездов изменяется из взаимное расположение, токи и скорости каждого отдельного поезда, поскольку поезд в каждый момент времени находится на разном элементе продольного профиля, который создает свое влияние на основное сопротивление движению.

Целью данной работы является исследование влияния параметров графика движения поездов, который определяет основную нагрузку системы тягового электроснабжения, на потери электроэнергии в контактной сети.

В статье рассматривается вопрос возможности снижения расхода электроэнергии на тягу поездов и снижения потерь электроэнергии в контактной сети электрифицированных железных дорог путем управления графиком движения поездов. Отмечается, что существующие размеры движения имеют резерв для постановки и решения задачи оптимизации параметров графиков движения. Выполнены расчеты на примере реального участка, которые показывают возможную величину экономии электрической энергии. Исследовано влияние выравнивания интенсивности движения поездов, упорядочивания последовательности отправления поездов, регулирования интервала попутного следования и временного сдвига пакета поездов на потери электроэнергии в контактной сети.

**Ключевые слова:** электроэнергия, потери, контактная сеть, график движения, межпоездной интервал, оптимизация, моделирование.

Внутренний рецензент Сыченко В. Г.

Внешний рецензент Панасенко Н. В.

#### UDC 621.331.3

#### V. G. KUZNETSOV, D. O. BOSIY, K. O. KALASHNIKOV (DNURT)

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

## TRAFFIC MANAGEMENT TO REDUCE OPERATING COSTS OF ELECTRIFIED RAILWAYS

Mode of operation systems due to the nature of the traction power supply load changes from electric rolling. During the movement of the trains varies the positional relationship currents and speed of each train as the train at each time is at a different longitudinal profile element, which produces its effect on the motion of the main resistance.

The aim of this work is to study the influence of parameters of train schedule, which defines the main load of the traction power supply, on loss of electricity in the contact network.

The article describes a possibility of power consumption and power losses decreasing in contact lines of electrified railways by controlling of time train schedule. Existing railway traffic has a reserve for further time train schedule optimization. The results that were obtained by real railway sector calculation shows electric power economy potential. The influence of traffic intensity aligning, interval regulating and time shifting in train schedule on power losses in contact lines are researched.

Keywords: electric power, losses, contact line, train schedule, interval, optimization, simulating.

Internal reviewer Sychenko V. G.

External reviewer Panasenko N. V.

© Кузнецов В. Г. та ін., 2013

#### УДК 621.315.65(08)

#### А. Г. ГАЛКИН, Т. А. НЕСЕНЮК (УРГУПС)

Уральский государственный университет путей сообщения, 620034, Россия, Екатеринбург, ул. Колмогорова 66, тел.: +7 (343) 221-25-27, эл. почта: <u>AGalkin@usurt.ru</u>, <u>TNesenuk@mail.ru</u>

## КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ИЗОЛЯТОРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

#### Введение

Информационный поиск и анализ отечественной и зарубежной технической литературы показал, что ни в РФ, ни в СНГ, ни за рубежом проблема оперативной диагностики состояния распределительных электросетей в настоящее время не решена [1]. Электрические сети питают тяговые и нетяговые потребители. К тяговым потребителям относится электрический транспорт, имеющий свою инфраструктуру, обеспечивающую бесперебойное питание контактной сети, линий СЦБ, продольного электроснабжения, освещения, автоматики телемеханики, релейной защиты. Разнообразие видов и характеров повреждений пока не позволило найти какой-либо универсальный метод диагностики изоляции, что затрудняет обнаружение дефекта, увеличивает время поиска и приводит к экономическим потерям [2].

Процессы, протекающие в изоляции под воздействием различных эксплуатационных факторов, приводят к ее разрушению и ухудшают свойства изоляции. Контроль изоляции определяется испытанием, оценкой состояния изоляции и принятием решения о дальнейшей его эксплуатации.

Диагностику изоляторов необходимо осуществлять приборами, обладающими достаточной чувствительностью в жестких условиях эксплуатации с учетом расположения изолирующих конструкций. В большинстве энергосистем (80%) осмотры изоляторов проводятся с поверхности земли в дневное время суток с помощью оптических приборов. Биноклями, используемые бригадами обслуживающими воздушные линии электропередачи при осмотрах, можно наблюдать только существенные внешние повреждения, а не полную и объективную информацию о состоянии изоляторов.

#### Классификация методов контроля изоляции

В настоящее время существуют различные методы контроля изоляции. Авторы попытались классифицировать методы контроля на контактные и бесконтактные, электрические и неэлектрические, звуковые и визуальные, а так же комбинированные, схематическое изображение представлено на рис. 1. Контактные методы, в основном, применяют при отключении напряжения на участке ЛЭП, где испытывают изоляторы. Такие методы сопровождаются снятием изоляторов с опор, что создает опасность связанную с подъемом рабочего персонала на опоры ВЛ и вероятность попадания персонала под напряжение. Тогда, как бесконтактные методы могут применяться без отключения напряжения в ЛЭП.

Возникновение или увеличение интенсивности короны или поверхностных частичных разрядов можно использовать для косвенной оценки изолирующей способности и обнаружения дефектов электронно-оптическим дефектоскопом (ночного видения Филин, Коршун, СогопаScope, и дневного DayCor II<sup>TM</sup>). Особенностью применения является регулирование чувствительности с учетом помехоустойчивости и пространственной разрешающей способности. По длительности оптического излучения определяется величина амплитуды тока утечки: ln  $I = 0, 1 + 0, 34 T_{\Pi \Psi P}$  (при I > 2 мА), где  $T_{\Pi \Psi P}$  измеренная длительность излучения ПЧР в миллисекундах (0,1...9,9 мс) [3].

Изображения записывают, оцифровывают и определяют интенсивности излучения ПЧР в двух участках спектра количественно. Степень загрязнения поверхности определяют из отношения [3]:

$$\chi = 20, 8 \cdot \left[ \left( \frac{2 \cdot I_{\rm KP}}{I_{\rm KP} + I_{\rm CMH}} \right) - 1 \right]$$
(1)

где  $I_{\rm KP}$  и  $I_{\rm CUH}$  – интенсивность излучения разрядов в красной и синей областях спектра, соответственно. После чего осуществляется выявление дефектов изоляторов и мест перекрытия.

Для работы с переносными приборами изучается информация о местности контролируемого участка и плане размещения контролируемой изоляции, планируется схема маршрута передвижения, анализируются данные показаний приборов подстанции, фиксирующих перекрытия, учитывается время суток (желательно темное время суток и повышенная влажность при положительной температуре).

© Галкин А. Г., Несенюк Т. А., 2013



\* - не требующие отключения напряжения во время испытаний

При приближении грозы запрещено применение контролирующими приборами, так же как приближение к токоведущим частям, ближе, чем на расстояние, указанное в РД 153-34.0-03.150-00. Необходимость учета всех параметров с учетом времени суток, влажности и климата, обучение персонала навыкам оператора и значительные затраты времени на поиск неисправности характеризует недостатки данного метода.

На практике в качестве диагностического прибора контроля изоляции используют тепловизор, обнаруживающий неисправность благодаря нагреванию наблюдаемой конструкций током. Применение в электроэнергетие инфракрасного аппарата позволяет косвенным способом выявлять неисправности [4]. Автор считает, что трудности диагностики возникают

© Галкин А. Г., Несенюк Т. А., 2013

начиная со сложности сопоставления температур всех элементов электроустановки, не допуская перекрытия изображения токопроводящими элементами, продолжаются при рассмотрении исследуемых объектов с разных углов на достаточно близком расстоянии, при этом тепловизор не учитывает многие физические эффекты, возникающие при излучении, поглощении и отражении инфракрасного (теплового) излучения. А программное обеспечение тепловизора не учитывает многие факторы из-за отсутствия соответствующих установочных параметров, значения которых могли бы задаваться до съемки.

Оценка надежности изоляции по результатам испытания бывает недостоверной на различных уровнях напряжений. Примером может служить решение Всероссийского семинара по сравнению различных методов контроля состояния изоляторов [5]. На семинаре отмечено, что проблемы совершенствования системы диагностирования изоляторов остаются актуальными. Рекомендовалось разработчикам и изготовителям аппаратуры для контроля изоляторов доработать существующие методики с целью повышения достоверности оценки состояния изоляторов.

#### Решение по контролю изоляторов

Авторами предлагается для диагностики использовать «Устройство для определения дефектов в изоляторах» [6] благодаря возникающему току замыкания на землю – току поверхностного или полного пробоя. Ток, направленный через сигнальное устройство, вызывает срабатывание последнего. Для улавливания тока пробоя не изменяя изоляционное тело изолятора авторы предлагают изменить конструкцию крепежного узла. Особенность «устройства» заключается в том, что крепежный элемент выполняют выступающим за пределы изолятора в месте крепления к заземленной конструкции, наносят на поверхность крепёжного элемента равномерную по толщине пленку из токопроводящего материала, на выступающей части крепежного элемента к пленке жестко прикрепляют металлический проводник, другой конец которого через сигнальное устройство соединяют с заземлённой конструкцией [6].

Проводимые в лаборатории «Теоретических основ электротехники» УрГУПС эксперименты подтвердили верность конструктивного исполнения устройства. При проведении опыта [7] распределения тока утечки по загрязненной поверхности, всю поверхность изолятора увлажнили соляным раствором и добились устойчивого прохождения тока. В результате ток протекал по влажной соляной поверхности изолятора на токопроводящую пленку, к которой был подключен тонкий медный провод. Ток попадал на «устройство», что можно было наблюдать на термограмме (рис. 3, а). В качестве сигнального устройства был использован предохранитель, плавкая вставка которого перегорела после прохождения через него тока утечки.

Следующий опыт проводился для того, чтобы убедиться в работе механизма устройства при пробое изолятора. На представленном рис. 3, б., составленным путем наложения фото и термограмм, можно увидеть путь прохождения пробивного тока. В качестве сигнального устройства применили медную проволоку, которая расплавилась под действием пропускаемого тока. Данный опыт позволил доказать возможность применения испытываемого устройства для выявления неисправного (пробитого) изолятора при внутренних повреждениях.



Рис. 2. Устройство для определения дефектов в изоляторах: 1 – изолятор; 2 – крепежный элемент; 3 – пленка; 4 – закрепленный через траверсу или напрямую штырь или крюк; 5 – сигнальное устройство; 6 – заземленная конструкция; 7 – опора; 8 – ЛЭП; 9 – выступающая часть крепежного элемента

Следующий опыт проводился для того, чтобы убедиться в работе механизма устройства при пробое изолятора. На представленном рис. 3, б., составленным путем наложения фото и термограмм, можно увидеть путь прохождения пробивного тока. В качестве сигнального устройства применили медную проволоку, которая расплавилась под действием пропускаемого тока. Данный опыт позволил доказать возможность применения испытываемого устройства для выявления неисправного (пробитого) изолятора при внутренних повреждениях.

Таким образом, при короне, внутренних стримерах, дуговом разряде, искровых перекрытиях линейной изоляции или полном пробое с помощью предлагаемого устройства можно выявить неисправность изоляции в линии электропередачи.

© Галкин А. Г., Несенюк Т. А., 2013



Рис. 3. Термограмма распределение тока пробоя: а) по поверхности изолятора; б) сквозного

#### Опорный изолятор с индикатором неисправности

Проблему опорной изоляции автор предлагает решить, установив индикатор неисправности модернизированным крепежным узлом [8], рис. 4. Изолировав потенциал токопроводящей линии (шины) 4 с одной стороны и заземленной конструкции 3 с другой втулкой и прокладкой из диэлектрического материала, можно соединить.

При пробое корпуса 1 изолятора однофазный ток протекает через металлический крепежный болт 2, изолированный от заземленной несущей конструкции 3 диэлектрической прокладкой 5 и втулкой 6 из диэлектрического материала, затем по проволочному проводнику 8, один конец которого пропущен между металлической шайбой 7 крепежного узла и дополнительной токопроводящей шайбой 12, установленными у головки болта 2, ток попадает на заземленную несущую конструкцию 3, к которой прикреплен другой конец проволочного проводника 8. На металлическом проволочном проводнике 8 размещен индикатор неисправности 9, срабатывающий при прохождении однофазного тока. Индикатор неисправности может иметь различную форму и различные методы срабатывания.





Рис. 4. Схема опорного изолятора с индикатором неисправности

Например, покрытие термокраской поверхности индикатора позволит визуально обнаруживать прохождение тока замыкания на землю за счет изменения цвета термокраски от силы тока. На краску не оказывают влияния магнитные и электрические поля.

Стальная проволока, сечение которой выбирается величиной тока, за счет нагрева током пробоя расплавляется и обрывается, при этом флажок будет удерживаться одним концом, что и будет сигналом повреждения изолятора.

Применение RFID-технологий. Можно применять RFID-технологии, модернизируя пассивную метку и считывателем обнаруживать прохождение тока замыкания на землю за счет перегорания микросхемы метки, которая не будет откликаться на высокочастотный сигнал, подаваемый считывателем [9].

В лабораториях УрГУПС проводились эксперименты по определению тока пробоя пассивных RFID-меток M3 (рис. 5, поз. 1), длины распространения сигнала от угла расположения, материала на который крепится метка, о влияниях на прием и передачу высокочастотных сигналов различных разрядов (рис. 5, поз. 2).

<sup>©</sup> Галкин А. Г., Несенюк Т. А., 2013



 Рис. 5. Опыты с пассивной RFID-меткой:
 1 – подключение метки в измерительную схему;
 2 – исследование влияния коронного разряда на считывание пассивной RFID метки M3

Результаты испытаний RFID метки M3 позволяют сделать следующие выводы: ток пробоя должен задаваться определенным значением; метка может крепиться на различные материа-

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Несенюк Т. А. Диагностирование изолирующих конструкций // Транспорт Урала.- 2011.- №3 (30). – С. 69-71.

2. Соловьев Э. П. Выбор наружной полимерной изоляции на основе опыта длительной эксплуатации / Э. П. Соловьев, М. К. Ярмаркин // Газета "Энергетика и промышленность России", №12(64), 2005.

3. Методические указания по дистанционному оптическому контролю изоляции воздушных линий электропередачи и распределительных устройств переменного тока напряжением 35 – 1150 кВ. СТО 56947007-29.240.003-2008.

4. Кочуров Е. Л. О технических характеристиках тепловизоров и о проблемах интерпретации результатов тепловизионной съемки оборудования / Е.Л. Кочуров, И.В. Милютин, А. В. Рубиновский [электрон. ресурс], режим доступа:

#### http://enlab.ru/pub/pub16/pub16.html

5. Решение Всероссийского семинара «Сравнение различных методов контроля состояния фарфоровых опорно-стержневых изоляторов на подстанциях 110 кВ. Применение методов диагностирования опорно-стержневой изоляции 35-110 кВ», г. Екатеринбург 25.11.2011.

Заявка на изобретение №2012120948\07(031733)
 Российской Федерации, МКП 8 Н 01В 17/00.

Устройство для определения дефектов в изоляторах. Дата подачи: 22.05.2012.

7. Протокол испытаний «Устройства для определения дефектов в изоляторах», 2012. – 7 лист.

Заявка на изобретение №2013133062\07(049422)
 Российской Федерации, МКП 8 Н 01В 17/14/ Опор-

лы, кроме металлических конструкций от которых она должна быть изолирована; угол поворота метки относительно считывателя влияет на длину считывания; высокочастотные сигналы не оказывают влияния электрические разряды различной конфигурации. Таким образом, использование RFID-технологий возможно для диагностики изоляции воздушных линий электропередачи с учетом особенностей RFIDметок. Объезды на передвижных лабораториях, обходы ЛЭП позволят производить диагностику изоляции с помощью RFID-технологий на ранней стадии развития и при пробое.

#### Выводы

Предложенные способы выявления неисправных изоляторов существенно уменьшат экономические потери, связанные с недоотпуском электрической энергии потребителям, повреждением высоковольтного оборудования, уменьшат время поиска причины аварии и снизят вероятность несчастных случаев.

#### REFERENCES

1. Nesenuyk T. A. *Diagnostirovanie izoliruyushchikh konstruktsiy* [Diagnostics of insulating structures] // Transport Urala [Transport of the Urals]. – 2011. – №3 (30). P. 69-71.

2. Solovyev E. P., Yarmarkin M. K. *Vybor naruzhnoy* polimernoy izolyatsii na osnove opyta dlitelnoy ekspluatatsii [Selection of exterior polymeric insulation based on long-term operation]. Gazeta "Energetika i promyshlennost Rossii" [Newspaper " Power and Industry of Russia"], №12(64), 2005.

3. Metodicheskie ukazaniya po distantsionnomu opticheskomu kontrolyu izolyatsii vozdushnykh liniy elektroperedachi i raspredelitelnykh ustroystv peremennogo toka napryazheniem 35-1150 kV. STO 56947007-29.240.003-2008 [Guidelines for remote optical monitoring of overhead power transmission lines' insulation and distribution devices of alternate current 35 - 1150 kV].

4. Kochurov E.L., I.V. Milyutin, Rubinovskiy A.V. *O* tekhnicheskikh kharakteristikakh teplovizorov i o problemakh interpretatsii rezultatov teplovizionnoy syemki oborudovaniya [On the specification of thermal imaging cameras and interpretation problems of equipment thermalimaging shooting], URL: <u>http://enlab.ru/pub/pub16/pub16.html</u>

5. Sravnenie razlichnykh metodov kontrolya sostoyaniya farforovykh oporno-sterzhnevykh izolyatorov na podstantsiyakh 110 kV. Primenenie metodov diagnostirovaniya oporno-sterzhnevoy izolyatsii 35-110 kV. [Resolution of All-Russian seminar "Comparison of different monitoring methods of porcelain rigid-rod insulators at 110 kV substations. Application of diagnostic methods of 35-110 kV rigid-rod insulation], Ekaterinburg, 25.11.2011

6. Application for an invention No.2012120948\07

© Галкин А. Г., Несенюк Т. А., 2013

ный изолятор с индикатором неисправности, дата подачи: 16.07.2013.

9. Несенюк Т.А. Применение RFID-технологий для поиска неисправной изоляции // Транспорт Урала, 2013. – №2 (37). – С.72-76.

