
**НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНА
СУМІСНІСТЬ
ТА БЕЗПЕКА НА
ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

**SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL
ELECTROMAGNETIC
COMPATIBILITY
AND SAFETY ON
RAILWAY TRANSPORT**

№ 1 2011

**Видання Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

**Затверджений до друку Вченою радою ДНУЗТ
Протокол № 7 від 31.01.2011 р.**

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор: Гаврилюк В. І. – д.ф.-м.н., проф., ДНУЗТ, Україна

Заст. головного редактора: Сиченко В. Г. – к.т.н., с.н.с., ДНУЗТ, Україна

Члени редколегії:

Бабаєв М. М. – д.т.н., проф., УкрДАЗТ, Україна;

Бадьор М. П. – д.т.н., проф., МГУПС, Росія;

Бойнік А. Б. – д.т.н., проф., УкрДАЗТ, Україна;

Бочков К. А. – д.т.н., проф., БелГУТ, Білорусь;

Гетьман Г. К. – д.т.н., проф., ДНУЗТ, Україна;

Дубинець Л. В. – д.т.н., проф., ДНУЗТ, Україна;

Жуковицький І. В. – д.т.н., проф., ДНУЗТ, Україна;

Заблудовський В. О. – д.т.н., проф., ДНУЗТ, Україна;

Загарій Г. І. – д.т.н., проф., УкрДАЗТ, Україна;

Костін М. О. – д.т.н., проф., ДНУЗТ, Україна;

Саєнко Ю. Л. – д.т.н., проф., ПДТУ, Україна;

Стасюк О. І. – д.т.н., проф., ДЕТУТ, Україна;

Чепцов М. М. – д.т.н., проф., ДонІЗТ, Україна;

Бялонь А. – к.т.н., НТЦ залізн. транспорту, Польща;

Микульський Є. – д.т.н., проф., Силезький технол. університет, Польща

Відповідальний секретар: Гончаров К. В. – к.т.н., доц., ДНУЗТ, Україна

Літературний редактор: Ящук К. І. – ас., ДНУЗТ, Україна

Видання виходить 2 рази на рік

Видається з березня 2011 року

Шановні колеги!

Розвиток нових систем управління та регулювання рухом на залізничному транспорті, що відбувається останнім часом, в тому числі мікроелектронних і комп'ютерних пристроїв автоматики, цифрових телекомунікаційних систем, імпульсних напівпровідникових силових перетворювачів для живлення тягових та допоміжних пристроїв рухомого складу, зробили ще більш актуальною проблему доведення їх безпеки та електромагнітної сумісності. На великий інтерес до проблеми електромагнітної сумісності у світі вказує велика кількість дослідницьких та випробувальних центрів, що працюють з цієї проблеми, та регулярні симпозиуми і конференції, що проводяться їми.

В Україні спеціалізованих журналів з електромагнітної сумісності на залізничному транспорті до сьогодні не було. Вважаю, що випуск такого журналу буде сприяти координації робіт дослідників у цьому напрямку та підвищить безпеку на залізничному транспорті.

Бажаю плідної роботи!
Головний редактор Гаврилюк В. І.

Уважаемые коллеги!

Происходящее в последнее время развитие новых систем управления и регулирования движением на железнодорожном транспорте, в том числе микроэлектронных и компьютерных устройств автоматики, цифровых телекоммуникационных систем, импульсных полупроводниковых силовых преобразователей для питания тяговых и вспомогательных устройств подвижного состава, сделали еще более актуальной проблему доказательства их безопасности и электромагнитной совместимости. На большой интерес к проблеме электромагнитной совместимости в мире указывает большое количество исследовательских и испытательных центров, работающих по этой проблеме, и проводимые ими регулярные симпозиумы и конференции.

В Украине специализированных журналов по электромагнитной совместимости на железнодорожном транспорте до сих пор не было. Полагаю, что выпуск такого журнала будет способствовать координации работы исследователей в этом направлении и повысит безопасность железнодорожного транспорта.

Желаю плодотворной работы!
Главный редактор Гаврилюк В. И.

Dear colleagues!

Development of a new control and regulations railway movement systems, including microelectronic and computer automatic devices, digital telecommunication systems, pulse semiconductor power converters for a electrosupply of traction and auxiliary rolling stock devices, occurring recently, have made even more actual a problem of the proof of their safety and electromagnetic compatibility. A plenty of the research and test centers working on this problem and regular symposiums and conferences, spend by them, specify on great interest to a problem of electromagnetic compatibility in the world.

In Ukraine a special journals on electromagnetic compatibility on railway transportation was not till now. I believe that realization of such journal will promote coordination of work of researchers in this direction and will increase of a railway transport safety.

I wish you fruitful work!
Editor-in-chief Gavrilyuk V. I.

ЗМІСТ

БЕЗПЕКА НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Буряк С. Ю.

Моделювання стрілочного електро-
приводу в середовищі Simulink пакету
Matlab.....6

Завгородній О. В., Гаврилюк В. І.

Забезпечення функціональної безпеки
рейкових кіл в умовах впливу електромаг-
нітних завад від тягової мережі сусідньої
колії на дільницях зі швидкісним
рухом поїздів.....11

Гончаров К. В.

Повышение функциональной безопасности
устройств счета осей
подвижного состава.....16

Рибалка Р. В., Маловічко. В. В.

Удосконалення безпеки сортувальних
гірок.....23

Разгонов А. П., Бондаренко Б.М., Профатилов В. И.

Метод автоматизированного определения
контактного давления реле железнодорож-
ной автоматики.....31

Романцев И. О.

Определение параметров и критериев для
системы автоматического контроля состоя-
ний тональных
рельсовых цепей.....37

Маловічко В. В., Гаврилюк В. І., Рибалка Р. В.

Контроль та діагностування стрілочних
переводів по часовій залежності
струму переводу стрілки без
виключення стрілочного переводу
з експлуатації.....43

Дунаєв Д. В., Романцев І. О.

Аналіз структури відмов і методів вимірю-
вання параметрів
рейкових кіл.....49

CONTENT

SAFETY ON RAILWAY TRANSPORT

Buryak S. U.

The mathematical modeling of
pointwork in the system
Matlab+Simulink.....6

Zavgorodniy A. V., Gavrylyuk V. I.

The ensuring of railway circuit functional
safety in electromagnetic hindrances influence
from neighbouring track traction network on
railways' highways with high-speed
movement.....11

Goncharov K. V.

The increasing of functional safety device
count of the axes of the
rolling stock.....16

Rybalka R. V., Malovichko V. V.

Hump yards safety
improvement.....23

Razgonov A. P., Bondarenko B. M., Profatillov V. I.

The method of the automated
definition of contact pressure of railway
automation relay.....31

Romantsev I. O.

The determination of parameters and options
for the system of tonal frequency railway cir-
cuit automatization
control.....37

Malovichko V. V., Gavrylyuk V. I., Rybalka R. V.

The monitoring and diagnostics of switch
operating apparatus by the time dependence
of point operation current without switching
off the switch operating
apparatus.....43

Dunaev D. V., Romantsev I. O.

The analysis of failures' structure and methods
of track circuit
measurements.....49

Лагута В. В. Тягові розрахунки з використанням векторної оптимізації.....	55
--	----

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ НА
ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

Міщенко Т. М. Метод імовірнісного аналізу випадкових електромагнітних процесів.....	63
--	----

Гончаров Ю. П., Панасенко М. В., Гаврилюк В. І., Сиченко В. Г. Принципи активної фільтрації при побудові сучасних систем електроживлення електричної тяги.....	67
--	----

Сердюк Т. Н., Швець А. В., Иванов В. К. Выделение импульсных сигналов на фоне импульсных помех от силовых сетей.....	77
--	----

Щека В. І. Організація захисту рейкових кіл від електромагнітних завад з боку контактної мережі.....	91
--	----

Бадер М. П. Анализ и синтез электромагнитной совместимости тягового электрооборудования, систем управления и телекоммуникаций.....	93
---	----

Завгородний А. В., Гаврилюк В. І. Расчет импеданса линий электрифицированных железных дорог.....	96
--	----

Панасенко М. В., Гончаров Ю. П., Сиченко В. Г., Хворост М. В., Божко В. В. Сучасні випрямлячі для модернізації тягових підстанцій при впровадженні швидкісного руху.....	102
--	-----

Бялонь А., Градовски П. Польський Національний Європейський Системний План Управління залізницями.....	111
--	-----

Laguta V. V. Traction calculations by vector optimization.....	55
---	----

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ON
RAILWAY TRANSPORT**

Mishchenko T. M. The method of probabilistic analysis of casual electromagnetic processes.....	63
---	----

Goncharov U. P., Panasenko M. V., Gavrylyuk V. I., Sychenko V. G. The active filtration principles at the modern systems of power supply of electric traction construction.....	67
---	----

Serdjuk T. M., Shvets A. V., Ivanov V. K. The assignment of pulse emissions against a background of powerful hindrance from power mains.....	77
--	----

Shcheka V. I. Track circuit protection from contact net electromagnetic hindrances.....	91
---	----

Badyor M. P. The analysis and synthesis of electromagnetic compatibility of traction power supply, control systems and telecommunication.....	93
--	----

Zavgorodniy A. V., Gavrylyuk V. I. The methods of catenary wire and railway lines impedance calculation of electrified railways.....	96
--	----

Panasenko M. V., Goncharov U. P., Sychenko V. G., Hvorost M. V., Bozhko V. V. The modern rectifiers for traction substation modernization in introduction of high-speed movement.....	102
---	-----

Bialon A., Gradowski P. Polish National European railway traffic Management System Plan.....	111
---	-----

О кафедре «Автоматика, телемеханика и связь».....	117	About the chair of «Automatic, telemechanic and connection».....	117
Анотації.....	118	Annotations.....	118

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТІЛОЧНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK ПАКЕТУ MATLAB

Представив д.ф.-м.н., проф. Гаврилюк В. І.

Вступ

В сучасній практиці експлуатації стрілочних переводів їх стан визначається працівниками колії, а стрілочних приводів і гарнітури працівниками дистанції сигналізації та зв'язку. Контроль здійснюється візуально, тому не може дати повноцінної інформації, щодо можливих відхилень від вільного переводу стрілки [1].

В процесі експлуатації на переводі можливе забруднення башмаків, відсутність на них мастила, потрапляння сторонніх предметів між гостряком і рамною рейкою, викривлення гостряків та інші випадки, коли перевід стрілки стає неможливим чи здійснюється уповільнено та ускладнено. Утримання стрілочного приводу передбачає змащення редуктора, контроль затиснення фрикційного зчеплення, перевірку колодок та контактів автоперемикача і т. ін. [1], що в сучасній практиці експлуатації також не перевіряється автоматизовано.

Для підвищення надійності експлуатації стрілочного переводу необхідне застосування системи автоматизованого контролю параметрів стрілочного переводу, яке б дозволило виявляти недоліки в роботі стрілочного переводу під час кожного спрацьовування. Це дасть можливість завчасно усувати причини, які в майбутньому могли б призвести до відмови, що в свою чергу могла б стати причиною затримки руху поїздів.

Діагностування стану стрілочних переводів централізованих стрілок з поста електричної централізації доцільно проводити за кривою струму, що протікає в колі електродвигуна стрілочного електроприводу під час переводу, адже амплітудне значення струму змінюється в залежності від моменту на валу двигуна, який в свою чергу є ре-

зультатом дії сил опору пересуванню гостряків в крайнє положення. До сил, які перешкоджають вільному переведенню стрілки, крім згаданих раніше, можна також віднести нерівномірність розподілу навантаження на привід через нерівність поверхні, що утворює поверхня башмаків, на яку вкладаються гостряки. Крім цього пошкодження можливі і в самому електродвигуні: обриви та короткі замикання в обмотках, несправність підшипника і т. д. [2].

Для розробки діагностичних систем необхідно мати модель об'єкту діагностування в справному стані, а також з можливими (ймовірними) дефектами [4], для того, щоб потім, порівнюючи струмові криві переводу стрілок, які знаходяться в експлуатації, з отриманими раніше зразками струмових кривих переводів стрілок, можна було з певною ймовірністю визначити стан приводу, що діагностується, і виявляти у разі появи дефекти. Ці дефекти можуть бути як вже дослідженими і підтвердженими експлуатаційною практикою [5], так і носити виключно теоретичний характер, що відповідає поглядам проектувальника.

Широке застосування в системах залізничної автоматики знайшли двигуни постійного струму з послідовним збудженням, оскільки вони відповідають усім вимогам, які висуваються до стрілочних двигунів [3].

Метою роботи є розробка математичної моделі стрілочного електроприводу з двигуном постійного струму з послідовним збудженням в системі MATLAB+Simulink (рис. 1).

Математична модель

Математичне моделювання проведено в системі MATLAB+Simulink.

Розроблена схема моделі стрілочного електроприводу, яка наведена на рис. 1.

Схема включає джерело постійної напруги DC Voltage Source для живлення машини, блок From Workspace «Moment» для завдання обертаючого моменту на валу машини й зняття її динамічних характеристик, досліджувану машину постійного струму з послідовним збудженням DC Machine, прилад для виміру змінних стану машини Display, блок Demux, який ділить вхідний вектор на його складові, і прилад Scope для візуального спостереження струмів і напруг, а також кривих перехідних процесів змін швидкості й моменту досліджуваної машини в тому числі й моменту, що задається [6].

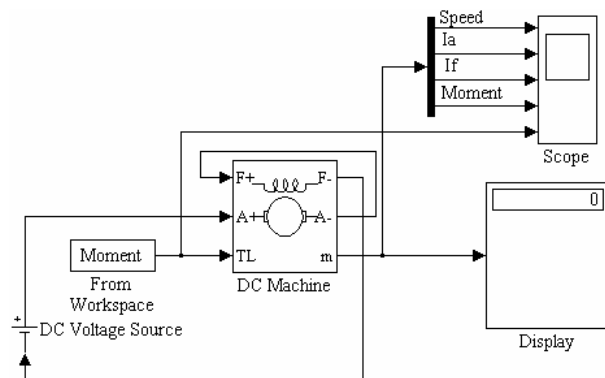


Рис. 1. Модель машини постійного струму з послідовним збудженням

В залежності від навантаження на двигун, яке задається за допомогою блока Moment, на осцилографі (Scope) можна спостерігати часові залежності зміни швидкості обертання валу двигуна (Speed) у рад/с, струму обмотки якоря (I_a), та обмотки збудження (I_f) в А, а також моменту на валу двигуна (Moment), який вимірюється у Н·м [6], що під'єднані до осцилографа через блок Demux, при цьому одночасно спостерігаючи за зміною моменту на валу, що задається.

У створеній математичній моделі в основу методу обробки сигналів покладено аналіз залежності величини амплітуди струму і характеру її зміни у колі двигуна від моменту на його валу. Момент на валу двигуна можна задавати як у вигляді масиву чисел, так і у відповідності до математи-

чних законів, або залежностей, які може створювати і задавати сам проектувальник. При цьому миттєві значення швидкості обертання валу двигуна (рад/с), струму в обмотках збудження і якоря (А), а також моменту на його валу (Н·м) виводяться у вигляді числового значення на Display.

Результати моделювання

Задаючи різні значення моменту на валу двигуна, можна дізнатися поведінку струмової кривої в залежності від характеру навантаження. Якщо, наприклад, навантаження несе логарифмічний характер і може бути описане функцією $y = \ln$ (рис. 2), то реакція моделі буде такою, як зображено на рис. 3.

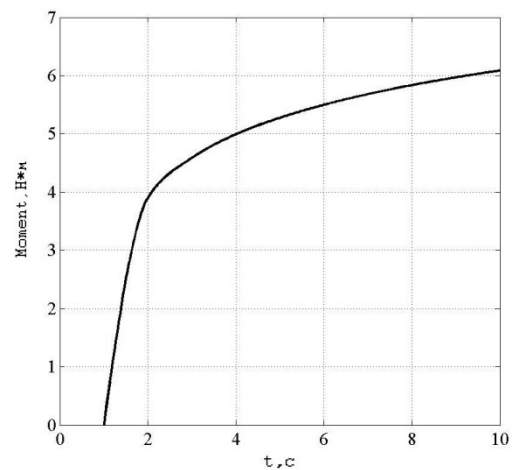
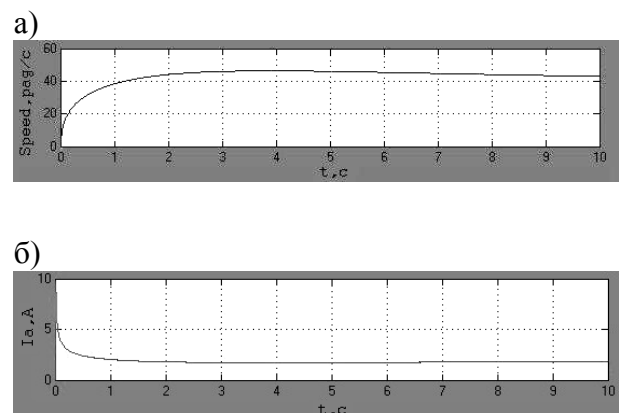


Рис. 2. Характер навантаження на валу двигуна у вигляді логарифмічної функції



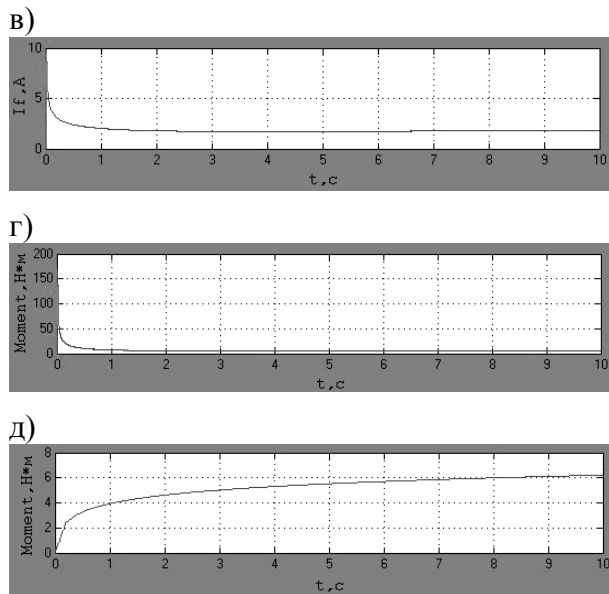


Рис. 3. Часові залежності при навантаженні у вигляді логарифмічної функції:

а – швидкості обертання валу двигуна; б – струму в обмотці якоря; в – струму в обмотці збудження; г – моменту на валу двигуна; д – моменту, що задається як навантаження.

Судячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що швидкість обертання валу двигуна обернено пропорційна моменту, який необхідно розвинути (див. рис. 3, а). Дві наступні осцилограми являють собою часову залежність зміни струму від моменту на валу. Оскільки обмотки з'єднані послідовно, то і струм в них протікає однаковий, тобто $I = I_a = I_f$.

Під час пуску двигуна спостерігається зростання струму, яке в кілька разів перевищує робочий струм (рис. 4).

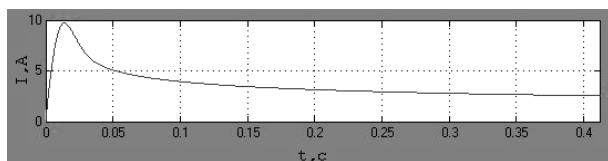


Рис. 4. Часова залежність струму під час пуску двигуна

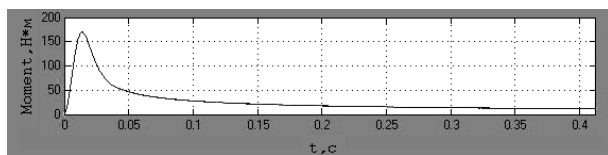


Рис. 5. Момент на валу під час пуску двигуна

Це забезпечує великий пусковий момент, який наведено на четвертій часовій залежності (див. рис. 3, г) і більш наглядно

показано на рис. 5. Зміну моменту на валу двигуна можна описати формулою [3]

$$M = C_M \times I^2, \quad (1)$$

де C_M – постійна, яка залежить від конструкції двигуна;

I – струм у колі двигуна.

На підставі приведених вище осцилограм можна дійти висновку, що робочі характеристики моделі при даному виді навантаження відповідають характеристикам двигунів постійного струму з послідовним збудженням [3]. З'ясуємо тепер як поводитиметься модель при навантаженнях, що задаються значеннями, які підкорюються іншим законам розподілу.

Придамо навантаженню характер експоненціальної функції виду $f(x) =$ (рис. 6), реакція моделі показана на рис. 7.

При даному виді навантаження на основі отриманих осцилограм (див. рис. 7) можна зробити висновки, що реакцією моделі на зростання моменту на валу двигуна є пропорційне зростання струму в обмотках двигуна (рис. 7, б та 7, в) і, як наслідок, збільшення моменту на валу двигуна (рис. 7, г), та відповідно зменшення числа обертів вала (рис. 7, д). Як і в попередньому досліді, струм в обмотках та момент на валу під час пуску двигуна також мають значення, які в декілька разів перевищують робочі. Це свідчить про адекватну поведінку моделі при завданні моменту на валу двигуна у вигляді навантаження, що підкорюється експоненціальному закону. Отже результати обох дослідів, в яких навантаження носило різний характер, співпадають.

Особливістю двигунів постійного струму з послідовним збудженням є те, що їх не можна вмикати без навантаження, тому що швидкість обертання валу збільшується настільки, що досягає неприпустимо великих значень і стає причиною виходу з ладу двигуна [7], який фактично йде в рознос. Перевіriamo можливість цього процесу на даній моделі.

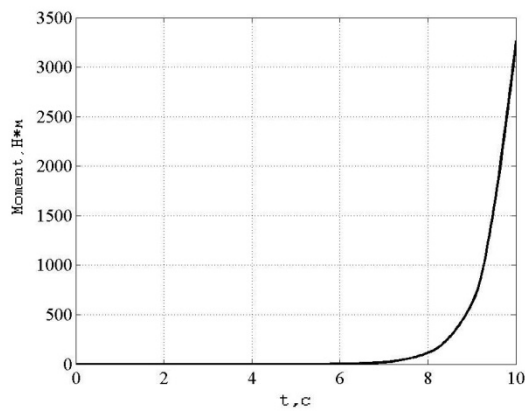


Рис. 6. Характер навантаження на валу двигуна у вигляді експоненціальної функції

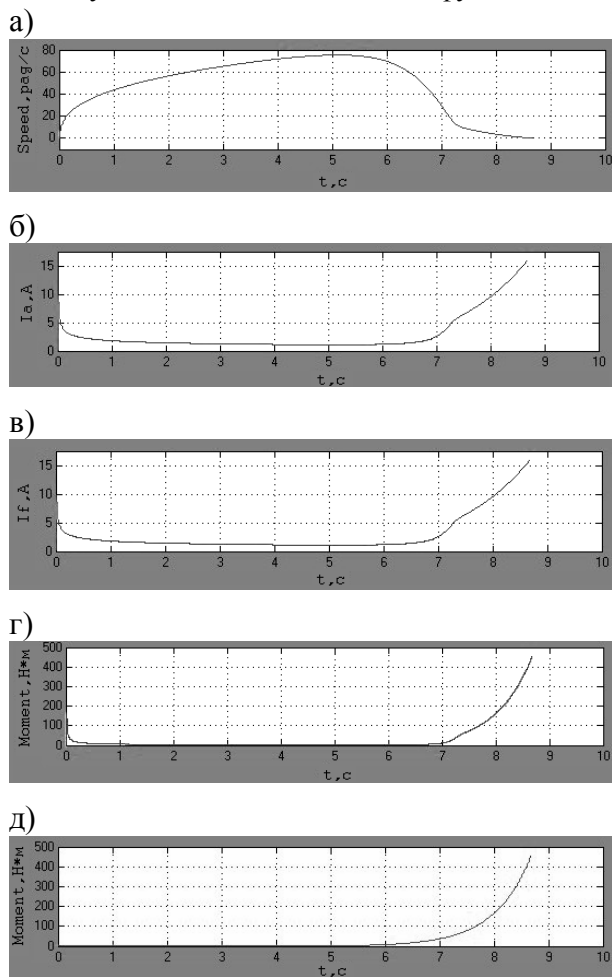


Рис. 7. Часові залежності при навантаженні у вигляді експоненціальної функції:
а – швидкості обертання валу двигуна; б – струму в обмотці якоря; в – струму в обмотці збудження; г – моменту на валу двигуна; д – моменту, що задається як навантаження.

Отже при роботі моделі в режимі холостого ходу часові залежності параметрів будуть такими, як показано на рис. 8.

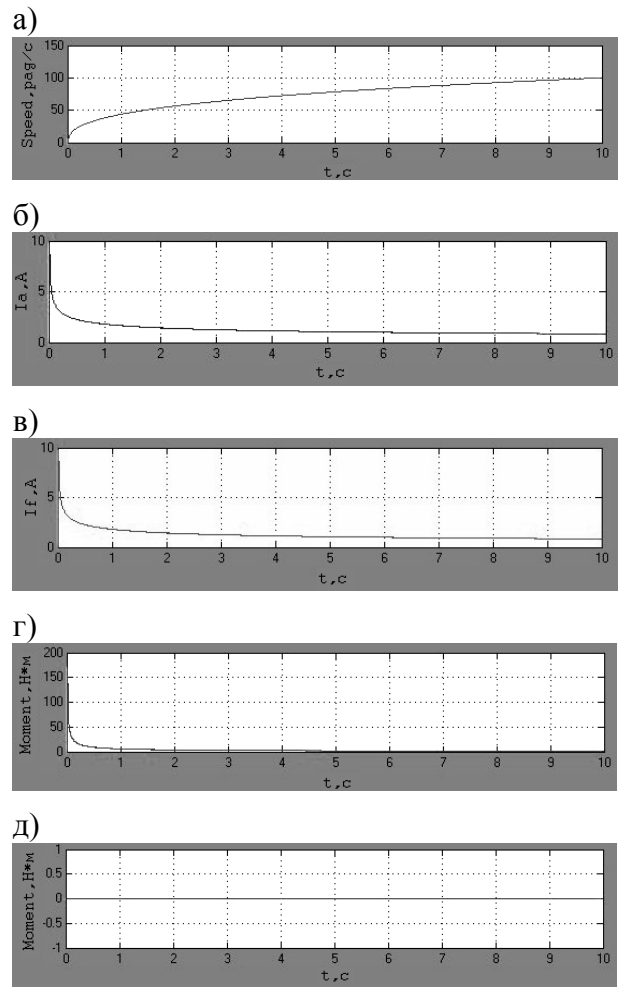


Рис. 8. Часові залежності при холостому ході:
а – швидкості обертання валу двигуна; б – струму в обмотці якоря; в – струму в обмотці збудження; г – моменту на валу двигуна; д – моменту, що задається як навантаження.

З осцилограм можна встановити, що швидкість обертання валу двигуна поступово і неухильно збільшується і навіть за 10 с не набирає свого максимального значення, що в дійсності призводить до руйнування двигуна.

При цьому момент на валу майже відсутній, а струм в обмотках стає дедалі меншим.

На основі цих спостережень про відповідність моделі її реальним аналогам, можна дійти висновку, що параметри даної моделі відповідають реальним і в режимі холостого ходу.

Висновки

Розроблено математичну модель стрілочного електроприводу в системі MATLAB+Simulink.

Проведено моделювання з аналізом отриманих результатів.

Одержано залежності швидкості обертання вала двигуна, струму в обмотках і моменту на валу від характеру навантаження.

Результати моделювання задовільнено співпадають з результатами експериментальних досліджень.

Бібліографічний список

1. ЦШЕОТ 0012 [Текст]: інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокуваннях – К.: Укрзалізниця, 1998. – 72 с.
2. Маловічко, В. В. Вивчення діагностичних ознак для автоматизованого контролю технічного стану стрілочних електродвигунів [Текст] / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилук // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 16. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007.
3. Сапожников, В. В. Станционные системы автоматики и телемеханики [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Сапожников, Б. Н. Елкин, И. М. Кокурин и др.; под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 2000. – 432 с.
4. Сапожников, В. В. Основы технической диагностики [Текст]: учебное пособие

для студентов вузов ж.-д. транспорта / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников. – М.: Маршрут, 2004. – 318 с.

5. Перникис, Б. Д. Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ [Текст] / Б. Д. Перникис, Р. Ш. Ягудин. – М.: Транспорт, 1984. – 224 с.
6. Герман-Галкин, С. Г. Электрические машины: лабораторные работы на ПК [Текст] / С. Г. Герман-Галкин, Г. А. Кардонов. – СПб.: КОРОНА принт, 2003. – 256 с.
7. Вольдек, А. И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений [Текст] / А. И. Вольдек – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

Ключові слова: математичне моделювання, стрілочний електропривід, надійність експлуатації, двигун.

Ключевые слова: математическое моделирование, стрелочный электропривод, надежность эксплуатации, двигатель.

Key words: mathematical modeling, pointwork, exploiting reliability, engine.

Надійшла до редколегії 24.01.2011.

Прийнята до друку 26.01.2011.

ЗАВГОРОДНІЙ О. В. – головний інженер (Придніпровська залізниця)
ГАВРИЛЮК В. І. – д.ф.-м.н., професор (ДНУЗТ)

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ РЕЙКОВИХ КІЛ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД ВІД ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ СУСІДНЬОЇ КОЛІЇ НА ДІЛЬНИЦЯХ ЗІ ШВИДКІСНИМ РУХОМ ПОЇЗДІВ

Проблема забезпечення функціональної безпеки РК в умовах впливу електромагнітних завад від тягової мережі стає ще більш актуальною з впровадженням в Україні прискореного, а у подальшому швидкісного руху поїздів, використанням нових типів локомотивів з асинхронним тяговим двигуном (АТД).

Електрифіковані залізниці зі швидкісним рухом поїздів є джерелом потужних електромагнітних завад, що впливають на функціональну безпеку систем залізничної автоматики та можуть привести до небезпечних або заважаючих збоїв в їх роботі. Наявність в Україні залізниць з різними родами тягового струму піднімає ще одне суттєве для організації швидкісного руху питання, яке пов'язане зі зміною типу електротяги при проїзді станції стикування. Технологічні операції по зміні локомотиву на станціях займають значний час, потребують і додаткових експлуатаційних витрат. Вирішення проблеми скорочення часу проїзду станцій стикування можна за рахунок використання швидкісних локомотивів з подвійним електроживленням від мережі змінного і постійного струму. Технологічні операції проїзду станції стикування зводяться при цьому до переключення роду тягового струму в тяговій мережі станції стикування і на локомотиві, а також до переключення локомотивних пристроїв безпеки (автоматичної локомотивної сигналізації) на інший кодовий струм.

Це рішення не усуває багатьох організаційних та технічних питань. Висока інтенсивність руху вантажних, пасажирських, приміських поїздів в перспективних напрямках швидкісного руху, значна зношеність

інфраструктури залізничного транспорту в Україні, а також досвід розвинутих країн вказують на доцільність організації швидкісного руху по окремих коліях.

Метою роботи є забезпечення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах впливу електромагнітних завад від тягової мережі сусідньої колії на дільницях зі швидкісним рухом поїздів. Запропоновано нову концепцію організації швидкісного руху в Кримському напрямку на Придніпровській залізниці (у 2004 році). Технічне рішення зводиться до подовження швидкісної магістралі з електротягою змінного струму за станцію стикування до кінцевої станції призначення швидкісного маршруту.

Організація швидкісного руху по існуючим магістралям з електротягою постійного струму не вирішує також технічні проблеми, пов'язані з більш жорсткими вимогами по утриманню колії, системи електропостачання, технічних засобів регулювання руху поїздів на швидкісних магістралях. До того ж вимоги до технічних засобів забезпечення безпеки на дільницях швидкісних магістралей з електротягою змінного та постійного струму мають відмінності. Рух швидкісних поїздів на дільницях з електротягою постійного струму має привести до збільшення струму в тяговій мережі до 5-10 кА, що потребує повне переобладнання контактної мережі і зворотної тягової мережі (дросель-трансформаторів, рейкових і міжрейкових з'єднувачів та ін.). При таких значеннях тягового струму та високих швидкостях руху існуючі системи сигналізації, централізації та блокування не зможуть забезпечити необхідний рівень безпеки, внаслідок частих збоїв в роботі РК і АЛСН під

дією тягового струму. Запропонований автором підхід до організації швидкісного руху дозволяє уніфікувати технічні рішення по організації швидкісного руху і підвищити безпеку руху поїздів.

Але при запропонованій концепції організації руху з'являються дільниці зближення і паралельного проходження колій з різними родами тягового струму (постійного і змінного). Забезпечення функціональної безпеки РК в умовах впливу ЕМЗ тягової мережі сусідньої швидкісної колії з електротягою змінного струму є новою малодослідженою проблемою.

В літературі запропоновано методи захисту кабельних ліній і металевих конструкцій від впливу тягового струму [1-9]. Але електромагнітний вплив на рейкові кола суміжної колії майже не розглянуто. Частково це пов'язано з тим, що при типовому обладнанні залізничних дільниць з однаковими тяговими мережами на сусідніх коліях, електромагнітний вплив однієї колії на іншу майже не впливає на функціональну безпеку рейкових кіл.

Зовсім інша ситуація для електрифікованих залізниць з різним родом тягового струму на сусідніх коліях при їх зближенні і паралельному проходженні. Тяговий струм колії змінного струму частотою 50 Гц та його гармоніки в тональному діапазоні частот наводять індуктивну е.р.с. і струм в рейковій колії з електротягою постійного струму. Враховуючи, що РК на дільницях з тягою постійного струму мають частоту сигнального струму 50 Гц, або частоти, що відповідають ТРЦЗ, електромагнітний вплив завад від тягової мережі змінного струму може викликати небезпечний або заважаючий збій в роботі рейкових кіл.

Для зменшення електромагнітного впливу електрифікованих залізниць на лінії зв'язку було запропоновано використовувати відсмоктуючі трансформатори, автотрансформатори [6], а також екрануючий провід (ЕП) [8-13].

Спосіб з ЕП, а також з додатковим підсилюючим проводом було запропоновано в [8,9]. Останнім часом систему з екрануючим і підсилюючим проводом (ЕПП) широко рекламують для використання Європейські фірми. В Україні залізнична дільниця Тернопіль - Красне обладнана тяговим електропостачанням з ЕПП [13]. Слід зазначити, що сфера економічно доцільного застосування тягової мережі з ЕПП значно ширше і не обмежується тільки зменшенням впливу завад від ЕРС. Швидкісний поїзд потужністю 8-16 МВт являє собою зосереджене навантаження. Тяговий струм поїзду значний, тому необхідно зменшення опору контактної мережі за рахунок використання ЕПП. Це дозволяє збільшити відстань між тяговими підстанціями, а отже зменшити їх кількість.

Типова схема розміщення пасивного екрануючого проводу (ЕП) з підсилюючим проводом (ПП) наведена на рис. 1 [8-13]

Між провідником ПП і контактною підвіскою в межах анкерної ділянки облаштовують три електричних з'єднання. Найбільш ефективною є система з активним екрануючим проводом, який розміщується між контактною мережею та лінією, що знаходиться під впливом цієї мережі.

Пасивний ЕП екранує завади, але не враховує можливий спектр завад від сучасних локомотивів. Більш перспективним в цьому напрямку є запропонований для зменшення електромагнітних завад активний екрануючий провід, що живиться від контактної мережі суміжної лінії за допомогою пристрою компенсації електромагнітних завад [11]. Пристрій складається з датчика гармонік тягового струму, пристрою обробки сигналів, блоку регуляторів зсуву фази, масштабуючих підсилювачів і регулюємого джерела струму. Пристрій формує компенсуючий струм в екрануючому проводі. Це дозволяє знизити завади в лініях зв'язку приблизно у 2 рази.

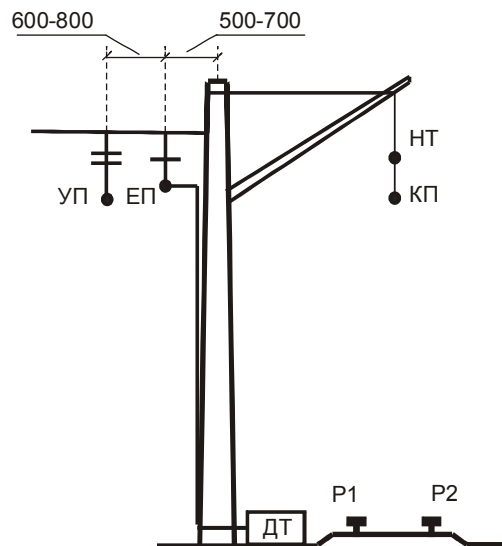
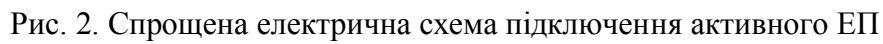


Рис. 1. Типова схема розміщення пасивного екрануючого проводу (ЕП) з підсилюючим проводом ПП (на рисунку позначений як УП)

Необхідності компенсації електромагнітного впливу гармонік тягової мережі на рейкові кола своєї колії, як правило, не виникає тому, що кондуктивні завади в рейкових лініях в зоні проходження локомотиву значно більші, ніж індуктивні. До того ж рейкові лінії симетрично розташовані відносно контактного проводу. Інша справа для двокільної дільниці. Контактна мережа однієї колії впливає через електромагнітне поле на рейкові кола суміжної колії. Особливо небезпечним такий вплив є, коли колія з тягою змінного струму частотою 50 Гц, 27,5 кВ, по якій рухаються швидкісні поїзди з потужністю 0,8-1,6 МВт наближається і проходить паралельно на дільницях зближення з колією постійного струму, що має сигнальний струм автоблокування і АЛС 50 Гц. Пасивні і активні екрануючі проводи компенсують електромагнітні завади в рейкових лініях, але ефективність компенсації завад в рейковій лінії є нижчою, ніж в лініях зв'язку. Це пов'язано з тим, що рейкові лінії, на відміну від ліній зв'язку електрично з'єднані з землею через опір ізоляції РЛ і, відповідно, струм в рейках не є однаковим по довжині лінії. До того ж рейкова лінія сегментована на окремі рейкові кола, частоти сигнального струму в яких також можуть відрізнятися. Відповідно для більш точної компенсації електромагнітного впливу гармонік тягового струму на рейкові кола необхідно змінювати

гармонійний склад компенсуючого струму по довжині лінії відповідно до струму завад в рейковій лінії. В роботі запропоновано такий регулюючий пристрій для компенсації завад в рейковій лінії. За основу, як прототип, обрано пасивний екрануючий провід [8-13] та компенсуючий пристрій [13]. Коротко суть розробленого компенсуючого пристрою зводиться до наступного.

Пасивний екрануючий провід з'єднується із середніми точками дросель-трансформаторів безпосередньо або через ізолюючі трансформатори на відстанях, що забезпечують безпеку рейкових кіл. Активний ЕП під'єднується до рейкової лінії через регулюючі елементи (рис. 2). В запропонованому в роботі пристрої сигнал, пропорційний струму завади знімається після колійного фільтра Φ рейкового кола на вході колійного приймача ПП за допомогою безконтактного датчика, наприклад датчика струму на ефекті Холла (рис. 3). Для усунення впливу сигнального струму автоблокування на результати вимірювання електричних завад, запропоновано включати контролюючий датчик через тильні контакти колійного реле або його повторювача в період пауз сигнального струму. Сигнал, пропорційний струму завад, через перетворювач подається на вхід регулюючого елементу РЕ, що змінює струм в екрануючому про-



Проаналізовано проблему забезпечення функціональної безпеки РК в умовах впливу електромагнітних завад від тягової мережі на дільницях зі швидкісним рухом поїздів. Запропоновано нову концепцію організації швидкісного руху на магістраліз, що прохо-

Для компенсації електромагнітного впливу гармонік тягового струму на рейкові кола сусідньої колії запропоновано регулюючий пристрій для компенсації завад

Бібліографічний список

1. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Карякин, Р. Н. Тяговые сети переменного тока [Текст] / Р. Н. Карякин. – М.: Транспорт, 1967. – 279 с.
3. Бадер, М. П. Экспериментальное исследование гармонического состава тока в тяговой сети и рельсовых цепях [Текст] / М. П. Бадер // Межвузовский сборник научных трудов. – М: МИИТ. – 1984. – №756 – С.17-20.
4. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость [Текст] / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС. – 2002. – 638 с.
5. Косарев, А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока [Текст] / А. Б. Косарев. – М.: Интекст, 2004. – 272 с.
6. Павлов, И. В. Отсасывающие трансформаторы в тяговых сетях переменного тока [Текст] / И. В. Павлов. – М., 1965.
7. Ермоленко, Д. В. Улучшение электромагнитного воздействия тиристорного подвижного состава и системы тягового электроснабжения [Текст] / Д. В. Ермоленко, В. И. Павлов // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – №8. – С. 25 – 30.
8. Бочев, А. С. Электротяговая сеть с усиливающим и обратным проводами [Текст] / А. С. Бочев, В. В. Мунькин, Е. П. Фигурнов // Железные дороги мира. – 1997. - №11. - С. 8-12.
9. Бочев, А. С. Эффективность экранирующих проводов многопроводной тяговой сети переменного [Текст] / А. С. Бочев, Т. П. Добровольскис, В. А. Мишель // Вестник ВНИИЖТа. - 1990. - № 8. - С. 17-20.
10. Патент РФ 2186694 (В60М3/00, Н02J3/01) Бочев А.С.; Устименко И.В. Устройство для снижения электромагнитных влияний на линии связи .10.08.2002
11. Мунькин, В. В. Электротяговая сеть повышенной эффективности [Текст] / В. В. Мунькин, А. С. Бочев, Е. П. Фигурнов // Железнодорожный транспорт. – 1997. – № 11. – С. 11-15.
12. Корниенко, В. В. Испытания тяговой сети с экранирующими и усиливающими проводами [Текст] / В. В. Корниенко // Железнодорожный транспорт Украины. 2001. – № 5. – С. 11-14.
13. Добровольскис, Т. П. Электромагнитные процессы в тяговых сетях переменного тока с экранирующими и усиливающими проводами [Текст] / Т. П. Добровольскис, А. Н. Артюх, А. В. Косарев, Б. И. Косарев / Вестник ВНИИЖТа, 1992. – № 2. – С. 21-23.

Ключевые слова: организация скоростного движения, индуктивные помехи, компенсирующее устройство.

Ключові слова: організації швидкісного руху, індуктивні завади, компенсуючий пристрій.

Key words: organization of high-speed movement, inductive handicapes, compensating device.

Надійшла до редколегії 9.12.2010.

Прийнята до друку 13.12.2010.

ПОВЫШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УСТРОЙСТВ СЧЕТА ОСЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Представил д.т.н., проф. Бойник А. Б.

Введение

Функциональная безопасность систем железнодорожной автоматики во многом зависит от устройств, используемых для контроля свободности участка, в качестве которых в большинстве систем используются рельсовые цепи. В ряде случаев (при контроле малодеятельных участков, длинных перегонов, участков с пониженным сопротивлением балласта и др.) применение рельсовых цепей нецелесообразно или затруднительно. В этих случаях для контроля участка можно использовать устройства счета осей подвижного состава (УСО ПС), первичными элементами которых являются точечные путевые датчики (ТПД).

При разработке УСО ПС необходимо определить требования к ним по обеспечению необходимого уровня безопасности. Под безопасностью систем железнодорожной автоматики (СЖАТ) понимают их свойство непрерывно сохранять исправное, работоспособное или защитное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки [1,2]. В целом проблему обеспечения безопасности необходимо рассматривать как часть общей проблемы обеспечения надежности. Выработка требований к СЖАТ по обеспечению безопасности подразумевает определение критериев опасного отказа, параметров и уровня безопасности, а также концепции безопасности. В качестве концепции безопасности для УСО ПС в первом приближении можно принять концепцию, сформулированную для микроэлектронных систем, согласно которой одиночные дефекты аппаратных и программных средств не должны приводить к опасным отказам, а должны обнаруживаться с заданной вероятностью на рабочих и тестовых воздействиях не позднее, чем в системе возникнет второй дефект [1,2]. Под

отказом УСО ПС будем понимать любую ошибку в подсчете числа проследовавших осей. Поскольку для УСО ПС при общем рассмотрении без учета особенностей конкретной схемы, в которой возможно его применение, невозможно определить какая из ошибок счета осей приведет к опасной ситуации, будем считать каждую ошибку в подсчете осей опасным отказом. Такое предположение приводит к заниженной оценке безопасности УСО ПС. Под параметром безопасности будем понимать достоверность счета, а под критерием опасного отказа – нарушение достоверности счета осей подвижного состава. При определении требуемого уровня безопасности УСО ПС необходимо исходить из существующих уровней безопасности для релейных СЖАТ.

На достоверность информации, получаемой от точечных путевых датчиков, влияет целый ряд случайных факторов, в том числе – механические воздействия со стороны подвижного состава, климатические факторы (температура, влажность), различие колес подвижного состава по типу, степени износа и т.д. Кроме этого, в области расположения УСО ПС действуют различные посторонние электромагнитные поля, источниками которых служат высоковольтные линии электропередач, контактная сеть, рельсовые линии, подвижной состав, близко расположенные радиостанции, различные электротехнические устройства (электромагнитные реле, трансформаторы, электродвигатели). Вследствие этого совместно с сигналами от точечных путевых датчиков (ТПД) на вход приемника УСО ПС поступают различные помехи, что снижает достоверность счета осей. Одним из эффективных способов уменьшения влия-

ния различных негативных воздействий на УСО ПС является использование дифференциальных ТПД. В работе [3] рассмотрен вопрос обнаружения сигнала от односекционного ТПД на фоне белого гауссового шума. В [4] рассмотрен вопрос синтеза устройства для обнаружения оси подвижного состава по сигналам от двух независимых ТПД.

Цель работы

Целью данной работы является синтез помехоустойчивого приемного устройства для обнаружения сигнала от электромагнитного дифференциального ТПД на фоне помех, что позволит повысить достоверность счета осей и, следовательно, повысить функциональную безопасность УСО ПС.

Синтез оптимального приемного устройства

Электромагнитный дифференциальный ТПД (рис. 1) содержит передающую катушку, подключенную к генератору, и две дифференциально включенных приемных катушки, подключенных к приемному устройству. Параллельно катушкам включены конденсаторы, обеспечивающие настройку контуров в резонанс с частотой генератора. При прохождении оси подвижного состава над ТПД, на его выходе появляется высокочастотный двуимпульсный сигнал. Для решения задачи обнаружения нужно аппроксимировать данный сигнал аналитической функцией. Для этого была измерена зависимость выходного сигнала ТПД от положения имитатора колеса относительно центра ТПД (рис. 2).

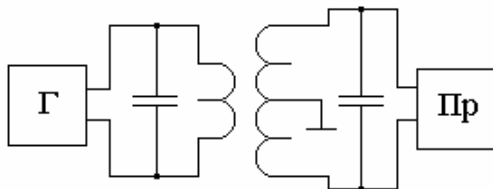


Рис. 1. Структурная схема электромагнитного дифференциального ТПД

Как видно из рис. 2 при аппроксимации каждого сигнального импульса гауссовой

кривой аппроксимирующая функция удовлетворительно согласуется с экспериментальными точками.

Таким образом, сигнал от ТПД можно описать выражением

$$s(t) = A \left(\exp \left\{ \frac{-(m(t-t_s))^2}{2a^2} \right\} - \exp \left\{ \frac{-(m(t-t_s)-\tau)^2}{2a^2} \right\} \right) \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала, t_s – время появления сигнала, τ – интервал между импульсами (при $m=I$), a – длительность импульсов по уровню 0.606 (при $m=I$), m – коэффициент, зависящий от скорости движения колеса, ω_0 – рабочая частота датчика, $0 \leq t \leq T$, T – интервал наблюдения. Параметры a и τ зависят от размеров катушек ТПД.

Параметры A , m , t_s являются случайными величинами. Так как амплитуда сигнала A зависит от целого ряда независимых случайных факторов (зазора между колесом и поверхностью ТПД, поперечного смещения колеса относительно центра ТПД и др.), то будем считать, что амплитуда распределена по нормальному закону. Предположим также, что параметры a и τ распределены равномерно

$$p(A) = \frac{1}{\sigma_A \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ \frac{-(A-m_A)^2}{2\sigma_A^2} \right\}, \quad (2)$$

$$p(m) = \begin{cases} \frac{1}{m_{\max} - m_{\min}}, & m \in [m_{\max}, m_{\min}] \\ 0, & m \notin [m_{\max} - m_{\min}] \end{cases}, \quad (3)$$

$$p(t_s) = \begin{cases} \frac{1}{t_{s\max} - t_{s\min}}, & t_s \in [t_{s\max}, t_{s\min}] \\ 0, & t_s \notin [t_{s\max} - t_{s\min}] \end{cases}. \quad (4)$$

На вход приемника поступает аддитивная смесь сигнала и помехи

$$\xi(t) = \theta \cdot s(t) + n(t), \quad (5)$$

где θ – параметр обнаружения ($\theta=1$ – есть сигнал, $\theta=0$ – нет сигнала). Рассмотрим случай, когда $n(t)$ представляет собой белый гауссовский шум с нулевым матема-

тическим ожиданием и корреляционной функцией

$$R_n(t_1, t_2) = \frac{N}{2} \delta(t_2 - t_1), \quad (6)$$

где N – односторонняя спектральная плотность шума, $\delta(x)$ – дельта-функция.

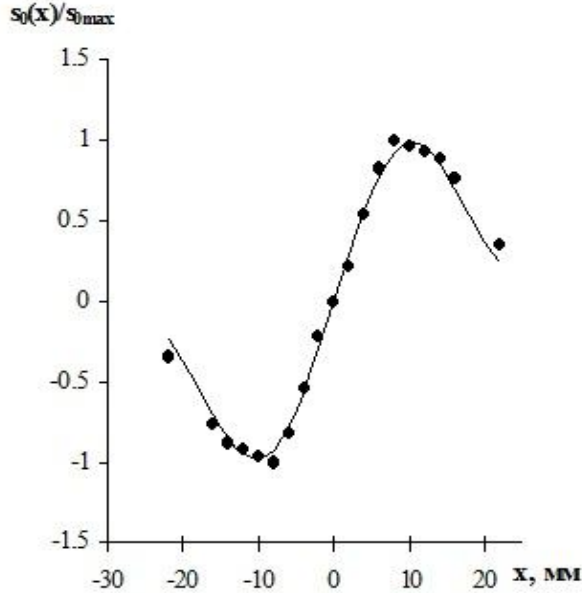


Рис. 2. Выходной сигнал ТПД (точки – эксперимент, линия – аппроксимирующая функция)

В работе [5] было показано, что для определения значения параметра θ , т.е. для обнаружения сигнала от ТПП, необходимо сравнить с некоторым порогом h корреляционный интеграл X

$$X > h(\theta = 1), \quad X < h(\theta = 0), \quad (7)$$

$$\text{где } X = \int_0^T s(t) \cdot \xi(t) dt.$$

Для нахождения интеграла X можно использовать согласованный фильтр [5]. Временная инвариантность фильтра устраняет необходимость учитывать время появления сигнала t_s .

По определению, согласованный фильтр имеет следующую частотную характеристику [5]

$$K(j\omega) = BS^*(j\omega) \exp\{-j\omega t_0\}, \quad (8)$$

где $S^*(j\omega)$ – величина комплексно сопряженная со спектром сигнала $s(t)$, B – постоянная, характеризующая усиление фильтра, t_0 – время появления максимума на выходе фильтра.

$$R_n(t_1, t_2) = \frac{N}{2} \delta(t_2 - t_1)$$

Применив преобразование Фурье к сигналу (1), определим его спектр

$$S(j\omega) = A \frac{\sqrt{2\pi}a}{m} \exp\left\{-\frac{(\omega - \omega_0)^2 a^2}{2m^2}\right\} \times \exp\{-j(\omega - \omega_0)t_s\} \left[1 - \exp\frac{-j(\omega - \omega_0)\tau}{m}\right]. \quad (9)$$

Полагая $t_0 = t_s + \frac{\tau}{m}$, по формуле (8) находим комплексную частотную характеристику фильтра

$$K(j\omega) = BA \frac{\sqrt{2\pi}a}{m} \exp\left\{-\frac{(\omega - \omega_0)^2 a^2}{2m^2}\right\} \times \exp\{-j\omega t_s\} \left[\exp\frac{-j\omega\tau}{m} - \exp\frac{-j\omega_0\tau}{m}\right]. \quad (10)$$

Как видно из выражения (10) частотная характеристика согласованного фильтра зависит от коэффициента m , т.е. от скорости движения подвижного состава. Предположим, что коэффициент m является детерминированной величиной. Тогда по частотной характеристике (10) синтезируем функциональную схему согласованного фильтра (рис. 3,а). Он состоит из усилителя, полосового фильтра, фазосдвигающих цепей, линии задержки и вычитающего устройства. Наличие фазосдвигающих цепей усложняет настройку такого фильтра.

Более простой согласованный фильтр получается для обнаружения сигнала (1) после его детектирования. Комплексная частотная характеристика такого фильтра определяется выражением

$$K_0(j\omega) = BA \frac{\sqrt{2\pi}a}{m} \exp\left\{-\frac{\omega^2 a^2}{2m^2}\right\} \times \left[\exp\frac{-j\omega\tau}{m} - 1\right], \quad (11)$$

Функциональная схема приведена на рис. 3,б.

С учетом случайного характера величины m оптимальный приемник должен строиться по многоканальной или адаптивной схеме. Многоканальный приемник содержит ряд согласованных фильтров для различных возможных значений величины m . В адаптивном приемнике перед обработкой принятого колебания производится оценка величины m . Однако, такие устройства требуют больших аппаратных затрат.

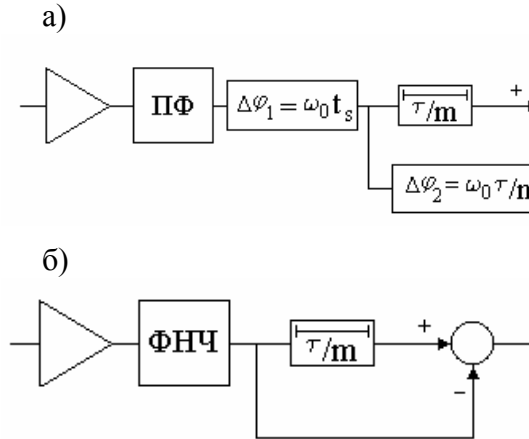


Рис. 3. Функциональные схемы согласованных фильтров:

а – для приемника без детектора; б – для приемника с детектором

Квазиоптимальный приемник для обнаружения выходного сигнала дифференциального ТПД

Для практических целей можно рекомендовать квазиоптимальный приемник, функциональная схема которого приведена на рис. 4. Он состоит из синхронного детектора, усилителя, фильтра низких частот, пороговых элементов. Использование синхронного детектора и двух пороговых элементов позволяет контролировать направление движения транспортного средства. Фильтр низких частот имеет характеристику, согласованную со спектральной характеристикой сигнала на выходе синхронного детектора при максимально возможной скорости движения транспортного средства. Частотная характеристика такого фильтра имеет вид

$$K(j\omega) = B \exp\left\{-\frac{\omega^2 a^2}{2M^2}\right\} \exp\{-j\omega t_d\}, \quad (12)$$

где t_d – задержка фильтра, $M = m_{\max}$.

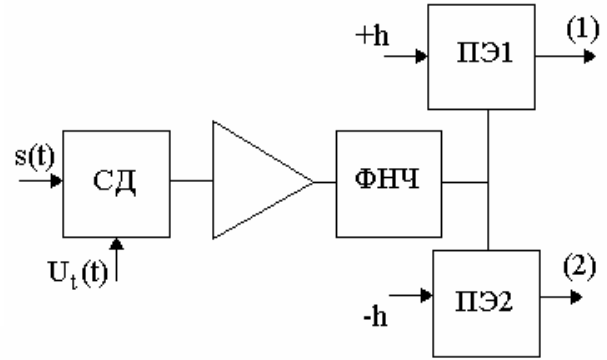


Рис. 4. Функциональная схема квазиоптимального приемника

Определение вероятности ошибки при обнаружении сигнала от дифференциального ТПД

При обнаружении сигнала от ТПД возможны ошибки двух видов: 1) шум превосходит порог и принимается неправильное решение о наличии сигнала; 2) уровень сигнала ниже порогового уровня и принимается ошибочное решение об отсутствии сигнала. Определим вероятность общей ошибки для квазиоптимального приемника. Для этого необходимо знание вероятностных характеристик случайной величины на входе пороговых элементов при наличии полезного сигнала и в его отсутствие. Пусть сигнал от ТПП присутствует. Тогда с выхода ФНЧ на вход пороговых элементов поступает аддитивная смесь сигнала и помехи

$$q_1(t) = q_s(t) + q_n(t), \quad (13)$$

где $q_s(t)$ – сигнальная составляющая, $q_n(t)$ – составляющая помехи. Найдем сигнальную составляющую $q_s(t)$

$$q_s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(j\omega) S_0(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (14)$$

где $K(j\omega)$ – частотная характеристика ФНЧ (12), $S_0(j\omega)$ – спектр выходного сигнала синхронного детектора. Будем считать, что задержка фильтра равна нулю ($t_d=0$), а постоянная B , характеризующая усиление фильтра, равна единице. Вычислив интеграл (14), получим

$$q_s(t) = A \frac{M}{\sqrt{m^2 + M^2}} \left[\exp \left\{ -\frac{M^2 m^2 (t - t_s)^2}{2a^2 (m^2 + M^2)} \right\} - \exp \left\{ -\frac{M^2 m^2 (t - t_s - \tau/m)^2}{2a^2 (m^2 + M^2)} \right\} \right] \quad (15)$$

Определим вероятностные характеристики напряжения q_1 на выходе ФНЧ в момент времени $t=t_s$, т.е. при максимуме полезного сигнала

$$q_1 = q_s + q_n, \quad (16)$$

где $q_s = A \frac{M}{\sqrt{m^2 + M^2}}$ – максимальное значение $q_s(t)$.

Расчеты показывают, что распределение случайной величины q_s при $M=m_{\max}$ близко к нормальному. Числовые характеристики случайной величины q_s , как функции двух независимых случайных величин A и m , определяются выражениями [6]

$$m_{qs} = m_A m_y, \quad (17)$$

$$\sigma_{qs}^2 = (\sigma_A^2 + m_A^2)(\sigma_y^2 + m_y^2) - m_A^2 m_y^2, \quad (18)$$

где

$$m_y = \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \frac{M}{\sqrt{m^2 + M^2}} p(m) dm,$$

$$\sigma_y^2 = \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \left(\frac{M}{\sqrt{m^2 + M^2}} - m_y \right)^2 p(m) dm.$$

Так как ФНЧ представляет собой линейную систему, то величина q_n распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией [6]

$$\sigma_{qn}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{N}{2} K^2(\omega) d\omega = \frac{MN}{4\sqrt{\pi}a}, \quad (19)$$

где $K(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика ФНЧ.

Величина q_1 , как сумма двух независимых гауссовых случайных величин, также является гауссовой [6]

$$p_1(q_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{q_1}} \exp \left\{ -\frac{(q_1 - m_{q_1})^2}{2\sigma_{q_1}^2} \right\}, \quad (20)$$

где

$$m_{q_1} = m_{qs} + m_{qn} = m_{qs},$$

$$\sigma_{q_1}^2 = \sigma_{qs}^2 + \sigma_{qn}^2.$$

В отсутствие сигнала от ТПП на вход пороговых элементов поступает напряжение

$$q_0 = q_n, \quad (21)$$

плотность вероятности которого

$$p_0(q_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{qn}} \exp \left\{ -\frac{q_0^2}{2\sigma_{qn}^2} \right\}. \quad (22)$$

Вероятность общей ошибки определяется выражением

$$p_e = p_{pr0} \int_h^{\infty} p_0(q_0) dq_0 + p_{pr1} \int_{-\infty}^h p_1(q_1) dq_1, \quad (23)$$

где p_{pr0} , p_{pr1} – априорные вероятности отсутствия и наличия сигнала от ТПД. Как видно из выражения (23), вероятность общей ошибки зависит от значения порогового уровня h .

По полученному математическому описанию с помощью пакета MathCad были рассчитаны и построены зависимости вероятности ошибки от значения порогового уровня h при различных уровнях помехи (рис. 5).

При этом использовались следующие значения параметров: $m_{\min} = 0,0083$, $m_{\max} = 3,33$, $a = 1,5$ мс, $m_A = 0,5$ В, $\sigma_A = 0,1$ В, $p_{pr0} = 0,9$, $p_{pr1} = 0,1$. Пороговый уровень h должен выбираться таким, чтобы обеспечивалось минимальное значение вероятности ошибки. При этом необходимо учитывать уровень шума на входе приемного устройства.

Методы защиты от импульсных помех

Реальные электромагнитные помехи, которые действуют в области расположения ТПД, можно разделить на флуктуационные,

сосредоточенные по спектру и импульсные. При этом только флуктуационные помехи хорошо описываются моделью белого гауссового шума. Сосредоточенные по спектру – это прежде всего помехи от тягового тока 50 Гц и его гармоник. Так как рассматриваемый ТПД работает на высоких частотах (десятки-сотни килогерц), а его контура настроены в резонанс с рабочей частотой, то электромагнитные помехи от тягового тока 50 Гц не влияют на работу ТПД.

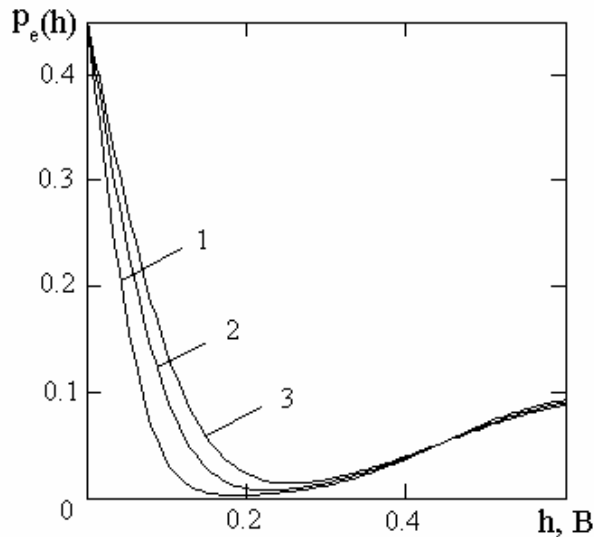


Рис. 5. Зависимость вероятности общей ошибки от значения порогового уровня при разных уровнях помехи (1 – $N=10^{-5}$, 2 – $N=2 \cdot 10^{-5}$, 3 – $N=3 \cdot 10^{-5}$)

Импульсные помехи создаются контактной сетью, коммутационными устройствами на подвижном составе. В результате их действия в приемных катушках ТПД наводятся ЭДС, величина которых пропорциональна производной от магнитного потока по времени. При этом в приемном контуре возникают затухающие колебания на рабочей частоте ТПД (происходит ударное возбуждение приемного контура ТПП), которые описываются выражением [7]

$$u_p(t) = U_p \exp(-\delta t) \sin(\omega_0 t + \varphi_p), \quad (24)$$

где $\delta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания приемного контура, U_p и φ_p – амплитуда и фаза колебаний. В результате этого на выходе ФНЧ возникает импульс, который описывается выражением

$$q_\eta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(t') h(t-t') dt', \quad (25)$$

где $\eta(t) = C \exp\{-\delta t\}$ – сигнал помехи на входе ФНЧ (колебание (24) после детектирования), $h(t) = \frac{M}{a\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{M^2 t^2}{2a^2}\right\}$ – импульсная характеристика ФНЧ. Импульс (25) может привести к ложному срабатыванию пороговых элементов.

$$\frac{q_s(t)}{q_{s\max}}, \frac{q_r(t)}{q_{r\max}}$$

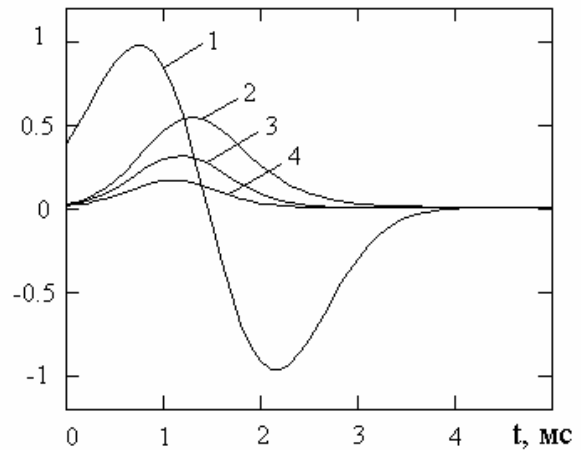


Рис. 6. Сигнальная составляющая (1) и составляющая помехи при $\delta=2500$ (2), $\delta=5000$ (3), $\delta=10000$ (4)

Одним из способов защиты от импульсных помех является использование схем, построенных по принципу ШОУ (широкополосный фильтр – ограничитель – узкополосный фильтр) [7]. В нашем случае, в качестве широкополосного фильтра может использоваться приемный контур ТПД. Для этого в контур надо ввести демпфирующие сопротивления, способствующие быстрому затуханию колебаний, возникающих от действия импульсных помех.

С помощью математического пакета MathCad были рассчитаны и построены (рис. 6) сигнальная составляющая (15) при $m=m_{\max}$ и составляющая помехи (25) на выходе ФНЧ при одинаковой амплитуде сигнала и помехи на входе ФНЧ для различных значений коэффициента затухания δ .