Поступила в печать 16.10.2013.

Ключевые слова: изолятор, методы контроля изолирующих конструкций, устройство для определения дефектов в изоляторах, опорный изолятор с индикатором неисправности, электромеханическое сигнальное устройство, RFID- технологии. (031733) of the Russian Federation, MKP 8 N 01V 17/00. *Ustroystvo dlya opredeleniya defectov v izolatorakh* [A device for detecting faults in isolators] / T.A. Nesenyuk. Filing date 22.05.2012

7. Protokol ispytaniy «Ustroystva dlya opredeleniya defektov v izolyatorakh» [Test record sheet A device for detecting faults in isolators], 2012, 7 p.

8. Application for an invention No. 2013133062\07 (049422) of the Russian Federation, MKP 8 N 01V 17/14/] *Oporny izolyator s indikatorom neispravnosti* [Base insulator with fault indicator], Filing date 16.07.2013.

9. Nesenuyk T. A. *Primenenie RFID-tekhnology dlya poiska neispravnoy izolyatsii* [The use of RFID-technology to detect insulation faults ] //Transport Urala [Transport of the Urals], 2013.- №2 (37). P.72-76.

#### Внутренний рецензент Сыченко В. Г.

Внешний рецензент Васяк И.

В данной работе проведена классификация методов диагностики и контроля изолирующих конструкций, описаны особенности применения бесконтактных методов на примере камер ночного видения и тепловизора. Предложено применение разработанного «Устройства для определения дефектов в изоляторах». В качестве параметра срабатывания предлагается использовать ток пробоя изолятора, выявляющего неисправность диэлектрика с помощью сигнального устройства. Приведены результаты испытаний работоспособности устройства на поверхностный ток и сквозной ток пробоя Проблему диагностики опорной изоляции авторы предлагают разрешить, установив индикатор неисправности с применением механических, термических или радиочастотных способов контроля

#### УДК 621.315.65(08)

## О. Г. ГАЛКІН, Т. А. НЕСЕНЮК (УРГУПС)

Уральський державний університет шляхів сполучення, 620034, Росія, Єкатеринбург, вул. Колмогорова 66, тел.: +7 (343) 221-25-27, ел. пошта: <u>AGalkin@usurt.ru</u>, <u>TNesenuk@mail.ru</u>

## КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ІЗОЛЯТОРІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

У даній роботі проведена класифікація методів діагностики та контролю ізолюючих конструкцій, описані особливості застосування безконтактних методів на прикладі камер нічного бачення і тепловізора. Запропоновано застосування розробленого «Пристрою для визначення дефектів в ізоляторах». В якості параметру спрацьовування пропонується використовувати струм пробою ізолятора, що виявляє несправність діелектрика за допомогою сигнального пристрою. Наведені результати випробувань працездатності пристрою на поверхневий струм і наскрізний струм пробою. Проблему діагностики опорної ізоляції автори пропонують вирішити, встановивши індикатор несправності з застосуванням механічних, термічних або радіочастотних способів контролю

Ключові слова: ізолятор, методи контролю ізолюючих конструкцій, пристрій для визначення дефектів в ізоляторах, опорний ізолятор з індикатором несправності, електромеханічний сигнальний пристрій, RFID-технології.

Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

Зовнішній рецензент Васяк І.

#### UDC 621.315.65(08)

## A. G. GALKIN, T. A. NESENYUK (DNURT)

Ural State University of Railway Transport, 620034, Russia, Ekaterinburg, 66 Kolmogorov Street, tel.: +7 (343) 221-25-27, e-mail: <u>AGalkin@usurt.ru</u>, <u>TNesenuk@mail.ru</u>

## MONITORING AND DIAGNOSTICS OF POWER TRANSMISSION LINES INSULATORS

In this paper the classification of monitoring and diagnostic methods of insulating structures is made, the peculiarities of noncontact methods application by the example of night observation cameras and thermal imaging cameras are described. The use of the developed "Device for detecting faults in insulators" is suggested. Insulator's leakage current that detects dielectric's fault with the help of alarm device is used as operating value. The test results of device operability on surface current and steady leakage current are given. The authors suggest to solve the problem of base insulation diagnostics by setting fault indicators with regard to mechanical, thermal and radio frequency monitoring methods.

**Keywords:** insulator, monitoring of insulating structures, device for detecting faults in insulators, base insulator with fault indicators, electromechanical alarm device, RFID-technology.

Internal reviewer Sychenko V. G.

External reviewer Vasyak I.

© Галкин А. Г., Несенюк Т. А., 2013

#### автоматизація і діагностика / automation and diagnose

#### УДК 621.314.222.6.082.63

#### А. Ф. ГНИДЮК (ДВГУПС)

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева 47, тел. +7 (4212) 40-74-89

## ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

#### Введение

При работе трансформаторов возникают потери энергии, превращающиеся в конечном счете в теплоту. Теплота повышает температуру обмоток, активной стали, контактных соединений, конструктивных деталей и одновременно рассеивается в окружающую среду [1]. Нагревание оборудования ограничивает его мощность и является главной причиной старения изоляции. Проведенный анализ научнотехнической отечественной и зарубежной литературы показал, что работ, непосредственно посвященных мониторингу тепловых полей сложных электротехнических элементов И устройств имеется небольшое количество. Не исследованы процессы распределения тепловых потоков внутри и снаружи устройства, не рассмотрены вопросы определения и идентификации внутренних повреждений трансформаторного и иного электротехнического оборудования. Проведенные ранее исследования создали предпосылки для решения задач идентификации внутренних нарушений, влияющих на тепловой режим работы оборудования, и определения его месторасположения и температуры дефекта. Поэтому теоретическое обобщение процессов теплового распределения с учетом динамического движения масла в трансформаторах и идентификация на этой основе его повреждений (состояния работоспособности) является актуальной научной задачей.

#### Принципы моделирования тепловых режимов работы трансформатора

В настоящее время разработано и аппаратно реализовано множество систем защиты, диагностики и мониторинга состояния высоковольтных силовых трансформаторов. Экономический эффект от их использования обусловлен предупреждением аварийного выхода из строя оборудования и переходом от плановопредупредительных ремонтов к ремонтам по состоянию. При номинальной частоте 50 Гц основную часть паспортных потерь составляют потери Джоуля – Ленца (на активном сопротивлении, близком по своему значению к сопротивлению постоянному току), а также потери на гистерезис и токи Фуко в магнитопроводе. Остальные потери являются добавочными и составляют несколько процентов от основных.

Перспективным является создание систем мониторинга для предупреждения различных повреждений трансформаторного оборудования. Очевидно, что при каждом определенном дефекте будет свое распределение теплового поля, а значит и свои последствия. Идентификация потенциально возможных дефектов с помощью анализа распределение теплового поля – довольно эффективный способ избежать выхода из строя трансформаторного оборудования.

В большинстве случаев для оценки состояния оборудования создаются математические модели, содержащие в себе большое количество расчетов, требующие большое количество времени для расчета каждого отдельного узла единицы оборудования. К тому же, при расчете сложных систем нередки ошибки чисто математического характера.

Создание модели можно условно разбить на 3 стадии. Первая это сбор данных для моделирования, цель этой стадии собрать максимальное количество информации, требующейся для создания модели. Вторая стадия – непосредственно само моделирование, оптимизация алгоритмов и отдельных элементов модели. Тртья стадия это оценка модели, сравнение показателей модели с реальными экспериментами, дынными об эксплуатации оборудования, что является необходимым для условия принятия модели или о ее доработке.

На рис. 1 приведена блок-схема процесса создания модели.



Рис. 1. Блок-схема процесса создания модели

Более перспективным и наглядным является создание интерактивных моделей в различных программных пакетах [2]. Они позволяют создавать модели, близкие к реальным, при этом не требуя глубоких математических знаний.

```
© Гнидюк А. Ф., 2013
```

В данной работе для моделирования используется программный пакет Comsol Multiphysics [3]. Это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных методом конечных элементов. С этим программным пакетом можно расширять стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение (прикладной режим) в мультифизические модели для расчета связанных между собой физических явлений. В основе расчетов пакета Comsol Multiphysics лежит метода конечных элементов [4].

Полную трёхмерную компьютерную модель такой сложной нелинейной термогидравлической системы, как реальный силовой масляный трансформатор, можно определить как общую теплогидравлическую макромодель трансформатора [2]. Она может включать в себя описание геометрии и детальной структуры всех трёх фаз, включающих в себя магнитопровод и рабочие обмотки. Такая модель должна обеспечить получение достоверных основных интегральных характеристик системы тепловыделения, температуры на выделенных поверхностях.

Для упрощения моделирования, на уровне макромодели обмотка представлена эквивалентным сплошным твёрдым телом без отдельного рассмотрения конвекции в межкатушечных горизонтальных каналах и детальной структуры катушек с изоляцией и дистанцирующими прокладками. Задачей макромодели является описание и общий расчёт теплогидравлических процессов всего трансформатора с обязательным учётом всех (основных и дополнительных) тепловыделений, имеющих место в трансформаторе.

С помощью Comsol Multiphysics созданы варианты моделей трансформатора с дефектами и без таковых. Трансформатор представлен в виде прямоугольного бака, заполненного трансформаторным маслом и с располагающимися внутри него обмотками и сердечником. Дополнительно вокруг бака создана область, заполненная воздухом. Дефекты заданы как дополнительные источники теплоты.

Проведенные расчеты распределения теплового поля наглядно показали распределение теплового поля по всей поверхности модели, включая температуры на ребрах и границах. Проведены расчеты для моделей с дефектами в одной из обмоток, в сердечнике, одновременно в разных частях трансформатора. В области, где расположен дефект, температура выше, чем в аналогичной модели нормального режима (без дефектов), следовательно, температура на поверхности так же повышается.

На рис. 2 и 3 представлены примеры полученных моделей с наличием дефекта и без такового.



Рис. 2. Распределение теплового поля в трансформаторе без дефектов.

<sup>©</sup> Гнидюк А. Ф., 2013

#### автоматизація і діагностика / automation and diagnose



Рис. 3. Распределение теплового поля в трансформаторе с дефектом фазы А (левая обмотка).

Таким образом, Comsol Multiphysics позволяет смоделировать и наглядно продемонстрировать распределение температурных полей при заданном режиме работы трансформатора. Создание интерактивной модели может стать очень удобным и перспективным способом диагностики и мониторинга дефектов в различных его частях. Это позволяет прогнозировать и предупреждать развитие различных дефектов и, следовательно, продлевать срок службы оборудования.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исаченко, В.П. Теплопередача : учеб. для вузов / В.П. Исаченко [Текст]. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.

2. Дульнев А.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена : учеб. пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов / А.Н. Дульнев [Текст]. – М. : Высш. шк., 1990. – 207 с

3. Roger W. Pryor Multiphysics modeling using Comsol: a first principles approach. Jones and Bartlett Publishers London W6 7PA United Kingdom, 2011. – 871 p.

 Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд [Текст]. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

Поступила в печать 15.10.2013.

Внутренний рецензент Сыченко В. Г.

#### Выводы

Моделирование тепловых процессов трансформаторного оборудования позволяет устанавливать с высокой долей вероятности наличие неисправностей на начальной стадии развития дефекта, что позволяет уйти от плановых ремонтов, получить экономию от снижения издержек на эксплуатацию и снизить к минимуму убытки от выхода оборудования из строя.

#### REFERENCES

1. Isachenko, V.P. Teploperedacha [The heat transfer]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981. 416 p.

2. Dul'nev A.N. Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploobmena [The use of computers for solving problems of heat transfer]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 207 p.

3. Roger W. Pryor Multiphysics modeling using Comsol: a first principles approach. Jones and Bartlett Publishers London W6 7PA United Kingdom, 2011. 871 p.

4. Segerlind, L. Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of finite element method]. Moscow, Mir Publ., 1979. 392 p.

#### Внешний рецензент Танкевич Е. М.

Рассматриваются принципы моделирования тепловых режимов работы силового трансформатора. Принцип построения модели силового масляного трансформатора представлен как математическая модель сложной нелинейной термогидравлической системы. Модель включает в себя описание геометрии и детальной структуры всех трёх фаз, включающих в себя магнитопровод и рабочие обмотки и обеспечивает получение достоверных основных интегральных характеристик системы тепловыделения, температуры на выделенных поверхностях.

© Гнидюк А. Ф., 2013

Применяя программный пакет Comsol Multiphysics созданы варианты моделей трансформатора с дефектами и без таковых. Трансформатор представлен в виде прямоугольного бака, заполненного трансформаторным маслом и с располагающимися внутри него обмотками и сердечником. Дополнительно вокруг бака создана область, заполненная воздухом. Дефекты заданы как дополнительные источники теплоты. В основе расчетов данного пакета лежит метод конечных элементов.

Моделирование тепловых процессов трансформаторного оборудования позволяет устанавливать с высокой долей вероятности наличие неисправностей на начальной стадии развития дефекта, что позволяет уйти от плановых ремонтов, получить экономию от снижения издержек на эксплуатацию и снизить к минимуму убытки от выхода оборудования из строя.

Ключевые слова: силовой трансформатор, потери энергии, обмотка, сердечник, нагрев, срок эксплуатации, тепловой процесс, поле, повреждение, дефект, идентификация, модель, математическая, теплогидравлическая, интерактивная.

#### УДК 621.314.222.6.082.63

#### А. Ф. ГНИДЮК (ДВГУПС, РФ)

Далекосхідний державний університет шляхів сполучення, 680021, Росія, м. Хабаровськ, вул. Сєришева, 47, тел. +7 (4212) 40-74-89

## ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Розглядаються принципи моделювання теплових режимів роботи силового трансформатора. Принцип побудови моделі силового масляного трансформатора представлений як математична модель складної нелінійної термогідравлічних системи. Модель включає в собі опис геометрії і детальної структури усіх трьох фаз, що включає в себе магнітопровід і робочі обмотки та забезпечує отримання достовірних основних інтегральних характеристик системи тепловиділення, температури на виділених поверхнях.

Застосовуючи програмний пакет Comsol Multiphysics створені варіанти моделей трансформатора з дефектами те без них. Трансформатор представлено у вигляді прямокутного баку, заповненого трансформаторним маслом і з обмотками та осердям, що розташовуються всередині. Додатково навколо бака створена область, заповнена повітрям. Дефекти задані як додаткові джерела теплоти. В основу розрахунку даного пакету покладено метод кінцевих елементів.

Моделювання теплових процесів трансформаторного обладнання дозволяє встановлювати з високою часткою ймовірності наявність несправностей на початковій стадії розвитку дефекту, що дозволяє уникнути планових ремонтів, отримати економію від зниження видатків на експлуатацію та знизити до мінімуму збитки від виходу обладнання з ладу.

**Ключові слова:** силовий трансформатор, втрати енергії, обмотка, осердя, нагрів, термін експлуатації, тепловий процес, поле, пошкодження, дефект, ідентифікація, модель, математична, теплогідравлічна, інтерактивна.

Внутрішній рецензент Сиченко В. Г.

Зовнішній рецензент Танкевич Є. М.

#### UDC 621.314.222.6.082.63

#### A. F. GNIDYUK (FESTU)

Far Eastern State University of Railways, 680021, Russia, Khabarovsk, 47 Serysheva Street, tel. +7 (4212) 40-74-89

## ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Discusses the principles of modeling of thermal modes of the power transformer. The principle of constructing a model of power transformer oil is presented as a mathematical model of a complex nonlinear thermalhydraulic system. The model includes a description of the detailed structure and geometry of all three phases which include a magnetic circuit and winding performance and provides reliable integral main characteristics of heat, the temperature on the selected surfaces.

Using the software package Comsol Multiphysics model variants created transformer defects and those without . A transformer presents a rectangular tank filled with insulating oil and it is positioned within the windings and the core. Additionally created around the tank area filled with air. Defects are defined as additional sources of heat. The calculations of this package is the finite element method

Modeling of thermal processes transformer equipment allows you to set a high probability for faults at an early stage of development of a defect that allows escape from the scheduled repairs , get the savings from reduced operating costs and reduce losses to a minimum of equipment failure .

**Keywords:** power transformer, loss of energy, winding, core, heat, lifetime, thermal process, field, damage, defect, identification, model, mathematical, thermohydraulic, interactive.

Internal reviewer Sychenko V. G.

External reviewer Tankevich E. M.

© Гнидюк А. Ф., 2013

#### УДК 621.316.97

#### В. М. ЛЯШУК, І. В. ДЕМ'ЯНЮК (ДНУЗТ)

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ МІЖВИТКОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ В ОБМОТКАХ ТЯГОВИХ СУХИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

#### Постановка проблеми

В даний час існує обладнання, дозволяюче визначати міжвиткове порушення ізоляції в обмотках сухих трансформаторів постійного струму [1, 2, 3, 4]. Але діагностування передвідмовного стану ізоляції викликає певні труднощі.

#### Аналіз досліджень

Пропонується ще один варіант проведення діагностування, заснований на вимірюванні діелектричних втрат в ізоляції обмоток трансформаторів шляхом подачі вимірювальної напруги звукової частоти. На виміри у великій мірі впливає вологість ізоляції, тому необхідно перед проведенням діагностування виміряти її відомими методами [5].

Попередньо проводиться загальна оцінка стану ізоляції обмотки по методиці вимірювання рівня оберненої напруги [6, 7, 8, 9]. Вимірюється опір ізоляції (при опорі менше 40 МОм подальші виміри не проводяться). Аналіз стану ізоляції проводиться по куту нахилу дотичної до початку кривої зміни рівня оберненої напруги до його величини.

Діагностування проводиться шляхом подачі змінної напруги звукової частоти через конденсатор, ємність якого спільно з індуктивністю обмотки трансформатора, при певній частоті, викликає резонанс напруги. Величина випробувальної напруги на два порядки менше робочої. При порушенні ізоляції (збільшення провідності) обмотки трансформатора резонанс може виникнути на іншій частоті або взагалі не наступити. Схема підключення генератора до обмотки трансформатора наведена на рис. 1.

Існує метод, коли паралельно до обмотки трансформатору підключають певну ємність і на отриманий контур подають прямокутний імпульс. За осцилограмою спостерігають характер загасання власних коливань. Якщо спостерігається 5-6 періодів, значить контур високодобротний, а добротність контуру визначається в першу чергу індуктивністю. Для визначення місця короткого замикання застосовуються індуктивні датчики. За схемою побудови індуктивні датчики можна розділити на одинарні та диференціальні. Одинарний індуктивний датчик містить одну вимірювальну гілку, диференційний - дві.



Рис. 1. Схема підключення генератора до обмотки трансформатора  $L_m$ 

#### Постановка задачі

Дослідити і розробити можливі методи діагностування порушення міжвиткової ізоляції обмоток тягових трансформаторів із застосуванням індуктивних датчиків. Місце порушення стану ізоляції, а саме, визначення місця передбачуваного пробою (руйнування) ізоляції знаходиться за допомогою індуктивного датчика.

#### Основний матеріал

У диференціальному індуктивному датчику при зміні параметра одночасно змінюються індуктивності двох однакових котушок, причому зміна відбувається на одну і ту ж величину, але з протилежним знаком.

Як відомо, індуктивність котушки:

$$L = \frac{W\Phi}{I}.$$
 (1)

Струм пов'язаний з магніторушійною силою співвідношенням:

$$I = \frac{HL}{W},$$
 (2)

звідки отримуємо

© Ляшук В. М., Дем'янюк І. В., 2013

$$L = \frac{W^2}{R_{\rm M}},\tag{3}$$

де  $R_{\rm M} = HL / \Phi$  – магнітний опір індуктивного датчика.



Рис. 2. Використання одинарного індуктивного датчика

Розглянемо систему вимірювання на основі одинарного індуктивного датчика (рис. 2). В основу роботи покладено властивість дроселя з повітряним зазором, а саме, змінювати свою індуктивність при зміні величини повітряного зазору.

Система вимірювань складається з магнітопроводу 1 з обмоткою датчика 2 і обмоткою трансформатора 3. На обмотку 2 через опір навантаження  $R_{\rm H}$  подається напруга живлення змінного струму. Струм в ланцюзі навантаження визначається як

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_{\rm H} + r_{\rm A}) + (\omega L)^2}},$$
 (4)

де  $r_{\pi}$  - активний опір дроселя;

*L* - індуктивність датчика.

Так як активний опір кола величина постійна, то зміна струму може відбуватися тільки за рахунок зміни індуктивної складової  $XL = I \cdot R_{\rm H}$ , яка залежить від величини повітряного зазору  $\delta$ .

Кожному значенню  $\delta$  відповідає певне значення I, що створює падіння напруги на опорі  $R_{\rm H}$ :  $U_{\rm BUX} = I \cdot R_{\rm H}$  - представляє собою вихідний сигнал датчика.

Можна вивести аналітичну залежність  $U_{\text{BUX}} = f(\delta)$ , за умови, що зазор досить малий і потоками розсіяння можна знехтувати, і знехтувати магнітним опором заліза  $R_{\text{M}\text{K}}$  в порівнянні з магнітним опором повітряного зазору  $R_{\text{MB}}$ .

Наведемо кінцевий вираз

$$U_{\rm BHX} = \frac{U_{\rm H}R_{\rm H}}{\sqrt{\left(R_{\rm H} + r_{\rm A}\right)^2 + \left(\frac{0.4 \cdot 10^{-8}\mu_o SW^2\omega}{2\delta}\right)^2}} (5)$$

У реальних пристроях активний опір ланцюга набагато менший індуктивного, тоді вираз зводиться до вигляду

$$U_{\rm BMX} \approx \frac{5 \cdot 10^8 U_{\rm H} R_{\rm H}}{\mu_o S W^2 \omega} \delta \approx K_{\rm H} \delta \,. \tag{6}$$

Залежність  $U_{\text{вих}} = f(\delta)$  має лінійний характер (у першому наближенні) (рис. 3). Реальна характеристика має вигляд (штрих-пунктирна лінія (рис. 3)).



Відхилення від лінійності на початку пояснюється прийнятим допущенням  $R_{\rm MW} << R_{\rm MB}$ .

При малих *а* магнітний опір заліза сумірно з магнітним опором повітря.

Відхилення при великих  $\alpha$  пояснюється тим, що при великих *RL* становиться сумірною з величиною активного опору –  $R_{\rm H} + r_{\pi}$ .

В цілому розглянутий індуктивний датчик має ряд істотних недоліків:

 не змінюється фаза струму при зміні напрямку переміщення;

• при необхідності вимірювати в обох напрямках переміщення потрібно встановлювати початковий повітряний зазор і, отже, струм  $I_0$ , що незручно;

• струм у навантаженні залежить від амплітуди і частоти живлячої напруги;

• в процесі роботи датчика на ярмо діє сила тяжіння до магнітопроводу, яка нічим не урівноважується, і значить вносить похибку в роботу датчика.

#### автоматизація і діагностика / automation and diagnose

Система вимірювань на основі диференціальних індуктивних датчиків (рис. 4) являють собою сукупність двох нереверсивних датчиків і виконуються у вигляді системи, що складається з двох магнітопроводів із загальним ярмом і двома котушками. Для диференціальних індуктивних датчиків необхідні два роздільних джерела живлення, для чого зазвичай використовується роздільний трансформатор 5.



Рис. 4. Диференціальний індуктивний датчик

Диференційно-індуктивні датчики складаються з листів електротехнічної сталі з магнітопроводом Ш-подібної форми (на частотах вище 1000 Гц застосовуються залізонікелеві сплави - пермалой) і циліндричні, з суцільним магнітопроводом круглого перетину.

Вибір форми датчика залежить від конструктивного поєднання його з контрольованим пристроєм.

Для живлення диференційно-індуктивного датчика використовують трансформатор 5 із виведенням середньої точки на вторинній обмотці. Між ним і загальним кінцем обох котушок включається прилад 4. Повітряний зазор 0,2-0,5 мм.

При середньому положенні ярма, коли повітряні зазори однакові, індуктивні опори котушок 3 і 3' однакові, отже величини струмів в котушках дорівнюють I1 = I2 і результуючий струм в приладі дорівнює 0.

При невеликому відхиленні ярма датчика в ту або іншу сторону під дією контрольованої величини X змінюються величини зазорів і індуктивностей, прилад реєструє різницевий струм  $I_1 - I_2$ , він є функцією зміщення ярма, яким, в даному випадку являється магнітопровід трансформатора, від середнього положення (постійна складова). Різниця струмів реєструється за допомогою магнітоелектричного приладу 4 (мікроамперметра) з випрямною схемою В.

Характеристика індуктивного датчика має вигляд (рис. 5).



Рис. 5. Характеристика індуктивного датчика ов

Полярність вихідного струму залишається незмінною незалежно від знака зміни повного опору котушок. При зміні напрямку відхилення ярма від середнього положення міняється на протилежний (на 180 °) фаза струму на виході датчика. При використанні фазочутливих випрямних схем можна отримати індикацію напрямку переміщення ярма від середнього положення. Характеристика диференціального індуктивного датчика з фільтром верхніх частот (ФВЧ) має вигляд (рис. 6).



Рис. 6. Характеристика диференціального індуктивного датчика з ФВЧ

Інформативна здатність індуктивного датчика в значній мірі визначається його похибкою перетворення вимірюваного параметра в обмотці ярма  $L_{\rm s}$ .

Для локалізації місця, де ізоляція має суттєві відхилення діагностичних параметрів, вимірювальну напругу подають на обмотку ярма за певним алгоритмом. Інформацію одержують за допомогою індуктивного датчика рівня електромагнітного поля, який переміщається по окружності в безпосередній близькості від ярма (відстань обмежена товщиною діелектричної прокладки між датчиком і корпусом ярма).

Щоб рівень випробувальної напруги не чинив вплив на проведення вимірювань, використовується мостова схема.

#### Висновки

Таким чином, для визначення степені порушення ізоляції секцій обмоток по запропонованим методам, проводиться неруйнівний контроль стану ізоляції, а саме, визначення місця

<sup>©</sup> Ляшук В. М., Дем'янюк І. В., 2013

передбачуваного пробою (руйнування) ізоляції. Це дозволить запобігти можливості виникнення

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бессуднов Е. П. Обнаружение мест дефектов изоляции обмоток электрических машин постоянного тока / Е. П. Бессуднов – М.: Энергия, 1977. – 120 с.

2. Каминский М. Л. Проверка и испытание электрических машин / М. Л. Каминский – М.: Энергия, 1977. – 103 с.

3. Сахновский Н. Л. Испытание и проверка электрического оборудования /Н. Л. Сахновский – М.: Энергия, 1975. – 103 с.

4. Бажанов С. А. Профилактические испытания изоляции оборудования высокого напряжения /С. А. Бажанов, В. Ф. Воскресенский – М.: Энергия, 1977. – 288 с.

5. Гончаренко Г. М. Испытательные установки и измерительные устройства в лабораториях высокого напряжения /Г. М. Гончаренко – М.: Энергия, 1966 – 326 с.

6. Боднар Б. Є. Діагностування та прогнозування стану ізоляції обмоток тягових електродвигунів локомотивів / Б. Є. Боднар, М. І. Капіца, В. М. Ляшук // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2002. – № 6(52). – С. 21–25.

7. Ляшук В.М. Устройство для оценки состояния изоляции обмоток тяговых электродвигателей локомотивов / В.М. Ляшук, Я.Е. Савич, М.И. Капица //Зб. наук. пр. Київ. ун-ту економіки і технологій трансп. Сер.: Транспортні системи і технології. – К.: КУЕТТ, 2003. – Вип. 1–2. – С. 72–79.

8. Капіца М. І. Як відмовитись від передчасного руйнування ізоляції тягових електричних машин локомотивів під час проведення випробувань / М. І. Капіца, В. М. Ляшук, Д. В. Бобир / Зб. наук. пр. Київ. ун-ту економіки і технологій трансп. Сер.: Транспортні системи і технології. — К.: КУЕТТ, 2006. — Вип. 9. — С. 69–77.

9. Капіца М. І. Неруйнівні методи контролю стану ізоляції електричних машин та високовольтних силових кабелів /М. І. Капіца, Д. В. Бобир // Зб. наук. пр. ДонІЗТ. – 2007. – Вип. 12. – С. 127–138.

Надійшла до друку 31.05.2013.

Ключові слова: неруйнівний контроль, діагностування, сухі трансформатори, якість ізоляції, індуктивні датчики, генератор звукової частоти, резонанс напруги. короткого замикання, при експлуатації тягових сухих трансформаторів.

#### REFERENCES

1. Bessudnov E. P. Obnaryjenie mest defektov izolyatsii obmotok elektricheskih mashyn postoyannogo toka [Detecting defects places winding insulation of electrical machines DC]. *Energya* [Energy], 1977, 120p.

2. Kaminsky M. L. Proverka I ispytanie elektricheskih mashyn [Inspection and testing of electrical machines]. *Energya* [Energy], 1997, 103p.

3. Sahnovsky N. L. Ispytanie i proverka elektricheskogo oborydovania [Testing and inspection of electrical equipment]. *Energya* [Energy], 1975, 103p.

4. Bazhanov S. A. Profilakticheskie ispytania izolyatsii oborydovania vysokogo nyapragenia [Routine tests in isolated high-voltage equipment], *Energya* [Energy], 1977, 288p.

5. Goncharenko G. M. Ispytatelnye ystanovki i izmerytelnye ysstroystva v laboratoriah vysokogo nyapragenia [Test facilities and instrumentation in the laboratory of high voltage], *Energya* [Energy], 1966, 326p.

6. Bodnar B. E., Kapitsa M. I., Lyashuk V. M. Diagnostyvanna ta prognozyvanna stany izolyatsii obmotok tyagovyh elektrodvygyniv lokomotyviv [Diagnosis and prognosis of winding insulation locomotive traction motors], *Visnyk Shydnoykrainskogo natsionalnogo yniversytety im. V. Dyala* [Journal of East Ukrainian National University by V. Dal], Lugansk, 2002, no. 6(52), 21-25p.

7. Lyashuk V. M., Savitch J., Kapitsa M. I. Ystroystvo dlya otsenki sostoyania izolyatsii obmotok tyagovykh elektrodvigateley lokomotivov [The device for the assessment of the electrical motor winding insulation of traction locomotives], *Zb. nayk. Pr. Kyiv. yn-ty ekonomiki i tekhnologiy transp. Ser.: Transportni systemy i tekhnologii.-K.:KYETT* [Collection. Science. Kyiv Ave. Univ of Economics and Technology transp. August.: Transport systems and technologies. - K. KUETT], Kyiv, 2003.-Vyp.1-2.-72-79p.

8. Kapitsa M.I., Lyashuk V.M., Bobir D.V. Yak vidmovytys vid peredchasnogo ryinyvanna izoliatsii tyagovyh electrychnyh mashyn lokomotyviv pid chas provedenna vyprobyvan [How can I stop premature destruction of insulation of electric traction vehicles locomotives during trials], *Zb. nayk. Pr. Kyiv. yn-ty ekonomiki i tekhnologiy transp. Ser.: Transportni systemy i tekhnologii.-K.:KYETT* [Collection. Science. Ky-iv Ave. Univ of Economics and Technology transp. August.: Transport systems and technologies. - K. KUETT], Kyiv, 2006.-Vyp.9.-69-77p.

9. Kapitsa M. I., Bobir D. V. Neryinivni metody kontroly stany izoliatsii elektryshnyh mashyn ta vysokovoltnych sylovyh kabeliv [Nondestructive methods for monitoring the insulation of electrical machines and high-voltage power cables], *Zb. nayk. pr. DonIZT.*, [Collection. Science. DonIZT Ave.], 2007, Vyp.12.-127-138p.

Внутрішній рецензент Костін М. О.

Зовнішній рецензент Танкевич Є. М.

© Ляшук В. М., Дем'янюк І. В., 2013

Оцінка фактичного стану силового електрообладнання за результатами діагностичних вимірів є на сьогоднішній день складною і актуальною задачею. Його значна частина виробила свій ресурс, але продовжує експлуатуватися через нестачу фінансових коштів на його заміну. Відповідно з кожним роком зростають витрати на проведення комплексних обстежень і діагностики. Основними причинами відключень, пов'язаних з внутрішніми КЗ, є недостатня стійкість обмоток при КЗ і пробою внутрішньої ізоляції.

В статті розглянуто методи неруйнівного контролю стану міжвиткової ізоляції обмоток тягових сухих трансформаторів. Розглянуто систему дослідження на основі одинарного індуктивного датчика та диференціального індуктивного датчика.

Для попередження виникнення аварійної ситуації, що тягне за собою важкі пошкодження обмоток трансформатора, бажано визначати місця порушення ізолюючих властивостей обмотки. Це проводиться шляхом аналізу інформації одержуваної з індуктивних датчиків при подачі напруги прямокутної форми на обмотку трансформатора

#### УДК 621.316.97

### В. М. ЛЯШУК, И. В. ДЕМЬЯНЮК (ДНУЖТ)

Кафедра Электроснабжение железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: <u>lyashuk52@qmail.com</u>

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ МЕЖВИТКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ОБМОТКЕ ТЯГОВЫХ СУХИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Оценка фактического состояния силового электрооборудования по результатам диагностических измерений является на сегодняшний день сложной и актуальной задачей. Его значительная часть выработала свой ресурс, но продолжает эксплуатироваться из-за недостатка финансовых средств на его замену. Согласно с каждым годом растут расходы на проведение комплексных обследований и диагностики. Основными причинами отключений, связанных с внутренними КЗ, является недостаточная устойчивость обмоток при КЗ и пробоя внутренней изоляции.

В статье рассмотрены методы неразрушающего контроля состояния межвитковой изоляции обмоток тяговых сухих трансформаторов. Рассмотрена система исследования на основе одинарного индуктивного датчика и дифференциального индуктивного датчика.

Для предупреждения возникновения аварийной ситуации, что влечет за собой тяжелые повреждения обмоток трансформатора, желательно определять места нарушения изолирующих свойств обмотки. Это производится путем анализа информации получаемой из индуктивных датчиков при подаче напряжения прямоугольной формы на обмотку трансформатора.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, диагностирование, сухие трансформаторы, качество изоляции, индуктивные датчики, генератор звуковой частоты, резонанс напряжения.

Внутренний рецензент Костин Н. А.

Внешний рецензент Танкевич Е. М.

#### UDC 621.316.97

## V. M. LYASHUK, I. V. DEMYANYUK (DNURT)

## RESEARCH METHODS FOR DIAGNOSING MIZHVYTKOVOYI WINDING INSYLATION IN DRY-TYPE TRANSFORMERS TRACTION

Assessment of the actual electrical power as a result Diagnostics is currently difficult and urgent task. He made much of his life, but continues to operate because of lack of funds for its replacement. Accordingly, every year rising costs of comprehensive examinations and diagnosis. The main causes of outages related to the internal circuit is lack of stability in the short-circuit windings and internal insulation breakdown.

The article deals with methods of non-destructive testing of inter winding insulation oil-less traction transformers. It was considered research system based on single and differential inductive sensor inductive sensor.

To prevent an emergency situation involving a serious injury transformer windings, it is desirable to determine a violation of winding insulating properties. This is done by analyzing information obtained from inductive sensors with rectangular voltage is applied to the winding of the transformer.

**Keywords:** non-destructive testing, diagnosis, transformers insulation quality, inductive sensors, audio frequency generator, resonance voltage.

Internal reviewer Kostin M. O.

External reviewer Tankevich E. M.

<sup>©</sup> Ляшук В. М., Дем'янюк І. В., 2013

#### УДК 621.331.3

#### Г. С. ЗИНОВЬЕВ, А. В. РОЖЕНЦЕВА, А. С. СУСЛОВА (НГТУ)

Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, Россия, пр-т К. Маркса, 20, тел.: +7 (383) 346-11-82, эл. почта: <u>genstep@mail.ru</u>

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### Введение

Потребность в электровозах большой мощности нарастает в связи с повышением грузопотоков на железнодоро ном транспорте и увеличения скорости движения. Достоинства систем тяги на постоянном токе ограничиваются сегодня их мощностями электровозов на уровне не более 5-8 мВт при напряжении в контактной сети 3 кВ. На необходимость повышения уровня постоянного напряжения в контактной сети до значений 12-24 кВ уже давно указывалось в [1-4], приемлемых печати но схемотехнических решений для построения понижающего двунаправленного DC-DC конвертора предложено не было.