Как видно из полученных характеристик для того, чтобы составляющая импульсной помехи на выходе ФНЧ (на входах порого-

вых элементов) была значительно меньше сигнальной составляющей нужно выбирать коэффициент затухания приемного колебательного контура $\delta \geq 10000$.

Выводы

В данной работе рассмотрены факторы, влияющие на функциональную безопасность устройств счета осей подвижного состава. Предложено в качестве параметра безопасности УСО ПС использовать достоверность счета осей, а в качестве критерия опасного отказа – нарушение достоверности счета осей.

Для повышения достоверности счета осей проведен синтез приемного устройства для обнаружения выходного сигнала электромагнитного дифференциального ТПД на фоне помех. Предложены функциональные схемы оптимального и квазиоптимального приемников. Определена вероятность ошибки обнаружения сигнала при использовании квазиоптимального приемника. Рассмотрен механизм воздействия импульсных помех и предложено способ защиты от них.

Библиографический список

1. Сапожников, В. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи [Текст] : учебное пособие для вузов ж.д. трансп. / Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов; Под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: Маршрут, 2003. – 263 с.
2. ДСТУ 4178-2003. Комплекси технічних засобів систем керування та регулювання руху поїздів. Функційна безпечність і надійність. Вимоги та методи випробування [Текст]: Національний стандарт України. – Київ: Держспоживстандарт України, 2003. – 32с.

3. Соболев, Ю. В. Путевые преобразователи автоматизированных систем управления железнодорожного транспорта [Текст] / Ю. В. Соболев. – Харьков: ХФИ «Транспорт Украины», 1999. – 200с.
4. Бабаев, М. М. Синтез помехоустойчивых приемников сигналов от точечных датчиков [Текст] / М. М. Бабаев // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1997. – №4 – С62-64.
5. Тихонов, В. И. Оптимальный прием сигналов [Текст] / В. И. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320с.
6. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1991. – 384 с.
7. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / И. С. Гоноровский. – М.: Сов. радио, 1971. – 671 с.

Ключевые слова: функциональная безопасность, устройства счета осей, электромагнитный дифференциальный датчик, вероятность ошибки, синтез приемного устройства.

Ключові слова: функціональна безпека, пристрої підрахунку осей, електромагнітний диференціальний датчик, імовірність помилки, синтез прийомного пристрою.

Key words: functional safety, axes count device, electromagnetic differential sensor, probability of the mistake, synthesise of receiver.

Поступила в редколлегию 31.01.2011.

Принята к печати 1.02.2011.

УДОСКОНАЛЕННЯ БЕЗПЕКИ СОРТУВАЛЬНИХ ГІРОК

Представив д.т.н., проф. Чепцов М. М.

Вступ

Галузь залізничної автоматики серед іншого охоплює проблему контролю заповнення колій підгіркового парку сортувальної гірки відчепами (КЗК). Вона полягає як у визначенні відстані від вхідного кінця колії до найближчого відчепу, яким вона зайнята, так і у визначенні проміжків між відчепами в разі недокочування останніх до точки прицілювання (“вікон”).

З метою автоматичного керування уповільнювачами і усунення оператору від процесу гальмування впроваджується система автоматичного регулювання швидкості [1]. При ручному гальмуванні оператор не повністю враховує ряд факторів, що впливають на швидкість скочування відчепів. Неточне гальмування призводить до перегальмовування відчепів й утворення “вікон” між вагонами на підгіркових коліях, виникає необхідність у додатковій операції осаджування для зчеплення вагонів, або недогальмовування і можливий “бій” вагонів.

Заради визначення стану вільності підгіркових колій, застосовуються різноманітні пристрої КЗК [1]. З результатів роботи останніх виробляється програма прицілювального гальмування для кожного відчепу.

Метою роботи є обґрунтування та розробка методу контролю заповнення колій підгіркового парку сортувальної гірки з метою підвищення ефективності роботи та безпеки сортувальних гірок.

Огляд літератури

З літератури відомий спосіб КЗК діленням підгіркової колії на короткі ізольовані ділянки [1], кожна з яких являє собою нормально розімкнуте рейкове коло (РК). Контроль вільності ділянок колії здійснюється

за вимірювальною магістраллю, в яку послідовно ввімкнені вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів, а на виході – первинна обмотка понижуючого трансформатора. Зі вторинної обмотки цього трансформатора знімається напруга, пропорційна довжині вільної колії. Недоліком даного методу КЗК можна вважати наявність у схемі ізолюючих стиків (одного з найненадійніших елементів), а також необхідність розбиття рейкової лінії (РЛ) на ділянки та велика кількість апаратури.

Подібним на метод, пропонований в даній роботі, є застосування способу імпульсного зондування (ІЗ) колії [2], [3]. В даному методі визначення відстані до рухомої одиниці в РК засноване на розрахунку індуктивності РЛ за перехідним процесом струму. За відомою питомою індуктивністю РЛ розраховується відстань до шунта після подачі в РЛ зондуючих імпульсів напруги різної полярності і вимірювання струму. До недоліків цього способу серед іншого можна віднести невисоку точність. Згідно алгоритму роботи блок ІЗ колії витрачає час на подачу пробних імпульсів, а потім робочих. Розрахунок базується на заданій питомій індуктивності РЛ, а через можливі зміни значення питомої індуктивності під час експлуатації з'являтимуться помилки в розрахунках. Даний спосіб чутливий до величини відхилення форми тестового сигналу від еталонного, в т.ч. за рахунок можливих адитивних завад на вході РК.

Метод корекції спектрів

Через недоліки застосування методу корекції спектрів (МКС) стосовно ідентифікації за ступеневим сигналом [4], в якості методу ідентифікації за спеціальними сигналами був обраний метод ідентифікації за

імпульсним сигналом [5]. Більш розгорнуто алгоритм МКС можна подати, як на рис. 1.

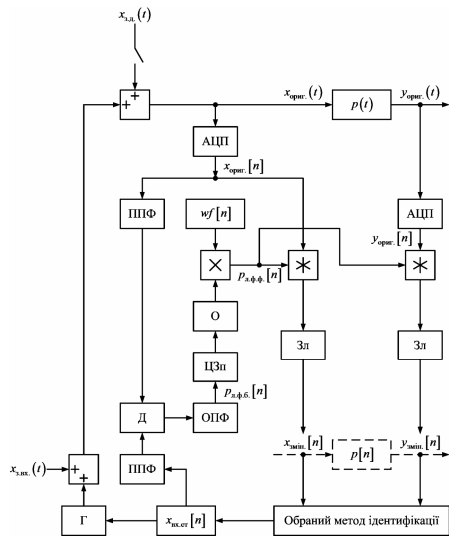


Рис. 1. Структурна схема методу корекції спектрів

На рис. 1 введені позначення: $p(t)$ – імпульсна характеристика (ІХ) лінійної системи, яка ідентифікується; $x_{\text{ориг.}}(t)$, $y_{\text{ориг.}}(t)$ – вхідний та вихідний оригінальні (незмінені) сигнали відповідно; $x_{\text{ориг.}}[n]$, $y_{\text{ориг.}}[n]$ – оцифровані $x_{\text{ориг.}}(t)$ і $y_{\text{ориг.}}(t)$ відповідно; $x_{\text{змін.}}[n]$, $y_{\text{змін.}}[n]$ – вхідний та вихідний змінені сигнали відповідно; $x_{\text{з.д.}}[n]$ – завада, яку можна додавати до $x_{\text{ориг.}}[n]$ для видалення нульових компонентів у спектрі останнього (див., наприклад, [4]); $x_{\text{з.вх.}}[n]$ – небажана завада, що може додаватися до тестового сигналу на вході системи, яка проходить ідентифікацію; $x_{\text{вх.ет.}}[n]$ – вхідний еталонний спеціальний тестовий сигнал в залежності від обраного методу ідентифікації; Γ – реальний генератор тестового сигналу який не ідеально відображає $x_{\text{вх.ет.}}[n]$; ПФ – пряме перетворення Фур'є; ОПФ – обернене перетворення Фур'є; Д – ділення; О – обнуління (відкидання елементів); ЦЗп – циклічний зсув вправо; Зл – зсув вліво; \times – множення; $*$ – згортка; АЦП – аналого-цифровий перетворювач.

У відповідності до структурної схеми МКС (рис. 1) можна навести узагальнений

алгоритм МКС як вказано нижче. Вихідними даними вважаються: відомий обраний метод ідентифікації за спеціальними тестовими сигналами (за імпульсним сигналом), $x_{\text{вх.ет.}}[n]$, $x_{\text{ориг.}}[n]$, $y_{\text{ориг.}}[n]$, довжина ядра шуканого лінійного фільтру зі скінченною імпульсною характеристикою (КІХ-фільтр), $n=1 \dots N$, де N – кількість виміряних точок. Алгоритм:

1. Знайти бажані характеристики шуканого лінійного фільтру $p_{\text{л.ф.б.}}[n]$, що здійснюється в частотній області;
2. Знайти фактичні характеристики шуканого лінійного фільтру $p_{\text{л.ф.ф.}}[n]$, який реалізований у вигляді КІХ-фільтру [6];
3. Обчислити $x_{\text{змін.}}[n]$ та $y_{\text{змін.}}[n]$, шляхом згортки в часовому просторі з $p_{\text{л.ф.ф.}}[n]$ враховуючи [6] і використати $x_{\text{змін.}}[n]$ та $y_{\text{змін.}}[n]$ для обраного методу ідентифікації.

Математичне моделювання

Схема підключення Γ до РЛ для проведення вимірів згідно запропонованого методу КЗК наведена на рис. 2.

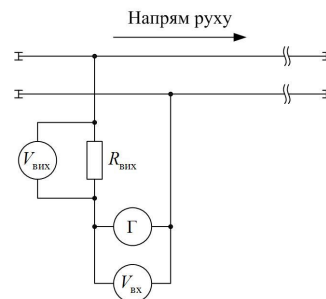


Рис. 2. Схема проведення вимірів

Введені позначення (рис. 2): $V_{\text{вх}}$ і $V_{\text{вих}}$ – АЦП, що вимірюють $x_{\text{ориг.}}[n]$ та $y_{\text{ориг.}}[n]$ відповідно; $R_{\text{вх}}$ – активний опір, з якого знімається вихідний сигнал.

Застосування методу ідентифікації за імпульсним сигналом з МКС для $x_{\text{ориг.}}[n]$ та $y_{\text{ориг.}}[n]$, дозволить спростити вимоги до тестового сигналу, який застосовується в обраному способі ідентифікації характеристик РК в т.ч. відійти від необхідності фільтрації шуму в тестовому сигналі.

В даній роботі пропонується вирішувати задачу КЗК за амплітудо-частотною характеристикою (АЧХ) системи “РЛ – відчіп”. Вибір АЧХ для вирішення задачі КЗК можна обґрунтувати таким чином: в разі наявності нульових компонентів в спектрі тестового сигналу (завада чи несправність генератору тестового сигналу) можна або видалити їх з аналізу, а оцінювати за наявними ненульовими, або додати адитивну заваду $x_{з.д.}[n]$, що міститиме в своєму спектрі ненульові елементи. Коли ж в даній ситуації подібно до методу ІЗ оцінювати характеристики системи в часовому просторі (за перехідним процесом струму), то передбачається виникнення помилки (див., наприклад, [4]). Додатково припускається, що кожному віддаленню відчепа від вхідного кінця РЛ відповідатиме власна (і єдина)

АЧХ (та інші системні характеристики), причому відхилення параметрів РЛ та накладеного шунта (відчепа) звичайно можуть призвести до прийняття невірної рішення. Оцінку величини та розташування “вікон” пропонується проводити на основі даних про відстань до попереднього та поточного відчепів і довжину поточного відчепа.

З метою перевірки роботи запропонованого методу КЗК було проведено математичне моделювання при накладанні нормативного шунта для гіркових РЛ (0.5 Ом [7]) на РК. В якості схеми заміщення РК в шунтовому режимі для РК, зайнятої одною рухомою одиницею (відчепом) у відповідності до рис.2 була прийнята схема, наведена на рис. 3.

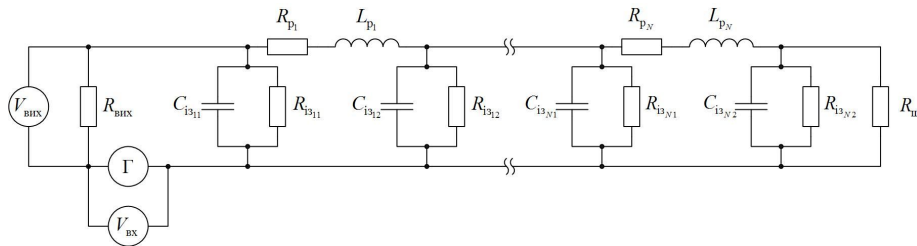


Рис. 3. Схема заміщення системи “РЛ – відчіп”

На рис. 3 введені позначення: $i=1,2,\dots,N$ – номер частини (ланки) РЛ; N – кількість ланок, якими заміщується ділянка РЛ до місця встановлення шунта (обчислюється в залежності від відстані до шунта і відстані, яку заміщає одна ланка); $j=1,2$ – номер частини (паралельного плеча) П-подібної схеми заміщення РЛ; $R_{ш}$ – активний опір шунта, Ом; R_{p_i} – активний опір рейкових ниток заданої довжини, Ом; L_{p_i} – індуктивність рейкових ниток заданої довжини, Гн; C_{i3ij} – ємність ізоляції РЛ заданої довжини, Ф; R_{i3ij} – активний опір ізоляції РЛ заданої довжини, Ом.

В [8] вказується на залежність первинних параметрів РК від частоти. З проведеного аналізу даних, наведених в [8], був обраний частотний діапазон, на якому зміна параметрів від частоти найменша (не перевищує 8% у відхиленні від обраної середньої точки 4 кГц), а саме 2.4...6.6 кГц. То-

му приймається припущення про адекватне представлення математичною моделлю даного прийнятого частотного діапазону. Нелінійність характеристик РЛ в залежності від рівня сигналу відкидається шляхом подання тестового сигналу низького рівня.

Математичне моделювання проводиться в середовищі MatLab за допомогою Simulink. Шляхом розігрування випадкових величин (метод Монте-Карло [9]) розраховуються значення питомих параметрів схеми заміщення РК. За прийнятими питомими параметрами, розраховуються параметри математичної моделі враховуючи віддалення до місця накладання шунта. Схема, надана на рис. 3, конвертується з неперервної моделі в дискретну модель (надається в просторі станів). На вхід математичної моделі з виходу Γ надається масив, який є вхідним оригінальним сигналом.

Для кожного віддалення місця накладання шунта від вхідного кінця РЛ проводиться 25 вимірів (спостережень) з однако-

вою реалізацією вхідного оригінального сигналу на вході і розіграними та розрахованими параметрів математичної моделі. Кількість вимірів, що дорівнює 25 приймається достатньою для оцінювання.

Вхідним оригінальним сигналом був обраний широкосмуговий сигнал, значення відліків якого в часовому просторі підкоряється нормальному закону розподілу випадкових величин. Вибір такого вхідного оригінального сигналу продиктований вимогами МКС та необхідністю незадовільної якості апроксимації ідеального тестового сигналу для даного методу ідентифікації. Задані параметри нормального закону розподілу: математичне сподівання 0, середньоквадратичне відхилення 0.1. Кількість точок у вхідному сигналі дорівнює 1024.

Результати проведеного моделювання

На рис. 4 наведені зразки еталонних АЧХ за однакових питомих параметрів схеми заміщення при різних віддаленнях місця накладання шунта.

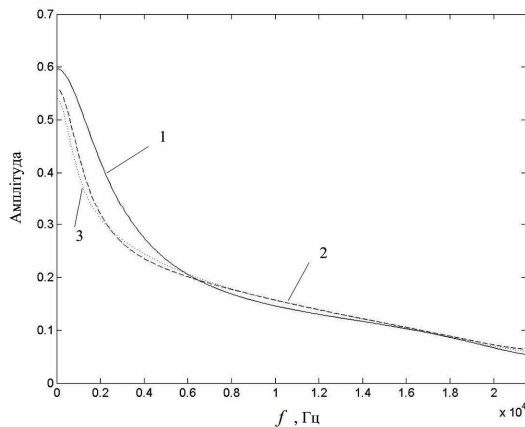


Рис. 4. Еталонні АЧХ при різних віддаленнях місця накладання шунта
1 – 0.10 км; 2 – 0.20 км; 3 – 0.30 км

Пропонований метод вносить похибку до результату ідентифікації, але вона значно менша за похибку, що була б внесена у разі застосування класичного методу ідентифікації за ІХ при даному тестовому сигналі (рис. 5).

З метою підвищення точності розпізнавання відстані до місця накладання шунта та винесення її імовірнісної оцінки, пропонується застосування штучних нейронних

мереж (ШНМ) прямого поширення (feed-forward) [10].

В якості критерію вибору структури і параметрів ШНМ пропонується досягнення мінімуму величини (1.2)

$$dev[i] = \max \left[\left| D_{\text{ет.}}[i] - (m_{\text{оц.}}[i] - 3 \cdot \sigma_{\text{оц.}}[i]) \right|, \right.$$

$$\left. \left| D_{\text{ет.}}[i] - (m_{\text{оц.}}[i] + 3 \cdot \sigma_{\text{оц.}}[i]) \right| \right] \quad (1.1)$$

$$est = \sum_{i=1}^{N_{\text{гр}}} dev[i] \quad (1.2)$$

де \max – функція, що повертає максимальне значення з двох аргументів; $N_{\text{гр}}$ – кількість груп відстаней до місця встановлення шунта; $D_{\text{ет.}}$ – еталонна відстань до місця встановлення шунта; $m_{\text{оц.}}$ – оцінка математичного сподівання

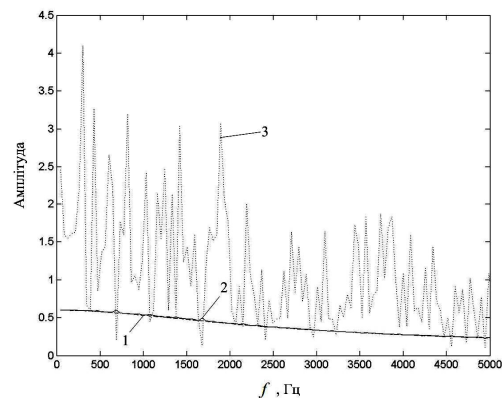


Рис. 5. Фрагмент АЧХ при віддаленні місця накладання шунта 0.10 км
1 – еталонна; 2 – визначена пропонованим методом; 3 – визначена за класичним методом ідентифікації за ІХ

розпізнаних ШНМ відстаней до місця встановлення шунта; $\sigma_{\text{оц.}}$ – оцінка середньоквадратичного відхилення розпізнаних ШНМ відстаней до місця встановлення шунта.

Оцінка (1.2) з однаковою вагою враховує відхилення середнього ($m_{\text{оц.}}$) кожної з груп розпізнаних відстаней до місця встановлення шунта від еталонних, та величину їх розкиду ($\sigma_{\text{оц.}}$). Ідеальне значення оцінки (1.2) $est = 0$ відповідає абсолютно точному розпізнаванню всіх відстаней до місця

встановлення шунта з пропонованого набору.

В результаті пошуку архітектури ШНМ за вищевказаним критерієм, була обрана ШНМ з 3-ма прихованими прошарками, кількістю нейронів 15 в 1-му прихованому прошарку з функцією активації (ФА) [11] “тангенсоїда”, 10 – в 2-му з ФА “логістична” і 5 – в 3-му ФА “логістична”, з навчальним алгоритмом Левенберга-Марквардта.

У відповідності до вищенаведеного було проведено навчання обраної ШНМ з різними наборами відстаней до шунта (відхилення параметрів РЛ від номінальних 5 %), з яких був обраний найкращий набір відстаней: 0.001, 0.01, 0.02, ..., 0.2, 0.22, ..., 0.44 км. Моделювання даної ШНМ.

Таблиця 1

Оцінка границь розпізнавання			
Відстань до шунта (включно) до ... км	0.14	0.32	0.44
Точність розпізнавання до ... км	0.00 5	0.01	0.01 5

проводилося на більш повному наборі відстаней (0.01, 0.02, ..., 0.44 км), результати якого наведені на рис. 6 та рис. 7. Переважна більшість з розпізнаних груп відстаней підкоряються нормальному закону розподілу, що в свою чергу було перевірено за допомогою критерію хі-квадрат на 5 %-му рівні значимості. З рис. 6 видно, що при відхиленні, оціненому за (1.1), не перекриваються групи відстаней до 0.16 км включно (крок між відстанями 0.01 км). Додаткова ілюстрація оцінки (1.1) наведена на рис. 7, з якого видна майже лінійна тенденція до погіршення розділення розпізнаних відстаней зі зростанням відстані до місця встановлен-

ня шунта. Можна винести таку оцінку границь розпізнавання, яка наведена в табл. 1.

Порівняльна табл. 2 містить результати перевірки БИЗП [3], та результати, отримані в даному розділі за допомогою пропонованого методу без винесення рішення за оцінкою (1.1).

З табл. 2 видне значне покращення точності визначення місцезнаходження відчепу у випадку застосування пропонованого методу відносно БИЗП для усіх встановлених відстаней. На практиці прогнозується не таке значне покращення результатів, оскільки перевірка БИЗП проводилася в польових умовах, а результати пропонованого методу отримані для прийнятої математичної моделі.

Результати табл. 2 у вигляді нормованої діаграми, яка дозволяє оцінити відношення величини помилки розпізнаних відстаней, наведені на рис. 8. Результати моделювання рівномірного слідування відчепу по РЛ з відхиленням параметрів РЛ від номінальних під час слідування 5 % для відстаней 0.001, 0.002, ..., 0.44 км наведені на рис. 9 похибки розпізнавання наведені на рис. 10.

З рис. 9 та рис. 10 видно підтвердження отриманих вище статистичних даних на даній єдиній реалізації слідування відчепу. До 0.04 км все ж спостерігаються деякі неточності (до 0.017 км) у визначенні відстані, як для еталонних АЧХ, так і для отриманих після пропонованого методу.

На рис. 10, в діапазоні 0.04...0.21 км обидві криві містять переважно високочастотні складові, а на діапазоні 0.21...0.44 км загрубляється точність визначення відстані за еталонними АЧХ, хоча такого не спостерігається для визначених за АЧХ після пропонованого методу.

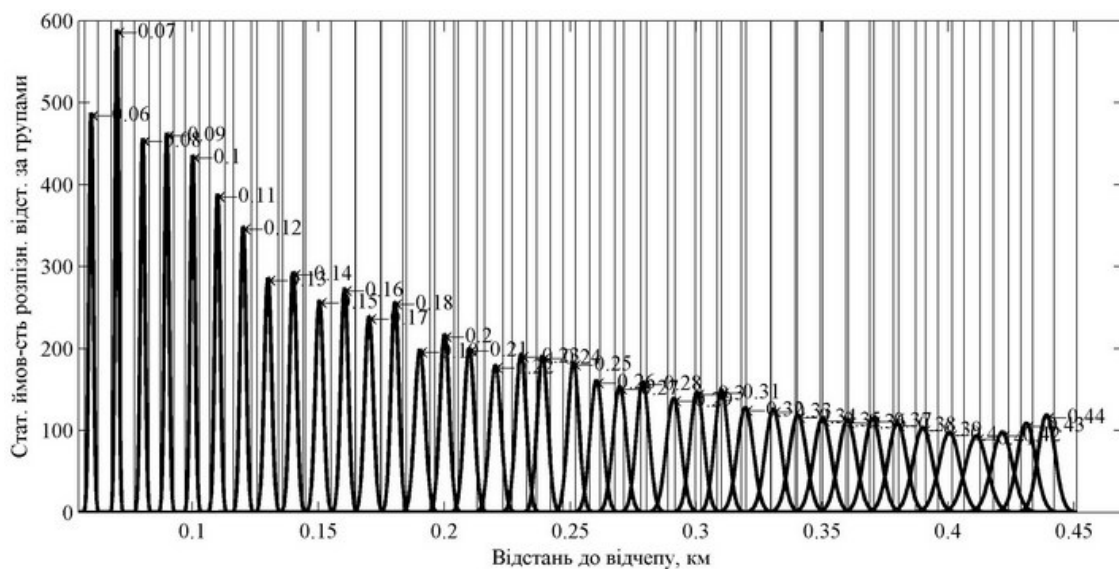


Рис. 6. Криві нормального закону розподілу для розпізнаних відстаней. Навчання для відстаней 0.001, 0.01, 0.02, ..., 0.2, 0.22, ..., 0.44 км, моделювання для відстаней 0.01, 0.02, ..., 0.44 км. Відхилення параметрів РЛ від номінальних 5 %

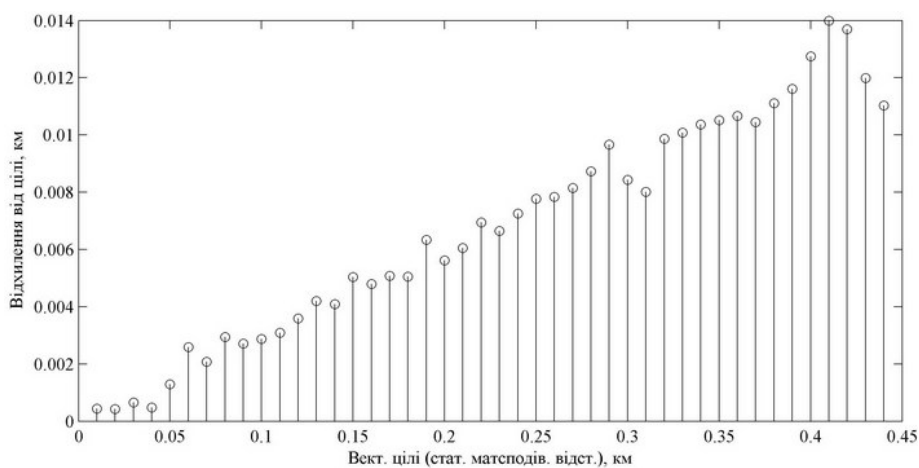


Рис. 7. Величина оцінки (1.1) для розпізнаних відстаней. Навчання для відстаней 0.001, 0.01, 0.02, ..., 0.2, 0.22, ..., 0.44 км, моделювання для відстаней 0.01, 0.02, ..., 0.44 км. Відхилення параметрів РЛ від номінальних 5 %

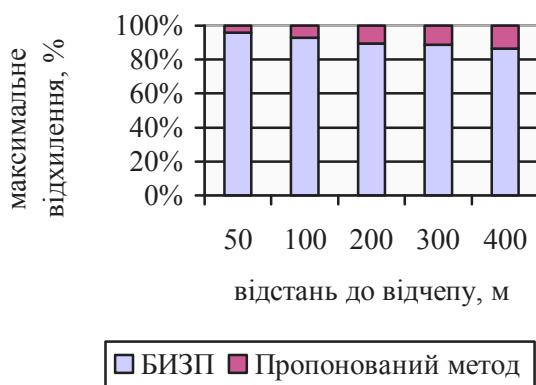


Рис. 8. Максимальне відхилення для деяких відстаней до відчепу, визначених БИЗП і пропонованим методом

Порівняння результатів визначення відстаней БИЗП та пропонованим методом

Встановлена відстань, м	БИЗП		Пропонований метод	
	Отримана відстань, м	Макс. відхиленн я, м	Отримана відстань, м	Макс. відхиленн я, м
50	36-64	14	49.4-50.7	0.6
100	82-118	18	98.6-101.6	1.4
200	175-225	25	197.1-203.1	2.9
300	267-333	33	295.8-304.8	4.2
400	360-440	40	393.7-407.2	6.3

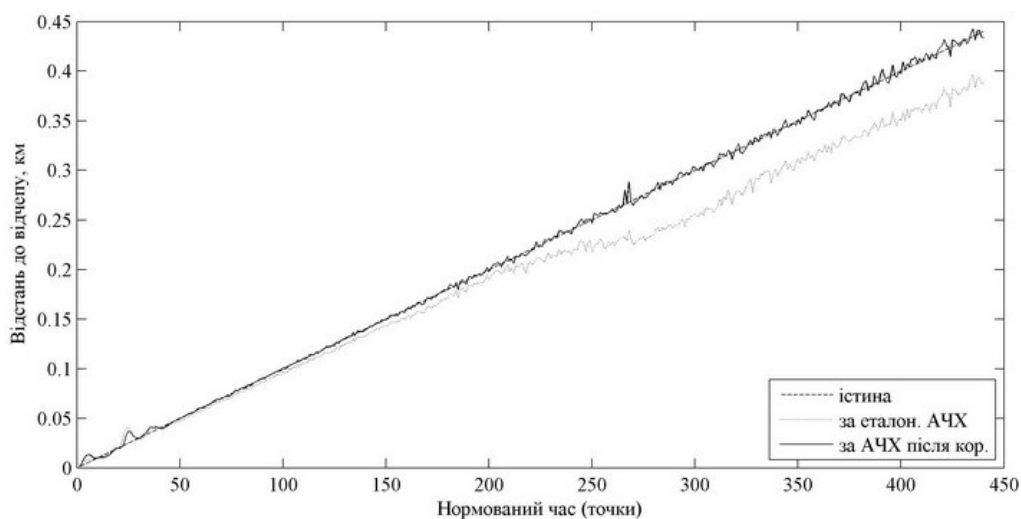


Рис. 8. Розпізнані відстані для відстаней 0.001, 0.002, ..., 0.44 км, відхилення параметрів РЛ від номінальних 5 %

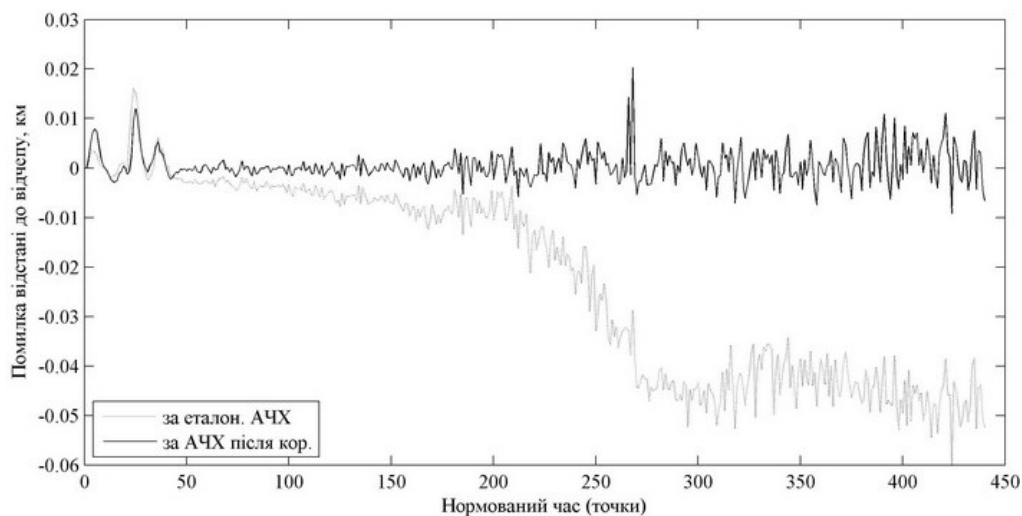


Рис. 9. Похибки розпізнавання відстані для відстаней 0.001, 0.002, ..., 0.44 км, відхилення параметрів РЛ від номінальних 5 %

Висновки

З метою підвищення ефективності роботи та безпеки сортувальних гірок в роботі наведене наукове обґрунтування та запропоновано метод контролю заповнення колій підгіркового парку сортувальної гірки.

В якості класифікатору, найкраще зарекомендувала себе ШНМ з 3-ма прихованими прошарками, кількістю нейронів 15 в 1-му прихованому прошарку з функцією активації (ФА) “тангенсоїда”, 10 – в 2-му з ФА “логістична” і 5 – в 3-му ФА “логістична”.

Були отримані ймовірнісні оцінки точності визначення відстані до місця накладання шунта для набору даних для моделювання ШНМ з групами відстаней 0.01, 0.02, ..., 0.44 км, переважна більшість з розпізнаних груп відстаней підкоряються нормальному закону розподілу.

На основі проведеного моделювання можна винести рекомендації до отримання сукупності даних для навчання ШНМ: необхідно провести вимірювання (неменше за 25) для відстаней 0.001, 0.01, 0.02, ..., 0.2, 0.22, ..., 0.44 км, в табл. 1 зведені оцінки точності визначення відстані за пропонованим методом.

Результатом даної роботи являється удосконалення методу КЗК, що дозволить спростити вимоги до тестового сигналу, який застосовується в обраному способі ідентифікації характеристик РК в т.ч. відійти від необхідності фільтрації шуму в тестовому сигналі; зменшити кількість апаратури на одну контрольовану колію; збільшити точність визначення відстані від вхідного кінця підгіркової колії до найближчого відчепу, яким вона зайнята; відмовитися від використання ізолюючих стиків для розділення на контрольовані секції; прискорити розпуск составів завдяки появі передумов для більш точного вирішення задачі прицільного гальмування тим самим удосконаливши ефективність роботи та безпеку сортувальних гірок.

Бібліографічний список

1. Казаков, А. А. Релейная централизация стрелок и сигналов [Текст] / А. А. Казаков. – М.: Транспорт, 1984. – 312 с.
2. Одикадзе, В. Р. Система контроля заполнения путей методом импульсного зондирования КЗП ИЗ [Текст] / В. Р. Одикадзе // Автоматика связь информатика. – 2008. – №11. – С. 14-15.
3. Блок импульсного зондирования пути БИЗП. Руководство по эксплуатации ИТАЖ.468169.001 РЭ, 2003.
4. Рибалка, Р. В. Узагальнення методу ідентифікації лінійних динамічних систем за допомогою ступеневого сигналу [Текст] // Вісник ДПТУ ім. В. Лазаряна. – 2009. – №26. – С. 154-159.
5. Рибалка Р. В. Узагальнення методу ідентифікації лінійних динамічних систем за допомогою імпульсного сигналу / Р.В. Рибалка, В. І. Гаврилук, І.О. Романцев // Вісник ДПТУ ім. В. Лазаряна. – 2009. – № 29. – С. 131–133.
6. Smith W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Second Edition / Steven W. Smith – San Diego, CA : California Technical Publishing, 1999. – 650 с.
7. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог [Текст] / В. С. Аркатов, А. И. Баженов, Н. Ф. Котляренко. – М.: Транспорт, 1992. – 384с.
8. Определение электрических параметров рельсового пути // Железные дороги мира. – 2000. – № 1. – С. 57–61.
9. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / Гмурман В. Е. – М.: Высшее образование, 2007. – 479 с.
10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание / Хайкин С. – М.: “Вильямс”, 2006. – 1104 с.
11. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / Круг-

лов В. В., Борисов В. В. – М. : Горячая линия, 2002. – 382 с.

Ключові слова: безпека функціонування, задачі контролю заповнення колій, методу корекції спектрів.

Ключевые слова: безопасность функционирования, задачи контроля заполнения путей, метод коррекции спектров.

Key words: functioning safety, track occupancy control task solution, spectrums correction method.

Надійшла до редколегії 21.10.2010.

Прийнята до друку 25.10.2010.

УДК : 656.25 : 621.318

РАЗГОНОВ А. П. – д.т.н., профессор (ДНУЖТ)

БОНДАРЕНКО Б. М. – преподаватель (ДНУЖТ)

ПРОФАТИЛОВ В. И. – к.т.н., доцент (ДНУЖТ)

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНОГО ДАВЛЕНИЯ РЕЛЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ

Введение и постановка задачи

Основной элементной базой в устройствах железнодорожной автоматики в Украине являются электромагнитные реле первого класса надежности типа НМШ и РЭЛ. Данные реле используются при построении устройств, обеспечивающих безопасность движения поездов с учетом специальных эксплуатационно-технических требований (ЭТТ) [1]. Для обеспечения соответствия ЭТТ реле железнодорожной автоматики периодически проверяются и регулируются по всему комплексу параметров. Все основные работы по ремонту, регулировке и проверке параметров реле производятся в соответствии с «Инструкцией по техническому обслуживанию устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ)» в ремонтно-технологических участках (РТУ) СЦБ [2]. При проверке реле железнодорожной автоматики измерению подлежат электрические, временные и механические параметры. Наиболее сложным процессом является измерение механических параметров реле: совместного хода контактов, межконтактного зазора в крайних положениях якоря и при перелете контактов, высоты

антимагнитного штифта, неодновременности замыкания контактов и контактного давления.

Существующая технология проверки механических параметров реле железнодорожной автоматики отличается низкой точностью и субъективностью, из-за большого количества ручных операций, которые осуществляются различного рода приспособлениями: щупами, шаблонами, грамометрами и т.п. Кроме того, часть механических параметров, таких как неодновременность замыкания контактов и совместный ход контактов, вообще не измеряются, так как в РТУ отсутствуют для этого измерительные средства. Для контроля данных параметров используется субъективный метод визуальной оценки, который не позволяет измерить реальное значение параметра, а только фиксирует, соответствие нормативному значению. Статистические исследования, проведенные на кафедре «Автоматики, телемеханики и связи» ДИИТа, показали, что до 10% реле первого класса надежности выпускаются в эксплуатацию с нарушением ЭТТ [3].

Измерение контактного давления в РТУ производится с помощью граммометра часового типа Г-10-60. Контактное давление измеряют путем оттягивания фронтного или тылового контакта от общего, и отсчета показаний в момент их размыкания. Статистические наблюдения показывают, что недостатком данного способа измерения контактного давления является достаточно высокая погрешность (до 30%), которая обусловлена как субъективностью при определении момента отсчета показаний, так и погрешностью самого граммометра.

Резервы повышения качества проверки реле и производительности труда при использовании существующей технологии практически исчерпаны, поэтому задача автоматизации процесса измерения параметров электромагнитных реле железнодорожной автоматики является актуальной.

Целью работы являлась разработка метода автоматизированного определения контактного давления реле железнодорожной автоматики типов НМШ и РЭЛ для использования его в составе измерительного диагностического комплекса для контроля параметров реле железнодорожной автоматики [4].

Разработанный метод автоматизированного определения контактного давления основывается на особенностях конструкции электромагнитных реле железнодорожной автоматики типов НМШ и РЭЛ, в которых отпадание якоря осуществляется не под действием возвратной пружины, а под действием собственного веса якоря, значение которого известно.

Описание метода

Исходными данными для определения контактного давления являются параметры элементов конструкции реле НМШ (рис. 1): вес якоря F_g , соотношение плеч якоря $K_y = b/a = 1,324$ и контактной пружины K_k , конструкция контактной системы, а также параметры, которые определяются с помощью автоматизированного измерительного диагностического комплекса для контроля параметров реле [4]:

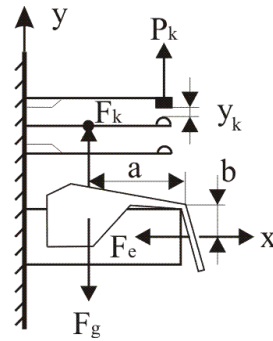


Рис. 1. Конструкция контактной системы реле НМШ

- зависимость зазора между якорем и сердечником от времени $x(t)$ во время включения реле, позволяющая определить моменты трогания и останова якоря, а также совместный ход каждой контактной группы;
- зависимость тока в обмотке реле от времени $i(t)$ при включении реле;
- моменты размыкания тыловых контактов и замыкания фронтных контактов при включении реле (T_i и F_i – где i – номер контакта).

Все данные оцифровываются с помощью аналого-цифрового преобразователя и записываются в память компьютера для дальнейшей математической обработки с помощью программного обеспечения, реализованного на языке высокого уровня C++.

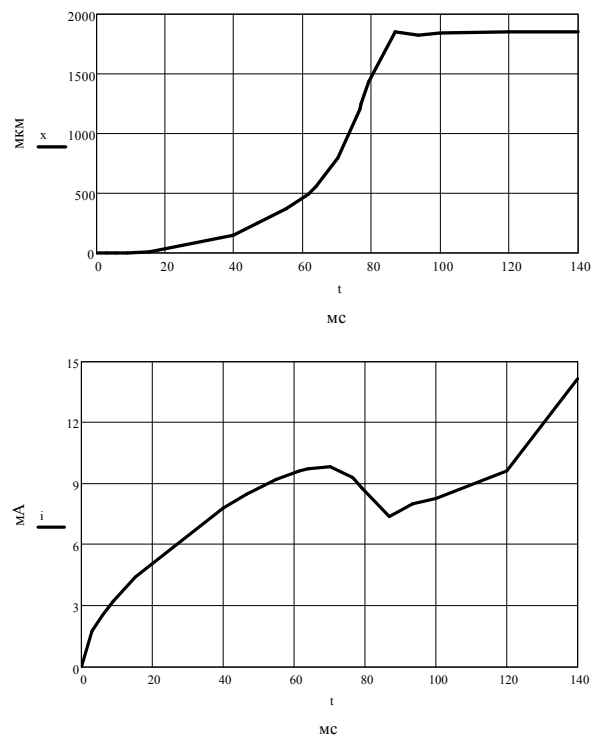


Рис. 2. Исходные данные $x(t)$ и $i(t)$

Исходные данные $x(t)$ и $i(t)$ представлены дискретными значениями, поэтому для определения значений функций между узловыми точками необходимо провести интерполяцию. Так как частота дискретизации измерительного комплекса позволяет получить несколько тысяч точек за время включения реле, то можно для интерполяции использовать простейшую одномерную линейную аппроксимацию.

На рис. 2. представлены зависимости $x(t)$ и $i(t)$ полученные с использованием интерполяционной формулы Ньютона [5].

Для определения ускорения якоря во время включения реле необходимо вычислить вторую производную от функции $x(t)$. Но данная зависимость представлена в виде кусочно-линейной аппроксимации имеет разрывы в узловых точках. Поэтому исходная зависимость $x(t)$ на участке движения якоря заменяется гладкой функцией $fx1(t1)$ с помощью полиномиальной регрессии четвертой степени. При таком коэффициенте полиномиальной регрессии функции $x(t)$ и $fx1(t1)$ имеют минимальное расхождение (см. рис. 3). Значения функции $fx1(t1)$ необходимы только до момента замыкания последнего фронтального контакта, поэтому данную функцию можно не продлевать до момента остановки якоря, что повышает точность совпадения функций $x(t)$ и $fx1(t1)$.

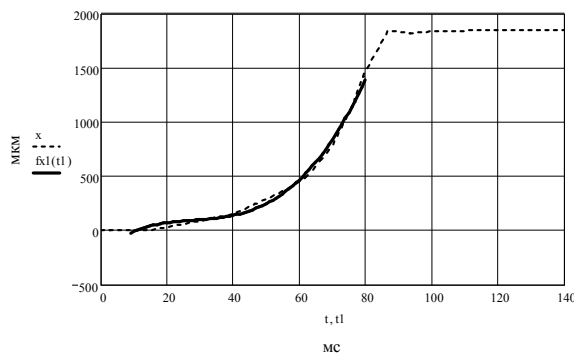


Рис. 3. Зависимости $x(t)$ и $fx1(t1)$

Вычисление второй производной функции $fx1(t1)$ осуществляется с помощью итерационного метода Риддера [5]. На рис. 4. представлен график полученной зависимости ускорения якоря от времени при включении реле.

Определение совместного хода тыловых LT_n и фронтальных контактов LF_n осуществ-

ляется путем сопоставления зависимости движения якоря во время включения реле $x(t)$ и моментов размыкания тыловых и замыкания фронтальных контактов:

$$LT_n = x(T_n), LF_n = \delta_{\max} - x(F_n) - \delta_0, \quad (1)$$

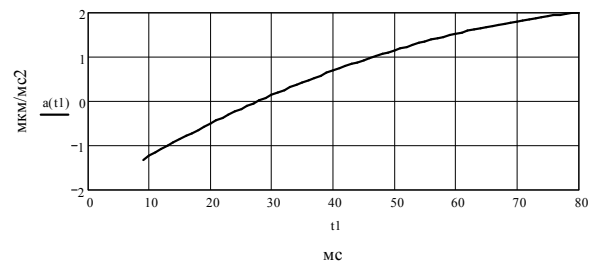


Рис. 4. Ускорение якоря во время включения реле

где n – номер контактной группы, δ_{\max} – максимальное расстояние между якорем и сердечником, δ_0 – остаточный зазор между якорем и сердечником.

Определение электромагнитной силы притяжения якоря осуществляется с помощью следующего выражения

$$F_e = \frac{\mu_0 i(t) w^2 S}{8 \delta(t)^2} \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздушного зазора, w – количество витков в обмотке реле, S – площадь полюса сердечник реле, $\delta(t)$ – зависимость зазора между якорем и сердечником во время включения реле от времени.

Контактное давление P_k в реле НМШ и РЭЛ создается предварительным нажатием регулировочных пластин на фронтальные и тыловые контакты P_0 и силой реакции совместного хода контактных пружин ΔP_k :

$$P_k = P_0 + \Delta P_k = c y_{скр} + c y_{совм}, \quad (3)$$

где c – жесткость контактных пружин, $y_{скр}$ – скрытый ход контакта, который он бы прошел, если бы не опирался на регулировочную пластину, $y_{совм}$ – совместный ход фронтального (тылового) и общего контактов.

Контактная пружина в реле НМШ представляет собой упругую балку, заделанную одним концом и нагруженную сосредоточенной силой F_k на расстоянии L_F от места заделки пружины (рис. 5). Прогиб контактных пружин в сравнении с их длиной мал и

не выходит за пределы упругой деформации, поэтому для расчетов можно использовать теорию изгиба упругой балки.

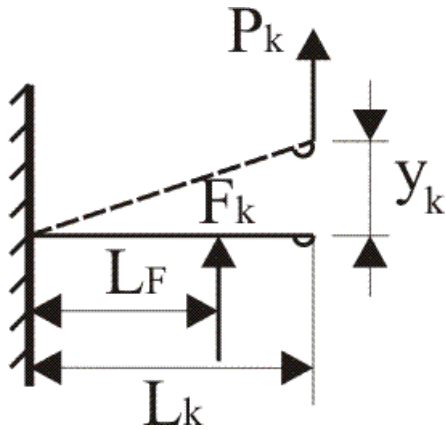


Рис. 5. Конструкция одного контакта реле НМШ

Величина изгиба конца контактной пружины будет равна:

$$y_k = F_k / C, \quad (4)$$

где C – жесткость контактной пружины на единицу силы, которая определяется следующим выражением [6]

$$C = \frac{6 E J}{L_F^2 (3 L_k - L_F)}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости материала (контактные пружины в реле НМШ и РЭЛ изготавливаются из фосфористой бронзы с $E = 11 \cdot 10^4$ Н/мм²), J – момент инерции пружины, L_F – расстояние от места заделки пружины до места приложения силы F_k , L_k – длина контакта. Момент инерции сечения плоской пружины равен

$$J = \frac{b h^3}{12}, \quad (6)$$

где b – ширина пружины, h – толщина пружины.

Соотношение изгиба пружины контакта в точке приложения силы F_k и на конце пружины контакта P_k , где создается контактное давление, определяется следующим выражением

$$K_k = \frac{\Delta y_k}{\Delta y_F} = \frac{3 L_k - L_F}{2 L_F}, \quad (7)$$

и для реле НМШ K_k составляет 1,666.

Таким образом, коэффициент передачи между ходом якоря x и ходом контакта y_k составляет для реле НМШ

$$K_{yk} = K_{\text{я}} K_k = 2,21 \quad (8)$$

Для механической системы реле НМШ (см. рис. 1) можно составить следующее соотношение сил

$$F_e = (F_k + F_g) K_{\text{я}} = (y_k C + m g) K_{\text{я}}, \quad (9)$$

где m – масса якоря, g – ускорение якоря при его движении во время включения реле.

В электромагнитном реле железнодорожной автоматики типа НМШ тыловые контакты расположены в два ряда, между которыми отсутствует жесткая связь, к тому же каждый тыловой контакт имеет свою регулировочную пластину. Давление тыловых контактов в реле НМШ создается двумя составляющими: $y_{\text{скр}}$ и $y_{\text{совм}}$. Значение скрытого хода контактов не поддается измерению косвенным методом. Для определения скрытых ходов контактов необходимо решить две системы из n -уравнений, полученные на основании выражения (9), где n – количество контактов в данном реле.

Система уравнений для реле НМШ2-900 с четырьмя группами контактов будет иметь следующий вид:

- для тыловых контактов

$$\begin{cases} F_e(T_1) = K_{\text{я}}(m g(T_1) + (C_T + C_O)4y_{T1} + C_T y_{TC1}) \\ F_e(T_2) = F_e(T_1) + K_{\text{я}}(m g(T_2) + (3C_T + 4C_O) \times \\ \times (y_{T2} - y_{T1}) + C_T y_{TC2}) \\ F_e(T_3) = F_e(T_2) + K_{\text{я}}(m g(T_3) + (2C_T + 4C_O) \times \\ \times (y_{T3} - y_{T2}) + C_T y_{TC3}) \\ F_e(T_4) = F_e(T_3) + K_{\text{я}}(m g(T_4) + (C_T + 4C_O) \times \\ \times (y_{T4} - y_{T3}) + C_T y_{TC4}) \end{cases}$$

- для фронтальных контактов

$$\left\{ \begin{aligned} F_e(F_1) &= F_e(T_4) + K_{\text{я}}(m g(F_1) + 4C_O \times \\ &\quad \times (\delta_{\text{max}} - \delta_0 - y_{T4} - y_{F1}) + C_F y_{FC1}) \\ F_e(F_2) &= F_e(F_1) + K_{\text{я}}(m g(F_2) + (C_F + 4C_O) \times \\ &\quad \times (y_{F1} - y_{F2}) + C_F y_{FC2}) \\ F_e(F_3) &= F_e(F_2) + K_{\text{я}}(m g(F_3) + (2C_F + 4C_O) \times \\ &\quad \times (y_{F2} - y_{F3}) + C_F y_{FC3}) \\ F_e(F_4) &= F_e(F_3) + K_{\text{я}}(m g(F_4) + (3C_F + 4C_O) \times \\ &\quad \times (y_{F3} - y_{F4}) + C_F y_{FC4}) \end{aligned} \right.$$

где T_i , F_i – это моменты времени в порядке размыкания тыловых и замыкания фронтowych контактов при включении реле, C_T , C_O , C_F – жесткость пружин, соответственно тыловых, общих и фронтowych контактов, y_{Ti} , y_{Fi} – совместный ход тыловых и фронтowych контактов, y_{TCi} , y_{FCi} – скрытый ход тыловых и фронтowych контактов.

Решив данные системы уравнений можно определить скрытый ход каждого контакта реле, и следовательно определить предварительное нажатие контактов реле P_0 .

В реле железнодорожной автоматики типа РЭЛ все тыловые контакты расположены в один ряд и для них отсутствуют регулировочные пластины, поэтому давление тыловых контактов определяется только величиной совместного хода.

Результаты экспериментальных измерений

В таблице 1 приведены обобщенные результаты экспериментальных измерений контактного давления граммометром часового типа и результаты вычислений контактного давления по предлагаемому методу для реле НМШ. Так как измерение контактного давления граммометром часового типа дает достаточно большую погрешность, то для получения более достоверных результатов измерение для каждого контакта проводилось 50 раз, после чего вычислялось среднее значение. Для получения расчетных данных использовался экспериментальный образец автоматизированного измерительного комплекса для проверки параметров реле железнодорожной автоматики. Сравнительный анализ данных результатов показал, что отклонение вычисленно-

го и измеренного значений контактного давления не превышает 12,6% для фронтowych контактов и 10,3% для тыловых контактов.

Данный метод позволяет достаточно точно решить задачу автоматизации определения контактного давления для нормальнодействующих реле железнодорожной автоматики типов НМШ и РЭЛ. К достоинствам данного метода определения контактного давления можно отнести увеличение точности получаемых результатов, а также уменьшение времени на измерение контактного давления, за счет того, что отпадает необходимость проводить измерения для каждого контакта отдельно и снимать кожух реле.

Метод автоматизированного определения контактного давления, рассмотренный в данной статье, не подходит для медленнодействующих реле железнодорожной автоматики, парк которых составляет около 15 % от всех реле находящихся в эксплуатации. Это связано с особенностями конструкций таких реле, в которых на сердечнике размещается медная гильза (короткозамкнутый виток), что снижает индуктивность обмотки реле и поэтому они имеют другую форму тока в обмотке реле $i(t)$. Она практически совпадает с формой напряжения подаваемого на обмотку реле при включении, т.е. имеет форму близкую к прямоугольному импульсу. Определение контактного давления в медленнодействующих реле, осуществляется другим методом, который основан на расчете магнитной цепи реле.

Выводы

Разработанный метод автоматизированного определения контактного давления реле железнодорожной автоматики типа НМШ и РЭЛ реализован в виде программного обеспечения, функционирующего в составе измерительного диагностического комплекса для контроля параметров реле. Метод позволяет решить комплексную задачу автоматизации определения механических параметров электромагнитных реле железнодорожной автоматики без снятия кожуха в соответствии с эксплуатационно-

техническими требованиями к реле первого класса надежности. Анализ полученной погрешности вычисления контактного давления реле позволяет использовать метод на практике вместо существующей технологии проверки реле.

Библиографический список

1. Подгайченко, М. С., Ягудин, Р. Ш. Эксплуатационно-технические требования к реле СЦБ [Текст] / М. С. Подгайченко, Р. Ш. Ягудин // Автоматика, телемеханика и связь. – 1992. – №9. – С. 19-20.
2. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ): ЦШЕОТ/0012: Затв. Гол. упр. зв'язку, енергетики та обчислювальної техніки М-ва транспорту України 05.10.1998. – Київ, 1998. – 72 с.
3. Стенд для проверки реле СЦБ. Разработка предложений по созданию стенда на базе КТС-ЛИУС-2. Отчет по НИР / ДИИТ. - № 353/3803. – Днепропетровск, 1983. – 54 с.
4. Профатилов, В. И., Разгонов, А. П., Андреевских, А. В., Бондаренко, Б. М. Измерительный диагностический комплекс для проверки реле [Текст] / В. И. Профатилов, А. П. Разгонов, А. В. Андреевских, Б. М. Бондаренко // Автоматика, связь и информатика – 2009. - № 10. – с. 14 – 17.
5. Калитки, Н. Н. Численные методы [Текст] / Н. Н. Калитки – М.: Наука, 1978. – 512 с.
6. Витенберг, М. В. Расчет электромагнитных реле [Текст] / М. В. Витенберг – М.: Энергия, 1975. – 416 с.

Ключові слова: контактний тиск, реле залізничної автоматики, якор, вимірювання механічних параметрів.

Ключевые слова: контактное давление, реле железнодорожной автоматики, якорь, измерения механических параметров.

Key words: contact pressure, railway automation relay, anchor, measuring automation of mechanical parameters.

Надійшла до редколегії 23.12.2010.

Прийнята до друку 24.12.2010.

Таблица 1

Результаты измерения контактного давления для реле НМШ2-900

№ контакта	Совместный ход контактов		Экспериментальные данные		Расчетные данные	
	тыловых	фронтowych	тыловые	фронтowych	тыловые	фронтowych
	$Y_{т\delta}$, мм	$Y_{ф\delta}$, мм	$P_{кт}$, гр	$P_{кф}$, гр	$P_{кт}$, гр	$P_{кф}$, гр
21-23	0,484	0,649	44	50	48	57
41-43	0,546	0,419	36	65	39	60
61-63	0,363	1,364	37	70	40	64
81-83	0,244	0,598	18	65	20	61

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И КРИТЕРИЕВ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЙ ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Представил д.ф.-м.н., проф. Гаврилюк В. И.

Введение

Рельсовая цепь на данный момент является основным датчиком состояния участка пути, информация о состоянии которого позволяет организовать движение на железнодорожном транспорте. Тональная рельсовая цепь как ответственный элемент регламентирована по периодичности контроля состояния технологическими картами, согласно которым состояние ТРЦ определяется косвенным методом через электрические параметры. Обслуживание рельсовой цепи требует временных и ресурсных затрат не только по самой проверке, но и по оформлению соответствующей документации. Автоматизация контроля состояния ТРЦ способствует уменьшению влияния человеческого фактора, затрат на организацию проверки и оформление документации.

Цель работы

Целью научной работы является анализ существующих методов контроля тональных рельсовых цепей и выбор параметров и

критериев оценки технического состояния рельсовых цепей для дальнейшей разработки методов и средств автоматизированного контроля ТРЦ

Анализ существующих методов контроля тональных рельсовых цепей

В настоящее время при эксплуатации тональной рельсовой цепи необходимо руководствоваться инструкцией ЦШЕОТ/0012, ЦШ/0042. Основным документом для регулировки ТРЦ является регулировочная таблица (табл.1), в которой указаны основные электрические параметры конкретной рельсовой цепи. Периодичность и порядок проверки состояний ТРЦ регламентированы пунктами 10.2-10.4 инструкции ЦШЕОТ/0012 и технологическими картами ТК34-ТК37 инструкции ЦШ/0042 при непрерывной эксплуатации. Проверка блоков ТРЦ реализуется согласно инструкции по проверке аппаратуры ТРЦ ТК1-ТК4, ТК6, ТК8.

Таблица 1

Заголовок регулировочной таблицы

ТРЦ	$L_{\text{общ.}}$	$F_H/F_{\text{мод}}$	U_r	S_r	U_{ϕ}	U_n	$U_{\text{пп}}$ при R_n \min и U_c		Режим АЛС		Выводы ФПУ	Наличие УТЗ
							мин	макс	$S_{\text{кт}}$	$U_{\text{кт}}$		
							В	В	ВА	В		

В табл. 1 указано: $L_{\text{общ}}$ – длина рельсовой цепи; $F_H/F_{\text{мод}}$ – значения несущих и модулирующих частот; U_r , S_r – напряжение и мощность на выходе генератора; U_{ϕ} – напряжение на выходе фильтра; U_n – напряжение на входе рельсовой линии; $U_{\text{пп}}$ мин и $U_{\text{пп}}$ макс – наименьшее и наибольшее

напряжение на входе путевого приемника (ПП); $S_{\text{кт}}$ и $U_{\text{кт}}$ – мощность и напряжение на выходе кодового трансформатора в режиме АЛС.

Согласно таблице 1, для каждой рельсовой цепи напряжение на выходе генератора и фильтра и мощность генератора рельсо-

вой цепи должны быть не больше указанного значения, напряжение на путевом приемнике – в пределах минимума и максимума, фактические значения режима АЛС – не меньше указанных [3].

Таким образом, вышеуказанные инструкции регламентируют проверку следующих параметров:

U_r , U_f , $U_{пп}$, напряжение на обмотках путевых реле, остаточное напряжение $U_{пп}$ при наложении шунта, остаточное напряжение на обмотках путевых реле при наложении шунта – 1 раз в квартал; напряжение пульсации постоянного тока электропитания генераторов – 1 раз в 6 месяцев (весной и осенью); сопротивление балласта и шпал – 1 раз в год (весной) [3].

Дополнительно, при замене аппаратуры ТРЦ или кабеля производят вспомогательную проверку параметров, указанных в таблице 36.4 инструкции ЦШ/0042 [1].

Таким образом, глобальный контроль параметров рельсовой цепи предполагает: контроль электрических параметров; расширенную проверку электрических параметров при замене блоков или ремонте кабеля; визуальный осмотр элементов ТРЦ.

Несмотря на указанные сроки, периодичность проверки электрических параметров рельсовой цепи может быть увеличена в 3-4 раза, что создает большую рутинную работу для обслуживающего персонала.

Выбор параметров и критериев оценки технического состояния тональной цепи

Для автоматизации контроля рельсовой цепи предлагается разделить все параметры на основные и дополнительные. К основным параметрам относятся те, контроль которых предусмотрен периодически технологическими картами и инструкциями службы Ш, а к дополнительным – контроль которых осуществляется при регулировке, замене или ремонте аппаратуры ТРЦ.

С учетом вышесказанного, к основным параметрам относятся: напряжения U_r , U_f , $U_{пп}$, напряжение на обмотке путевого реле $U_{прл}$, напряжение пульсации тока электропитания генератора $U_{птэг}$, остаточное напряжение на входе путевого приемника при

наложении шунта $U_{опп}$, остаточное напряжение на обмотке путевого реле при наложении шунта $U_{опрл}$; а к дополнительным: сопротивление балласта R_b ; напряжение сети питания $U_{пит}$; напряжение кодového трансформатора $U_{кт}$.

Моделирование прохождения подвижного состава позволяет определить параметры $U_{опп}$ и $U_{опрл}$.

Для организации системы контроля необходимо провести дискретизацию аналоговых электрических параметров тональной рельсовой цепи и определить пороговые значения всех параметров [4, с. 295].

Дискретизация параметров

Непрерывный сигнал напряжения на генераторе U_r описан критерием k_1 , показанным на рис. 1.

Согласно рис. 1, при данном изменении напряжения на выходе генератора критерий k_1 присваивается только при разрешенном значении. Если ($k_1=0$), то генератор неисправен, либо не отрегулирован (при условии исправности всех остальных элементов РЦ). По инструкции ЦШ/0034, п. 4.7.3 данное напряжение при регулировке устанавливается на 20-30% ниже значения, указанного в регулировочной таблице, и не должно превышать его.

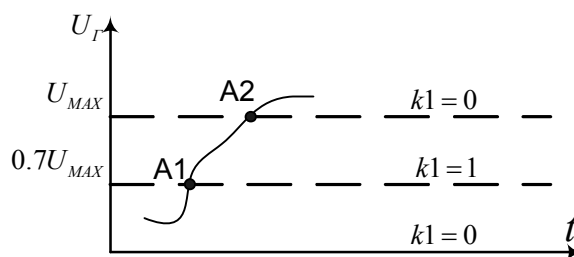


Рис. 1. Критерий напряжения на выходе генератора

Напряжение на выходе фильтра напрямую зависит от напряжения на генераторе и может быть в 4.0-9.5 раз больше (ШЦ/0034, п. 4.7.5). Критерий, описывающий данный параметр, показан на рис. 2.

Аналогично рис. 1, параметр ($k_2=1$) при наличии напряжения на выходе фильтра в пределах нормативных значений между точками В1 и В2.

Электрическое напряжение на входе путевого приемника в различных состояниях рельсовой цепи может принимать противоречивые значения (так, низкое напряжение

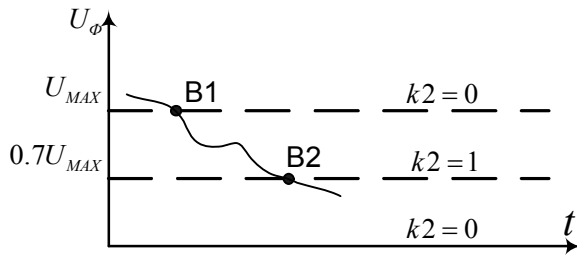


Рис. 2. Критерий напряжения на выходе фильтра

указывает нормальное состояние РЦ в шунтовом режиме или неисправное состояние при нормальном режиме, а допустимо высокое из регулировочной таблицы – исправное состояние нормального режима или наличие подпитки из постороннего источника). Критерий k3 (рис. 3) описывает параметр Упп.

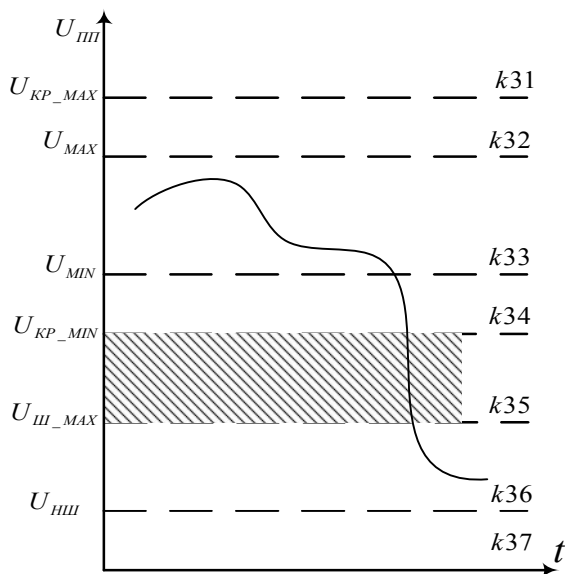


Рис. 3. Критерий напряжения на входе путевого приемника

На рис. 3 показаны границы критерия k3, который принимает только одно из показанных значений k31-k37, следовательно:

$$\sum_{i=1}^7 k3i = 1 \quad (1)$$

К примеру, рельсовая цепь работает в нормальном режиме, тогда для Упп ($k33=1$).

Значения U_{KP_MAX} и U_{KP_MIN} соответствуют указанным в регулировочной таблице, $U_{Ш_MAX}$ – максимальное напряжение на входе ПП при наличии шунта для любой ординаты размещения поездного шунта, $U_{НШ}$ – минимальное напряжение Упп при нахождении на рельсовой линии шунта и наихудших условиях передачи сигнала по РЛ.

Как правило, данные подкритерии характерны для таких ситуаций:

- k31 – напряжение на входе ПП выше допустимого значения;
- k32 – приближение значения Упп к верхнему допустимому пределу;
- k33 – напряжение на входе ПП находится в пределах нормы;
- k34 – приближение Упп к нижнему допустимому пределу;
- k35 – недопустимые значения напряжений, возможны только при изменении состояния рельсовой цепи;
- k36 – напряжение на входе ПП находится в пределах нормативных значений;
- k37 – напряжение Упп указывает на возможность неисправности рельсовой линии, либо другого элемента РЛ.

Значения k32-k34 свойственны нормальному, а k36 и k37 – шунтовому режиму работы рельсовой цепи.