В последнее время в работах [5,6] проанализирована новая схема безтрансформаторного понижающего двунаправленного DC-DC конвертора, позволяющего связать сети постоянного напряжения 12-24кВ с типовой бортовой сетью электровоза 3кВ. Но отсутствие общей шины входа и выхода у такого конвертора предъявляет повышенные требования к изоляции обмоток двигателя относительно его корпуса. Более перспективное решение, обеспечивающее гальваническую развязку входа и выхода конвертора, является выполнение конвертора по многоканальной схеме С последовательным включением их по входу и параллельным или автономным включением их по выходу [8].

Два схемо-технических варианта выполнения таких многоканальных конверторов со звеном повышенной частоты сопоставлены в примыкающем разделе. Затем в следующем разделе рассмотрен вариант двунаправленного безтрансформаторного понижающего DC-DC преобразователя по лестничной схеме с общей шиной входа и выхода. Сравнение трех вариантов опирается на результаты моделирования конверторов в программе PSIM.

#### Многоканальные DC-DC, AC-DC конверторы с промежуточным трансформаторным звеном повышенной частоты

Схема DC-DC преобразователя может быть выполнена в двух вариантах: однофазная полумостовая или мостовая схема, на рис.1 изображены мостовые схемы.

Такое решение увеличения пропускной способности участков железной дороги выглядит следующим образом: напряжение контактной сети повышается до напряжения 24 кВ; на электроподвижном составе располагается согласующий преобразователь 24 кВ-3 кВ, выход которого постоянный. Схема состоит из 8 последовательно соединенных по входу ячеек, таким образом, входное напряжение одной ячейки составляет 3 кВ. Этот уровень напряжения ориентирован на применение в схемах IGBT-транзисторов на 6,5 кВ. Сказанное иллюстрирует рис. 2.



Рис. 1. Принципиальная схема одного канала преобразователя (инвертор и выпрямитель выполнены по однофазным мостовым схемам)

Ячейки инвертора и выпрямителя могут быть выполнены в виде однофазной полумостовой схемы путем замены плеча ключей на плечо конденсаторов. Все выпрямители по выходу включены параллельно, чтобы обеспечить

© Зиновьев Г. С. и др., 2013

независимое регулирование каждого асинхронного двигателя.



Рис. 2. Общий вид структурной схемы конвертора

Произведем сравнение с аналогичным преобразователем для системы переменного тока.

АС-DС преобразователь электротяги переменного тока состоит из 12 каналов, соединенных по входу последовательно, а по выходу выпрямителей – параллельно (рис.3).



Рис. 3. Общий вид структурной схемы АС-DС конвертора

Необходимо отметить, что здесь преобразователь выполнен на основе мостовых схем.

В табл. 1 приведено сравнение двух схемных решений DC-DC преобразователей и AC-DC преобразователя.

Таблица 1

Параметры		Полумостовая схема	Мостовая схема	Мостовая схема	
		(постоянный ток)	(постоянный ток)	(переменный ток)	
Количество каналов	ШТ	8	8	12	
Количество транзисоров	ШТ	64	64	72	
Количество банок конденсаторов	ШТ	72	16	36	
Действующее значение тока	٨	580.8	281.2	127.5	
в ключах	A	380.8	201.2	127.5	
Среднее значение тока в ключах	Α	397.5	197.7	90,10	
Потери в транзисторах	кВт	89.301	99.804	100.416	
Потери в конденсаторах	Вт	1 236.16	433.43	245	
КПД		0.952	0.962	0.962	
Суммарный КПД контактной сети		0.026	0.044	0.046	
и электровоза		0.930	0.944	0.940	
Масса преобразователя	КГ	7 333.44		11 989	
Общий занимаемый объем	м <sup>3</sup>	2.464		3,819	
Стоимость комплектующих изделий	руб	9 681 851.6	8 072 948	13 803 928	
Стоимость преобразователя	руб	9 697 635.3	8 086 918.4	13 819 447	
Потери в транзисторах	кВт	53.227	56.3	53.725	
КПД		0.97	0.97	0.971	
Суммарный КПД контактной сети и электровоза		0.953	0.953	0.954	

Примечания:

1. Количество банок конденсаторов для полумостовой схемы указанно с тем условием, что в плече конденсаторов, в параллель ставятся 2 конденсатора.

2. Количество транзисторов для полумостовой схемы указанно с тем условием, что в плече, в параллель ставятся 2 транзистора.

3. Для системы переменного тока, значения тока указанны в ключах инвертора.

Данные табл. 1. были получены при использование следующей элементной базы:

Конденсаторы фирмы «Ерсоз»:

Система постоянного тока:

• B25650D3258K024 (для мостовой схемы), B25650D1528K004 (для полумостовой схемы)

Система переменного тока

• B25650D3258K024, B25650D3128K004.

IGBT транзисторы фирмы «Infineon» (для обеих систем):

• FZ600R65KF2: Ia=600 A; U=6500 B (для мостовой и полумостовой схем)

Контактный медный фасонный провод для системы постоянного тока с площадью сечения 123 мм<sup>2</sup>, для системы переменного тока – с площадью сечения 85 мм<sup>2</sup>

Если сравнивать предложенные схемные решения для системы постоянного тока, то практически по всем показателям имеет преимущество схема, построенная на однофазных мостах.

© Зиновьев Г. С. и др., 2013

Так, для построения понижающего преобразователя на базе мостовой схемы мощностью около 10 МВт, для 8 каналов необходимо 64 IGBT транзистора на напряжение 6.5 кВ и ток 600А; для полумостовой схемы необходимо 64 ключа на 6.5 кВ и ток 600А. Но в данном схемном решении, требуется также в 4.5 раз больше конденсаторов, чем для мостовой схемы.

Для обоих схемных решений требуется восемь асинхронных двигателей типа НТА-1200 кВт.

Преобразователь для системы переменного тока тяжелее и дороже, содержит большее количество ключей и имеет более сложную систему управления.

Обратимся к одному из важных параметров электрифицированной железной дороги – суммарному КПД контактной сети и электровоза.

Общий КПД электровоза переменного тока и контактной сети в режиме тяги, без учета затрат на собственные нужды и работу компрессоров, по расчетам получается равным 0.94 и мало зависит от расстояния между тяговой подстанцией и электровозом.

Общий к.п.д. электровоза постоянного тока и контактной сети меняется в зависимости от расстояния до тяговой подстанции от 0.95 вблизи ее, до 0.73 на расстоянии 10 км, усредненное значение КПД электровоза постоянного тока и контактной сети не превышает 0.84.

Например, функционирующие электровозы на сегодняшний день имеют:

КПД ЭП2к не менее 0.88 (электровоз постоянного тока)

КПД ЭП10-0.86 (электровоз переменного тока)

В предлагаемых нами схемах, по предварительным расчетам КПД составит 0.952 (полумостовая схема) и 0.962(мостовая схема), для системы постоянного тока, 0962 для системы переменного тока.

Основные характеристики преобразователей

1. Внешние характеристики

На рис. 4 приведена зависимость выходного напряжения от выходного тока, для трех рассмотренных преобразователей.



© Зиновьев Г. С. и др., 2013



На рисунке 5 показана зависимость КПД от тока нагрузки, для трех рассмотренных преобразователей.





Как видно из рисунка 5, система постоянного тока превосходит по КПД систему переменного тока.

3. Электромагнитная совместимость преобразователей электровозов

Переменный несинусоидальный ток в контактной сети и на входе выпрямителя электровоза переменного тока создает серьезные проблемы и для оборудования электровоза и для других систем, примыкающих к контактной сети. Контактная сеть электровоза постоянного тока загружена практически постоянным током и не создает указанных проблем.

#### Двунаправленный DC-DC конвертор без гальванической изоляции выхода от входа

Возможно построение понижающих DC-DC преобразователей и без использования промежуточного высокочастотного звена с трансформатором, вносящего свои ограничения на мощность канала преобразования. Это можно сделать на основе лестничных структур DC-DC конверторов с мягкой коммутацией добавлением транзисторных ключей, обеспечивающих режим рекуперации [11]. Двунаправленные однотактный и двухтактный преобразователи постоянного напряжения показаны на рис. 6а, б соответственно. Они содержат конденсаторный делитель КД, реакторно-конденсаторную цепочку РК и диодно-транзисторную цепочку ДТ с соответствующей системой управления, , а также токовый делитель ТД во второй схеме. При JGBT с напряжением 6.5кВ в модели конвертора в программе PSIM получается уровень мощности 1МВт.



Рис. 6. Двунаправленные а) однотактный и б) двухтактный преобразователи постоянного напряжения

#### Тяговые подстанции

Затраты на построение тяговой подстанции играют не мало важную роль при выборе системы тока. Но стоимости тяговых подстанций для двух систем тока существенно зависят от их исполнения. Поэтому пока ограничимся "экономическим весом" подстанций на уровне оценки мощностей основных ее элементов.

Положим, что обе подстанции рассчитаны на одинаковую активную мощность в контактной сети. Полная мощность сетевого трансформатора для высоковольтной тяги постоянного тока равна активной мощности при условии использования на новой подстанции активного выпрямителя, потребляющего синусоидальный ток, синфазный с напряжением сети [10]. Полная мощность сетевого трансформатора для высоковольтной тяги переменного тока равна активной мощности, деленной на входной коэффициент мощности существующего электровоза на шинах тяговой подстанции (0.7-0.8 с учетом индуктивности контактной сети). Это обстоятельство, помимо потребующегося увеличения полной мощности трансформатора на 30-50%, обусловит еще и дополнительные затраты на устройства компенсации реактивной мощности и мощности искажения (активные или пассивные фильтры), чтобы сравнение сделать с учетом одинакового уровня электромагнитной совместимости тяговой подстанции с питающей энергосистемой. При коэффициенте мощности 0.7 это потребует активной компенсации неактивной мощности на входе, равной активной, что по затратам на компенсатор (с ШИМ) это будет порядка затрат на активный выпрямитель тяговой подстанции постоянного тока. Но у последней есть еще одно преимущество – возможность компенсации неактивной мощности других нелинейных потребителей энергосистемы, от которой питается подстанция постоянного тока. Таким образом, появляется еще один существенный плюс в пользе системы постоянного тока.

#### Выводы

1. Увеличение напряжения до 24 кВ в контактной сети постоянного тока позволит построить электровозы мощностью до 25 МВт и более, в соответствии с требованиями времени.

2. Все основные преимущества системы тяги переменного тока присущи в системах постоянного тока на то же напряжение. Основные недостатки системы тяги переменного тока устраняются в системах тяги постоянного тока.

3. Существующие тяговые сети железных дорог могут быть использованы для испытаний новых образцов высоковольтных электровозов постоянного тока. Контактная сеть 3кВ постоянного напряжения позволяет поднять напряжение в ней до 10кВ, т. к. она имеет изоляторы на 20 кВ. Контактная сеть переменного тока 25 кВ позволяет по изоляции запитать ее постоянным напряжением 24 кВ.

4. В связи с этим повышение напряжения в контактной сети постоянного тока представляется перспективным вариантом для увеличения пропускной способности железных дорог и скорости движения поездов.

5. Стоимость тяговой подстанции системы постоянного тока дешевле, чем тяговая подстанция для системы переменного тока.

<sup>©</sup> Зиновьев Г. С. и др., 2013

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Розенфельд, В. Е. Система электрической тяги постоянного повышенного напряжения с тиристорными преобразователями на подвижном составе [Текст] / В. Е. Розенфельд, В. В. Щевченко, В. А. Майбога, Г. П. Долаберидзе // Электрическая и тепловозная тяга. - 1968. - №3. - С 4 - 6.

2. Steigerwald R. L. Comparison of High-Power DC-DC Soft-Switched Converter Topologies / R. L. Steigerwald, R. W. De Doncker, M. H. Kheraluwala // Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE. - 1994. – Pp. 1139 - 1145.

3. Курбасов, А.С. Система электрической тяги XXI века [Текст] / А.С. Курбасов // Железные дороги мира. - 1999. - №4. – С. 24-26.

4. Kim J. Modeling, Control, and Design of Input-Series-Output-Parallel- Connected Converter for High-Speed-Train Power System / Jung-Won Kim, Jung- Sik You, B. H. Cho // IEEE transactions on power electronics. 2001, Vol. 48, № 3.

5. Lopatkin N. N. Bi-Directional High-Voltage DC-DC-Converter of Advanced Railway Locomotives / N.N. Lopatkin, G.S. Zinovyev, L.G. Zotov // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congresss, September, 12-16, 2010,USA, Atlanta, Georgia, pp. 1123-1128.

 Зиновьев, Г. С. Высоковольтный DC-DC конвертор для электровозов новой волны [Текст] / Г. С. Зиновьев, Н. Н. Лопаткин, Х. Вайс // Электротехника. – 2009. – №12. – С. 46-51.
 Зиновьев, Г. С. Пути модернизации систем

7. Зиновьев, Г. С. Пути модернизации систем электроснабжения и электрооборудования высоковольтных электровозов постоянного напряжения [Текст] / Г. С. Зиновьев, С. Сальва // Электромеханика. – 2012. – №6. – С. 83-88.

8. D. Peftitsis, G. Tolstoy, A. Antonopoulos, J. Rabkowski, M. Bakowski, L. Angquist, and H. Nee, "High-power modular multilevel converters with SiC JFETs," IEEE Trans. Powe r Electr., vol. 27, no. 1, pp. 28–36, Jan. 2012.

9. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники [Текст]: учебное пособие, 4-изд. / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. - 671 с.

10. Zinoviev G. S., Rozhentseva A., Suslova A. Comparative analysis of high-voltage DC prospective converters of electric loco. Proc. EDM2013, Altay, 2013, p. 399-401.

11. Высоковольтный преобразователь постоянного напряжения. Материалы заявки на изобретение №2013136472. НГТУ, 2013.

### REFERENCES

1. Rozenfel'd V. E., Shchevchenko V. V., Mayboga V. A., Dolaberidze G. P. *Sistema elektricheskoy tyagi postoyannogo povyshennogo napryazheniya s tiristornymi preobrazovatelyami na podvizhnom sostave* [DC electric traction system of high voltage thyristor converters for rolling stock]. *Elektricheskaya i teplovoznaya tyaga* – Electric and diesel traction, 1968, no.3, pp.4-6.

2. Steigerwald R. L. Comparison of High-Power DC-DC Soft-Switched Converter Topologies / R. L. Steigerwald, R. W. De Doncker, M. H. Kheraluwala // Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE. - 1994. – Pp. 1139 - 1145.

3. Kurbasov A.S. *Sistema elektricheskoy tyagi XXI veka* [Electric traction system of XXI century]. *Zheleznye dorogi mira* – Railways world, 1999, no.4, pp.24-26.

4. Kim J. Modeling, Control, and Design of Input-Series-Output-Parallel- Connected Converter for High-Speed-Train Power System / Jung-Won Kim, Jung- Sik You, B. H. Cho // IEEE transactions on power electronics. 2001, Vol. 48, № 3.

5. Lopatkin N. N. Bi-Directional High-Voltage DC-DC-Converter of Advanced Railway Locomotives / N.N. Lopatkin, G.S. Zinovyev, L.G. Zotov // Proceedings of IEEE Energy Conversion Congresss, September, 12-16, 2010, USA, Atlanta, Georgia, pp. 1123-1128.

6. Zinov'ev G. S., Lopatkin N. N., Vays Kh. *Vysokovol'tnyy DC-DC konvertor dlya elektrovozov novoy volny* [High Voltage DC-DC converter for electric new wave]. *Elektrotekhnika* – Electrical Engineering, 2009, no.12, pp.46-51.

7. Zinov'ev G. S., Sal'va S. *Puti modernizatsii sistem elektrosnabzheniya i elektrooborudovaniya vysokovol'tnykh elektrovozov postoyannogo napryazheniya* [Road upgrading of electrical systems and electrical high-voltage DC electric voltage]. *Elektromekhanika* – Electromechanics, 2012, no.6, pp.83-88.

8. D. Peftitsis, G. Tolstoy, A. Antonopoulos, J. Rabkowski, M. Bakowski, L. Angquist, and H. Nee, "High-power modular multilevel converters with SiC JFETs," IEEE Trans. Powe r Electr., vol. 27, no. 1, pp. 28–36, Jan. 2012.

9. Zinov'ev G. S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of Power Electronics]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2009. 671 p.

10. Zinoviev G. S., Rozhentseva A., Suslova A. Comparative analysis of high-voltage DC prospective converters of electric loco. Proc. EDM2013, Altay, 2013, p. 399-401.

11. Vysokovol'tnyy preobrazovatel' postoyannogo napryazheniya [High Voltage DC converter]. Application materials for the invention, no. 2013136472, 2013.

Поступила в печать 12.11.2013.

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

#### Внешний рецензент Панасенко Н. В.

В данной работе сопоставлены двунаправленные понижающие DC-DC преобразователи перспективных высоковольтных электровозов постоянного тока. Определены параметры и количество требуемых активных элементов (транзисторов), удельные энергии установленных конденсаторов, ход внешних характеристик и КПД преобразователей.

Сравниваются два вида DC-DC преобразователей, построенных с использованием однофазной мостовой и однофазной полумостовой схем ячеек в многоканальной системе с промежуточным трансформаторным звеном переменного тока повышенной частоты, обеспечивающим гальваническую развязку входных

© Зиновьев Г. С. и др., 2013

електрорухомий склад / electric rolling stock

и выходных цепей, также произведено сравнение предложенных DC-DC преобразователей с AC-DC преобразователем (по основным параметрам), построенный по такому же принципу. Также рассматривается вариант двунаправленного бестрансформаторного понижающего DC-DC преобразователя по ленточной схеме с общей шиной входа и выхода. Сравнение опирается на результаты моделирования конверторов в программе PSIM.

**Ключевые слова:** двунаправленный DC-DC преобразователь, ВЧ промежуточное звено, современные электровозы, многоканальная конверторная система.