Напряжение на обмотке путевого реле в нормальном режиме работы РЦ должно быть в пределах от 4.0 до 8.0 В (ЦШ/0034, п. 4.7.7), и не более 0.42 В (ЦШ/0034, п. 3.9.8) в шунтовом режиме работы. Дополнительно, режим работы рельсовой цепи можно проверить по состоянию реле последовательного занятия ПЗ и последовательного освобождения ПО. Критерий k4 описывает параметр Упрл как показано на рис. 4.

На рис. 4 показаны 4 подкритерия, которые описывают все состояния параметра Упрл, которые соответствуют следующим состояниям: k41 – параметр превышает максимально допустимое значение; k42 – параметр в пределах нормы (при работе системы в нормальном режиме); k43 – недопустимое значение параметра, наблюдается

при переходе системы (ТРЦ) из одного основного режима работы в другой; k_{44} – параметр в пределах нормы (при работе системы в шунтовом режиме).

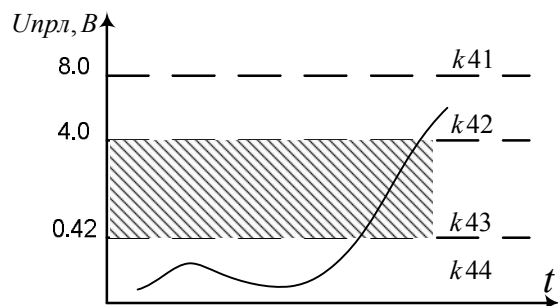


Рис. 4. Критерий напряжения на обмотке путевого реле

Как и k_3 , для подкритериев k_{41} – k_{44} справедливо выражение:

$$\sum_{i=1}^4 k_{4i} = 1, \quad (2)$$

которое значит, что в один момент времени может присутствовать только один подкритерий параметра $U_{пл}$.

Напряжение $U_{птэг}$ находится следующим образом:

$$U_{птэг} = \frac{\bar{U}_{тэг} - \underline{U}_{тэг}}{2}, \quad (3)$$

где $U_{тэг}$ – максимальное и минимальное напряжение тока электропитания генератора соответственно за один период. Критерий k_5 описывает параметр $U_{птэг}$, при превышении данного напряжения значения 0.9 В будет равен «0», в остальных случаях – «1».

Остаточные напряжения на входе ПП и на обмотках путевых реле могут быть описаны критериями k_3 и k_4 при прохождении поезда с условием того, что реле ПЗ данной рельсовой цепи стали под ток. Тогда нормативным значениям параметров $U_{опп}$ и $U_{пл}$ будут соответствовать значения подкритериев k_{36} (или k_{37}) и k_{44} . Таким образом, количество контролируемых электрических параметров уменьшается за счет объединения критериев контроля. Данное со-

кращение уменьшает объем периодически выполняемых работ по измерению остаточных напряжений путевого приемника и путевого реле, несмотря на то, что необходимо производить контроль состояния реле последовательного занятия рельсовой цепи.

Как было указано, к дополнительным параметрам контроля относятся сопротивление балласта $R_б$, напряжение сети питания $U_{пит}$ и напряжение кодowego трансформатора $U_{кт}$. Согласно ЦШ/0034 (п. 3.9.11) напряжение на кодowych трансформаторах (КТ) должно быть не менее указанного значения в регулировочной таблице, следовательно, критерий k_6 , который описывает параметр $U_{кт}$ должен быть «1» при превышении данного табличного значения и «0» в других случаях. Параметр $U_{кт}$ считается в пределах нормы, если ($k_6=1$), измерение необходимо проводить в момент занятия рельсовой цепи подвижной единицей.

Напряжение сети питания, согласно ТК 73 и ЦШЕОТ/0012 п. 18.1.8 [2] может допускать изменение в пределах от +5% до -10% для номиналов 230 В и 380 В. Значение критерия k_7 будет «1» только при соответствии напряжения $U_{пит}$ нормативному.

Критерий k_8 , описывающий параметр сопротивления балласта, приравнивается к «1» при значении $R_б \geq 1$ Ом·км, однако определение данного значения может потребовать проведение вспомогательных измерений на станции.

В результате дискретизации автоматически измеряемых параметров полученные значения критериев k_1 – k_8 позволяют непрерывно контролировать состояние основных и дополнительных электрических параметров тональной рельсовой цепи.

Описание одиночных неисправностей

В результате описания критериями всех контролируемых параметров составляется булева функция контроля FK , которая описывает исправное состояние рельсовой цепи. Данная функция принимает значение «1» при нахождении всех подконтрольных параметров в пределах нормы.

$$\begin{aligned}
 FK = & k_1 \cap k_2 \cap (k_{32} \cup k_{33} \cup k_{34}) \\
 & \cap k_{42} \cap k_5 \cap k_6 \cap k_7 \cap k_8 \cup \\
 & k_1 \cap k_2 \cap k_{36} \cap k_{44} \cap \\
 & k_5 \cap k_6 \cap k_7 \cap k_8 \cap k_9
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

где FK – функция контроля; k_9 – вспомогательный критерий, указывающий на состояние реле последовательной занятости ре-

льсовой цепи ($k_9=1$ когда ПЗ находится под током).

Фактически, наиболее часто встречающимися неисправностями являются одиночные неисправности, когда выходит из-под контроля только один параметр [5]. Функции элементарных состояний неисправностей ТРЦ сведены в табл. 2.

Таблица 2

Функции элементарных неисправностей ТРЦ

№ функции неисправности	Критерии								
	k_1 U_r	k_2 U_ϕ	k_3 $U_{пп}$	k_4 $U_{прл}$	k_5 $U_{птэг}$	k_6 $U_{кт}$	k_7 $U_{пит}$	k_8 R_6	k_9 ПЗ
FR1	0	0	k_{33}	K_{42}	1	x	1	1	0
FR2	0	0	k_{36}	K_{44}	1	x	1	1	1
FR3	1	0	x	x	x	x	x	x	x
FR4	x	x	k_{31}	x	x	x	x	x	x
FR5	x	x	k_{32}	x	x	x	x	x	x
FR6	x	x	k_{34}	x	x	x	x	x	x
FR7	x	x	k_{35}	x	x	x	x	x	x
FR8	x	x	k_{37}	x	x	x	x	x	x
FR9	x	x	k_{33}	x	x	x	x	x	1
FR10	x	x	k_{36}	x	x	x	x	x	0
FR11	x	x	x	K_{41}	x	x	x	x	x
FR12	x	x	x	K_{43}	x	x	x	x	x
FR13	x	x	x	x	0	x	x	x	x
FR14	x	x	x	x	x	0	x	x	x
FR15	x	x	x	x	x	x	0	x	x
FR16	x	x	x	x	x	x	x	0	x

В таблице 2 знаком «х» указывает на то, что данный признак не играет роли при определении этой неисправности.

В табл. 2 функции неисправности указывают на следующее:

FR1 и FR2 – напряжение на выходе генератора находится вне пределов нормативных значений, необходима регулировка, т.к. возможно невыполнение нормального и шунтового режима работы РЦ соответственно;

FR3 – напряжение на выходе фильтра находится вне нормативных значений из-за неисправности внутренних элементов, необходимо заменить его;

FR4 – напряжение на входе путевого приемника выше разрешенного значения, негарантированное выполнение шунтового режима либо выход из строя ПП;

FR5 (FR6) – напряжение Упп приближается к верхней (нижней) допустимой границе, возможно невыполнение шунтового (либо нормального) режима;

FR7 – напряжение Упп находится в запрещенной зоне, возможно несоответствие состояния путевого реле состоянию ПП;

FR8 – Упп ниже расчетного значения в шунтовом режиме, возможна неисправность в рельсовой линии;

FR9 и FR10 – несоответствие показаний реле занятости с напряжением на входе путевого приемника, возможна неисправность схемы реле ПЗ;

FR11 – неисправное состояние ПП либо внешняя подпитка путевого реле;

FR12 – неисправное состояние путевого приемника;

FR13 – неисправна схема питания генератора, либо сам генератор;

FR14 – возможно невыполнение режима локомотивной сигнализации, необходимо увеличить Укт;

FR15 – неисправность в цепи питающей панели (статива);

FR16 – неудовлетворительное состояние балласта, возможно невыполнение нормального или АЛС режима.

Выводы

В результате проведенной работы на основе анализа существующих методов кон-

троля тональных рельсовых цепей проведен выбор параметров и критериев оценки технического состояния рельсовых цепей для дальнейшей разработки методов и средств автоматизированного контроля ТРЦ, что позволит:

- автоматически проверять состояние всех рельсовых цепей перегона;
- уменьшить время на проведение измерительных работ;
- снизить загрузку работников службы «Ш»;
- проводить сравнительный анализ работы контролируемых ТРЦ;
- проводить автоматический сбор статистических данных и их простую передачу по каналу связи при необходимости на диспетчерский пункт;
- уменьшить время устранения неисправностей;
- организовать систему диспетчерского контроля рельсовых цепей тональной частоты на участке любой длины и сложности.

Библиографический список

1. Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування. ЦШ-0042 [Текст]: Затв.: наказ Державної адміністрації залізничного транспорту України 26.04.2006р. № 347-ЦЗ/ Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2006. – 461 с.
2. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ). ЦШЕОТ-0012 [Текст]: Затв.: наказ Державної адміністрації залізничного транспорту України 05.10.1998 № 243-Ц/ Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 1998. – 72 с.
3. Методичні вказівки з експлуатації тональних рейкових кіл ЦЦ-0034 [Текст]: Затв.: наказ Державної адміністрації залізничного транспорту України 23.02.2004 № 030-Ц/ Мін-во транспорту України. – К., 2004. – 48.
4. Сапожников, В.В. Основы технической диагностики [Текст]: Учебное пособие для студентов вузов ж-д. транспорта / В.

- В. Сапожников, Вл. В. Сапожников – М.: Маршрут, 2004. – 318с.
5. Сафарбаков, А. М. Основы технической диагностики деталей и оборудования: учебное пособие [Текст] / А. М. Сафарбаков, А. В. Лукьянов, С. В. Пахомов. – Ч.1 – Иркутск: ИрГУПС, 2007. – 128 с.

Ключевые слова: методы контроля, тональные рельсовые цепи, автоматизация.

Ключові слова: методи контролю, тональні рейкові кола, автоматизація.

Key words: control methods, tonal frequency railway circuit, automatization.

Надійшла 20.12.2010.

Прийнята до друку 23.12.2010.

УДК656.25: 621.318.5

МАЛОВІЧКО В. В. – ст. викладач (ДНУЗТ)

ГАВРИЛЮК В. І. – д.ф.-м.н., професор (ДНУЗТ)

РИБАЛКА Р. В. – асистент (ДНУЗТ)

КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ СТІЛОЧНИХ ПЕРЕВОДІВ ПО ЧАСОВІЙ ЗАЛЕЖНОСТІ СТРУМУ ПЕРЕВОДУ СТІЛКИ БЕЗ ВИКЛЮЧЕННЯ СТІЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Вступ

В даній роботі авторами запропонований метод непрямого діагностування та контролю деяких відмов стрілочних переводів з електроприводами постійного струму.

Зовнішня перевірка стану електроприводів і стрілочних гарнітур виконується електромеханіком один раз на тиждень на стрілках, що беруть участь в маршрутах приймання та один раз на два тижні на решті стрілок [1]. При використанні системи автоматичного діагностування стрілочних електричних двигунів з послідовним збудженням, в котрій для контролю стану двигуна використовується крива споживання струму ми маємо змогу частково контролювати стан стрілочного переводу по не прямим даним. Таку можливість ми одержуємо завдяки тому, що між кривою споживання струму двигуном, та навантаженням на валу двигуна існує пряма залежність, і зміни навантаження на валу відбиваються на кривій споживання струму [2].

Метою даної роботи є визначення необхідних діагностичних ознак для аналізу

стану стрілочних переводів з електричними двигунами з послідовним збудженням без виключення стрілок з поїздної і маневрової роботи по котрих автоматична система діагностування та контролю визначатиме та класифікуватиме несправності.

Методика вимірювання

Для діагностування стану стрілочного переводу ми користуємося тією самою методикою, що використовувалась для діагностування стрілочних двигунів [3]. Єдиною відмінністю при діагностуванні та контролі стрілочного переводу є те, що в випадку діагностування всього переводу нас цікавить не лише друга ділянка (рис. 1), а весь процес переводу стрілки [4], починаючи від моменту спрацьовування реле ППР в схемі керування стрілкою (окремий всплеск рівня сигналу до початку переведення стрілки) [5].

При аналізі відмов стрілочного переводу по кривих споживання струму у нас з'являється можливість контролювати та діагностувати всі вище перелічені несправності стрілочного двигуна постійного струму без зняття його з стрілочного переводу. Крім

цього, з'являється можливість часткової діагностики стрілочного переводу. Найбільша перевага такого методу заключається в тому, що практично без зміни схеми керування стрілки та використання додаткової апаратури на коліях ми маємо змогу контролювати та діагностувати основні елементи стрілочного переводу, контроль яких дозволяє попереджувати більшість відмов стрілок.

Результати

На рис 1 приведена крива переводу стрілки в мінусове положення при практично справному стрілочному переводі і стрілочному двигуні без відмов. В двигуні постійного струму з послідовним збудженням ми контролюємо ті самі несправності що приводились в попередній статті [3], тобто використовуємо для контролю та діагностики другу ділянку кривої споживання струму з застосуванням спектрального аналізу. До параметрів які ми можемо діагностувати і контролювати в самому стрілочному переводі можна віднести такі як забруднення башмаків стрілочного переводу, відсутність зазору в корні вістряка стрілки, збільшення опору лінійних провідників Л1 та Л2, збільшення току фрикції, і т. д. При цьому, для аналізу ми використовуємо всю криву споживання струму, а не лише її другу ділянку.

Для проведення аналізу впливу зміни опору лінійних провідників Л1 та Л2 на криву споживання струму стрілочним переводом, на одиночній стрілці, в електроприводі якої знаходився двигун постійного струму з послідовним збудженням типу МСП – 0.25 ми провели контрольні вимірювання, при яких штучно змінювали опір лінійних провідників. Причому стрілка являлась не спареною, з одним і тим самим двигуном, без значних недоліків в конструкції та обслуговуванні.

На стрілці ми провели три групи вимірювань. При першій групі вимірювань опір провідників Л1 та Л2 штучно не змінювався (рис 2), і при вимірюванні за допомогою мегаомметра складав 7 МОм.

При проведенні другої групи контрольних вимірювань, на виводах дужок на кросовій поста електричної централізації було

встановлено за допомогою резисторів опір, паралельно двигуну. Цей опір був відрегульований таким чином, щоб загальний опір провідників Л1 та Л2 при вимірюванні за допомогою мегаомметра дорівнював 1 МОм (рис. 3).

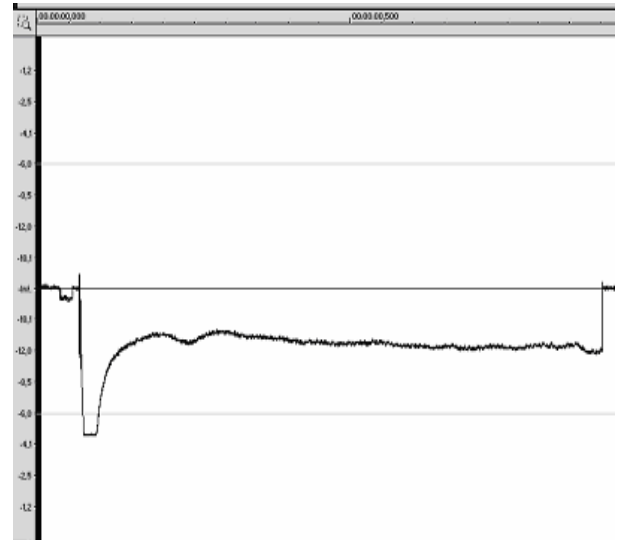


Рис.1. Стрілка нормально працює, двигун без несправностей

При проведенні третьої групи контрольних вимірювань умови залишилися тими самими, але за допомогою резисторів був виставлений опір лінійних провідників рівний 18 кОм. При даних умовах також було знято групу кривих споживання струму, одна з яких приведена на рис 4.

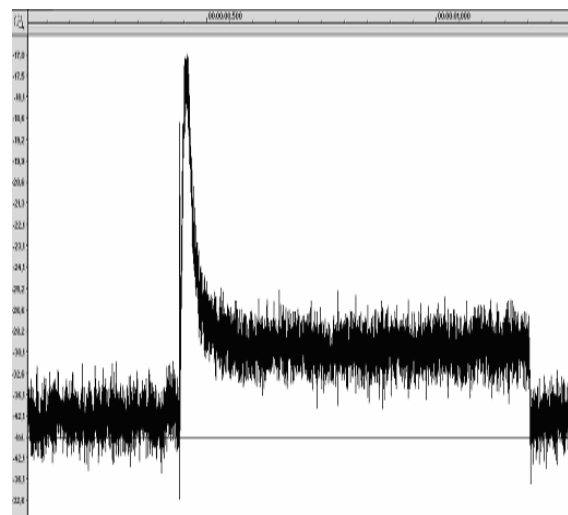


Рис.2. Крива споживання струму при нормальній родоті стрілочного переводу з опором лінійних провідників 7 МОм

Якщо проводити аналіз цих трьох кривих, які є зразками для кожної групи контрольних вимірювань, то можна знайти ознаки, по яких можна фіксувати зменшення опору лінійних провідників.

Спочатку проаналізуємо час переходу стрілки. Як ми бачимо, при опорі лінійних провідників Л1 та Л2 або по другому стрілочного кабелю рівному 7 МОм, час переходу стрілки дорівнює приблизно 750 мс. При опорі стрілочного кабелю 1 МОм, час переходу стрілки складає 775 мс. При опорі лінійних провідників 18кОм, час переходу тієї самої стрілки складає 850 мс. Час переходу стрілки зростає зі зменшенням опору лінійних провідників, але зростає в дуже незначній мірі.

Таке зростання часу переходу стрілки може бути зумовлено також забрудненням башмаків, або шибера. Тому робимо висновок, що по часу переходу стрілки контролювати зменшення опору лінійних провідників можливо але проблематично.

Якщо подивитися на амплітуду сигналу, то ми побачимо певну закономірність. При переході стрілки з лінійним опором 7 МОм амплітуда сигналу на першій (ненавантаженої) ділянці кривої споживання струму досягає -17Дб , а на другій ділянці – -28Дб .

При лінійному опорі 1 МОм, на першій ділянці амплітуда досягає -12Дб , а на другій ділянці – -24Дб . При лінійному опорі низького рівня 18кОм, амплітуда сигналу на другій ділянці сягає $-12,5\text{Дб}$, а на першій ділянці вище – -5Дб . З вище сказаного можна зробити висновок, що ми маємо зворотньопропорційну залежність між опором лінійних провідників та амплітудою сигналу. При цьому, якщо величина рівня споживання струму на другій ділянці кривої споживання може збільшуватись і через інший ряд причин (наприклад забруднення башмаків стрілки, провисання вістряків, застигання стрілочного переводу), то збільшення амплітуди на першій ділянці, де двигун працює без навантаження з боку вістряків стрілки, може бути зумовлене тільки зменшенням опору лінійних провідників. Це пояснюється тим, що на першій ділянці кривої, величина струму залежить лише від

опору лінійних провідників, та активного опору обмотки збудження двигуна і якоря.

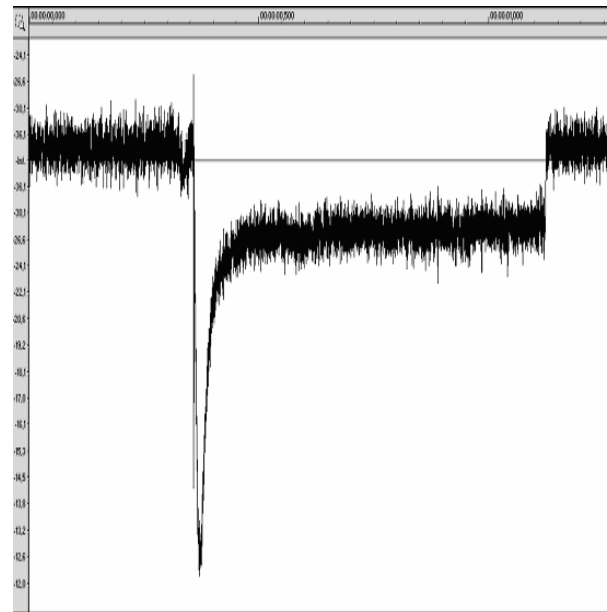


Рис.3. Крива споживання струму при нормальній роботі стрілочного переводу з опором лінійних провідників 1 МОм

Так як активний опір двигуна в більшості випадків не змінюється, а якщо і змінюється по причині обривів чи коротких замикань в якові або обмотці збудження, то ми це фіксуємо за допомогою методики яка приведена вище.

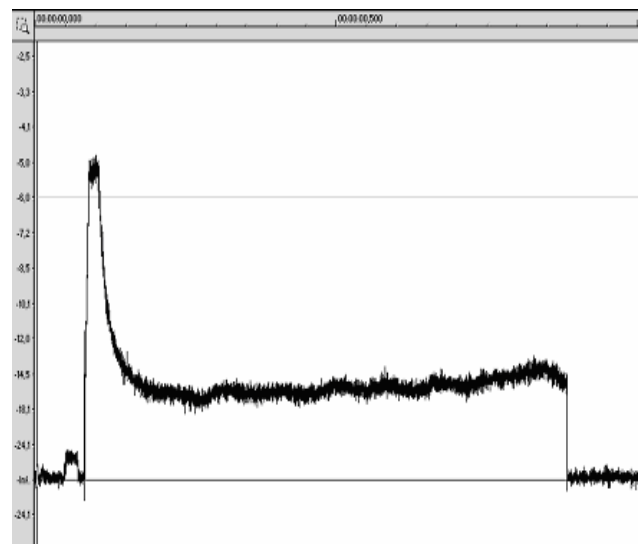


Рис.4. Крива споживання струму при нормальній роботі стрілочного переводу з опором лінійних провідників 18 кОм

З цих даних ми можемо зробити висновок, що по величині струму на першій

ділянці кривої споживання ми можемо контролювати величину опору стрілочного кабелю.

Наступним параметром діагностування та контролю, котрий ми можемо фіксувати по кривій споживання струму стрілочним двигуном постійного струму є відсутність зазору в корні вістряків стрілки. При перевірці, зазор між корнем вістряка та рамною рейкою повинен складати 4 – 8 мм. При відсутності такого зазору, виникає явище яке називають “пружинність” вістряка [6]. Суть його заключається в тому, що при відсутності зазору при переводі стрілки з одного положення в інше, корень вістряка в кінці переводу своїм кутом впирається в рамну рейку, і для того щоб стрілка довелася до кінця потрібно прикласти більше зусиль з боку стрілочного двигуна (рис. 5). Ці зусилля йдуть на те, щоб зігнути вістряк, так як відсутність зазору в його корені не дає змоги його переміщати. Зігнутий вістряк при закінченні переводу за пружинить, даючи додаткове навантаження на робочу тягу, шибєр та автоперемикач. На стрілці, крива споживання котрої приведена на рис. 5 на лівому вістряку зазор біля двох міліметрів, а на правому вістряку зазор біля семи міліметрів. Відповідно до цього при переводі стрілки в плюсове положення спостерігається невелика пружинність вістряка, а при переводі в мінусове положення пружинність відсутня.

Збільшення споживання струму на прикінці другої ділянки кривої споживання (на кінці другої ділянки кривої споживання струму спостерігається зростання амплітуди сигналу) викликано тим, що за рахунок пружності вістряка збільшується навантаження на стрілочний двигун, а так як струм якоря, а відповідно і струм споживання прямопропорційний моменту на валу двигуна, і момент збільшується, то відповідно і збільшується споживання струму. Амплітуда споживання струму збільшується на невелику величину, так як на стрілочному переводі в корені лівого вістряка зазор всежтаки є, але він нижче норми. При повній відсутності зазору, величина зростання струму на цьому відрізку кривої споживання струму може до-

сягати 2/3 величини струму на першій ділянці кривої споживання

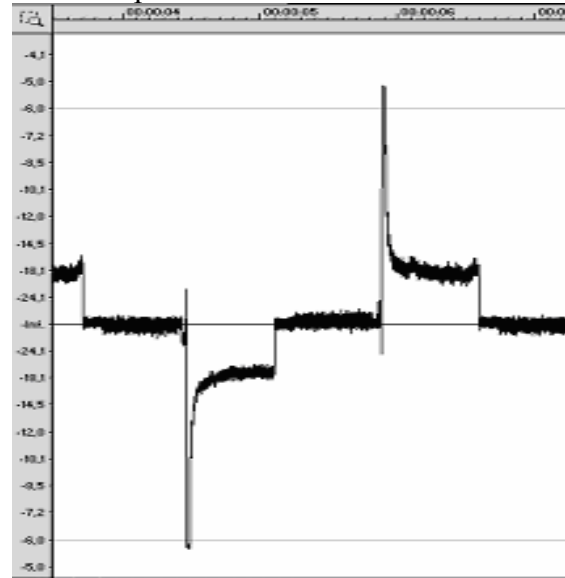


Рис.5. Група кривих споживання струму з пружинністю вістряка при переводі стрілки в плюсове положення

По кривій споживання струму ми маємо змогу також контролювати стан стрілочного переводу у випадку його роботи на фрикцію. По нормам, які закладені в технологічних картах, збільшення споживання струму стрілочним двигуном постійного струму не повинно перевищувати 25 – 30 % від нормального переводу. Ці норми надають нам змогу контролювати максимально допустимий рівень споживання струму при роботі на фрикцію без вимірювання в абсолютних одиницях, а шляхом порівняння споживання струму при нормальному переводі, та при роботі на фрикцію. Криві споживання струму при роботі на фрикцію та при нормальному переводі стрілки (зображені на рис.6)

На рис. 6 ми бачимо, що при переводі стрілки в плюсове положення рівень споживання струму на другій ділянці кривої збільшується більше ніж в два рази. Слід також вказати на той факт, що при вимірюванні щільності прилягання вістряків стрілки до рамної рейки, яке проводиться щотижня по графіку технологічного процесу, кожна стрілка котру перевіряють буде працювати на фрикцію і при переводі в плюсове положення, і при переводі в мінусове положен-

ня. Це викликано специфікою даних вимірювань.

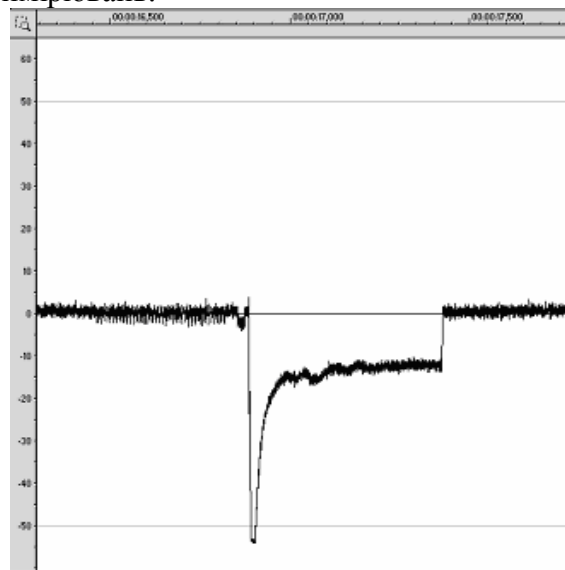


Рис.6. Криві споживання струму при роботі стрілки на фрикцію та при нормальному переводі

А так як при створенні системи автоматичного контролю та діагностування стрілочних переводів ми матимемо можливість записувати всі переводи стрілок, то з графіку технологічного процесу ми матимемо змогу виключити роботи по вимірюванню струму фрикції. Це нам дасть можливість звільнити електромеханіка від даного типу робіт, які є досить тривалими. Крім того впровадження такої системи дасть нам змогу контролювати сумлінність виконання обслуговуючим персоналом графіку технологічного процесу, так як в тому випадку, якщо вимірювання щільності прилягання не буде виконуватись один раз на тиждень на всіх централізованих стрілках, це буде зафіксовано системою контролю та діагностування.

При забрудненні башмаків (погане обслуговування переводу) стрілка рухається рівномірно, але сильно зростає момент навантаження на валу двигуна. В цьому випадку, з кривої споживання струму (рис. 7) видно, що після рушення вістряків з місця, струм зростає а не залишається незмінним, як при переводі нормально функціонуючої стрілки. Крива споживання струму стрілки була заміряна в реальних умовах експлуатації, тому рівень забруднення на

даному стрілочному переводі доволі низький, але вже досить помітний.

При засипанні стрілочного переводу, форма кривої струму (рис. 8) на ділянці 1 – 2 матиме перепади струмів, оскільки стрілочні вістряки рухаються ривками що приводить до зміни навантаження на валу двигуна і відповідно до формули змінюється струм споживання

$$I_{я} = \sqrt{\frac{M}{C_{м} \times C_{ф}}}$$

З форми кривої споживання струму у цьому випадку видно, що на початку ділянки 1 – 2 переводу стрілки в мінусове положення (перша крива), величина струму складала близько 20 %, а наприкінці другої ділянки близько 35 % від максимальної величини струму. Як видно із форми кривої, в цьому випадку крім поступового збільшення величини струму на протязі переводу стрілки, ми бачимо також збільшення та зменшення струму різкими стрибками в відповідності з збільшенням та зменшенням навантаження на валу двигуна в залежності від плавності руху стрілочних вістряків по забрудненим башмакам.

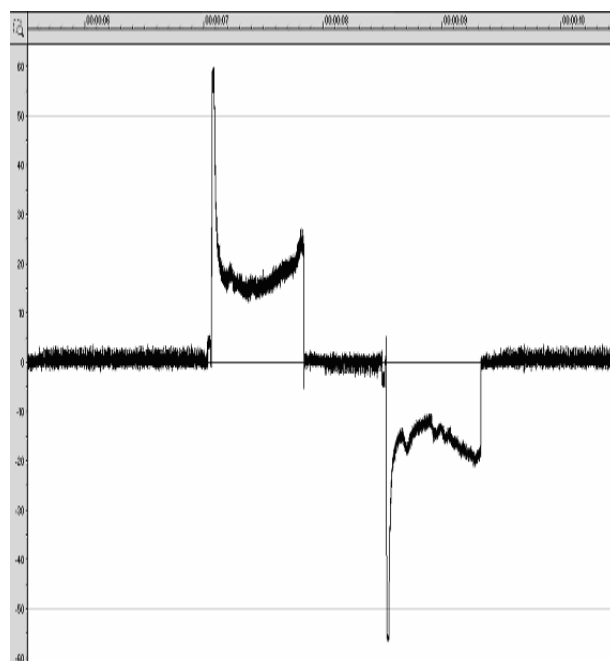


Рис. 7. Крива споживання струму при переводі стрілки в плюсове та мінусове положення

При аналізі справності та працездатності стрілочного переводу треба брати до уваги що стрілки, які експлуатуються навіть на одній і тій же станції працюють в різних умовах. Одні стрілочні переводи працюють на дерев'яних шпалах, інші на залізобетонних, в одних стрілочних приводах установлені стрілочні двигуни постійного струму з послідовним з'єднанням потужністю 100 Вт, в інших 150 Вт, 250 Вт, 180 Вт. Також різні криві споживання струму будуть при різній степені пологості стрілок, так як чим пологіша стрілка, тим важчі стрілочні вістряки, а відповідно і навантаження на двигун. Також збільшується навантаження на двигун при використанні перехресних стрілок з чотирма вістряками. Але якщо при установці системи діагностування та контролю врахувати всі ці нюанси, і при замінах пристроїв вносити в систему відповідні корективи, то ніяких складностей для роботи системи діагностування та контролю це не складатиме.

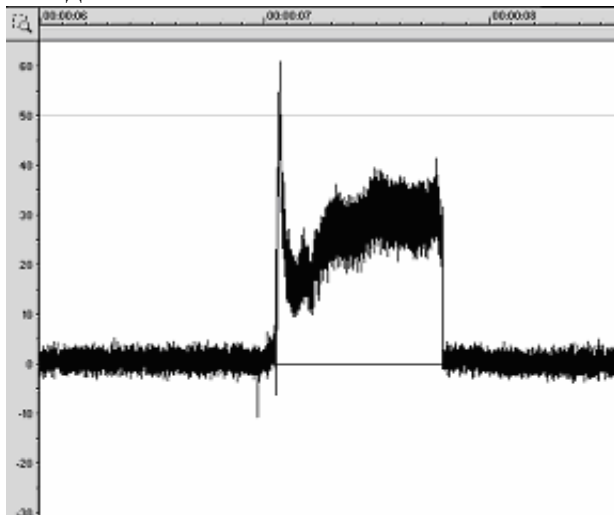


Рис.8. Криві споживання струму при переводі стрілки з сильно забрудненими башмаками

Висновки

З вище перерахованого, можна зробити висновок, що за допомогою аналізу форми кривої споживання струму двигуном, та спектрального аналізу можна виявляти всі основні несправності двигуна постійного струму з послідовним збудженням і значну частину несправностей стрілочного переводу з досить великою точністю. Звичайно повністю всі несправності привода визна-

чити не вдасться, але автоматичний контроль визначених параметрів дає можливість в значній мірі скоротити час перевірки стрілочного переводу, без додаткових затрат. Також до переваг даної системи можна віднести можливість контролю як двигунів і стрілок станції, так і гірок [7]. Авторами на даний час визначено діагностичні ознаки для 16 несправностей стрілочних переводів, схем керування стрілкою та стрілочних двигунів. Найбільшим плюсом даної системи контролю є те, що виявлення несправностей відбувається в автоматичному режимі в процесі їх експлуатації без виключення стрілки з електричної централізації в автоматичному режимі.