## УДК 621.331.3

## Г. С. ЗІНОВ'ЄВ, А. В. РОЖЕНЦЕВА, А. С. СУСЛОВА (НДТУ)

Новосибірський державний технічний університет, 630073, м. Новосибірськ, Росія, пр-т К. Маркса, 20, тел.: +7 (383) 346-11-82, эл. почта: <u>genstep@mail.ru</u>

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПЕРСПЕКТИВНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

У даній роботі зіставлені двонаправлені понижуючі DC-DC перетворювачі перспективних високовольтних електровозів постійного струму. Визначено параметри і кількість необхідних активних елементів (транзисторів), питомі енергії встановлених конденсаторів, хід зовнішніх характеристик і ККД перетворювачів. Порівнюються два види DC-DC перетворювачів, побудованих з використанням однофазної мостової, і однофазної полумостовой схем комірок у багатоканальній системі з проміжною трансформаторною ланкою змінного струму підвищеної частоти, що забезпечує гальванічну розв'язку вхідних і вихідних ланцюгів, та-

кож виконано порівняння запропонованих DC-DC перетворювачів з AC-DC перетворювачем (за основними параметрами), що побудований за таким же принципом. Також розглядається варіант двонаправленого безтрансформаторного понижуючого DC-DC перетворювача по стрічковій схемі із загальною шиною входу і виходу. Порівняння спирається на результати моделювання конверторів у програмі PSIM.

**Ключові слова:** двонаправлений DC-DC перетворювач, ВЧ проміжна ланка, сучасні електровози, багатоканальна конверторна система.

Внутрішній рецензент Гетьман Г. К.

Зовнішній рецензент Панасенко М. В.

## UDC 621.331.3

G. S. ZINOVIEV, A. V. ROZHENTSEVA, A. S. SUSLOVA (NSTU)

Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia, 20 K. Marksa Avenue, tel.: +7 (383) 346-11-82, e-mail: <u>genstep@mail.ru</u>

# COMPARATIVE ANALYSIS OF HIGH-VOLTAGE CONVERTERS DC ELECTRIC PERSPECTIVE

In this paper we compared the bidirectional DC-DC step-down converters promising high DC electric. Defined parameters and the required number of active elements (transistors), the specific energy capacitors installed , move the external characteristics and efficiency converters.

Compared two types of DC-DC converters built using single-phase and single-phase half-bridge bridge circuits of cells in a multichannel system with an intermediate transformer link AC high frequency, providing galvanic isolation of input and output circuits, also made a comparison of the proposed DC-DC converters with AC-DC converter (General Settings), built on the same principle. Also considering the possibility of bidirectional transformerless DC-DC buck converter with tape circuit with common rail input and output. Comparison based on the results of the simulation program converters PSIM.

Keywords: bi-directional DC-DC converter, HF intermediate, advanced electric, multi-channel converter system.

Internal reviewer Getman G. K.

External reviewer Panasenko M. V.

<sup>©</sup> Зиновьев Г. С. и др., 2013

#### УДК 629.423

#### О. В. МЕЛЬНИЧЕНКО (ИРГУПС), С. В. ВЛАСЬЕВСКИЙ (ДВГУПС)

Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Чернышевского 15, тел.: +7 (902) 170-24-37, e-mail: <u>olegmelnval@mail.ru</u>

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева 47, тел.: +7 (914) 547-54-47, e-mail: <u>vlas@festu.khv.ru</u>

## АВАРИЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ПЕРВОЙ ЗОНЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕН-НОГО ТОКА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕГО РАБОТОСПОСОБНОСТИ

#### Введение

Более 40 лет назад были созданы электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями, в которых наиболее существенным изменениям подверглись их силовые схемы и системы управления. Общее количество элементов в таких электровозах стало на один два порядка больше, чем на ранее выпускавшихся сериях электровозов. Так например, только в логической части аппаратуры управления первых электровозов серии ВЛ80Р насчитывается свыше 1500 элементов. Кроме того, в выходных каскадах выпрямительноинверторных преобразователей (ВИП) было установлено около 4000 электронных элементов [1]. В настоящее время с развитием полупроводниковой и микропроцессорной техники на электровозах серий ВЛ80ТК, ЭП1, 2(3) ЭС5К количество применяемых электронных элементов на порядок стало меньше. В результате, надёжность работы электровозов должна была возрасти. Однако этого не происходит и выход из строя даже одного маломощного элемента системы управления у современного электровоза и по сей день может привести к возникновению ненормального режима его работы, в результате которого дальнейшее движение электровоза будет затруднено или невозможно. Таким образом, на сегодняшний день всё ещё сохраняется жёсткая зависимость качества работы силового оборудования электровоза от работы системы его управления.

#### Основные причины возникновения аварийных режимов преобразователей

Анализ характера, причин повреждений и режимов работы электрооборудования электровозов при выходе из строя тиристоров ВИП показал, что основная часть повреждений и сбоев работы силовой части электровозов происходят из-за повреждений электронных элементов и сбоев в работе цепей системы управления. Половина таких отказов приходится на пропуск импульсов управления, подаваемых на управляющие электроды тиристоров плеч ВИП. Действительно, в настоящее время система управления построена таким образом, что в случае отказа любого выходного канала аппаратуры управления возникает отказ отдельных выходных каскадов системы формирования импульсов (СФИ) на всех ВИП электровоза. Например, отказ элементов в кассете выходных усилителей блока управления (типа БУВИП-133) приводит к отказу работы кассет СФИ ВИП. В итоге, это приводит к однократным или многократным броскам тока и напряжения ВИП, которые увеличивают продольную динамику подвижного состава и вероятность обрывов автосцепных устройств, снижают сцепление колёс локомотива с рельсами, снижают способность преодолевать тяжёлые элементы профиля пути.

Природа образования бросков тока тяговых двигателей электровоза с тиристорными преобразователями является многофакторной и, как правило, совершенно не устранима силами локомотивной бригады в процессе эксплуатации. В некоторых случаях обнаружить причину бросков тока удаётся только после нескольких дней непрерывных поездок, так как некоторые неисправности проявляют себя весьма кратковременно, например, при тряске локомотива в течение нескольких секунд.

Испытания электровоза серии ВЛ80Р на экспериментальном кольце ВНИИЖТ [2] показали, что пропуск даже одного импульса управления на плечи ВИП приводит к нарушению режима работы силовых цепей всего электровоза. В тяговом режиме, например, это может привести к быстрому снижению тока плеча ВИП в результате запирания тиристоров его ветвей, искажению синусоидальности кривой потребляемого переменного тока, увеличению пульсации выпрямленного тока, увеличению угла сдвига фаз ф и росту

<sup>©</sup> Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

реактивной энергии. В результате коэффициент мощности электровоза резко снижается. В тоже время это приводит к нарушению работы плеч ВИП в последующие полупериоды напряжения.

#### Цель работы

Перед технической системой – электровоз ставится задача, чтобы выход из строя любого элемента или узла системы управления не должен приводить к повреждениям силовых цепей электровоза или возникновению режима, сопровождающегося резкими бросками тока и напряжения. Многолетняя практика эксплуатации электровозов с тиристорными преобразователями показала, что наиболее ответственные цепи и элементы целесообразно резервировать для обеспечения высокой надёжности работы тиристорных преобразователей.

#### Технические решения по реализации поставленной цели

Чтобы выполнить это требование необходимо было предложить такие технические решения, которые могли бы обеспечить его выполнение. Такие решения были разработаны ИрГУПС и ДВГУПС в виде нового алгоритма управления ВИП и включения в силовую схему ВИП диодного плеча, которые были испытаны на электровозе ВЛ80Р на участке Иркутск-Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги.

В качестве примеров, рассмотрим несколько аварийных режимов работы ВИП, связанные с пропуском импульсов управления на те или иные его плечи, для электровоза переменного тока в режиме тяги с типовым (табл. 1) и предлагаемым (табл. 2) авторами алгоритмами управления на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения совместно с включением в силовую схему ВИП диодного плеча.

Первая зона регулирования является важным режимом работы электровоза с поездом в диапазоне малых скоростей движения. На этих скоростях электровоз работает в режиме пуска и разгона поезда, при движении поезда на горном профиле пути по расчетному подъему на пределе сцепления при плохих погодных условиях и в других различных случаях.

Таблица 1

Типовой алгоритм управления ВИП на 1-й зоне регулирования

Зона	полу-	Плечи выпрямителя			
	период	V3	V4	V5	V6
1	$\leftarrow$	$\alpha_0$	-	-	$\alpha_{ m P}$
	$\rightarrow$	—	$\alpha_{\rm P}$	$\alpha_0$	-

Предлагаемый алгоритм управления ВИП на 1-й зоне регулирования с включением диодного плеча в схему ВИП

Зона	полу-	Плечи выпрямителя			
	период	V3	V4	V5	V6
1	$\leftarrow$	$\alpha_{\rm P}$	-	-	$\alpha_{\rm P}$
	$\rightarrow$	_	$\alpha_{\rm P}$	$\alpha_{\rm P}$	_

Вначале рассмотрим пример аварийного процесса на 1-й зоне, связанный с пропуском импульса управления на пятое плечо выпрямителя (VS5), при типовом алгоритме управления. На рис. 1 изображена диаграмма выпрямленно-го напряжения и токов плеч на 1-й зоне регулирования при пропуске импульса управления с углом отпирания (фазой)  $\alpha_0$  на плечо VS5 в первом полупериоде напряжения, обозначенном сплошной стрелкой, при  $\alpha_p = 90$  эл. град.

Проанализируем более подробно процессы работы плеч ВИП при смене полупериодов напряжения. Для этого на рис. 1 первый и второй полупериоды выпрямленного напряжения разбиваются на временные интервалы 0-1-2-3-4-5- $\pi$  и 6-7-8-9-2 $\pi$  соответственно.

На рис. 2 изображены мгновенные силовые схемы замещения ВИП (а, б, в, г) в первом полупериоде напряжения сети при возникновении в нем аварийного процесса - пропуске импульса управления с фазой  $\alpha_0$  на плечо VS5.

Допустим, что в предшествующем полупериоде напряжения, обозначенном на рис. 2 пунктирной стрелкой, ток протекал по плечам VS3 и VS6 благодаря приложенной к ним положительного знака в этом полупериоде переменной е.д.с. е<sub>1-2</sub> секции 1-2 вторичной обмотки тягового трансформатора. После смены в точке 0 направления э.д.с. с пунктирной на сплошную стрелку, на интервале 0-1 обеспечивается возникновение отрицательного выпрямленного напряжения u<sub>d</sub> (см. рис. 1). Это объясняется всё ещё проводимыми ток нагрузки тиристорами плеч VS3 и VS6, но уже не под действием  $e_{1-2}$ , а под действием е.д.с. самоиндукции е<sub>L</sub>, возникшей в индуктивности L<sub>d</sub> цепи выпрямленного тока во время прохождения по ней тока нагрузки в предыдущий полупериод напряжения сети. В результате, через секцию 1-2 вторичной обмотки тягового трансформатора и плечи VS3, VS6 происходит разряд (передача) в сеть электромагнитной энергии, накопленной в индуктивности L<sub>d</sub>. В момент времени, соответствующий цифре 1 на рис. 1, согласно типового алгоритма управления должен быть подан импульс управления с фазой  $\alpha_0$  на плечо VS5 и

© Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

должна произойти коммутация (переход) тока с плеча VS3 на плечо VS5 на интервале 1-2. Однако коммутации на этом интервале не возникает в силу того, что на плечо VS5 импульс управления с фазой  $\alpha_0$  не подается (пропуск импульса). Причиной не подачи импульса, например, является возникновение неисправности в системе управления ВИП (в БУВИП или в СФИ). При этом отрицательное напряжение u<sub>d</sub> возрастает, а ток нагрузки протекает через открытые плечи VS3 и VS6 под действием  $e_L$ . На интервале 2-3 отрицательное напряжение  $u_d$ продолжает возрастать (см. рис. 1), так как ток нагрузки все ещё протекает через открытые плечи VS3 и VS6 под действием  $e_L$ . Мгновенная схема замещения ВИП во временных интервалах 0-1-2-3 представлена на рис. 2, а.



Рис. 1. Диаграмма выпрямленного напряжения и токов плеч на первой зоне регулирования при пропуске импульса управления с фазой α<sub>0</sub> на плечоVS5



Рис. 2. Мгновенные схемы замещения ВИП на первой зоне регулирования, соответствующие интервалам 0-1-2-3 (а), 3-4 (б), 4-5 (в) и 5-π (г) при пропуске импульса управления с фазой α<sub>0</sub> на плечо VS5

© Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

В момент времени, соответствующий точке 3, разряд в сеть электромагнитной энергии, накопленной в индуктивности  $L_d$ , прекращается, ток в плечах VS3 и VS6 падает до нуля и плечи закрываются. В результате напряжение и<sub>d</sub> падает до нуля. Далее в промежутке времени от точки 3 до точки 4 напряжение и<sub>d</sub> продолжает быть равным нулю и ток нагрузки тоже равен нулю (см. рис. 1). Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 3-4 представлена на рис. 2, б.

В результате подачи во временной точке 4 на плечо VS4 импульса управления с углом отпирания  $\alpha_p = 90$  эл. град. образуется контур протекания импульсного тока через цепи блока выравнивания напряжения (БВН) плеч ВИП. В эти БВН входят резисторы  $R_{III}$ , шунтирующее тиристоры и цепочки RC плеч ВИП. В этот момент времени изменением выпрямленного тока и напряжения можно пренебречь в силу их малости.

Ток в плече VS4 является результатом появления контура тока, в котором имеется э.д.с. секций 1-2-X1 вторичной обмотки тягового трансформатора, участок цепи из резисторов БВН плеч VS3, VS4 и VS5, а также цепь выпрямленного тока (сглаживающий реактор и тяговые двигатели). Этот ток заряжает индуктивность  $L_d$ , создавая э.д.с. самоиндукции е<sub>L</sub>, которая затем разряжается в этом же контуре, поддерживая ток плеча VS4 на более длительном времени, чем импульсный ток через БВН указанных плеч вначале открытия плеча VS4 (см. рис. 1 и 5). Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 4-5 представлена на рис. 2, в.

На интервале времени 5-*π* напряжение u<sub>d</sub> продолжает быть равным нулю, так как на этом интервале плечо VS4 закрыто и не проводит ток нагрузки. Этому процессу соответствует мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 5-*π*, представленная на рис. 2, г.

На рис. З изображены мгновенные силовые схемы замещения ВИП (а, б, в, г) для второго полупериода напряжения при возникновении аварийного процесса - пропуске импульса управления с фазой  $\alpha_0$  на плечо VS5 в первом полупериоде напряжения.

Во втором полупериоде, обозначенном на рис. 1 пунктирной стрелкой, в на интервале времени  $\pi$ -6 напряжение u<sub>d</sub> продолжает быть равным нулю, так как на этом интервале плечо VS4 продолжает быть закрытым, а на плечо VS3 еще не подан импульс управления, в результате чего они не проводят ток нагрузки.

Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале π-6, представлена на рис. 3, а.

В момент времени, соответствующий точке 6, на плечо VS3 согласно алгоритма управления подаётся импульс управления с углом отпирания  $\alpha_0$  (рис. 1). В результате подачи на плечо VS3 импульса управления вначале образуется контур протекания тока утечки через плечо VS3, цепь БВН плеч VS4, VS6 и VS8, а также цепь выпрямленного тока под действием э.д.с.  $e_{1-2}$  секции 1-2 вторичной обмотки трансформатора. Этот контур тока утечки действует до точки 7 непродолжительное время, а именно пока не зарядится индуктивность  $L_d$  с образованием в ней э.д.с. самоиндукции  $e_L$ . Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 6-7, представлена на рисунке 3, б.

Затем в точке 7 создается другой контур тока, а именно контур тока разряда е<sub>L</sub> через цепь выпрямленного тока, цепь БВН плеча VS4 и плечо VS3, минуя обмотку секции 1-2. К моменту времени, соответствующему точке 8, по мере разряда е<sub>1</sub> ток в плече VS3 постепенно уменьшается, но не падает до нуля к точке 8 и поэтому это плечо не закрывается. Таким образом, оба контура тока действуют на интервалах времени 6-7 и 7-8 (см. рис. 1). На интервале времени 6-7 действия контура тока утечки выпрямленное напряжение u<sub>d</sub> имеет небольшую величину, так как большая часть э.д.с. e<sub>1-2</sub> в виде падения напряжения тратится на большой величине сопротивления БВН плеча VS4 при прохождении через него тока утечки. На интервале времени 7-8 действия контура тока разряда е<sub>L</sub> напряжение u<sub>d</sub> практически равно нулю в силу уменьшения тока разряда и малой величины сопротивления цепи выпрямленного тока. Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 7-8, представлена на рис. 3, в.

В момент времени, соответствующий точке 8, на плечо VS6 согласно алгоритма управления подается импульс управления с фазой  $\alpha_p = 90$  эл. град., плечо VS6 открывается и начинает проводить ток. На интервале времени 8-9 коммутации токов плеч VS4 и VS6 не происходит, так как тока в плече VS4 в этот момент времени нет (ток плеча VS4 стал равен нулю еще в момент времени, соответствующий точке 4). Поэтому на интервале 8-9 и 9-2 $\pi$  ток в плечах VS3 и VS6 резко возрастает под действием приложенной к ним положительного знака в этом полупериоде переменной е.д.с. е<sub>1-2</sub> секции 1-2 (см. рис. 1). При этом выпрямленное напряжение u<sub>d</sub> также резко возрастает сначала до амплитудной величины напряжения 1-й зоны, а затем спадает до нуля в точке 2 л. В итоге к тяго-

<sup>©</sup> Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

вым двигателям прикладывается половина напряжения первой зоны регулирования. Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 8-9-2π представлена на рис. 3, г.



Рис. 3. Мгновенные схемы замещения ВИП на первой зоне регулирования, соответствующие интервалам времени π-6 (a), 6-7 (б), 7-8 (в), 8-9-2π (г) при пропуске импульса управления с фазой α<sub>0</sub> на плечо VS5

В следующий полупериод при пропуске импульса управления с фазой  $\alpha_0$  на плечо VS5 электромагнитные процессы ВИП происходят аналогично описанным выше.