Бібліографічний список

1. Инструкция з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування.
2. Резников, Ю. М. Электроприводы ж.д. А и Т [Текст] / Ю. М. Резников. – М.: Транспорт, 1985.
3. Маловічко, В. В. Визначення діагностичних ознак для автоматизованого контролю технічного стану стрілочних електродвигунів [Текст] / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк, В. Я. Кізяков // Вісник Дніпропетровського національного університету імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 17. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007.
4. Безрученко, В. Н. Электрические машины [Текст] / В. Н. Безрученко. – К.: Вища шк. Головное изд-во. – 1987. – 215 с.
5. Сапожников, Вл. В. Станционные системы автоматики и телемеханики: Учеб. Для вузов ж.-д. трансп. [Текст] / Вл. В. Сапожников, Б. Н. Елкин, И. М. Кокурин и др. // М.: Транспорт. – 1997. – 432 с.
6. Резников, Ю. М. Стрелочные электроприводы электрической и горочной централизации [Текст] // М.: Транспорт. – 1975.
7. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода [Текст] / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер // М.: Энергоиздат. – 1981. – 576 с.

Ключові слова: стрілочні переводи, двигун, залізничні станції, струм.

Ключевые слова: стрелочные переводы, двигатель, железнодорожные станции, ток.

Key words: switch transfer, machine, railway station, current.

Надійшла до редколегії 16.12.2010.

Прийнята до друку 17.12.2010.

УДК 656.259.12

ДУНАЄВ Д. В. – ст. викладач (ДНУЗТ)

РОМАНЦЕВ І. О. – асистент (ДНУЗТ)

АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ВІДМОВ І МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЙКОВИХ КІЛ

Представив д.ф.-м.н., проф. Гаврилюк В. І.

Вступ

Рейкові кола є основним колійним датчиком систем залізничної автоматики на станціях і перегонах, від правильності роботи яких залежить безпека руху поїздів (БРП). У зв'язку з тим, що постійно підвищуються вимоги до БРП зростає важливість технологічного обслуговування рейкових кіл (РК), зокрема тональних рейкових кіл (ТРК), які застосовуються на ділянках із прискореним рухом поїздів.

Подальше підвищення безпеки рейкових кіл пов'язане з поліпшенням технічного обслуговування на якісно новому рівні з використанням автоматизованих методів контролю, а також пошуку кращих методів вимірювання параметрів РК. Для розробки таких методів і систем необхідно попередньо провести аналіз статистики відмов рейкових кіл з виявленням причин відмов, що найчастіше зустрічаються, і проаналізувати методи вимірювання параметрів РК.

Метою роботи є проведення аналізу відмов рейкових кіл, існуючих методів контролю стану РК та методів вимірювання їх параметрів для розробки на цій основі методів вимірювання та засобів автоматизованого контролю параметрів рейкових кіл.

Аналіз відмов рейкових кіл

На залізницях України відбувається інтенсивне впровадження рейкових кіл тональної частоти (ТРК) на ділянках зі швидким рухом поїздів. Ці рейкові кола відрізняються від тих, що експлуатуються, наступними позитивними особливостями: повною відсутністю ізолюючих стиків на перегоні, застосуванням апаратури на сучасній елементній базі й амплітудно-модульованого сигналу замість синусоїдального, а так само можливістю роботи при низькому опорі ізоляції баласту. Перераховані відмінності у свою чергу викликають складності при аналізі роботи ТРК обслуговуючим персоналом, тому що змінюється структура відмов і методи контролю цих рейкових кіл (тип вимірювальних приладів). Дана обставина позначається на безпеці руху поїздів (БРП). Тому з метою підвищення безпеки ТРК у даній роботі проведений аналіз відмов і методів контролю, вимірювання параметрів РК.

Аналіз структури відмов ТРК полягав у наступному: розподіл відмов рейкових кіл з ізолюючими стиками (далі РК із ІС) по елементах; порівняльний аналіз РК із ІС і ТРК за питомими показниками на 1000 рей-

кових кіл. Слід зазначити, що аналіз проводився за 2005 рік на підставі даних [1] для залізниць Росії, де експлуатація ТРК ведеться більше 10 років і ними обладнано більше дільниць, що збільшує вибірку й об'єктивність результатів, на відміну від залізниць України.

Усього відмов РК із ІС за 2005 рік на всій мережі залізниць Росії зафіксовано 1966, при цьому ці відмови близько 20 % від всіх відмов господарства сигналізації, централізації й блокування (СЦБ). На першому етапі аналізу виявлені такі причини відмов, які представлені на рис. 1. При цьому найчастіше відмова доводилася на ізолюючий стик (ІС) – усього 570, на стикові з'єднувачі – 356, на закорочування рейкових кіл – 315, на тягові, міжколіїні з'єднувачі, порушення регульовального режиму, вплив сторонніх джерел, злам рейки – 235, на несправність апаратури – 196, на інші причини відмов – 294.

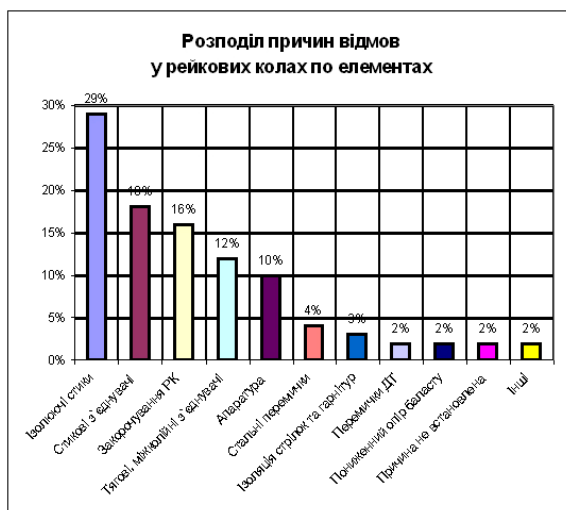


Рис. 1. Розподіл причин відмов у рейкових колах по елементах

На залізницях України відмов рейкових кіл з ІС за 2005 рік зафіксовано 246 згідно [2]. При цьому дані відмови становлять 13 % від всіх відмов СЦБ. Незважаючи на розходження в кількості відмов рейкових кіл і їхній питомій вазі по господарствах СЦБ на залізницях Росії та України саме ці відмови безпосередньо впливають на БРП. Однак практично біля чверті від загальної кількості відмов рейкових кіл пов'язано з порушеннями технології обслуговування (ТО).

Весь попередній аналіз для залізниць Росії та України виконано для РК із ІС, але не до ТРК. Представлені результати в [1] для залізниць Росії порівняльного аналізу роботи РК із ІС і ТРК свідчать що по кількості відмов на 1000 рейкових кіл тональної частоти працюють в 3 рази надійніше. Таке збільшення надійності роботи пояснити тільки практично повною відсутністю ізолюючих стиків неможливо, тому вимагає детальних пояснень. По-перше, вплив сторонніх джерел практично виключається, тому що забезпечується придушення будь-якого іншого сигналу. По-друге, зменшується кількість дросель-трансформаторів (ДТ), які ставляться через кожні 5-6 км. По-третє, виконання апаратури з урахуванням сучасних вимог і на сучасній елементній базі приводить до скорочення кількості відмов. По-четверте, підвищення коефіцієнта повернення колійного приймача до 0,8, що поліпшує основні режими роботи ТРК.

Така перевага за надійністю роботи збільшується, при впровадженні ТРК із централізованим розміщенням апаратури. Однак на залізницях України в ТРК, як і в РК із ІС, біля чверті від всіх відмов пов'язано з порушенням технічного обслуговування (ТО), а в 11 % відмов причина не виявлена, що можна пояснити складністю в експлуатації й діагностування відмов.

Для роз'яснення наведеного вище приведемо приклад діагностування несправності електромеханіком ТРК на перегоні в нормальному режимі.

Несправність ізолюючих стиків (коротке замикання). Можлива така ситуація, коли колійний приймач суміжного рейкового кола стане під струм і на зайняту ділянку шляху вступить рухома одиниця, що приведе до катастрофи. У цьому випадку необхідно перевіряти відсутність сигналу контрольованого рейкового кола на колійному приймачі суміжної ТРК (напруга на виводах 11-43 блоку ПП). Для короткого замикання ізолюючих стиків характерно досить різке збільшення контрольованої напруги.

Несправність стикового з'єднувача (розрив). У результаті через нього припиняє протікати сигнальний струм рейкового кола аналогічно, як у випадку обриву рейки. Рей-

кове коло починає працювати в контрольному режимі. На ПП різко зменшується напруга сигналу, у тому числі й від сусідніх ТРК, при відсутності ІС на межах контрольованої дільниці. Струм джерела ТРК різко зменшується.

Результатом короткого замикання є різке збільшення струму (і відповідно потужності) генератора ТРК. На колійному приймачі напруга стрибком зменшується нижче величини надійного відпускання, фіксує зайнятість контрольованої дільниці.

Несправність міжколійного з'єднувача за характером впливу аналогічна ситуації несправності стикових з'єднувачів.

Несправність тягових перемичок, які організують електричне з'єднання рейка-ДТ, має на увазі перегорання даного провідника струму. У цьому випадку зворотний тяговий струм протікає тільки по одній рейці, збільшується асиметрія струму й на прийомному кінці ТРК виникає струм частотою 50 Гц і відбувається розмикання АВМ-2 15А (при електротязі змінного струму). Або ж збільшується намагніченість сердечника ДТ, що приводить до зміни параметрів ДТ живлячого (або релейного) кінця й форми сигналу на прийомному кінці ТРК (при електротязі постійного струму).

Зменшення напруги на колійному приймачі нижче зазначеного в регулювальній таблиці. У цьому випадку причин може бути декілька: витік струму, вплив сторонніх джерел, зменшення опору ізоляції баласту, і т.д. Тому електромеханіку в цьому випадку найбільше складно визначити причину несправності. Тільки після визначення причини зменшення напруги на колійному приймачі електромеханік може здійснити санкціоновано підрегулювання рейкового кола, згідно [3, 4]. Величина напруги на живлячому кінці ТРК повинна бути не більше зазначеної в регулювальній таблиці, а на колійному приймачі – у межах між мінімальною і максимальною, відповідно до регулювальної таблиці. Контролюються параметри – напруги на виході генератора, фільтра та на колійному приймачі.

Вплив сторонніх перешкод позначається найбільше на колійному приймачі, який приймає сигнал. Напруга на ньому повинне

бути при мінімальній напрузі живлення й мінімальному опорі ізоляції рейкової лінії (РЛ) не менш і при максимальній напрузі живлення й максимальному опорі ізоляції РЛ не більше зазначеного в регулювальній таблиці [5].

При зламі рейки характерна ситуація, що описана для несправності стиків з'єднання.

Розглянуті не всі можливі ситуації, однак навіть така кількість несправностей свідчить про ускладнення діагностики відмов у ТРК.

Аналіз існуючих методів контролю стану рейкових кіл та методів вимірювання їх параметрів

Розглянемо ТО для рейкових кіл, що передбачається відповідно до Інструкції по технічному обслуговуванню пристроїв сигналізації, централізації й блокування (СЦБ) ЦШЕОТ/0012 (далі ЦШЕОТ/0012) [5], Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування ЦШ/0042 [3].

Технічне обслуговування ТРК базується на технологічних картах № 32...№ 41 [3] і відповідно до пунктів 10.1...10.9. ЦШЕОТ/0012 [5]. У нормальному режимі вимірюється напруга на кожному елементі рейкового кола по технологічній карті (ТК) № 36 та пункту 10.4. ЦШЕОТ/0012, а також проводиться перевірка стану баласту по ТК № 40 за пунктом 10.8. ЦШЕОТ/0012 і стану рейкового кола відповідно до ТК № 32 й пункту 10.1. ЦШЕОТ/0012. Крім того, окремо вимірюється напруга на колійних реле за ТК № 34 й пунктом 10.3. ЦШЕОТ/0012. У шунтовому режимі визначається за ТК № 33 і пунктом 10.2. ЦШЕОТ/0012 шунтова чутливість щодо релейного та живлячого кінців до нормативного шунта 0,06 Ом (залишкова напруга). У режимі АЛС вимірюється величина кодового струму АЛС за ТК № 37 й пунктом 10.4. ЦШЕОТ/0012, а також виконується її регулювання за ТК № 36 і пунктом 10.4. ЦШЕОТ/0012, часові параметри кодів АЛС за ТК № 35 й пунктом 10.4. ЦШЕОТ/0012. Інші супровідні роботи виконуються за ТК № 37, 38, 39, 41 відповідно до пунктів 10.6, 10.7. ЦШЕОТ/0012.

Перераховані вище технологічні карти рекомендують застосування наступних вимірювальних приладів: прилад комбінований Ц4380 (ампервольтметр ЭК – 2346, мультиметр В7 – 63), мультиметр цифровий В7 – 63, перетворювач струму селективний А9 – 1, індикатор струму рейкових кіл ИРК – 25/50 (МРК – 75), шунт для випробування рейкових кіл типу ШУ-01м опором 0,06 Ом, вимірник тимчасових параметрів ИВП – АЛСН, вимірник опору заземлення М416 (ЭС0201), мегаомметр М4100/5 (ЭС0202/2), іскровий проміжок ИПМ.

ТО виконується, в-

- основному, електромеханіком і електромонтером з періодичністю робіт від 1 разу в чотири тижні до 1 разу в квартал, однак роботи за технологічними картами № 33, 34, 36 можуть виконуватися щодня. Вони повинні вимірювати електричні параметри, які залежать від первинних параметрів рейкової лінії (опору ізоляції баласту R_{iz} й рейки Z_p), на великій кількості рейкових кіл. Тому розглянемо методи вимірювання R_{iz} й Z_p .

Відомі наступні методи вимірювання R_{iz} й Z_p [6]: холостого ходу й короткого замикання (хх і кз), двох коротких замикань, двох відомих навантажень, електрично довгої лінії, модифікованої електрично довгої лінії, одного короткого замикання із графоаналітичним розрахунком, двох вимірювань при одному короткому замиканні. Останні два методи в експлуатації рейкових кіл не знайшли широкого застосування, так як передбачають побудову графіків на підставі вимірювань величин і не дають безпосередньо відразу величини, яка вимірюється. Метод модифікованої електрично довгої лінії припускає, що при накладенні шунта напруга й струм не змінюються ні на початку РЛ (біля джерела живлення) ні на відстані 0,5 км від початку рейкової лінії. При цьому обчислення величини R_{iz} виконується за складними формулами з використанням логарифмічної функції. Даний метод теж не знайшов широкого застосування через специфіку вимог.

Розглянемо більш докладно перші три методи, які знайшли широке застосування в

експлуатації РК із-за їхньої простоти реалізації.

Метод хх і кз найпростіший, але має наступний недолік: чим довша рейкова лінія, тим менша різниця величин опорів холостого ходу та короткого замикання, що призводить до значних похибок в вимірюваннях. Розглянуті вимірювання вимагають відключення від рейкових кіл колійних трансформаторів (ДТ). Тому для виключення даного недоліку використовують інші методи.

Розглянемо метод двох коротких замикань більш докладно. Відповідно до методу провадяться два коротких замикання на відстанях l і $2l$ від джерела живлення. У результаті одержуємо відповідним відстаням l , $2l$ опору пору Z_l , Z_{2l} . Потім обчислюємо величини хвильового опору Z_B й гіперболічного тангенса від γl :

$$\operatorname{th} \gamma l = \sqrt{\frac{2Z_l - Z_{2l}}{Z_{2l}}} = T e^{j\varphi_l}, \quad (1)$$

$$Z_B = \frac{Z_l}{\operatorname{th} \gamma l}, \quad (2)$$

де γ – коефіцієнт поширення.

Визначаємо кілометричні коефіцієнти загасання амплітуди α й фази β .

$$\operatorname{th} 2\beta \cdot l = \frac{2T \cos \varphi_l}{1 + T^2}, \quad (3)$$

$$\operatorname{th} 2\alpha \cdot l = \frac{2T \sin \varphi_l}{1 - T^2}, \quad (4)$$

Модуль коефіцієнта поширення $|\gamma| = \sqrt{\beta^2 + \alpha^2}$, а кут $\varphi_\gamma = \arctg(\alpha/\beta)$.

Тоді при активному опорі ізоляції баласту (ОІБ)

$$Z_p = Z_B \cdot \gamma, \quad (5)$$

$$R_{iz} = \frac{Z_B}{\gamma}. \quad (6)$$

При наявності в ОІБ реактивної (ємнісної) складові модулі Z_p й R_{iz} виражаються

$$|Z_p| = |Z_B| \cdot \sqrt{\beta^2 + \alpha^2}, \quad (7)$$

$$R_{iz} = \frac{Z_B}{\sqrt{\beta^2 + \alpha^2}}, \quad (8)$$

$$\varphi = \varphi_B + \varphi_\gamma \text{ або } \varphi = \varphi_B - \varphi_\gamma, \quad (9)$$

де φ_B й φ – кути хвильового опору й опору рейок відповідно.

Даний метод дає гарні результати при лінійному ОІБ або невеликій його нелінійності.

Розглянемо метод двох відомих навантажень більш докладно. Відповідно до методу провадяться вимірювання в нормальному режимі РК, що навантажується на заздалегідь відомі навантаження R_{H1} й R_{H2} . Звідси можемо записати дві системи рівнянь:

$$\begin{cases} U_1' = U_2' \operatorname{ch} \gamma l + I_2' Z_B \operatorname{sh} \gamma l \\ I_1' = I_2' \operatorname{ch} \gamma l + \frac{U_2'}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} U_1'' = U_2'' \operatorname{ch} \gamma l + I_2'' Z_B \operatorname{sh} \gamma l \\ I_1'' = I_2'' \operatorname{ch} \gamma l + \frac{U_2''}{Z_B} \operatorname{sh} \gamma l \end{cases}, \quad (11)$$

де величини I_1' , I_2' , U_1' , U_2' , які вимірюються при R_{H1} , а I_1'' , I_2'' , U_1'' , U_2'' – при R_{H2} .

Звідси маємо, що вхідний опір рівняється

$$Z_1' = \frac{U_1'}{I_1'} = \frac{R_{H1} + Z_B \operatorname{th} \gamma l}{1 + \frac{R_{H1}}{Z_B} \operatorname{th} \gamma l}, \quad (12)$$

$$Z_1'' = \frac{U_1''}{I_1''} = \frac{R_{H2} + Z_B \operatorname{th} \gamma l}{1 + \frac{R_{H2}}{Z_B} \operatorname{th} \gamma l}. \quad (13)$$

де Z_1' и Z_1'' – вхідний опір при R_{H1} й R_{H2} відповідно.

Вирішуючи рівняння (12) і (13) щодо невідомих хвильового опору Z_B й гіперболічного тангенсу від γl , одержимо:

$$Z_B = \pm \sqrt{\frac{Z_1'' Z_1' \Delta R_H - R_{H2} R_{H1} (Z_1'' - Z_1')}{(R_{H2} - R_{H1}) - (Z_1'' - Z_1')}}, \quad (14)$$

$$\operatorname{th} \gamma l = \frac{Z_B (R_{H1} - Z_1')}{R_{H1} Z_1' - Z_B^2} = T e^{j\varphi_l}, \quad (15)$$

де $\Delta R_H = (R_{H2} - R_{H1})$.

На підставі формул (3) – (6) або (3), (4), (7) – (9) знаходимо R_{iz} й Z_p .

Даний метод має перевагу в тому, що його точність вимірювань практично не залежить від нелінійності баласту, його недолік – велика кількість складних обчислень.

Метод електрично довгої лінії припускає, що опори холостого ходу й короткого замикання рівні, а значить вхідний опір дорівнює хвильовому. Вимірявши Z_B й вхідний опір рейкової лінії, при короткому замиканні на відстані l від місця вимірювання, можна визначити

$$T e^{j\varphi_l} = \operatorname{th} \gamma l = \frac{Z_l}{Z_B}. \quad (16)$$

На підставі формул (3) – (6) або (3), (4), (7) – (9) знаходимо R_{iz} й Z_p .

Даний метод найкраще підходить для вимірювань первинних параметрів ТРК, однак має недоліки методу хх і кз.

Всі вищерозглянуті методи вимірювань опорів ізоляції баласту R_{iz} й рейки Z_p припускали наявність в електромеханіка амперметра й вольтметра, але згідно ТК № 40 для вимірювання величини ОІБ можна використовувати вимірювач опору баласту типу ИСБ–1.

Принцип вимірювання приладом заснований на тому, що при високій частоті струму (декілька кілогерц) фізична довжина електрично довгої лінії досить незначна. У цьому випадку може виявитися, що по обидва боки від місця вимірювань будуть електрично довгі лінії. Тоді вхідний опір у місці вимірювань буде дорівнювати половині хвильового опору

$$Z_{BX} = 0,5 \cdot Z_B.$$

У приладі розташований генератор, який виробляє струм частотою 5000 Гц, і резистор, включений послідовно з генератором. Внутрішній опір генератора разом з опором резистора значно вище вхідного опору РК, тому при підключенні приладу ИСБ-1 навіть при найбільш низькому опорі ізоляції струм на виході генератора залишається постійним. При цьому між точками підключення приладу до рейок з'являється напруга, пропорційна напрузі на навантаженні $0,5R$. Через захисний фільтр і трансформатор ця напруга подається на індикатор. За показниками індикатора, користуючись спеціальною таблицею, визначають питомий опір ізоляції рейкового кола.

Прилад вимірює опір ізоляції на ділянці довжиною від 250 м до 300 м у межах повної довжини РК. За отриманим значенням цих вимірювань знаходять ділянку рейкового кола зі зниженим опором ізоляції.

Після всіх вимірювань визначають середнє значення опору ізоляції РК R_{iz} в Ом км:

$$R_{iz} = \frac{n}{\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_{i2}} + \dots + \frac{1}{R_{in}}},$$

де n – кількість вимірювань; R_{in} – показання приладу в точках вимірювання, Ом км.

За даним методом вимірювання отримуємо величину опору ізоляції рейкового кола R_{iz} з точністю $\pm 10\%$, що для близьких до нормативного значення ОІБ 1 Ом км може сильно вплинути на регулювання даного рейкового кола. При цьому передбачається, що опір рейки незмінний (нормативна величина), а на практиці це може виявитися далеко не так. Крім того, точність вимірювань приладом ИСБ залежить від кількості вимірів.

Однак при експлуатації рейкових кіл опір ізоляції баласту R_{iz} приймають активною величиною, а опір рейки – нормативним, як в останньому методі вимірювань.

Таким чином, жоден з розглянутих методів вимірювань опорів ізоляції баласту R_{iz} й рейки Z_p повністю не задовольняють

вимогам за простотою застосування й обчислення величин, тому що в розрахункових виразах різниці величин близькі одна до одної, що приводить до значних погрешностей (обчислення гіперболічного тангенса від γ може виявитися неможливим, якщо $\gamma \geq 1$). Тому пропонується використовувати метод, що дозволяє виміряти опір рейки, а потім розрахувати величину ОІБ. Для цього можна зробити коротке замикання на відстані 50 м від джерела живлення рейкового кола й виміряти напругу U й струм I , при цьому частиною струму, що відгалужується через баласт і шпали, можна не враховувати, тоді

$$|Z_p| = \frac{|U|}{|I| \cdot 0,05}.$$

Далі за одним із трьох перших методів визначення R_{iz} й Z_p знаходимо хвильовий опір. Після одержуємо величину ОІБ за формулою (6) з урахуванням виразу (5).

Запропонований метод вимірювань параметрів рейкових кіл дозволить із достатнім ступенем точності вимірювань за рахунок вимірювання реального опору рейок для конкретної РК одержати R_{iz} й Z_p , але вимагає експериментальної перевірки.

Висновки

Аналіз відмов рейкових кіл і існуючих методів контролю стану РК для розробки на цій основі методів і засобів автоматизованого контролю параметрів РК.

Аналіз методів вимірювання параметрів рейкових кіл (R_{iz} и Z_p) показав, що із достатнім ступенем точності вимірювань визначити данні параметри можливо методом одного короткого замикання на певній відстані від живлячого кінця РК з наступним розрахунком за x і kz , двох kz . Підвищення точності вимірювань параметрів рейкових кіл досягається за рахунок вимірювання реального опору рейок для конкретної РК.

Бібліографічний список

1. Казиев, Г. Д. Повышают надежность рельсовых цепей [Текст] / Г. Д. Казиев, В.

М. Адашкин //Автоматика, телемеханика и связь. – 2006. – № 4. – С. 2-5.

2. Мороз, В. П. Аналіз відмов пристроїв залізничної автоматики [Текст] / В. П. Мороз, А. О. Лапко //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. – № 2(64). – С. 10-15.

3. Пристрої сигналізації, централізації та блокування. Технологія обслуговування ЦШ/0042 [Текст]. – К., 2006. – 462 с.

4. Практичний посібник з технічного утримання апаратури тональних кіл. – ЦШ/0041 [Текст]. – К., 2006. – 236 с.

5. Інструкції з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) ЦШЕОТ/0012 [Текст]. – К., 1998. – 72 с.

6. Дмитренко, И. Е. Измерения и диагностирование в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи [Текст] /: Учебник для вузов ж.-д. транспорта / И. Е.

Дмитренко, В. В. Сапожников, Д. В. Дьяков. – М: Транспорт, 1994. – 263с.

Ключові слова: рейкові кіла, аналіз відмов, методи контролю стану рейкових кіл, вимірювання параметрів, автоматизований контроль параметрів.

Ключевые слова: рельсовые цепи, анализ отказов, методы контроля состояния рельсовых цепей, измерение параметров, автоматизированный контроль параметров.

Key words: railway circuit, the analyses of refusal, methods of control of railway circuit, measurement of parameters, automatic control of parameters.

Надійшла до редколегії 29.11.2010.

Прийнята до друку 30.11.2010.

УДК 629.42.05

ЛАГУТА В. В. – к.т.н., доцент (ДНУЗТ)

ТЯГОВІ РОЗРАХУНКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕКТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Представив д.т.н., проф. Стасюк О. І.

Тягові розрахунки є прикладної частиною теорії тяги поїздів і дозволяють вирішувати численні практичні задачі, що виникають при проектуванні та експлуатації залізниць.

На залізничному транспорті методи розробки тягових розрахунків і необхідні для їх виконання нормативи регламентуються Правилами тягових розрахунків (ПТР) для поїзної роботи [1-6].

В даний час тягові розрахунки виконуються, переважно, з допомогою засобів обчислювальної техніки. Для математичного формулювання задачі необхідно враховувати фізичну суть явищ, що супроводжують процес руху поїзда, основні прийоми та

способи тягових розрахунків. У більшості випадків тягові розрахунки вимагають оперативності їх проведення.

Сьогодні найактуальнішою проблемою є проблема економії енергоресурсів. У той же час необхідно вантаж доставляти під час, а в багатьох випадках – в найкоротші терміни.

Запропонований підхід стосовно рішення задачі оптимальних тягових розрахунків розглядається як багатостадійний процес прийняття рішень. На кожній стадії необхідно прийняти рішення так, щоб його результат був оптимальним з точки зору всього процесу. В задачі стадіями є інтервали путі. Задача управління швидкістю і

часом руху сформульована в термінах динамічного програмування.

Метою роботи є розробка прогнозу результатів і формування рекомендацій по можливим впливам на процес руху поїзда з метою ведення його в оптимальних умовах стосовно енергії і часу. Розробка чисельного методу оптимальних тягових розрахунків з використанням векторної оптимізації для двох показників.

Актуальність

Одним з радикальних способів, що забезпечує стійкість на ринку надання транспортних послуг, є економія енергоресурсів. Залізнична мережа України зливається з залізницями Росії, Білорусії, Польщі, Чехословаччини, Румунії та ін. Географічне розташування України має великий потенціал до транзитних перевезень. Незважаючи на істотне зниження обсягів перевезень, умови роботи залізничних підприємств України залишаються важкими і це в першу чергу пов'язано із щорічним зростанням цін на енергоносії. Значна частка використання енергії припадає на забезпечення тяги поїздів. Проблемі економії енергоресурсів приділяється постійна і пильна увага у всіх галузях промисловості і не тільки на транспорті.

Сьогодні важливою проблемою є створення компромісно-оптимальних режимів тяги поїздів для показників споживання та часу доставки вантажу. Вартісні показники ефективності руху поїздів вимагають нових підходів до розробки методів оптимального розрахунку режимних карт ведення поїздів. Для аналізу доцільності переходу на режими руху, оптимальні за вартістю електроенергії, необхідно виконати дослідження компромісно-оптимальних рішень, ефективних для вектора показників:

- витрати електроенергії;
- вартості електроенергії при заданому обсязі перевезень;
- графік руху.

Компромісно-оптимальні режими представляють набір умовно-оптимальних режимів руху (або ж дільничних швидкостей), які застосовуються залежно від зада-

ної переваги характеристик векторної цільової функції [7].

Аналіз літературних джерел

Дослідження в області оптимізації управління тягою транспортних засобів початі ще Охоцимським («К теорії движения ракет», 1946г). Практичне застосування теорії оптимального керування почалися після виходу робіт Л.С. Понтрягіна [8], Болтянського [9], Беллмана [10].

В розвиток теорії тяги поїздів внесли А. М. Бабищков, В. Ф. Єгорченко, Д. А. Штанге, Д. К. Мінов, І. П. Ісаєв та інші. Динаміка тяги розвивалась в роботах С. А. Чаплигіна, В. А. Лазаряна, Н. А. Панькіна, В. В. Деєва Є. П. Блохіна, А. А. Босова, Г. К. Гетьмана.

Характерною особливістю робіт за оптимальними тяговими розрахунками є пристосування схем і методів до обчислювальної техніки. В основу багатьох алгоритмів покладено принцип Беллмана. Експериментальні розрахунки сьогодні дозволили накопичити певний досвід з оптимізації.

Одним з напрямів впровадження методів управління на транспорті, є розробка таких обчислювальних систем, які дозволяли б оптимально управляти поїздом, як в замкнутому циклі (автоматичне керування), так і в режимі рекомендацій (підказок). Практика показала, що для більшої ефективності необхідно розробити досить дієві математичні методи розв'язання задач оптимальних тягових розрахунків, на підставі яких можна було б розробити ті чи інші алгоритми для конкретних інженерних задач, з наступним уточненням і доробкою на реальних процесах керування поїздами або в системах управління. Дана проблема висвітлена в роботах [11–14].

У роботах Костроміна А. М. [15–17] використовується як класичне варіаційне числення, так і методи математичної теорії оптимального управління, що з'явилися у фундаментальних працях Понтрягіна і Беллмана. Проблема оптимальних режимів управління локомотивом розглядається як інженерне завдання. В основу методів рі-

шення покладений в більшості випадків принцип максимуму.

Роботи [18–20] присвячені, в основному, розробці методів оптимізації режимів водіння поїздів, заснованих на використанні сучасної математичної теорії управління і обчислювальних засобів. Критерієм оптимальності в більшості виконаних робіт служить мінімум витрат енергії на тягу поїздів, хоча зустрічається також застосування інших показників ефективності організації перевізного процесу, наприклад час руху поїзда по ділянці, що використовується в задачах на швидкодію або точність виконання заданого часу ходу і т. п. Проте незалежно від прийнятого критерію і параметра оптимізації задача вибору оптимальних режимів водіння поїзда розглядалися в однокритеріальній постановці.

Застосування методів векторної оптимізації до вирішення двокритеріальної задачі оптимізації тягових розрахунків викладені в роботах [21–23]. У роботах досліджується рішення двокритеріальних задач методом векторної оптимізації. Для аналізу можливих шляхів вирішення використовується метод параметризації, проводиться аналіз завдання тягових розрахунків як завдання векторної оптимізації. Запропонований метод оптимізації ґрунтується на якісному дослідженні режимів руху на елементарному відрізку колії. До недоліків можна віднести відсутність чисельних методів векторної оптимізації орієнтованих до використання обчислювальної техніки що реалізують даний метод.

Постановка задачі

Розглядається задача, яка змістовно відома як задача оптимальних тягових розрахунків. Величини

$f(s)$, $t(s)$ – показники, що відображають перевізний процес і являють собою витрати енергоресурсів (електроенергія, паливо) і часу на доставку вантажу;

S – координата колії. Поїзд розглядається як тверде тіло з масою зосередженої в його центрі. Рівняння руху потягу враховуються як в [24]. Вважаються заданими

– поздовжній профіль колії;

– обмеження швидкості по колії проходження;

– маса складу;

– тип вагонів, навантаження на вісь;

– маса електровоза;

– тягові характеристики електровоза;

– обмеження часу проходження;

– початкова і кінцева швидкість;

– довжина ділянки колії.

З точки зору витрат енергоресурсів на рух виникає задача про побудову закону керування потягом, де критерієм оптимальності є витрата енергоресурсів. Критичним залишається вимога витрат часу на проходження поїзда для даної ділянки.

Нехай

S – координата колії, $0 \leq s \leq l$;

l – довжина ділянки колії (значення кінцевої координати ділянки);

$v(s)$ – швидкість руху поїзда;

$f(v(s))$ – витрати енергоресурсів;

$t(v(s))$ – функція витрат часу в залежності від обраної швидкості руху;

\bar{T} – час руху по ділянці.

Задача на оптимальне управління рухом поїзда з мінімальною витратою енергії коротко можна сформулювати так: знайти таке допустиме управління $v(s)$, при якому відповідний витрат енергоресурсів був би мінімальним і виконувався графік руху на даній ділянці.

Зазвичай задача оптимального управління руху поїзда з мінімальним витратами енергоресурсів має вигляд

$$\min_{v(s)} f(s) \quad (2)$$

за умови

$$t(v(s)) = \bar{T}, \quad 0 \leq s \leq l. \quad (3)$$

Управлінням є швидкість руху.

Модель (2)–(3) враховує не всі обмеження. Необхідно при розрахунках ще врахувати й інші чинники: початкову та кінцеву швидкість, характеристики локомотива (обмеження на питому дотичну силу, обмеження на питому гальмівну силу, ККД і ін.), обмеження швидкісного режиму, перегрів тягового двигуна.

Пом'якшимо жорстку умову щодо часу проходження (3) і замість рівності (2) будемо розглядати обмеження

$$t(v(s)) \leq \bar{T}, \quad 0 \leq s \leq l. \quad (3')$$

Модель (2)–(3') є неперервною. Для побудови схеми розв'язку задачі перейдемо до відповідної дискретної моделі.

Розіб'ємо ділянку колії $0 \leq s \leq l$ на N елементарних ділянок $\{[s_{j-1}, s_j]\}$, $j=1, \dots, N$. У точках розбиття s_j швидкість $v = v(s_j)$ може приймати кінцеву безліч значень V_j , $j=1, \dots, N$

$$V_j = \{v_i(s_j)\}, \quad i=1 \dots m_j,$$

де m_j – кількість елементів у множині V_j .

Величина m_j визначається обмеженнями на швидкість руху в точці s_j та у спосіб дискретизації $v(s_j)$ (регулярний крок розбиття, нерегулярний крок розбиття, величина кроку розбиття). Залежно від вибраної швидкості руху $v \in V_j$ в точці розбиття колії s_j елементарна ділянка $[s_{j-1}, s_j]$ може бути прослідкована за час $t_j = t(V_j)$ – невід'ємна величина, при цьому витрати енергоресурсів складуть $f_j = f(V_j)$ – також невід'ємна величина. Витрати енергоресурсів на ділянці $0 \leq s \leq l = s_N$ являють собою суму всіх витрат на елементарних ділянках. Витрати часу для $0 \leq s \leq l = s_N$ представляють суму часу відповідних встановленому енергоресурсу на елементарних ділянках. Інакше, функція витрат енергоресурсів і функція витрат часу є адитивні функції, визначені на кінцевих множинах V_j .

Потрібно вибрати такий режим руху потягу v_k , $k=0 \dots N$ (v_0 и v_N надані), при якому сумарні витрати енергоресурсів були б мінімальними, і при цьому загальні витрати часу не виводили з встановленого графіка руху (сумарні витрати часу не перевершували заданої величини \bar{T}).

Розглянута задача про оптимальний рух поїзда з мінімальними витратами енергоресурсів (2)–(3') є канонічною задачею про

розподіл ресурсу [25, 26]. Для її рішення пропонується схема методу динамічного програмування. Замість рекурентних рівнянь використовується покрокове обчислення безлічі точок, оптимальних за Парето, на площині значень цільової функції й ресурсу.

У прийнятих позначеннях формальна постановка задачі запишеться так. Знайти мінімум суми

$$\sum_{j=1}^N f_j(v_i), \quad v_i \in V_j, \quad j=1 \dots N \quad (4)$$

при обмеженнях

$$\sum_{j=1}^N t_j(v_i) \leq \bar{T}, \quad v_i \in V_j, \quad j=1 \dots N. \quad (5)$$

Передбачається, що безліч (5) допустимих рішень не порожньо.

Схема динамічного програмування

Задача (4)–(5) представляє собою відому задачу оптимального розподілу ресурсу, для вирішення якої використовується, зазвичай, метод динамічного програмування [11, 12]. Наведемо основні співвідношення цього методу. Позначимо через $B_j(u)$ оптимум наступної задачі: знайти мінімум суми

$$\sum_{k=1}^j f_k(v_k)$$

при обмеженнях $\sum_{i=1}^j t_i(v_i) \leq u \quad v_i \in V_i,$

$j=1 \dots N$, де j приймає значення $1, \dots, N$, $0 < u \leq \bar{T}$. Очевидно, величина $B_N(\bar{T})$ дорівнює оптимуму вихідної задачі (4), (5). Її розрахунок проводиться за рекурентним рівнянням

$$\begin{cases} B_j(u) = \min_{v_j \in V_j \setminus t_j(v_j) \leq u} \{B_{j-1}[u - t_j(v_j)] + f_j(v_j)\} \\ 0 < u \leq \bar{T} \quad j=1, \dots, N. \end{cases} \quad (6)$$

При такій організації обчислень необхідно покласти $B_0(u) = +\infty$, $0 < u \leq \bar{T}$, і $B_j(u) = 0$, якщо мінімум в (6) береться по порожній безлічі.

При великих значеннях \bar{T} і N розрахунок з використанням рівнянь (6) вимагає значного обсягу пам'яті і часу рахунку. Нижче пропонується підхід, який дозволяє істотно заощаджувати обчислювальні ресурси.

На площині двох змінних введемо відношення часткового порядку

$$(x, y) < (z, w) \Leftrightarrow x \leq y, \quad z \leq w.$$

Нехай A – деяка безліч точок на площині. Точки з A , мінімальні щодо часткового порядку, називають оптимальними за Парето або просто паретовськими. Розглянемо безліч точок вигляду

$$F = \sum_{i=1}^j f_i(v_i), \quad T = \sum_{i=1}^j t_i(v_i),$$

де вектор (v_1, v_2, \dots, v_j) пробігає всі значення, що задовольняють умовам

$$\sum_{i=1}^j t_i(v_i) \leq \bar{T}, \quad v_i \in V_i, \quad i = 1 \dots j.$$

Сукупність паретовських точок цієї множини позначимо через S_j . З кількох рівних паретовських точок у безліч S_j включається тільки одна. Позначимо через (F_{jk}, T_{jk}) , $k = 1, \dots, K_j$, точки безлічі S_j , нумеруючи їх за зростанням координат, тобто

$$F_{j1} < F_{j2} < \dots < F_{jK_j}, \quad T_{j1} < T_{j2} < \dots < T_{jK_j}.$$

Неважко бачити, що $B_j(T_{jk}) = F_{jk}$, $k = 1, \dots, K_j$. Функція $B_j(u)$ є неубуваючою по аргументу u при даному j . Її графік складається з ділянок постійності і точок зростання, які і складають безліч S_j . Таким чином, безліч S_j містить всю необхідну інформацію про функції в мінімальному обсязі.

Безлічі S_j , $j = 1, \dots, N$ перераховуються по кроках, аналогічно рівнянь (6). На початковому кроці вважаємо $S_0 = \{(0, 0)\}$. Опишемо спільний крок. Нехай вже побудовано безліч

$$S_{j-1} = \{F_{j-1,k}, T_{j-1,k}, \quad k = 1, \dots, K_{j-1}\}.$$

Розглянемо безліч точок (F, T) вигляду

$$F = F_{j-1,k} + f_j(v_j), \quad T = T_{j-1,k} + t_j(v_j),$$

де $k = 1, \dots, K_{j-1}$, а змінна v_j пробігає всі значення, що задовольняють умовам

$$T_{j-1,k} + t_j(v_j) \leq \bar{T}, \quad v_j \in V_j.$$

Виділяючи з цієї множини паретовські точки і залишаючи з рівних точок тільки одну, отримуємо безліч

$$S_j = \{(F_{j,k}, T_{j,k}), \quad k = 1, \dots, K_j\}.$$

Цей процес завершується побудовою безлічі

$$S_N = \{(F_{N,k}, T_{N,k}), \quad k = 1, \dots, K_N\}.$$

Величина F_{NK_N} дорівнює оптимуму початкової задачі. Відповідне вказаному оптимуму значення T_{NK_N} є витратами часу.

Тут використано таку властивість рішення: перспективні пари (F, T) утворюють безліч Парето, а всі інші можна видалити (але можна і залишити). У реальній реалізації представленого алгоритму попередньо виділяються для кожного значення індексу $j = 1, \dots, N$ паретовські точки безлічі

$$\{f_j(v_j), t_j(v_j), v_j \in V_j\}$$

і використовуються в розрахунках тільки вони.

Якщо перспективні пари (F, T) не вилучати, то серед безлічі пар (F, T) можна знайти такі, які оптимізують час. У самому сприятливому випадку серед безлічі паретовських пар можна вибрати найбільш підходящі до умов графіку руху за витратами часу та енергоресурсів.

Ефективним рішенням багатокритеріальної задачі називають оптимальне по Парето рішення [27]. Пошук ефективного рішення називають ще програмуванням на множині Парето. Чисельна реалізація методу динамічного програмування на множині Парето дозволяє застосовувати обмеження на використання ресурсу.

Наведемо приклад пошуку ефективних траєкторій по Парето. Процедура побудови

ефективного рішення надамо для багатостадійного процесу, що моделюється графом, рис. 1, аналогічній топології сітки, яка використовується при оптимальних тягових розрахунках з допомогою динамічного програмування. Граф (сітка) відображає процес руху від стадії D_k до D_{k+1} , $k=1,...,11$ (відрізок путі $[D_k, D_{k+1}]$) і змін стану (від швидкості v_i до швидкості v_j) в напрямках, що задані стрілками (дуги). Процеси переходу від однієї стадії руху до іншої харак-

теризується парами (e, t) , де e - витрати енергії при переході від швидкості v_i до швидкості v_j , t - відповідні витрати часу для подолання відрізка путі $[D_k, D_{k+1}]$. Формально можна сказати, що кожній дузі графа поставлено відповідно пару чисел (вектор). Для наданого графа необхідно визначити оптимальні траєкторії по Парето (ефективні траєкторії), що ведуть з

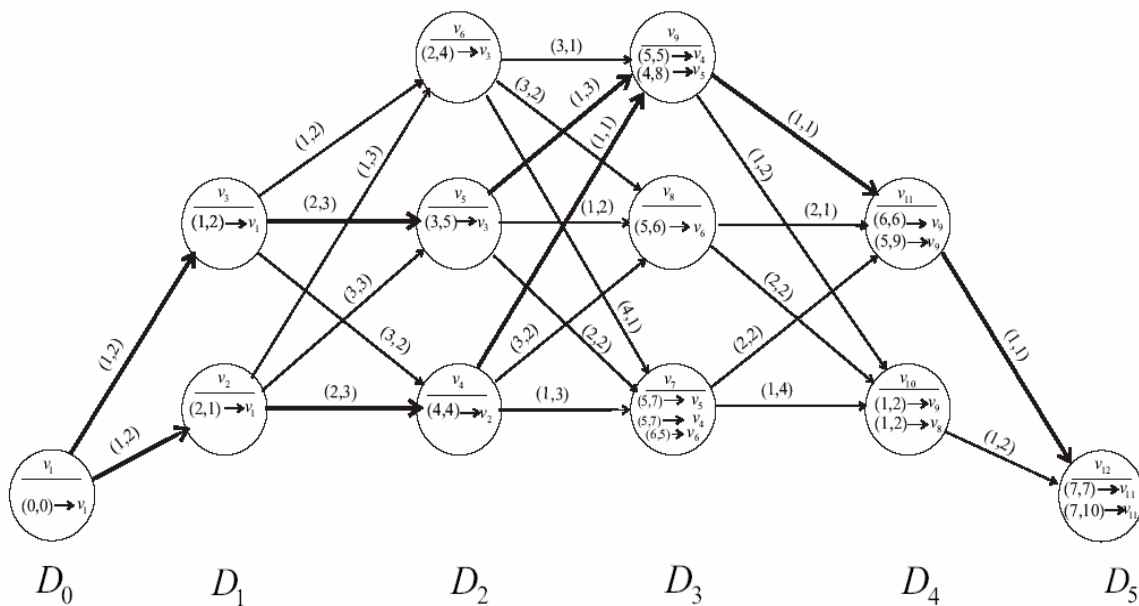


Рис.1. Граф багатостадійного процесу. Компромісно-оптимальні траєкторії процесу.



- Парето-оптимальні (ефективні) траєкторії руху;

v_i - швидкість руху; (e, t) - показники руху при переході з стану v_i в стан v_j ; D_k - стадії руху;

$(\bar{e}, \bar{t}) \rightarrow v_m$ - показник (зворотний) руху по Паретовській траєкторії та відповідні значення витрат енергії \bar{e} і часу \bar{t} в напрямку початкової вершини v_1 .

початкової вершини v_1 до кінцевої v_{12} на множені паретовських точок (\bar{e}_p, \bar{t}_p) , що характеризують процес руху.

На графі в кожній вершині проставлено незрівнянні по Парето варіанти, які вказують напрямку руху (зміни станів для кожної стадії) з даної вершини в начало путі (показник на попередню вершину $\rightarrow v_m$ і які витрати, при цьому енергії \bar{e} и ресурсу часу \bar{t} будуть.

Оптимальні по Парето траєкторії на графі виділено товстими лініями. Процеду-

ра оптимізації проводилася ручними розрахунками і з допомогою розробленого програмного забезпечення. Для наданого прикладу компромісно оптимальними (ефективними) траєкторіями є:

- перша траєкторія проходить через послідовність вершин

$$v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_4 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{11} \rightarrow v_{12},$$

відповідні витрати енергії $\bar{e}_{12} = 7$, часу $\bar{t}_{12} = 7$;

- друга траєкторія проходить через послідовність вершин

$$v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_5 \rightarrow v_9 \rightarrow v_{11} \rightarrow v_{12},$$

відповідні витрати енергії $\bar{e}_{12} = 6$, часу $\bar{t}_{12} = 10$.

Даний приклад несе тільки демонстративний характер. Показники процесу (e, t) і кількість вершин в графі вибрано випадково. Задачі тягових розрахунків відповідає лише топологія графу.

Слід зазначити, що в випадку не виконання обмеження на ресурс часу $\bar{t} < T$ (взагалі якого-небудь ресурсу), така траєкторія не розглядається. Стосовно прикладу, якщо мається обмеження $t < 9$, друга траєкторія до розгляду як ефективна не береться.

Висновки

Задача на оптимальне управління рухом поїзда з мінімальною витратою енергії та обмеженням часу можна звести до задачі оптимального розподілу ресурсу, для вирішення якої використано метод динамічного програмування на сукупності паретовських точок безлічі пар $(F, T) = (\text{енергія}, \text{час})$. Рішення засноване на паретовських точках неєдине. На безлічі рішень по Парето вибирається одне найбільш підходяще по компромісу щодо організації перевізного процесу для даної ділянки.

Бібліографічний список

1. Фуфрянский, Н. А. Подвижной состав и тяга поездов [Текст] / Н. А. Фуфрянский, В. В. Деев. – М.: Транспорт, 1979.
2. Правила тяговых расчётов для поездной работы [Текст]. – М.: Транспорт, 1985.
3. Гребенюк, П. Т. Справочник по тяговым расчётам [Текст] / П. Т. Гребенюк и др. – М.: Транспорт, 1987.
4. Третьяков, А. П. Подвижной состав и тяговое хозяйство железных дорог [Текст] / А. П. Третьяков. – М., 1971.
5. Кокурин, И. М. Эксплуатационные основы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / И. М. Кокурин, Л. Ф. Кондратенко. – М.: Транспорт, 1989.
6. Ликратов, Ю. Н. Тяговые расчёты [Текст]: методические указания к кур-

- совому проектированию / Ю. Н. Ликратов. – Новосибирск, 1989.
7. Рекомендации по обеспечению энергооптимального процесса перевозок на основе информационных технологий управления системами электрической тяги [Текст]: решение комиссии ОСЖД от 30 октября 2003 г.
8. Понтрягин, Л. С. Математическая теория оптимальных процессов [Текст] / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1983. 392 с.
9. Болтянский, В. Г. Математические методы оптимального управления [Текст] / В.Г. Болтянский. – М.: Наука, 1966. 307 с.
10. Беллман, Р. Динамическое программирование [Текст] / Р. Беллман. – М.: ИЛ, 1960. – 400 с.
11. Ковальський, А. Н. Система автоматического управления поездом метрополитена (САУ-М) и ее модернизация [Текст] / А. Н. Ковальський // Тр. МИИТ. – 1968. – Вып. 276. – С. 3-13.
12. Ерофеев Е. В. Система автоведения пассажирского поезда [Текст] / Е. В. Ерофеев, Я. М. Головнчер, Н. И. Куренков и др. // – Тр. МИИТ. – Вып. 492. – С. 3-10.
13. Гаккель, Е. Я. Автомашинист для грузового тепловоза [Текст] / Е. Я. Гаккель. // Тр. ЛИИЖТ. – 1964. – Вып. 232. – С. 3-8.
14. Зимарьков, Б. Д. Локомотивом управляет автомат [Текст] / Б. Д. Зимарьков. // Электрическая и тепловозная тяга. – 1973. – № 7. – С. 21-22.
15. Костромин, А. М. Методы определения оптимальных режимов вождения поездов [Текст] / А. М. Костромин. – Гомель: БелИИЖТ, 1974. – 43 с.
16. Костромин, А. М. Об интегрировании уравнений движения поезда и расчете оптимальной траектории [Текст] / А. М. Костромин // Тр. БелИИЖТ. – Вып. 132. – 1974. – С. 3-11.
17. Костромин, А. М. Об оптимальном управлении локомотивом при электрической тяге [Текст] / А. М. Костромин // Тр. БелИИЖТ. – Вып. 156. – 1977, – С. 3-23.

18. Погосов, В. Ю. Прогнозирование расхода электроэнергии на тягу поездов с учетом выброса параметров грузовых поездов и условий эксплуатации [Текст]: автореф. дисс.... канд. техн. наук Ж 05.09.93 / В. Ю. Погосов. – М.: МИИТ, 1990. – 23 с.
 19. Гетьман, Г. К. Определение оптимальной по минимуму расхода энергии на движение поезда мощности локомотива [Текст] / Г. К. Гетьман // ХарДАЗТ. – Вип. 39. – Х., 2000. – С. 41-48.
 20. Беляев, А. В. Алгоритм оптимального по расходу электроэнергии управления движения поезда [Текст] / А. В. Беляев, А. Г. Вольвич, Н. Ю. Федорова // Сб. научн. тр. Всерос. научн.-исследов. и проектно-конструкт. ин-та электровозостр. – № 39. – М, 1998. – С. 160-169.
 21. Босов, А. А. Векторная оптимизация в задачах тяговых расчетов [Текст] / А. А. Босов, Г. К. Гетьман // Вісник Харківського держ. політехн. ун-ту. – Вип. 73. – Х.: ХДПУ, 1999. – С. 23-27.
 22. Гетьман, Г. К. Применение векторной оптимизации для решения задачи тяговых расчетов / Г. К. Гетьман // Вісник Харківського держ. політехн. ун-ту. – Вип. 62. – Х.: ХДПУ, 1999. – С. 12-19.
 23. Босов, А. А. Параметризация в задачах векторной оптимизации [Текст] / А. А. Босов, Г. К. Гетьман. // Транспорт: зб. наук. пр. – Вип. 5. – Д.: Наука і освіта, 2000. – С. 62-65.
 24. Деев, В. В. Тяга поездов [Текст] / В. В. Деев и др. – М.: Транспорт, 1987.
 25. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования [Текст] / Р. Беллман, Дрейфус. – М.: Наука, 1965. – 458 с.
 26. Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология [Текст] / Е. С. Вентцель. – М.: Дрофа, – 2004. – 208 с.
 27. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач [Текст] / А. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
- Ключові слова:** тягові розрахунки, оптимальне розподілення ресурса, динамічне програмування, оптимум по Парето.
- Ключевые слова:** тяговых расчетов, оптимальное распределение, динамическое программирование, оптимум по Парето.
- Key words:** traction calculations, optimum distribution, dynamic programming, optimum on Pareto.
- Надійшла до редколегії 12.01.2011.
Прийнята до друку 14.01.2011.

МЕТОД ІМОВІРНІСНОГО АНАЛІЗУ ВИПАДКОВИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

Представив д.т.н., проф. Костін М. О.

Вступ

Метод імовірнісного аналізу випадкових електромагнітних процесів в електричних колах нелінійних динамічних електротехнічних систем базується на часткових методах: стохастичних диференціальних рівнянь, статистичної лінеаризації та методі моментних функцій. В якості прикладу виконано числові розрахунки стохастичних перехідних електромагнітних процесів у тягових електричних колах першого українського електровоза ДЕ 1.

Постановка задачі

При дослідженні певних нелінійних динамічних електротехнічних систем, до яких прикладена одна зовнішня дія – випадкова функція напруги $U(t)$, – необхідно розрахувати й проаналізувати стохастичні перехідні чи усталені електромагнітні процеси, найчастіше це функції електричних струмів у різних вітках системи (рис. 1).



Рис. 1. Схема до методу імовірнісного аналізу електромагнітних процесів

Зазначені струми також є випадковими функціями, а тому треба визначити їх імовірнісні характеристики, бо знаходження закону розподілу їх імовірностей виявляється дуже складною та трудомісткою математичною задачею [1-4], що обумовлено такими причинами.

По-перше, точне аналітичне розв'язання цієї задачі можливе лише для деяких конкретних найпростіших нелінійних систем

при відомих видах зовнішньої випадкової дії та простих характеристиках нелінійних елементів системи. Тому практичне розв'язання поставленої задачі можливо тільки наближеними методами. По-друге, в багатьох практичних задачах моментні функції (і перш за все, функція математичного сподівання $m(t)$, кореляційна функція $K(t, t')$ і функція дисперсії $D(t)$) дають достатнє уявлення про випадковий процес. І в той же час у теорії лінійних систем існують прості перетворення моментних функцій [2-4]: якщо випадкова функція $X(t)$ з математичним сподіванням $m_x(t)$ і кореляційною функцією $K_x(t, t')$ перетворюється лінійним оператором Z у випадкову функцію $Y(t) = Z[X(t)]$, то для знаходження математичного сподівання $m_y(t)$ випадкової функції $Y(t)$ необхідно застосувати той же оператор Z до математичного сподівання випадкової функції $X(t)$ (тобто $m_y(t) = Z[m_x(t)]$), а для знаходження кореляційної функції $K_y(t, t')$ треба двічі застосувати той же оператор до кореляційної функції $K_x(t, t')$, тобто $K_y(t, t') = Z^{(t)} Z^{(t')} [K_x(t, t')]$.

Викладене дозволило розробити такий метод розв'язання задач імовірнісного аналізу: статистично лінеаризувавши задану нелінійну систему і застосовуючи правила перетворення моментних функцій лінійних систем, визначають моментні функції випадкових процесів на виході нелінійної системи (рис. 1). Зазначений підхід об'єднує в собі відомі з теорії імовірнісного аналізу нелінійних систем автоматичного керування [2, 5, 6] часткові методи: стохастичних диференціальних рівнянь, статистичної лінеаризації та метод моментних функцій.

Метою роботи є розробка методу імовірнісного аналізу випадкових електромагнітних процесів.

Метод імовірнісного аналізу

Розглянемо коротко у загальному випадку запропонований метод розв'язання поставленої задачі.

У загальному випадку система диференціальних рівнянь, яка описує перехідні процеси в системі, може бути зведена до диференціальних рівнянь першого порядку з постійними коефіцієнтами в нормальній формі (у формі Коши):

$$\frac{dI_k(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n a_{ki} I_i(t) + b_k U(t) + \sum_{q=1}^s d_{kq} E_q(t), \quad (1)$$

де

$$E_q(t) = F_q[\Phi_q(t)], \quad (q=1,2,\dots,s), \quad (2)$$

а

$$\Phi_q(t) = A_q I_r(t) + B_q U(t), \quad (3)$$

де $a_{ki}, b_k, d_{kq}, A_q, B_q$ – постійні коефіцієнти (у загальному випадку вони можуть залежати від часу); n – порядок системи диференціальних рівнянь; s – кількість нелінійних стохастичних елементів; $I_i(t), I_r(t), I_k(t)$ – випадкові процеси (струми) на виході системи; $U(t)$ – зовнішня випадкова дія на систему (напруга); $\Phi_q(t)$ – випадкова дія на вході нелінійного елемента; $E_q(t)$ – випадкова дія на виході q -го нелінійного елемента; $F_q[\Phi_q(t)]$ – характеристика q -го нелінійного елемента.

Виконаємо лінеаризацію характеристик нелінійних елементів, використовуючи для цього метод стохастичної лінеаризації [3]. Тоді характеристику q -го нелінійного елемента можна записати у вигляді:

$$E_q = F_q[\Phi_q(t)] \approx K_{q0}(t) m_{\Phi_q}(t) + K_{q1}(t) \Phi_q^0(t), \quad (q=1,2,\dots,s), \quad (4)$$

де $m_{\Phi_q}(t)$ – математичне сподівання випадкової функції впливу; $\Phi_q(t)$ – випадкова дія на вході q -го нелінійного елемента; $\Phi_q^0(t) = \Phi_q(t) - m_{\Phi_q}(t)$ – центрована випадкова дія функції $\Phi_q(t)$; $K_{q0}(t), K_{q1}(t)$ – коефіцієнти статистичної лінеаризації характеристики $F_q[\Phi_q(t)]$ нелінійного елемента. Ці коефіцієнти в загальному випадку можуть бути функціями часу:

$$K_{q0}(t) = f_0[m_{\Phi_q}(t), \sigma_{\Phi_q}(t); t], \quad (5)$$

$$K_{q1}(t) = f_1[m_{\Phi_q}(t), \sigma_{\Phi_q}(t); t]. \quad (6)$$

Очевидно, що математичне сподівання функції $E_q(t)$ дорівнює

$$M[E_q(t)] = M[F_q\{\Phi_q(t); t\}] = K_{q0}(t) m_{\Phi_q}(t) \quad (7)$$

Застосовуючи до лівої та правої частин рівнянь (1) та (3) операцію математичного сподівання та враховуючи (7), отримаємо, що

$$\frac{dm_{I_k}(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n a_{ki} m_{I_i}(t) + b_k m_U(t) + \sum_{q=1}^s d_{kq} K_{q0} m_{\Phi_q}(t), \quad (k=1,2,\dots,n), \quad (8)$$

$$m_{\Phi_q}(t) = A_q m_{I_r}(t) + B_q m_U(t), \quad (q=1,2,\dots,s). \quad (9)$$

Система рівнянь (8) – (9) є лінеаризованою системою, із якої можна було б методами аналізу лінійних систем [2, 4] визначити математичні сподівання шуканих величин. Але в цій системі коефіцієнти K_{q0} залежать не тільки від математичного сподівання $m_{\Phi_q}(t)$, але й від невідомих середньоквадратичних відхилень $\sigma_{\Phi_q}(t)$ випадкових дій $\Phi_q(t)$. Тому для визначення цих $\sigma_{\Phi_q}(t)$, а також середньоквадратичних від-

хилень $\sigma_{lk}(t)$ шуканих випадкових процесів у системі розглянемо рівняння, що отримані шляхом віднімання рівнянь (8) та (9) із відповідних рівнянь (1) та (3). Тоді з врахуванням (4) маємо:

$$\begin{aligned} \frac{dI_k(t)}{dt} - \frac{dm_{lk}(t)}{dt} &= \left(\frac{dI_k(t)}{dt} \right)^0 = \\ &= \sum_{i=1}^n a_{ki} I_i^0(t) + b_k U^0(t) + \\ &+ \sum_{q=1}^s d_{kq} K_{q0} \Phi_q^0(t), \quad (k=1,2,\dots,n), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Phi_q^0(t) &= A_q I_k^0(t) + B_q U^0(t), \\ (q &= 1,2,\dots,s), \end{aligned} \quad (11)$$

де $I_k^0(t)$, $U^0(t)$, $\Phi_q^0(t)$ – центровані випадкові функції.

Отримана система рівнянь (10)–(11) є лінійною. І тому, розв’язавши її разом з рівняннями (8)–(9), (5)–(6) методами аналізу лінійних систем [2–4, 6] (при заданих початкових умовах), визначимо шукане математичне сподівання $m_{lk}(t)$ та середньоквадратичне відхилення $\sigma_{lk}(t)$ випадкових процесів $I_k(t)$ в системі.

Навіть при простій нелінійній характеристиці $F_q[\Phi_q(t)]$ точний розв’язок зазначених рівнянь практично отримати неможливо. Тому необхідно знаходити їх наближені розв’язки. Найбільш ефективно це здійснюється методом послідовних наближень у наступній послідовності. Попередньо задаємося нульовим

$$\begin{aligned} K_{q0} &= \frac{F_n}{m_\phi} \cdot \left((m_1 + 1) \cdot \Phi\left(\frac{1+m_1}{\sigma_1}\right) - \right. \\ &\quad \left. - (1-m_1) \cdot \Phi\left(\frac{1-m_1}{\sigma_1}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sigma_1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \left(e^{\frac{-1}{2} \left(\frac{1+m_1}{\sigma_1} \right)^2} - e^{\frac{-1}{2} \left(\frac{1-m_1}{\sigma_1} \right)^2} \right) \right); \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} K_{q1}^{(1)} &= \frac{F_n}{\sigma_\phi} \times \\ &\times \left(1 - \frac{K_{q0}^2 \cdot m_1^2}{L^2} + (m_1^2 + \sigma_1^2 - 1) \times \right. \\ &\quad \times \Phi\left(\frac{1+m_1}{\sigma_1}\right) - \Phi\left(\frac{1-m_1}{\sigma_1}\right) - \\ &\quad \left. - \frac{\sigma_1 - (1-m_1)}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\frac{-1}{2} \left(\frac{1+m_1}{\sigma_1} \right)^2} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sigma_1 - (1+m_1)}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\frac{-1}{2} \left(\frac{1-m_1}{\sigma_1} \right)^2} \right)^{1/2}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$K_{q1}^{(2)} = \frac{F_n}{\sigma_i} \cdot \sigma_1 \cdot \Phi\left(\frac{1+m_1}{\sigma_1}\right) - \Phi\left(\frac{1-m_1}{\sigma_1}\right); \quad (14)$$

$$K_{q1} = \frac{K_{q1}^{(1)} + K_{q1}^{(2)}}{2}, \quad (15)$$

наближенням для величин $m_\phi^{(0)}(t)$ та $\sigma_\phi^{(0)}(t)$. Далі за нижченаведеними формулами (12)–(16) [3] розраховуємо коефіцієнти статистичної лінеаризації $K_{i0}^{(0)}(t)$ і $K_{i1}^{(0)}(t)$ нульового наближення і математичні сподівання та середньоквадратичні відхилення шуканих величин також нульового наближення

де F_n – величина F_q у початковій точці насичення характеристики $F_q[\Phi_q(t)]$; $\Phi(x)$ – функція Крампа, числові данні якої подані в додатку роботи [3]

$$m_1 = \frac{m_\phi}{I_{з\text{ поч}}}, \quad \sigma_1 = \frac{\sigma_\phi}{I_{з\text{ поч}}}, \quad (16)$$

де $I_{з\text{ поч}}$ – величина струму збудження в початковій точці насичення, що визначається за кривою $F_q[\Phi_q(t)]$.

Далі за рівняннями (8)–(9) знаходимо математичне сподівання $m_\phi^{(1)}(t)$, а за допомогою рівнянь (10)–(11) і середньоквадратичне відхилення $\sigma_\phi^{(1)}(t)$ першого набли-

ження. Потім за допомогою $m_{i3}^{(1)}(t)$ та $\sigma_{i3}^{(1)}(t)$ визначаємо коефіцієнти $k_{i30}^{(1)}(t)$ і $k_{i31}^{(1)}(t)$ першого наближення, а також математичні сподівання і середньоквадратичні відхилення першого наближення шуканих випадкових струмів в системі і так далі. Процес знаходження результатів припиняємо тоді, коли математичні сподівання і середньоквадратичні відхилення шуканих струмів при даному наближенні будуть мало відрізнятися від попередньо знайдених значень.