Чтобы детально изучить аварийные процессы была разработана математическая модель электровоза в среде схемотехнического проектирования OrCad16.0. В качестве объекта моделирования был выбран электровоз переменного тока, аналогичный существующему электровозу ВЛ80Р, работающий в режиме тяги. Работа этого электровоза была смоделирована при управлении преобразователем по типовому алгоритму и предлагаемому алгоритму с применением диодного плеча, включенного параллельно цепи выпрямленного тока.

Электровоз в модели рассмотрен как комплексная система, состоящая из нескольких подсистем, взаимодействующих между собой. Такими подсистемами является электрическая часть электровоза, контактная сеть и система управления электровоза. Электрическая часть электровоза представлена математической моделью, состоящей из тягового трансформатора, двух ВИП, двух сглаживающих реакторов и четырех тяговых двигателей. Система управления ВИП электровоза представляет собой схему, с помощью которой импульсы управления подаются на тиристоры плеч преобразователя согласно алгоритму управления. Для более точного отображения взаимного влияния переходных процессов в системе контактная сеть электровоз в общей модели этой системы контактная сеть представлена конечноэлементной схемой замещения. Она состоит из каскадного

© Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

соединения Т-образных симметричных четырехполюсников.

Результаты моделирования процессов работы ВИП при штатном алгоритме управления в аварийном режиме тяги, связанном с пропуском импульса управления с фазой  $\alpha_0$  на плечо VS5, представлены на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Диаграмма выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя для типового способа управления в аварийном режиме тяги на 1-й зоне регулирования при пропуске импульса управления с фазой α<sub>0</sub> на плечо VS5

На участке Татаурово – Боярский Восточно-Сибирской железной дороги были проведении сравнительные испытания электровоза ВЛ80Р №1829 в тяговом режиме для штатного и предлагаемого алгоритмов управления на первой зоне регулирования при аварийных режимах работы ВИП, связанные с пропуском импульса управления с фазой α<sub>0</sub> на плечо VS5. Диаграммы процессов работы ВИП по результатам этих испытаний представлены на рис. 6.



Рис. 5. Диаграммы токов плеч ВИП на 1-й зоне регулирования с типовым способом управления в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α<sub>0</sub> на плечо VS5



Рис. 6. Экспериментальные диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя при типовом алгоритме управления в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления

с фазой  $\alpha_0$  на плечо VS5

Сравнивая процессы на рис. 4 и 6 можно сказать о том, что наблюдается высокая сходимость электромагнитных процессов, полученных при математическом моделировании и при проведении испытаний электровоза.

Таким образом, оценивая электромагнитные процессы, происходящие в электровозе при типовом алгоритме управления на 1-й зоне в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой  $\alpha_0$  на плечо VS5 ВИП, можно сделать следующие выводы:

1. В течение первой половины времени первого полупериода напряжения происходит рост реактивной энергии, что резко снижает энергетические показатели электровоза, а выпрямленный ток двигателя резко падает с 300 А до нуля, образовывая броски тока.

2. Во втором полупериоде выпрямленное напряжение является регулируемым и величина его зависит от положения штурвала машиниста электровоза, а выпрямленный ток двигателя резко возрастает от нуля до 300 А, также образовывая броски тока.

Если рассматривать в качестве аварийного процесса работы ВИП с типовым алгоритмом управления пропуск импульса управления с фазой  $\alpha_p$  на плечо VS6 в полупериод напряжения сети, обозначенный на рис. 1 пунктирной стрелкой, то выпрямленное напряжение  $u_d$  на всем протяжении этого полупериода будет равно нулю, а в следующем полупериоде (сплошная стрелка на рис. 1) к тяговым двигателям будет прикладываться уже полное напряжение 1-й зоны. Такой аварийный процесс работы ВИП, полученный с помощью математического моделирования, представлен на рис. 7 и 8.







регулирования с типовым способом управления в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления 6-го плеча ВИП

© Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

На рис. 9 изображены экспериментальные диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя при типовом способе управления ВИП на 1-й зоне регулирования в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α<sub>p</sub> на плечо VS6, полученные во время испытаний электровоза на участке Татаурово – Боярский Восточно-Сибирской железной дороги.



Рис. 9. Экспериментальные диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя при типовом способе управления ВИП на 1-й зоне регулирования в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α<sub>p</sub> на плечо VS6

Сравнение диаграмм процесса работы ВИП на рис. 7 и 9 показывает их хорошую сходимость. Из диаграмм видно, что выпрямленный ток двигателя электровоза резко не уменьшается до нуля как на рис. 4 и 6 (нет бросков тока), однако он становится не регулируемым и определяется величиной напряжения u<sub>d</sub> полной 1-й зоны в одном из полупериодов. При движении электровоза на этой зоне с определенной скоростью такой аварийный режим тяги не представляет опасности. Однако, если рассматривать этот аварийный процесс при трогании электровоза с места, то ток двигателя будет возрастать резким броском до тока уставки защиты силовой цепи, так как к двигателю в один из полупериодов будет прикладываться напряжение полной 1-й зоны в отсутствии противо-ЭДС двигателя. При таком аварийном процессе ВИП, привести в движение электровоз будет невозможно.

Чтобы устранить негативные результаты в работе электровоза на 1-й зоне регулирования от возникновения аварийных процессов в режиме тяги при пропуске импульсов управления на плечо VS5 или VS6 необходимо, как уже было сказано выше, применить на 1-й зоне новый алгоритм управления ВИП и включить в его силовую схему разрядное диодное плечо VD [3]. Суть нового алгоритма управления заключается в том, что на все плечи ВИП по два в каждом полупериоде напряжения подаются импульсы управления с фазой  $\alpha_p$  (см. табл. 2). Плечо VD включается параллельно цепи выпрямленного тока.

Рассмотрим на рис. 9 электромагнитные процессы в электровозе при действии предлагаемых технических решений. Также как и в предыдущем случае первый полупериод разбиваем на временные интервалы 0-1-2-3-4- $\pi$ , а второй полупериод на интервалы 5-6-7-8-2 $\pi$ .



Рис. 10. Диаграмма выпрямленного напряжения и токов плеч ВИП с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD на 1-й зоне регулирования при пропуске импульса управления фазой α<sub>p</sub> на плечоVS5

<sup>©</sup> Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

На рис. 11 изображены мгновенные силовые схемы замещения ВИП (а, б, в, г) с предлагаемым алгоритмом управления и плечом VD на 1й зоне регулирования в первом полупериоде напряжения сети при возникновении в нем аварийного процесса - пропуске импульса управления с фазой  $\alpha_p$  на плечо VS5. Проанализируем их работу



Рис. 11. Мгновенные схемы замещения ВИП на 1-й зоне регулирования с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD, соответствующие интервалам 0-1 (a); 1-2 (б); 2-3-4 (в); 4-π-5-6 (г) при пропуске импульса управления фазой α<sub>p</sub> на плечо VS5

Допустим, что в предшествующем полупериоде напряжения, обозначенном на рис. 9 пунктирной стрелкой, ток протекал по плечам VS3 и VS6 благодаря приложенной к ним положительного знака в этом полупериоде переменной е.д.с. е<sub>1-2</sub> секции 1-2 вторичной обмотки тягового трансформатора. После смены в точке 0 направления э.д.с. е<sub>1-2</sub> с пунктирной на сплошную стрелку, на интервале времени 0-1 начинается коммутация (переход) тока с плеч VS3 и VS6 на плечо VD. Такая коммутация возникает потому, что благодаря наличию плеча VD э.д.с. самоиндукции ег, возникшая в индуктивностях L<sub>d</sub> цепи выпрямленного тока, создает буферный контур протекания тока через это плечо и тем самым возникают потенциальные условия для закрытия плеч VS3 и VS6. К точке 1 токи плеч VS3 и VS6 падают до нуля и плечи закрываются. Таким образом, на интервале времени 0-1 через плечо VD происходит разряд электромагнитной энергии, накопленной в индуктивностях L<sub>d</sub> в предыдущий полупериод напряжения сети. Ток буферного контура проходит через плечо VD, минуя секцию 1-2 вторичной обмотки тягового трансформатора. Благодаря такому контуру выпрямленный ток двигателя на интервале 0-1 в аварийном полупериоде практически не уменьшается И поддерживается на прежнем уровне, что сохраняет работоспособность электровоза.

Мгновенная схема замещения ВИП на интервале времени 0-1 приведена на рис. 10 а. На интервале 1-2 ток протекает через плечо VD, разряжая накопленную электромагнитную энергию в L<sub>d</sub>. При этом выпрямленное напряжение будет равняться нулю. Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 1-2 представлена на рис. 10, б.

В момент времени, соответствующий цифре 2 на рис. 9, при пропуске импульса управления с фазой ар на плечо VS5 перехода тока с плеча VD на плечи VS4 и VS5 на интервале 2-3 не происходит. Образуется контур протекания тока утечки через плечо VS4 и цепь БВН плеч VS3, VS5 и VS7 под действием напряжения секции 1-2 вторичной обмотки. Плечо VD остается открытым, поддерживая тем самым ток нагрузки. Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 2-3 представлена на рис. 10, в. На интервале 3-4 ток утечки продолжает протекать по образовавшемуся контуру через плечо VS4 и цепь БВН плеча ВИП. Выпрямленное напряжение при этом также равняется нулю. Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 3-4, представлена на рисунке 10, в. К моменту времени, соответствующему точке 4, по мере снижения величины напряжения секции 1-2 ток плеча VS4 падает до нуля и плечо закрывается. При этом выпрямленное напряжение продолжает быть рав-На интервале 4-π-5-6 ным нулю. ток продолжает протекать через плечо VD, причём выпрямленное напряжение также равняется нулю. Этому соответствует мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 4-л-5-6, представленная на рис. 10, г.

<sup>©</sup> Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

На рис. 12 представлены мгновенные схемы замещения ВИП на 1-й зоне регулирования с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD при пропуске импульса управления на плечо VS5, соответствующие интервалам времени 6-7 (а) и 7- $2\pi$  (б).



Рис. 12. Мгновенные схемы замещения ВИП на 1-й зоне регулирования с предлагаемым алгоритмом управления и диодным плечом VD при пропуске импульса управления с фазой α<sub>p</sub> на плечо VS5, соответствующие интервалам 6-7 (а) и 7-2π (б)

В момент времени, соответствующий цифре 6, на плечи VS3 и VS6 приходят импульсы управления с фазой  $\alpha_p = 90$  эл. град. На интервале 6-7 происходит коммутация токов плеч VD и VS3, VS6 (токи в плечах VS3 и VS6 возрастают, а в плече VD падает до нуля). При этом выпрямленное напряжение равно нулю. Мгновенная схема замещения ВИП в интервале 6-7 представлена на рис. 11, а.

На интервале 7-2 $\pi$  ток протекает через открытые плечи VS3 и VS6. К тяговым двигателям прикладывается напряжение, равное напряжению первой зоны в соответствии с заданным фазовым углом регулирования  $\alpha_p$ . Мгновенная схема замещения ВИП во временном интервале 7-2 $\pi$  представлена на рис. 11, б. В следующий период при пропуске импульса управления с фазой  $\alpha_p$  на плечо VS5 электромагнитные процессы в ВИП происходят аналогично описанным выше.

Если рассматривать в качестве аварийного плечо VS6 с предлагаемым алгоритмом управления на 1-й зоне регулирования, то существенной разницы с аварийным плечом VS5 – нет. Электромагнитные процессы ВИП происходят аналогично описанным выше. Выпрямленное напряжение и ток двигателей электровоза второго полупериода остаётся регулируемым и зависит от положения штурвала машиниста электровоза.

На рис. 12 представлены диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя при математическом моделировании аварийного режима тяги при пропуске импульса управления фазой α<sub>p</sub> на плечо VS5. На рис. 13 представлены диаграммы токов плеч ВИП при математическом моделировании аварийного режима тяги при пропуске импульса управления фазой α<sub>p</sub> на плечо VS5.

При проведении испытаний электровоза ВЛ80Р с предлагаемым алгоритмом управления ВИП на 1-й зоне регулирования и диодным плечом VD осуществлялся аварийный режим тяги, вызванный пропуском импульса управления с фазой α<sub>p</sub> на плечо VS5. На рис. 14 изображены экспериментальные диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 1-й зоне регулирования с предлагаемым способом управления и диодным плечом VD при пропуске импульса управления фазой α<sub>p</sub> на плечо VS5.







Рис. 14. Диаграммы токов плеч ВИП на 1-й зоне регулирования с разрядным диодным плечом в аварийном режиме тяги при пропуске импульса управления с фазой α<sub>n</sub> на плечо VS5

<sup>©</sup> Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013


Рис. 15. Экспериментальные диаграммы выпрямленного напряжения и тока тягового двигателя на 1-й зоне регулирования с предлагаемым способом управления и диодным плечом VD при пропуске импульса управления фазой α<sub>p</sub> на плечо VS5

Сравнение осциллограмм на рис. 12 и 14 показывает хорошую сходимость электромагнитных процессов, полученных при математическом моделировании и при проведении испытаний электровоза (расхождение не более 3 %).

Анализ и сравнение аварийных процессов ВИП при штатном и предлагаемом алгоритмах управления представляет собой особый интерес с точки зрения оценки переходного процесса выпрямленного тока (резкие изменения величины тока в виде образования его бросков). Через такое сравнение процессов можно оценить возможность движения электровоза с поездом без образования негативных последствий для его электрооборудования. Эту оценку можно осуществить через определение коэффициента относительной пульсации выпрямленного тока  $K_{\Pi O}$  и его влияния на корректирующий коэффициент  $\lambda$ , который в свою очередь влияет на величину потерь выпрямленного напряжения от коммутации вентилей преобразователя (потери напряжения на индуктивном сопротивлении обмоток трансформатора) и как следствие на величину коэффициента мощности электровоза.

 $K_{\Pi O}$  и  $\lambda$  определяются по формулам

$$K_{\Pi O} = \Delta i_d / I_d, \qquad (1)$$

$$\lambda = 1 + 0.2 \text{ K}_{\Pi O.}$$
 (2)

где I<sub>d</sub> – среднее значение выпрямленного тока,  $\Delta i_d$  – переменная составляющая выпрямленного тока.

По условиям коммутации коллекторных тяговых электрических двигателей электровоза коэффициент относительной пульсации выпрямленного тока должен быть не более 0,6. Самый тяжелый режим по броскам тока на первой зоне регулирования при типовом алгоритме управления образуется, когда на плечо VS5 не приходит импульс управления. Для этого аварийного режима проведём его количественную оценку в сравнении с таким же аварийным процессом при применении предлагаемого алгоритма управления. Из полученных токовых диаграмм аварийных режимов (см. рис. 6 и 13), определим коэффициент относительной пульсации для типового и предлагаемого алгоритмов управления и произведём расчёт корректирующего коэффициента  $\lambda$ . Результаты расчёта заносим в табл. 3.

Таблица 3

N⁰	N⁰	Типовой алгоритм				Γ	Іредлагаемн	ый алгоритм	алгоритм			
зоны	плеча	I <sub>dcp</sub>	$\Delta i_d$	K <sub>no</sub>	λ	I <sub>dcp</sub>	$\Delta i_d$	Кпо	λ			
0,5	5	150	660	4,4	1,88	632	176	0,27	1,05			

Сравнительные значения коэффициентов К<sub>ПО</sub> и λ в аварийном режиме при типовом и предлагаемом алгоритмах управления

По результатам табл. 3 видно, что коэффициенты  $K_{\Pi O}$  и  $\lambda$  при применении предлагаемого алгоритма управления с диодным плечом меньше на 93 % и 44 % соответственно по сравнению с типовым алгоритмом и без применения диодного плеча.

При пропуске импульса управления на плечо VS5 в ВИП с предлагаемым алгоритмом управления на первой зоне регулирования возникает резерв плеча VS5, не принявшего нагрузку, за счёт разрядного диодного плеча VD, что даёт возможность машинисту электровоза довести поезд до ближайшей станции без образования опасных бросков тока двигателей, при которых движение поезда становится не возможным.

Определение коэффициента мощности при аварийных процессах с учётом несинусоидальности кривых переменного напряжения и тока в первичной обмотке тягового трансформатора электровоза производилось при проведении эксперимента с помощью счетчика активной и реактивной энергии переменного тока типа СЭТ-1М по формуле

<sup>©</sup> Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

$$K_{M} = \frac{\sum_{k=1}^{n} U_{k}I_{k}\cos\phi_{k}}{\sqrt{\sum_{k=0}^{n} U_{k}^{2}} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{n} I_{k}^{2}}} = \frac{U_{0}I_{0} + U_{1}I_{1}\cos\phi_{1} + \dots + U_{k}I_{k}\cos\phi_{k}}{\sqrt{U_{0}^{2} + U_{1}^{2} + \dots + U_{k}^{2}} \cdot \sqrt{I_{0}^{2} + I_{1}^{2} + \dots + I_{k}^{2}}},$$
(3)

где  $U_0$ ,  $I_0$  - постоянные составляющие напряжения и тока;  $U_1$ ,  $I_1$  - действующие значения синусоидальных напряжения и тока 1-й гармоники;  $U_k$ ,  $I_k$  - действующие значения синусоидальных напряжения и тока *k*-й гармоники;  $\varphi_k$  - угол сдвига фазы между напряжением и током *k*-й гармоники.

п

Результаты замеров заносим в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные значения коэффициента мощности в аварийном режиме при типовом и предлагаемом алгоритмах управления

№ зоны	Коэффициент мощности							
	Плечо	Типовой	Предлагаемый	Разница,				
	ВИП	алгоритм	алгоритм	%				
0,5	5	0,118	0,224	90				

Данные табл. 4 показывают, что коэффициент мощности при предлагаемом алгоритме выше, чем при типовом на 90 %. Это говорит о повышении активной и снижении реактивной мощности питающей сети в аварийном режиме при предлагаемом алгоритме управления на первой зоне регулирования с разрядным диодным плечом.

#### Выводы

 Пропуск импульса управления с фазой α<sub>0</sub> на плечо VS5 при типовом алгоритме управлении ВИП образует значительный рост реактивной энергии, что резко снижает энергетические показатели электровоза. Выпрямленный ток двигателя резко падает до нуля, образовывая броски тока, которые приводят к срабатыванию токовой защиты электровоза.

 Пропуск импульса управления с фазой α<sub>р</sub> на плечо VS6 при типовом алгоритме управле-СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Капустин, Л.Д. Обеспечение надёжности системы управления электроподвижного состава с тиристорными преобразователями [Текст] Л. Д. Капустин // Вестник ВНИИЖТ. – 1975. – №2. – С. 5-9.

2. Тихменев Б. Н. Потенциальные условия работы тиристоров в выпрямительно-инверторном преобразователе электровоза ВЛ80Р [Текст] / Б.Н. Тихменев, Ю.В. Басов, В.В. Находкин // сб. науч. тр. ВНИИЖТ. – 1984. – М. – С. 9-20.

3. Патент № 2322749 Российская Федерация, МПК Н02М 5/42, В60L 9/12, 2006 г.; Опубл. 20.04.2008; Бюл. № 11. Способ управления многозонным выпрямителем однофазного переменного нии ВИП образует не регулируемый выпрямленный ток двигателя электровоза, так как в первом полупериоде выпрямленное напряжение всегда равно нулю, а во втором полупериоде к тяговым двигателям всегда прикладывается полное напряжение первой зоны.

3. Пропуск импульса управления с фазой α<sub>p</sub> на плечо VS6 при типовом алгоритме управлении ВИП приводит при трогании электровоза с места к резкому возрастанию тока в виде его броска до тока уставки защиты силовой цепи, что приводит к срабатыванию токовой защиты электровоза. При таком аварийном процессе ВИП привести в движение электровоз не предоставляется возможным.

4. Предлагаемый алгоритм управления на 1-й зоне регулирования при пропуске импульсов управления с фазой  $\alpha_p$  на плечи VS5 или VS6 образует их резервирование за счёт разрядного диодного плеча VD. Величины выпрямленных значений напряжения и тока двигателей электровоза всегда остаются регулируемыми и зависят от положения штурвала машиниста электровоза. Это даёт возможность машинисту электровоза довести поезд до ближайшей станции без образования опасных бросков тока двигателей.

5. Сравнительные значения коэффициентов  $K_{\Pi O}$  и  $\lambda$  в аварийном режиме при применении предлагаемого алгоритма управления с разрядным диодным плечом по сравнению с типовым алгоритмом ниже на 93% и 44% соответственно.

6. Коэффициент мощности электровоза на 1-й зоне регулирования в аварийном режиме при предлагаемом алгоритме управления по сравнению с типовым алгоритмом выше на 90 %.

#### REFERENCES

1. Kapustin L.D. Obespechenie nadezhnosti sistemy upravleniya elektropodvizhnogo sostava s tiristornymi preobrazovatelyami [Ensuring the reliability of the control system of electric rolling stock with thyristor converters] Vestnik Vserossiyskogo nauchnoissledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the Russian Scientific Research Institute of Railway Transport], 1975, no. 2, pp. 5-9

2. Tikhmenev B.N., Basov Yu.V., Nakhodkin V.V. Potentsial'nye usloviya raboty tiristorov v vypryamitel'no-invertornom preobrazovatele elektrovoza VL80R [Potential working conditions thyristor rectifierinverter converter electric locomotive VL80R], Moscow, collection of scientific papers of the Russian Scientific Research Institute of Railway Transport, 1984, pp. 9-20

<sup>©</sup> Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

тока / авторы Власьевский С.В., Бабичук А.К., Мельниченко О. В.

3. Vlasyevsky S.V., Babichuk A.K., Melnichenko O.V., e.a. *Sposob upravleniya mnogozonnym vypryamitelem odnofaznogo peremennogo toka* [The control method of multi-zone single-phase rectifier AC]. Patent, no. 2322749, 2006.

Поступила в печать 14.10.2013.

Внутренний рецензент Костин Н. А.

Внешний рецензент Андриенко П. Д.

Статья рассматривает аварийные процессы тиристорного преобразователя (выпрямителя) электровоза переменного тока в режиме тяги на первой зоне регулирования выпрямленного напряжения, возникающие в результате пропуска импульсов управления на плечи выпрямителя по причине выхода из строя электронных элементов выходных усилителей системы формирования импульсов СФИ. Предложены технические решения по устранению негативного влияния аварийных процессов тиристорного преобразователя на работоспособность электровоза. Проведено математическое моделирование аварийных процессов работы выпрямителя при штатном (типовом) и предлагаемом алгоритмах управления преобразователем. Показаны диаграммы аварийных процессов выпрямителя при типовом и предлагаемом алгоритмах управления управления на математической модели и в опытных испытаниях электровоза ВЛ80Р на участке Татаурово-Боярский Восточно-Сибирской железной дороги. Приведены количественные и качественные результаты моделирования и эксперимента.

**Ключевые слова:** электровоз переменного тока, тяговый двигатель, тиристорный преобразователь, выпрямитель, тиристорные плечи, алгоритм управления, импульсы управления, аварийные процессы, зона регулирования, выпрямленный ток, коэффициент относительной пульсации, коэффициент мощности.

## УДК 629.423

## О. В. МЕЛЬНИЧЕНКО (ИРГУПС), С. В. ВЛАСЬЄВСЬКИЙ (ДВГУПС)

Іркутський державний університет шляхів сполучення, 664074, м. Іркутськ, Росія, вул. Чернишевського 15, тел.: +7(902)170-24-37, ел. пошта: <u>olegmelnval@mail.ru</u>

Далекосхідний державний університет шляхів сполучення, 680021, м. Хабаровськ, Росія, вул. Сєришева 47, тел.: +79145475447, ел. пошта: <u>vlas@festu.khv.ru</u>

# АВАРІЙНІ ПРОЦЕСИ НА ПЕРШІЙ ЗОНІ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОВОЗА ЗМІННОГО СТРУМУ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЙОГО ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

Стаття розглядає аварійні процеси тиристорного перетворювача (випрямляча) електровозу змінного струму в режимі тяги на першій зоні регулювання випрямленої напруги, що виникають в результаті пропуску імпульсів управління на плечі випрямляча з причини виходу з ладу електронних елементів вихідних підсилювачів системи формування імпульсів СФІ. Запропоновано технічні рішення з усунення негативного впливу аварійних процесів тиристорного перетворювача на працездатність електровозу. Проведено математичне моделювання аварійних процесів роботи випрямляча при штатному (типовому) і запропонованому алгоритмах управління перетворювачем. Показані діаграми аварійних процесів випрямляча при типовому і запропонованому алгоритмах управління на математичній моделі і в дослідних випробуваннях електровоза ВЛ80Р на ділянці Татаурова - Боярський Східно-Сибірської залізниці. Приведені кількісні та якісні результати моделювання і експерименту.

**Ключові слова:** електровоз змінного струму, тяговий двигун, тиристорний перетворювач, випрямляч, тиристорні плечі, алгоритм управління, імпульси управління, аварійні процеси, зона регулювання, випрямлений струм, коефіцієнт відносної пульсації, коефіцієнт потужності.

Внутрішній рецензент Костін М. О.

Зовнішній рецензент Андрієнко П. Д.

### UDC 629.423

#### O. V. MELNICHENKO (IRGUPS), S. V. VLASEVSKY (DVGUPS)

Irkutsk State University of Railway Transport, 664074, Irkutsk, Russia, 15 Chernyshevskogo Street, tel.: +7(902) 170-24-37, e-mail: <u>olegmelnval@mail.ru</u>

Far Eastern State University of Railways, 680021, Khabarovsk, Russia, 47 Serysheva Street, tel.: +7(914) 547-54-47, e-mail: <u>vlas@festu.khv.ru</u>

# EMERGENCY FIRST PROCESS CONTROL AREA VOLTAGE CONVERTER AC LOCOMOTIVES AND SUPPORT THE OPERATION

The article examines the processes of emergency thyristor converter (rectifier) AC electric traction mode on the first control zone rectified voltage strength resulting from crossing the control pulses on the shoulders of the rectifier because of failure of the electronic components output amplifiers pulse shaping system PSS. Proposed technical solutions to eliminate the negative impact of the NIJ - disturbance thyristor converter to work tiveness electric . The mathematical modeling of emergency processes of the rectifier with a nominal (typical) and the proposed algorithms management converter. Chart shows the disturbance in a typical rectifier and the proposed control algorithms on a mathematical model and experimental tests on a plot of electric VL80R Tataurovo - East Siberian Boyarsky of railways. The quantitative and qualitative results of simulation and experiment.

**Keywords:** AC electric locomotive, traction motor, thyristor converter, rectifier, thyristor shoulders, control algorithm, control impulses, emergency processes, rectified current, coefficient of relative pulsation, power factor.

Internal reviewer Kostin M. O.

External reviewer Andrienko P. D.

© Мельниченко О. В., Власьевский С. В., 2013

## УДК 621.336

## О. А. СИДОРОВ, А. Н. СМЕРДИН, А. Е. ЧЕПУРКО (ОмГУПС)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения», пр. Маркса, 35, Омск, Россия, 644046, тел 8-951-413-44-35, эл. почта: <u>Alexey.Chep@inbox.ru</u>

# ПРИМЕНЕНИЯ СГО-МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ ТОКОПРИЕМНИКА И ЕГО АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

На сегодняшний день одним из самых перспективных направлений в моделировании воздействия внешней среды на объекты является вычислительная аэрогидродинамика (*Computational Fluid Dynamics* – CFD). Сегодня CFDисследования могут быть эффективно применены на железнодорожном транспорте для решения задач моделирования обтекания подвижного состава воздушной и для расчета аэродинамических характеристик токоприемника и его аэродинамических устройств.

Процесс моделирования CFD состоит из:

генерации расчётной сетки;

нахождения оптимального числового алгоритма;

моделирования турбулентных течений.

Особенностью обтекания воздушным потоком токоприемника является то, что он представляет собой конструкцию, состоящую из большого количества элементов. При обдуве спектры обтекания данных элементов могут пересекаться, т.е. их взаимное расположение обуславливает и действующие на них аэродинамические силы. Кроме того, расчетная сетка при CFD-исследовании всего токоприемника крупнее, чем при CFD-исследовании отдельных деталей или узлов, что сказывается на точности расчета (рис. 1).

Таким образом, анализируя конструкцию токоприемника (рис. 1), авторы статьи пришли к выводу, что для его CFD-исследования целесообразно применять «поэлементный CFDметод». Для этого необходимо выявить элементы и узлы токоприемника с минимальной степенью влияния друг на друга при обтекании воздушным потоком, затем рассчитать аэродинамические силы, действующие на эти элементы и узлы. Далее, применяя принцип суперпозиции, определить аэродинамические силы, действующие на весь токоприемник.



а – при исследовании токоприемника, б – при исследовании верхнего узла токоприемника

Аэродинамическое воздействие на конструкции и устройства описывается системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса в частных производных:

<sup>©</sup> Сидоров О. А. и др., 2013

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = j_x \cdot \rho - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \zeta \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right]; \\ \rho \frac{\partial u_y}{\partial t} = j_y \cdot \rho - \frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right]; \\ - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \zeta \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right]; \\ \rho \frac{\partial u_z}{\partial t} = j_z \cdot \rho - \frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \zeta \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \zeta \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \zeta \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \zeta \cdot \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \right] = 0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial (\rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial (\rho u_z)}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial (\rho u_y}{\partial y} + \frac{\partial (\rho u_z)}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_z}{\partial t} + \frac{\partial ($$

електрорухомий склад / electric rolling stock

где u – вектор скорости потока с проекциями  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  на соответствующие оси координат [м/c];

р – давление среды [Па];

 $\rho$  – плотность среды [кг/м<sup>3</sup>];

 $\mu$  – динамическая вязкость [Пас] при заданной температуре;

 $j_x$ ,  $j_y$ ,  $j_z$  – проекции вектора объемной силы на соответствующие координатные оси [H];  $\zeta$  – объемная вязкость [Пас].

 $\varsigma = 00$  bemhax by skoetb [11a c].

Если принять, что  $\mu$  = const и  $\zeta$  = const, то система уравнений (1) значительно упрощается:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial t} = j_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[ \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right] + \left( \frac{\zeta}{\rho} + \frac{\nu}{3} \right) \cdot \left[ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right]; \\ \frac{\partial u_y}{\partial t} = j_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[ \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right] + \left( \frac{\zeta}{\rho} + \frac{\nu}{3} \right) \cdot \left[ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right]; \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} = j_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \left( \frac{\zeta}{\rho} + \frac{\nu}{3} \right) \cdot \left[ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right]; \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho u_z)}{\partial z} = 0, \end{cases}$$
(2)

где  $\nu$  – кинематическая вязкость [м<sup>2</sup>/c], которая является отношением динамической вязкости к плотности воздуха.

Найти прямое решение данной системы уравнений на сегодняшний день не представляется возможным из-за того, что оно зависит от начальных и граничных условий. Поэтому при решении практических задач применяют численное моделирование, основной проблемой которого является моделирование турбулентных течений, для чего используют следующие CFD-модели турбулентности [1]: 1) Прямое численное моделирование (DNS – Direct Numerical Simulation). Отсутствуют дополнительные уравнения. Нестационарные уравнения Навье-Стокса решаются с очень мелким шагом по времени, на мелкой пространственной сетке.

2) Осреднение по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes equations), замкнутых с помощью алгебраических или дифференциальных моделей турбулентности.

<sup>©</sup> Сидоров О. А. и др., 2013

3) Метод крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation). Влияние вихрей, которые по размерам меньше, чем размеры ячейки расчётной сетки, заменяется эмпирическими моделями.

4) Метод DES (Detached Eddy Simulation), который является комбинацией подходов RANS и LES. В зоне внешнего течения используется RANS, а в зоне отрыва потока с крупными вихрями – LES.

Наибольшая точность расчетов может быть получена при прямом численном моделировании (DNS). Однако при сегодняшнем уровне развития вычислительной техники отсутствует возможность решения задач с реальной геометрией с Колмогоровским масштабом длины и Колмогоровским масштабом времени при больших числах Рейнольдса [1]. Современные суперкомпьютеры способны решать задачи с применением метода крупных вихрей (LES) и метода моделирования отдельных вихрей (DES), однако такая техника имеется только в крупных научно-исследовательских центрах. Поэтому для решения широкого спектра инженерных задач аэрогидродинамики широко используется метод осреднения по Рейнольдсу системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса в частных производных (RANS).

Дополнительный модуль инженерного анализа Flow Simulation программного комплекса САПР SolidWorks 2010 применялся авторами для CFD-исследований. Для моделирования турбулентных течений в нем используется стандартная k-є модель турбулентности Лаундера-Сполдинга, основанная на решении системы дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \rho \left( \left[ u_{x} \right] \cdot \frac{\partial \left[ u_{x} \right]}{\partial x} + \left[ u_{y} \right] \cdot \frac{\partial \left[ u_{x} \right]}{\partial y} + \left[ u_{z} \right] \cdot \frac{\partial \left[ u_{x} \right]}{\partial z} \right] = -\frac{\partial \left[ p \right]}{\partial x} + \\ + 2 \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{x} \right]}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{x} \right]}{\partial y} + \frac{\partial \left[ u_{y} \right]}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{x} \right]}{\partial z} + \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial x} \right) \right]; \\ \rho \left( \left[ u_{x} \right] \cdot \frac{\partial \left[ u_{y} \right]}{\partial x} + \left[ u_{y} \right] \cdot \frac{\partial \left[ u_{y} \right]}{\partial y} + \left[ u_{z} \right] \cdot \frac{\partial \left[ u_{y} \right]}{\partial z} \right] = -\frac{\partial \left[ p \right]}{\partial y} + \\ + 2 \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{y} \right]}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{x} \right]}{\partial y} + \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial z} + \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial y} \right) \right]; \\ \rho \left( \left[ u_{x} \right] \cdot \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial x} + \left[ u_{y} \right] \cdot \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial y} + \left[ u_{z} \right] \cdot \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial z} \right] = -\frac{\partial \left[ p \right]}{\partial z} + \\ + 2 \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial z} \right) \right] = -\frac{\partial \left[ p \right]}{\partial z} + \\ + 2 \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[ \mu_{ef} \cdot \left( \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial z} + \frac{\partial \left[ u_{z} \right]}{\partial y} \right) \right], \end{cases} \right],$$

где  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

[p] – осредненное давление, Па;

 $[u_x], [u_y], [u_z]$  – осредненные проекции скорости на координатные оси, м/с;

 $\mu_{e\!f}$  – эффективная динамическая вязкость, Па<br/>с.

Эффективная динамическая вязкость определяется по формуле [1]:

$$\mu_{ef} = \rho \cdot \left( \nu + \nu_j \right), \tag{4}$$

где V – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;

 $V_i$  – кинематическая вихревая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

© Сидоров О. А. и др., 2013

Кинематическая вихревая вязкость рассчитывается с помощью зависимости Прандтля-Колмогорова через величины кинетической энергии турбулентности k и диссипации этой энергии  $\varepsilon$ :

$$\boldsymbol{v}_j = \boldsymbol{C}_{\boldsymbol{v}} \cdot \frac{\boldsymbol{k}^2}{\boldsymbol{\varepsilon}},\tag{5}$$

где  $C_{\nu} = 0,09$  – эмпирический коэффициент, выбранный на основании экспериментов с близкими к равновесным турбулентными потоками [2].

Система дифференциальных уравнений, связывающих кинетическую энергию турбулентности k и энергию её диссипации  $\varepsilon$ , записывается в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial \left(\left[u_{x}\right]\cdot k\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\left[u_{y}\right]\cdot k\right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\left[u_{z}\right]\cdot k\right)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[\frac{\left(v+v_{j}\right)}{\sigma_{k}} \cdot \left(\frac{\partial k}{\partial x}\right)\right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[\frac{\left(v+v_{j}\right)}{\sigma_{k}} \cdot \left(\frac{\partial k}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[\frac{\left(v+v_{j}\right)}{\sigma_{k}} \cdot \left(\frac{\partial k}{\partial z}\right)\right] + \frac{G}{\rho} - \varepsilon; \\ \frac{\partial \left(\left[u_{x}\right]\cdot\varepsilon\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\left[u_{y}\right]\cdot\varepsilon\right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\left[u_{z}\right]\cdot\varepsilon\right)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[\frac{\left(v+v_{j}\right)}{\sigma_{\varepsilon}} \cdot \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)\right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[\frac{\left(v+v_{j}\right)}{\sigma_{\varepsilon}} \cdot \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[\frac{\left(v+v_{j}\right)}{\sigma_{\varepsilon}} \cdot \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)\right] + \\ + C_{1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{G}{\rho} - C_{2} \cdot \frac{\varepsilon^{2}}{k} + C_{3} \cdot \frac{G^{2}}{k \cdot \rho^{2}}, \end{cases}$$

$$(6)$$

електрорухомий склад / electric rolling stock

где G – скорость генерации турбулентности;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_{\varepsilon} = 1,3$ ;  $C_1 = 1,43$ ;  $C_2 = 1,92$ ;  $C_3 = 0$  – эмпирические коэффициенты, определенные на основе решения задач о плоской струе и слое смешения [2].

С помощью САПР SolidWorks 2010 авторами статьи было произведено CFD-исследование токоприемника АИСТ и установлены компенсирующие аэродинамические силы, необходимые для получения рациональной аэродинамической характеристики асимметричного токоприемника [3, 4].

Аэродинамические силы, которые должно создавать аэродинамическое компенсирующее устройство для токоприемника, движущегося коленом вперед, во всем диапазоне рабочих высот и для скорости движения от 33,3 м/с до 69,4 м/с приведены в табл. 1.

Для токоприемника, движущегося коленом назад – в табл. 2.

Таблица 1

при движении токоприемники конспом внеред								
и, м/с	33,3	38,8	44,4	50	55,5	61,1	66,7	69,4
<i>h</i> , мм	P <sub>BT ycrp.</sub> , H							
400	1,8	2,8	3,8	5,5	7,1	9,6	11,7	13,5
1000	1,5	2,1	2,9	4,4	5,8	8,0	9,6	11,2
1200	1,4	1,9	2,5	3,9	5,3	7,5	9,0	10,7
1400	1,1	1,4	2,0	3,2	4,3	5,9	7,5	8,8
1600	0,6	1,2	1,5	2,6	3,4	4,8	6,3	7,6
1900	0,2	0,7	1,0	1,9	2,2	3,5	4,8	6,1

Аэродинамические компенсирующие силы необходимые при движении токоприемника коленом вперед

Таблица 2

Аэродинамические компенсирующие силы необходимые при движении токоприемника коленом назад

		I		- 1					
и, м/с	33,3	38,8	44,4	50	55,5	61,1	66,7	69,4	
<i>h</i> , мм		P <sub>BT ycrp.</sub> , H							
400	-4,6	-6,2	-8,1	-10,2	-13,6	-15,3	-16,5	-16,1	
1000	-6,0	-7,7	-9,7	-12,0	-15,2	-17,2	-18,5	-18,3	
1200	-6,4	-8,0	-10,1	-12,5	-15,8	-18,1	-19,5	-19,6	
1400	-5,5	-7,3	-9,6	-12,0	-15,5	-18,0	-19,5	-19,8	
1600	-7,0	-8,8	-11,4	-14,0	-17,6	-20,3	-21,9	-22,4	
1900	-7,2	-9,1	-11,9	-14,6	-18,3	-21,0	-22,8	-23,6	

© Сидоров О. А. и др., 2013

ISSN 2307-4221 Електрифікація транспорту, № 6. - 2013.

Полученные данные показывают, что модули компенсирующих аэродинамических сил различаются при движении в различных направлениях. Поэтому для компенсации аэродинамической подъемной силы асимметричного токоприемника целесообразно применять крылья определенного профиля.

Авторами статьи были проведены исследования аэродинамических характеристик крыльев, длина которых принималась равной 180 мм.

Аэродинамическое крыло устанавливалось в соответствии с рисунком 2. Такое положение было выбрано в соответствии с данными круговой обдувки [5]. На рисунке 2 приведена кинематическая схема, на которой изображен асимметричный токоприемник электроподвижного состава, состоящий из основания 1, пневмопривода 2, взаимодействующего с шарнирно сочлененной нижней штангой 3 и верхней штангой 4, на которой размещены каретки 7 с полозами 8, причем верхняя штанга 4 связана соединительной тягой 5 с основанием 1, направляющей штанги параллелограммного механизма 6 кареток 7, аэродинамического устройства 9. При этом аэродинамическое устройство 9 включает крыло 10, шарнирно соединенное с каретками 7 и способное изменять угол атаки за счет системы управляющих рычагов 11, приводимых в действие встречным потоком воздуха с помощью экранов 12. Упругий элемент 13 обеспечивает заданный угол атаки в зависимости от скорости движения и осуществляет возврат механизма в первоначальное состояние при остановке поезда.



Рис. 2. Кинематическая схема токоприемника с установленным крылом

Спектры обтекания крыла профиля NASA-2210, полученные в результате CFD-исследования для скорости 69,4 м/с приведены на рис. 3.



Рис. 3. Спектры обтекания крыла профиля NACA-2210 для угла атаки:  $a - 0^{\circ}, 6 - 10^{\circ}, 6 - 20^{\circ}$ 

© Сидоров О. А. и др., 2013

Спектры обтекания на рисунке 3, показывают, что для углов атаки 0° – 10° течение имеет ламинарный характер, без образования турбулентных вихрей. Профиль данного типа согласно [6] имеет критический угол атаки равный 16°, после чего коэффициент подъемной силы начинает резко снижаться, а лобовое сопротивление расти. При угле атаки в 20°, как видно из спектра обтекания, на задней кромке крыла образуется вихрь, течение приобретает турбулентный характер. Также с ростом угла атаки выше критического увеличивается лобовое сопротивление с одновременным снижением качества крыла.

Следовательно, регулирование аэродинамической подъемной силы токоприемника следует осуществлять при угле атаки крыла аэродинамического устройства ниже критического.

Авторами статьи было проведено CFDисследование крыльев с профилями заданного типа. Результаты этого исследования для скорости 69,4 м/с приведены на рисунках 4 – 6. Угол атаки изменяли от 0 до 45 градусов, продувка осуществлялась в обоих направлениях. Предполагается, что при движении асимметричного токоприемника коленом назад крыло аэродинамического устройства будет создавать опускающую силу, при движении в обратном направлении – подъемную силу.













а – профиль USA-27; б – зависимость аэродинамической подъемной силы крыла от угла атаки

<sup>©</sup> Сидоров О. А. и др., 2013

Эффективное регулирование контактного нажатия может быть обеспечено при создании крылом аэродинамических подъемных сил, приведенных в таблице 1 и таблице 2 и осредненных по высоте. В наибольшей степени этому требованию соответствует крыло с профилем NACA-2210.

#### Выводы

1) Способ моделирования газодинамических процессов посредством ПЭВМ с использованием CFD-исследования с применением «поэлементного CFD-метода», является целесообраз-

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Выбор подхода к определению турбулентной скорости распространения пламени в цилиндре газового двигателя [Текст] / Абрамчук Ф. И. и др. // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2009. – № 47. – С. 112 – 126.

2. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Текст] / А. А. Алямовский и др.// СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.

3. Чепурко А. Е. Регулирование аэродинамической подъемной силы токоприемника в процессе его взаимодействия с контактной подвеской [Текст] / А. Е Чепурко // Известия Транссиба. – 2012. – № 4. – С. 87–93

4. Сидоров О. А., Смердин А. Н., Емельянов М. В. Адаптация математической модели универсального измерительного токоприемника для исследования системы токосъема на линии Москва – Санкт-Петербург [Текст]/ О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, М. В. Емельянов // Известия Транссиба. – 2012. – № 4. – С. 51 – 58.

5. Радченко И. П. Круговая обдувка профиля NACA 23012 в аэродинамической трубе Т-103Н ЦАГИ. Технические отчеты ЦАГИ № 161, 1959.

6. Атлас аэродинамических профилей крыльев [Текст] / Ушаков Б.А. и др.//. Издание БИТ НКАП при ЦАГИ. –1940.

Поступила в печать 17.04.2013.

Ключевые слова: CFD-метод, модели турбулентности, аэродинамические силы, профиль крыла, система дифференциальных уравнений Навье-Стокса, спектры обтекания.

Внутренний рецензент Кузнецов В. Г.

ным при выполнении аэродинамических расчетов токоприемника.

2) Рассчитанные аэродинамические силы, создаваемые аэродинамическим устройством, позволили разработать устройство для автоматического регулирования нажатия.

3) Произведено CFD-исследование крыльев заданного профиля, на основании чего был сделан вывод, что для регулирования аэродинамической подъемной силы токоприемника необходимо использовать крыло с профилем NACA-2210.

#### REFERENCES

1. Abramchuk F. I. Vybor podkhoda k opredeleniyu turbulentnoy skorosti rasprostraneniya plameni v tsilindre gazovogo dvigatelya [The approach to the definition of the turbulent flame propagation velocity in the cylinder gas engine], Bulletin of the National Technical University "KPI", 2009, no. 47, pp. 112-126.

2. Alyamovskiy A. A. SolidWorks 2007/2008. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoy praktike [SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice], SPb., BKhV-Peterburg Publ., 2008, 1040 p.

3. Chepurko A. E. Regulirovanie aerodinamicheskoy pod"emnoy sily tokopriemnika v protsesse ego vzaimodeystviya s kontaktnoy podveskoy [Regulation of aerodynamic lift susceptor during its interaction with catenary], Proceedings of the Trans-Siberian, 2012, no. 4, pp. 87-93.

4. Sidorov O. A., Smerdin A. N., Emel'janov M. V. Adaptacija matematicheskoj modeli universal'nogo izmeritel'nogo tokopriemnika dlja issledovanija sistemy tokosema na linii Moskva – Sankt-Peterburg [Adapting mathematical model multimeter pantograph current collection system for studies on the Moscow - St. Petersburg], Proceedings of the Trans-Siberian, 2012, no. 4, pp. 51-58.

5. Radchenko I. P. Krugovaja obduvka profilja NACA 23012 v ajerodinamicheskoj trube [Circular profile NACA 23012 blowing in the wind tunnel], Technical Reports, 1959.

6. Ushakov B.A. Atlas ajerodinamicheskih profilej kryl'ev [Atlas of aerodynamic airfoils]. Izdanie BIT NKAP pri CAGI, 1940.

#### Внешний рецензент Саенко Ю. Л.

Контактное нажатие при взаимодействии токоприемника с контактной подвеской не остается постоянным. Одной из его дестабилизирующих составляющих является аэродинамическая подъемная сила токоприемника. Поэтому для обеспечения надежного и экономичного токосъема необходимо рассчитать рациональную аэродинамическую силу токоприемника, при которой износ контактирующих элементов будет минимальным с сохранением надежности контакта.

Проведение линейных испытаний токоприемника требует больших материальных затрат, как и его обдувка в аэродинамической трубе. Однако в настоящее время за счет широкой компьютеризации находят применение методы вычислительной гидрогазодинамики (CFD). На железнодорожном транспорте данные методы могут быть применены для расчета лобового сопротивления локомотива, для моделирования воздействия ветра на контактную подвеску и др. Авторами CFD-метод применялся для расчета аэродинамических характеристик токоприемника.

© Сидоров О. А. и др., 2013

Объектом исследования является метод применения CFD-анализа для расчета аэродинамических сил, действующих на токоприемник при высокоскоростном движении.

В статье авторами проведено исследование особенностей применения CFD-метода для моделирования аэродинамического воздействия на токоприемник и выбран профиль крыла для его последующего применения в аэродинамическом устройстве.

## УДК 621.336

## О. О. СИДОРОВ, А. М. СМЕРДІН, О. Є. ЧЕПУРКО (ОмГУПС)

Федеральна державна бюджетна освітня установа вищої професійної освіти «Омський державний університет шляхів сполучення», пр. Маркса, 35, Омськ, Росія, 644046, тел.: 8(951) 413-44-35, e-mail: <u>Alexey.Chep@inbox.ru</u>

# ЗАСТОСУВАННЯ СFD-МЕТОДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ СИЛ СТРУМОПРИЙМАЧА І ЙОГО АЕРОДИНАМІЧНІ ПРИСТРОЇ

Контактне натискання при взаємодії струмоприймача з контактною підвіскою не залишається постійним. Однією з його дестабілізуючих складових є аеродинамічна підйомна сила струмоприймача. Тому для забезпечення надійного і економічного струмознімання необхідно розрахувати раціональну аеродинамічну силу струмоприймача, при якій зношування контактуючих елементів буде мінімальним із збереженням надійності контакту.

Проведення лінійних випробувань струмоприймача вимагає великих матеріальних витрат, як і його обдування в аеродинамічній трубі. Проте в даний час за рахунок широкої комп'ютеризації знаходять застосування методи обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD). На залізничному транспорті дані методи можуть бути застосовані для розрахунку лобового опору локомотива, для моделювання впливу вітру на контактну підвіску та ін. Авторами CFD-метод застосовувався для розрахунку аеродинамічних характеристик струмоприймача.

Об'єктом дослідження є метод застосування CFD-аналізу для розрахунку аеродинамічних сил, що діють на струмоприймач при високошвидкісному русі.

У статті авторами проведено дослідження особливостей застосування CFD-методу для моделювання аеродинамічного впливу на пантограф і вибраний профіль крила для його подальшого застосування в аеродинамічному пристрої.

**Ключові слова:** СFD-метод, моделі турбулентності, аеродинамічні сили, профіль крила, система диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, спектри обтікання.

Внутрішній рецензент Кузнецов В. Г.

Зовнішній рецензент Саєнко Ю. Л.

## **UDC 621.336**

## O. A. SIDOROV, A. N. SMERDIN, A. E. CHEPURKO (OSTU)

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Omsk State Transport University" 35 Marks Ave, Omsk, Russia, 644046, tel.: 8(951) 413-44-35, e-mail: <u>Alexey.Chep@inbox.ru</u>

# USE CFD-METHOD TO DETERMINE THE AERODYNAMIC FORCES PANTOGRAPH AND AERODYNAMIC DEVICES

Contact pressure in the interaction with the pantograph catenary is not constant. One of its components is destabilizing aerodynamic lift trolley. Therefore, to ensure reliable and efficient current collection is necessary to calculate the rational aerodynamic force collector, in which the wear items will be minimal contact with reliable contact.

Conducting tests of linear pantograph requires high material costs, as well as its blowing in the wind tunnel. Currently, however, due to the wide computerization methods are used computational fluid dynamics (CFD). In rail transport, these methods can be used to calculate the drag of the locomotive, to simulate the effects of wind on the catenary, etc. The authors of CFD-method was used to calculate the aerodynamic characteristics of the pantograph.

The object of study is the method of application of CFD-analysis to calculate the aerodynamic forces acting on a current collector for high-speed motion.

In this paper the authors study the features of CFD-modeling method for aerodynamic effects on the current collector and selected airfoil for its use in the aerodynamic device.

**Keywords:** CFD-method, the turbulence model, the aerodynamic forces, the wing profile, the system of the Navier-Stokes differential equations, the spectra of the flow.

Internal reviewer Kuznetsov V. G.

External reviewer Saenko U. L.

© Сидоров О. А. и др., 2013

# ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

# ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ТРАНСПОРТА

ELECTRIFICATION OF TRANSPORT

науковий журнал

научный журнал

scientific journal

Свідоцтво про державну ресстрацію № 17327 – 6097Р від 14.10.2010 р. ISSN 2307-4221 Передплатний індекс 68641

Передрук матеріалів здійснюється тільки з дозволу редакції Члени редакційної колегії здійснюють рецензування та редагування статей Статті друкуються українською, російської та англійською мовами

> 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: <u>elsnz@mail.ru</u> URL: <u>http://etr.diit.edu.ua/</u>

> Ум. др. арк. 7,2. Зам. № 11 Наклад 100 прим.

Видавництво Маковецький Юрій Вадимович Свідоцтво ДК №2665 від 25.10.2006 р. 49000, Україна, м. Дніпропетровськ, вул. Плеханова, 16, к.14 Тел. (056)798-33-64, факс (0562)36-79-93 e-mail: <u>europress@gala.net</u>



# Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту імені акадаміка В. Лазаряна у 2014 р. проводяться наступні тематичні науково-практичні конференції:

► 5-а Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості», яка відбудеться в смт. Воловець, Закарпатської обл., 11 – 13 червня 2014 р.

Програма конференції передбачає роботу по таких напрямах:

1. Нормування споживання енергетичних ресурсів.

- 2. Енерго- і ресурсозбереження.
- 3. Енергоаудит.
- 4. Енергоменеджмент.

5. Застосування енергозберігаючих технологій і устаткування.

6. Проблеми обліку і контролю енергетичних ресурсів.

7. Ефективне використання традиційних і поновлюваних джерел енергії на залізничному транспорті.

▶ 7-а Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація транспорту» ТРАНСЕЛЕКТРО-2014, яка відбудеться в м. Місхор, АР Крим, 23 – 26 вересня 2014 р.

Програма конференції передбачає роботу по таких напрямах:

1. Перспективи розвитку електричного транспорту.

2. Якість електричної енергії, методи і засоби її забезпечення.

- 3. Способи, методи і пристрої діагностування в системах електричного транспорту.
- 3. Експлуатація господарства електротяги.
- 4. Застосування нових технологій і устаткування.
- 5. Проблеми швидкісного руху, струмознімання, електромагнітна сумісність.
- 6. Проблеми електровозобудування.
- 7. Електромеханічні системи і електропостачання електричного транспорту.
- 8. Проблеми надійності, діагностики і безпеки електричного транспорту.

На конференціях заслуховуватимуться і будуть обговорені нові результати теоретичних і експериментальних досліджень, а також розглянуті проблемні питання розвитку науки і техніки по вказаних напрямах. За необхідною інформацією звертатись до редколегії.



# ТОВ «КС Енергія»

# Дніпропетровська обл., м. Новомосковськ, вул. Радянська, 16. т\ф (056) 374 65 78.

E-mail: KS Energy@mail.ru

Виробництво та реалізація деталей контактної мережі, запасних частин для вантажних і пасажирських вагонів.

Ремонт трансформаторів типу ОМ, ЗНОМ, НТМІ.

Виробництво котушок для масляних та швидкодіючих вимикачів.