Результати та аналіз чисельних розрахунків

В результаті прикладу застосування викладеного методу виконано розрахунки перехідних електричних струмів в силових нелінійних колах першого українського електровоза ДЕ 1, до якого прикладена імовірнісна напруга з середнім значенням $U = 3260$ В та з середньоквадратичним відхиленням $\sigma_U = 217,5$ В. Розрахунки здійснено для паралельного з'єднання тягових електричних двигунів послідовного збудження з параметрами: активні опори обмотки якоря, компенсаційної обмотки, обмотки збудження та індуктивного шунта відповідно дорівнюють (Ом): 0,026; 0,025; 0,019; 0,022; індуктивності обмотки якоря, обмотки збудження та індуктивного шунта відповідно (Гн): $1,56 \cdot 10^{-3}$; $4,9 \cdot 10^{-3}$; $4 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 2-4 зображено часові залежності математичних сподівань і середньоквадратичних відхилень перехідних струмів. Результати отриманих розрахунків підтверджені результатами промислових випробувань електровозів.

Висновки

Запропонований метод імовірнісного аналізу є ефективним, адекватно підтвердженим, методом чисельного розрахунку перехідних стохастичних електромагнітних процесів в нелінійних динамічних системах.

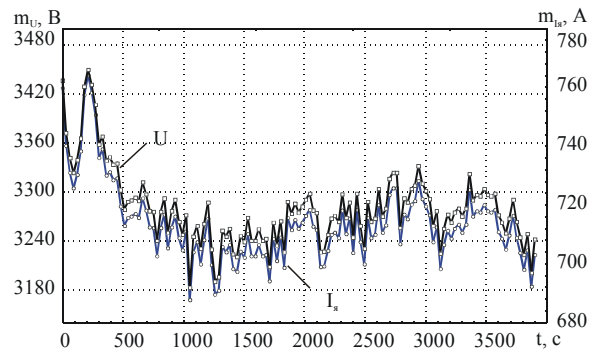


Рис. 2. Залежності математичних сподівань напруги на струмоприймачі електровоза m_U та струму якоря m_{Ia}

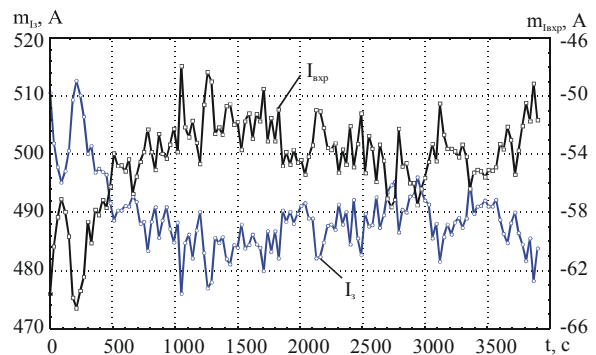


Рис. 3. Залежності математичних сподівань струму в обмотці збудження двигуна m_{I3} та вихрового струму m_{Iexp}

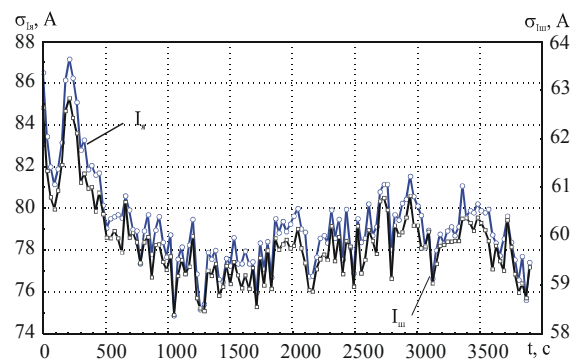


Рис. 4. Залежності середньоквадратичних відхилень струму якоря σ_{Ia} та струму в шунтувальній вітці σ_{Ish}

Бібліографічний список

1. Пугачёв, В. С. Теория случайных функций и её применение к задачам автома-

- тического управления [Текст] / В. С. Пугачев. М: Физматгиз, – 1960. – 883 с.
2. Лившиц, Н. А. Вероятностный анализ систем автоматического управления [Текст] / Н. А. Лившиц, В. Н. Пугачёв – М: Советское радио, 1963. - Т.1 –482 с.; Т.2 – 895 с.
 3. Казаков, И. Е. Статистическая динамика нелинейных автоматических систем [Текст] / И. Е. Казаков, Б. Г. Доступов. – М: Гос. изд. физ.-мат. лит-ры, – 1962. – 331 с.
 4. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель – М: Наука, – 1969. – 576 с.
 5. Тихонов, В. В. Нелинейные преобразования случайных процессов [Текст] / В. В. Тихонов. – М.: Радио и связь, 1986. – 296 с.

6. Свешников, А. А. Прикладные методы теории случайных функций [Текст] / А. А. Свешников. – М.: Наука, 1968. – 463 с.

Ключові слова: метод імовірнісного аналізу, перехідні струми, нелінійні кола.

Ключевые слова: метод вероятностного анализа, переходные токи, нелинейные цепи.

Key words: probabilistic analysis, transitional currents, nonlinear circuits.

Надійшла до редколегії 23.12.2010.

Прийнята до друку 24.12.2010.

УДК 621.311

ГОНЧАРОВ Ю. П. – д.т.н., профессор (Национальный технический университет «Харьковская политехнический институт»)

ПАНАСЕНКО Н. В. – к.т.н., доцент (НТУ «ХПИ»)

ГАВРИЛЮК В. И. – д.ф.-м.н., профессор (ДНУЖТ)

СЫЧЕНКО В. Г. – к.т.н., с.н.с. (ДНУЖТ)

ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ АКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Анализ состояния проблемы и постановка задачи работы

В ряде работ авторами предложена и частично изучена структура преобразовательного агрегата для тяговых подстанций, показанная на рис. 1. Она содержит основной выпрямитель (ОВ) по традиционной 12-пульсной схеме и обратимый вольтодобавочный преобразователь 3В с широтно-импульсной модуляцией на запираемых приборах с диапазоном регулирования напряжения порядка $\pm 20\%$, компенсирующий недостатки основного выпрямителя с точки зрения его электромагнитной совместимости с контактной сетью (КС) и питающей сетью (ПС) [1-3].

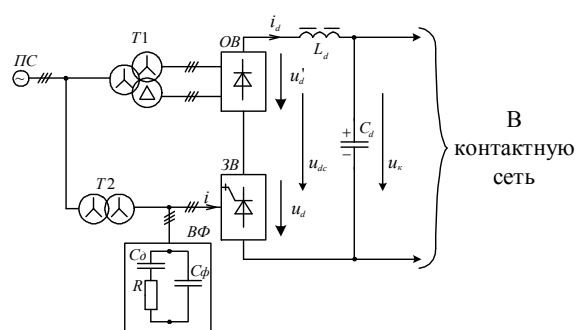


Рис 1. Структура преобразовательного агрегата для тяговых подстанций

В частности, вольтодобавка может выступить в качестве активного фильтра (АФ) канонических и неканонических гармоник выходного напряжения основного выпрямителя, что позволяет радикальным обра-

зом облегчить выходной пассивный фильтр, который в настоящее время по массе и потерям энергии соизмерим с железом его формы, обусловленным трансформатором. Из канонических гармоник реально может быть подавлена двенадцатая, а из неканонических – все более низкочастотные гармоники, начиная от первой гармоники ПС.

Известно, что причиной неканонических гармоник в исходном напряжении преобразовательных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока является фазная несимметрия напряжения питающей сети, искаженное нагрузками, например, другими преобразователями и иными реальными факторами [4]. Наибольшие проблемы создают относительно низкочастотные неканонические гармоники по причине их отрицательного влияния на системы железнодорожной автоматики и устройства связи. Для их подавления традиционно используют сложные выходные фильтры, которые включают в себя кроме однозвенного Г-образного LC-фильтра еще и фильтры пробки на частоте 100 Гц, 200 Гц, 300 Гц и выше, что усложняет и увеличивает установленную мощность фильтрового электрооборудования тяговых подстанций [5].

Как правило, при оценках отрицательного влияния неканонических гармоник, достаточно учитывать лишь нечетные гармоники в напряжении питающей сети, которые после их выпрямления дают спектр четных гармоник, из которых наиболее значимыми являются вторая, четвертая, шестая гармоники [6]. Шестая гармоника (300 Гц) возникает также в двенадцатипульсном выпрямителе из-за неодинаковости индуктивностей рассеяния вторичных обмоток звезды и треугольника силового трансформатора, по отношению к его первичной обмотке. Для подавления указанных гармоник средствами управления нужна модуляция выходного напряжения преобразователя с частотой больше 600 Гц, что при построении преобразовательных агрегатов на основе только фазоуправляемых выпрямителей является невозможным.

В работе [2] приведена структурная схема системы управления вольтодобавкой с

каналом активной фильтрации, рассмотрены её свойства и характеристики. Эта структурная схема приведена на рис. 2. Основным канал гармоник является совокупностью узкополосных фильтров с высокой добротностью Q порядка 50, реализуемых программно микропроцессором и настроенных на пропускание отдельных подавляемых гармоник:

$$W_k = \frac{k_y p}{p^2 Q / \omega_k + p + Q \omega_k}, \quad (1)$$

где k – номер подавляемой гармоники по отношению к частоте сети; ω_k – угловая частота k -й гармоники; k_y – коэффициент усиления, задаваемый пропорциональным звеном.

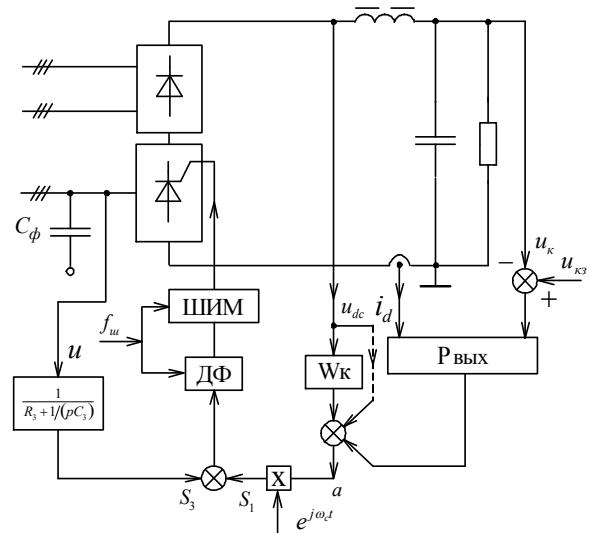


Рис 2. Структура системы регулирования вольтодобавочного преобразователя

$u_{кз}$ – сигнал задания по напряжению нагрузки; i_d – сигнал коррекции по току; $P_{вых}$ – регулятор выходного напряжения; ШИМ – ШИМ-контроллер; ДФ – дискретный фиксатор, действующий с частотой ШИМ – $f_{ш}$.

Как показали расчёты, с помощью указанной структуры можно избавиться от силовых фильтров-пробок и сократить примерно на треть массу основного Г-образного LdCd-фильтра. Дальнейшее снижение массы Г-образного фильтра упирается в необходимость подавления гармоник с частотой ШИМ $f_{ш}$ вольтодобавки, которая реально может быть достигнута порядка 1200 – 1800 Гц, а также комбинационных гармоник более низкой частоты, генери-

руемых вольтодобавкой при её работе в качестве АФ. К сожалению, все эти гармоники приходятся на пик псофометрической кривой.

Это препятствие преодолевается при использовании системы комбинированной активной фильтрации, в которой пиковые гармоники подавляются с помощью дополнительного маломощного параллельного АФ.

Комбинированная система активной фильтрации

Структура комбинированной системы приведена на рис. 4. Активный фильтр на базе инвертора тока является источником переменного тока, численно равного переменной составляющей тока дросселя i_d , в результате чего она не поступает в нагрузку. Переменный ток формируется методом двуполярной либо однополярной ШИМ из входного постоянного тока i_{ad} , источником которого является низковольтный сетевой выпрямитель, например, синхронного типа, с фильтровым дросселем [7]. Режим источника тока на выходе АФ позволяет исключить одну инерционность, упрощая, тем самым, обеспечение устойчивости замкнутой структуры с АФ.

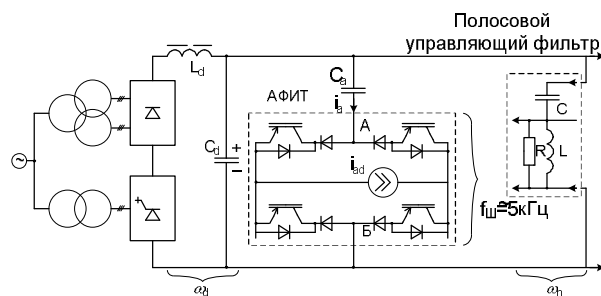


Рис.4. Структура комбинированной системы: АФИТ – активный фильтр на базе инвертора тока; i_{ad} – источник постоянного тока, питающий АФИТ; C_d – конденсатор, блокирующий протекание постоянной составляющей тока в АФИТ.

Входом цепи обратной связи является датчик напряжения u_k с полосовыми фильтрами пиковых гармоник, электрический эквивалент каждого из которых соответствует схеме рис. 5, а передаточная функция

$$W_k = \frac{k_y p^2}{p^2 + \frac{\omega_k}{Q} p + \omega_k^2} \quad (2)$$

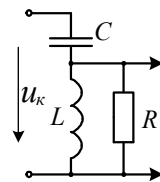


Рис.5. Электрический эквивалент полосового фильтра в АФИТ

Эта передаточная функция обеспечивает, кроме резонансного подъёма частоты подавляемой гармоники (рис. 6 в), так же более быстрое убывание коэффициента усиления на низких частотах ($|W_k| \sim \omega^2$), чем полосовой фильтр (1). Тем самым облегчается борьба с автоколебаниями на низких частотах, которые возможны в схеме параллельного АФ [8]. Склонность к их возникновению обусловлена тем, что как выходная цепь АФ, так и цепь обратной связи при низких частотах, создаёт опережение сигнала замкнутого контура (рис. 6)

На частоте, где суммарное опережение равно π , согласно критерию Найквиста, возникают автоколебания, если модуль коэффициента усиления замкнутого контура превышает единицу. Слабое убывание $|W_k|$ при высоких частотах малосущественно, так как результирующий фазовый сдвиг при этом не превышает $\pi/2$.

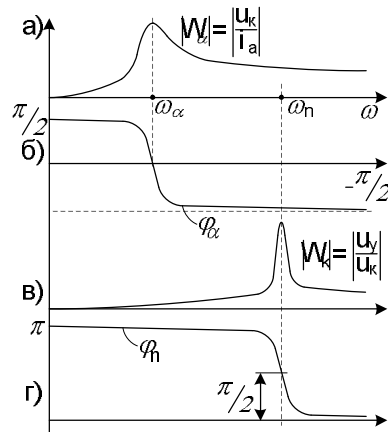


Рис.6. АЧХ замкнутой структуры с АФИТ

Снижение резонансного пика амплитудной характеристики $L_d C_d$ -фильтра (рис. 6, а) достигается при введении в систему управления вольтодобавкой широкополос-

ного канала с пропорциональным звеном, что равносильно эквивалентному резистору последовательно с дросселем L_d [9] или (и) дополнительного резистора R параллельно АФИТ или в виде отдельной RC-цепи.

Определение гармоник с частотами ШИМ вольтодобавки

На рис. 7 приведена схема коммутатора с обозначениями номеров фаз $n=1,2,3$, которые указываем в скобках, и номеров полупроводниковых ключей. Исходим из того, что система управления формирует в фазах основные гармоники тока $i_{(1)}$, $i_{(2)}$, $i_{(3)}$ сетевой частоты ω_c , сдвинутые относительно фазных напряжений $u_{(1)}$, $u_{(2)}$, $u_{(3)}$ угол φ в сторону опережения, и определим гармоники выходного напряжения U_d .

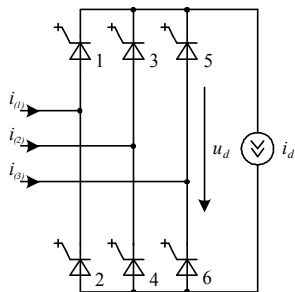


Рис. 7. Коммутатор вольтодобавки

В работе [10] предложен алгоритм ШИМ, при котором во входных токах выделяются шесть структурных интервалов длительностью $\pi/3$ каждый, с наибольшим током в одной из фаз.

На рис. 8 показан один такой структурный интервал, когда наибольшим является ток фазы (1) положительного направления. Два других тока при этом имеют обратные знаки. Примем следующие допущения:

- ток i_d идеально сглажен;
- частота ШИМ $\omega_{ш}$ отличается от частоты сети ω_c в χ раз, кратное 6, и достаточно велика для того, чтобы можно было пренебречь изменением основных гармоник фазных сигналов на периоде ШИМ.

На рис. 9 показан один такой период, внутри которого располагается текущая точка θ структурного интервала (см. рис. 8). Поскольку токи $i_{(2)}$ и $i_{(3)}$ имеют отрицательные знаки, то для их формирования замкнуты ключи 4 и 6 (см. рис. 7) с относитель-

ными временами (коэффициентом заполнения), равными относительным значениям основных гармоник токов в текущей точке θ .

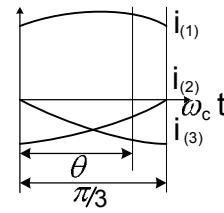


Рис. 8. Структурный интервал

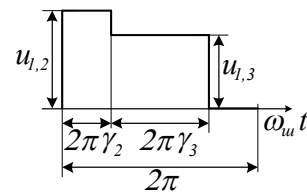


Рис. 9. Выходное напряжение U_d на текущем интервале ШИМ

$$\begin{aligned} v_{(2)} &= -\frac{i_{(2)}}{i_d} = -\tau \sin\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right), \\ v_{(3)} &= -\frac{i_{(3)}}{i_d} = -\tau \sin \theta, \end{aligned} \quad (3)$$

где τ — относительная амплитуда фазного тока в долях i_d .

Поскольку ток $i_{(1)}$ положителен, то в первой фазе при этом замкнут ключ 1 и, следовательно, на выход при этом подаются линейные напряжения соответственно

$$\begin{aligned} u_{(1,2)} &= U_m \cos(\theta - \varphi), \\ u_{(1,3)} &= U_m \cos\left(\theta - \frac{\pi}{3} - \varphi\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где U_m — амплитуда линейного напряжения. На оставшейся части периода ШИМ одновременно замкнуты ключи 1 и 2, поэтому выходное напряжение и мгновенные значения всех трёх фазных токов равны нулю.

Текущее значение амплитуды k -й гармоники выходного напряжения удобно определить, используя комплексную форму записи ряда Фурье

$$U_{dkm} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_d e^{-jk\theta} d\theta \quad (5)$$

Для прямоугольного импульса единичной амплитуды с относительной длительностью ν и началом координат, расположенным посередине импульса, при этом найдём из (5) амплитуду k -й гармоники

$$U(\nu) = \frac{\sin(\pi k \nu)}{\pi k} \quad (6)$$

Тогда с учётом фактических сдвигов двух импульсов относительно начала координат согласно рис. 9 найдём

$$U_{dkm} = u_{(1,2)} U(\nu_{(2)}) e^{-j\pi k \nu_{(2)}} + u_{(1,3)} U(\nu_{(3)}) e^{-j\pi k (\nu_{(3)} + 2\nu_{(2)})} \quad (7)$$

Теперь для определения действующего значения k -й гармоники необходимо выполнить квадратичное усреднение текущего значения на структурном интервале. Удобно перейти к относительным единицам, принимая в качестве базисного наибольшее значение постоянной составляющей выходного напряжения, получающееся при $\tau = 1$ и $\varphi = 0$

$$u_{d0m} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \quad (8)$$

Тогда получим действующее значение k -й гармоники в относительных единицах

$$U_{dk}^* = \frac{1}{u_{d0m}} \sqrt{\frac{6}{\pi} \int_0^{\pi/3} |U_{dkm}|^2 d\theta} \quad (9)$$

В (9) учтено, что гармоника комплексного ряда Фурье вдвое меньше фактической вещественной гармоники, а также то, что для перехода к действующему значению амплитуду надо разделить на $\sqrt{2}$. Так как относительная величина U_{dk}^* не зависит от U_m , то при выполнении расчётов, которые удобно выполнить численным методом, можно принять $U_m = 2/\sqrt{3}$, что даёт $u_{d0m} = 1$.

На рис. 10 представлены полученные таким образом зависимости для первой гармоники ШИМ. Поскольку величины τ и φ меняются, то в расчёт следует взять наи-

большее значение первой гармоники, которое составляет около 0,5.

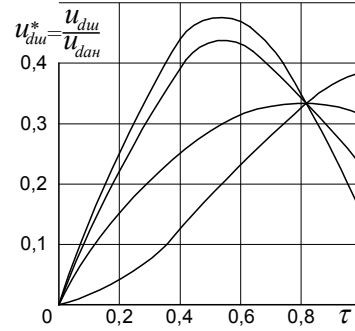


Рис. 10. Действующее относительное значение первой гармоники ШИМ во входном напряжении

Примерно такая же величина и примерно при той же величине τ получается в простом понижающем ШИП, что и следовало ожидать, поскольку схема (см. рис. 7) также использует однополярную ШИМ. С увеличением k наибольшее значение U_{dk}^* изменяется примерно обратно пропорционально номеру, что так же следовало ожидать, поскольку именно такой закон изменения высших гармоник дают разрывные сигналы. Таким образом, приходим к следующей простой аппроксимации гармонического спектра выходного напряжения.

$$U_{dk}^* = \frac{0,5}{k} \quad (10)$$

Следует оговориться, однако, что рассмотренный подход учитывает низкочастотную модуляцию амплитуд гармоник, которая всегда имеет место при синусоидальной ШИМ [11], переходом к эквивалентному действующему значению, в то время как на самом деле спектр содержит, кроме центральных гармоник с частотами $k\omega_{ш}$ ещё и боковые гармоники с комбинационными частотами. Учёт наличия боковых гармоник целесообразен при наличии узкополосных фильтров в силовой схеме или системе управления.

Проблема ограничения спектра частот

АФ с помощью метода широтно – импульсной модуляции (ШИМ) формируют гармонические составляющие встречного

знака (компенсирующие) по сигналам обратных связей, поступающих на управляющие электроды силовых полупроводниковых ключей. Однако вследствие импульсного характера компенсирующих сигналов с их помощью можно воспроизвести лишь гармонические составляющие, которые лежат в полосе воспроизводимости [12]

$$\omega_n \leq \frac{1}{2} \omega_{III} \quad , \quad (11)$$

где ω_{III} - частота ШИМ. Более высокие частоты не воспроизводятся сколько – ни будь точно и, мало того, создают помеху внутри полосы воспроизводимости. Этот факт иллюстрируется наглядно рис.12. Как видно, с помощью 10 коротких импульсов на периоде можно воспроизвести достаточно точно низкочастотную синусоиду, а затем выделить ее с помощью фильтра низких частот (ФНЧ). Однако тот же самый результат получаем при воспроизведении девятой гармоники, поскольку в точках выборки, помеченных вертикальными линиями, она принимает те же значения, что и первые. Поэтому при ее наличии первая гармоника будет воспроизводиться с ошибкой. Аналогичный негативный эффект в данном примере производят все гармоники с номерами $10K \pm 1$, где $K > 0$ - целое число.

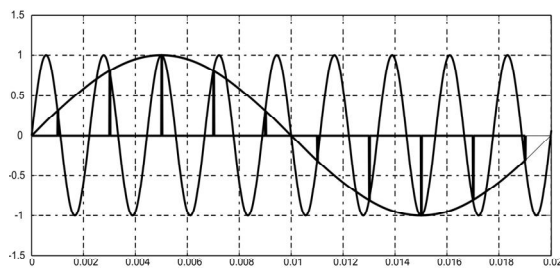


Рис.11. Иллюстрация причин помехи, создаваемой высокочастотной синусоидой при импульсном воспроизведении низкочастотной

Для предотвращения этой аномалии необходимо ограничение спектра сигналов обратных связей по верхнему пределу частоты. Однако известно, что фильтр, обладающий ограниченной частотной характеристикой вида рис.12, в общем случае не

может быть реализован [13]. Действительно, для его импульсной характеристики, которая является преобразованием Фурье от частотной характеристики, имеем

$$N(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_n}^{\omega_n} e^{j\omega t} d\omega = \frac{e^{j\omega_n t} - e^{-j\omega_n t}}{2\pi j t} = \frac{\sin \omega_n t}{\pi t} \quad (12)$$

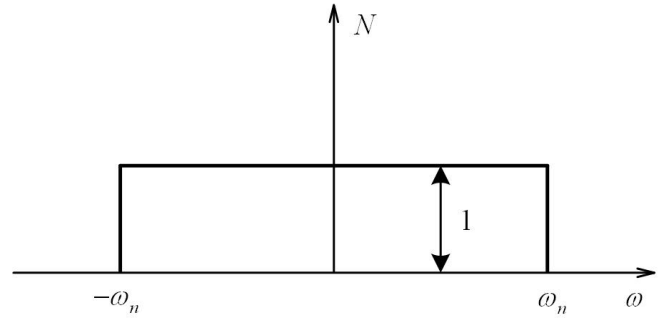


Рис.12. Идеальный фильтр

Идеальный фильтр пропускает без амплитудных и фазных искажений гармоники с частотами $|\omega| < \omega_n$ и вовсе не пропускает гармоники с частотами $|\omega| > \omega_n$. Известно, что импульсная характеристика $N(t)$ некоторого линейного звена является его реакцией на мгновенный импульс (толчок) с единичной площадью (интенсивностью), расположенный в точке $t = 0$. Воспользовавшись принципом наложения, справедливым для линейных звеньев, разлагают входной сигнал на совокупность элементарных толчков с интенсивностью $x(\tau - t)dt$ и реакцию в текущей точке суммируют

$$y(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau - t) N(t) dt \quad (13)$$

Выражение (13) позволяет трактовать невозможность реализации идеального фильтра рис.2 следующим образом. Согласно (11) импульсная характеристика $N(t)$ такого фильтра отлична от нуля в том числе и при $t < 0$. Поэтому для получения текущего значения $y(\tau)$ необходимо знание будущих значений входного сигнала $x(\tau - t)$ (значений при $\tau - t > \tau$), что в общем случае невозможно.

Однако для частного случая периодического входного сигнала $x(\tau)$ будущее зна-

чение можно связать с прошлыми значениями. Для этого выделим совокупность выборок (дискрет) входного сигнала, отстоящих на период T и поэтому одинаковых по величине (рис.14). Вызываемый ими элементарный сигнал на выходе в точке τ

$$dy = x(\tau - t)s(t)dt,$$

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} N(t + kT), \quad (14)$$

где $s(t)$ - импульсная характеристика идеального фильтра с прямоугольной частотной характеристикой (рис.2) при периодических сигналах.

Результирующий выходной сигнал определяем суммированием элементарных

$$y(\tau) = \int_0^T x(\tau - t)s(t)dt \quad (15)$$

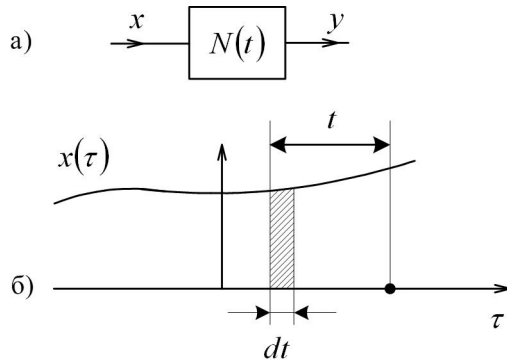


Рис. 13. К определению реакции линейного звена в момент времени τ на входной сигнал $x(\tau)$

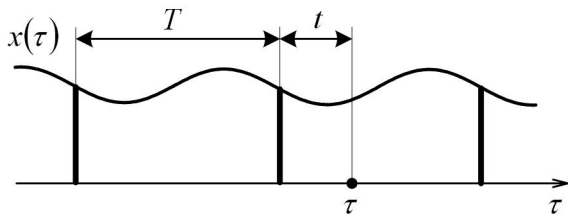


Рис. 14. К получению уравнения свертки (4) для периодических сигналов

На основе уравнения периодической свертки идеальный фильтр рис. 12 может быть реализован по структуре рис.15,а. На входе структуры имеется запоминающее устройство значений входного сигнала на периоде T с шагом Δt , действующее по принципу стека: очередное измеряемое

значение «проталкивает» предыдущее на 1 шаг в ячейках памяти. Постоянное запоминающее устройство S при использовании метода Эйлера для численного интегрирования уравнения (15) состоит из элементов $s(t)\Delta t$. Множительное устройство умножает на каждом такте Δt матрицу-строку X на матрицу-столбец S согласно равенству

$$Y = XS \quad (16)$$

Наконец, выходной сигнал $y(t)$ формируется дискретным фиксатором из значений Y на каждом такте измерений Δt .

Альтернативой методу свертки являются резонансный метод и метод ряда Фурье (рис.15,б-в). Резонансное звено, электрический эквивалент которого показан внутри прямоугольника на рис.15,б, выделяет k -ю гармонику сигнала x при выполнении равенств

$$\kappa\omega_1 L = \frac{1}{\kappa\omega_1 C}, \quad Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} \rightarrow \infty, \quad (17)$$

где $\omega_1 = 2\pi/T$ - частота первой гармоники; Q - добротность резонансного звена.

Метод ряда Фурье реализует уравнения

$$X_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-jk\omega_1 t} dt,$$

$$y(\tau) = \sum_{k=-q}^q X_k e^{jk\omega_1 \tau}, \quad (18)$$

где X_k - комплексная амплитуда k -й гармоники входного сигнала; q - наибольший номер гармоники, входящий в полосу пропускания идеального фильтра. Дискретный фиксатор ДФ действует с периодом T .

Периодическая импульсная характеристика фильтра

В том, что импульсная характеристика $s(t)$ удовлетворяет условию периодичности

$$s(t + T) = s(t), \quad (19)$$

убеждаемся из ее связи (3) с непериодической импульсной характеристикой $N(t)$,

подставляя $t+T$ вместо t и заменяя $\kappa+1$ на κ .

Для получения замкнутого выражения для $s(t)$ подставим X_κ из первого уравнения (18) во второе и поменяем местами порядок суммирования и интегрирования

$$y(\tau) = \int_0^T x(t) \left[\frac{1}{T} \sum_{\kappa=-q}^q e^{j\kappa\omega_1(\tau-t)} \right] dt. \quad (20)$$

Заменяя $\tau-t$ на t , либо, что одно и то же, t на $\tau-t$ приходим к уравнению свертки вида (15) в котором

$$s(t) = \frac{1}{T} \sum_{\kappa=-q}^q e^{j\kappa\theta}, \quad (21)$$

где $\theta = \omega_1 t$, - электрический угол на

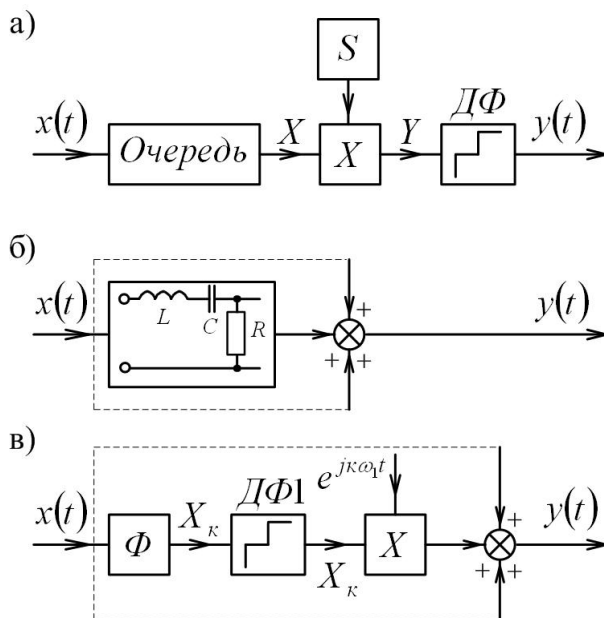


Рис. 15. Методы реализации идеального фильтра рис.2 при периодических сигналах:

а - метод свертки; б - резонансный метод; в - метод ряда Фурье

основной частоте ω_1 , и отличие есть лишь в пределах интегрирования. В связи с изменением знака dt после замены переменной интегрирования поменяем в (20) местами пределы интегрирования, получая в качестве нижнего предела $\tau-T$, а в качестве верхнего $(\tau-T)+T$. В связи с периодичностью интегральной функции добавление в сравнении с (15) к нижнему и верхнему

пределам одной и той же величины $\tau-T$ (смещение интервала интегрирования на $\tau-T$) не изменит величины интеграла, поскольку изменится лишь порядок суммирования значений функции на периоде, а сами эти значения останутся теми же. Рассмотрим теперь равенство (21) для импульсной характеристики. Сумма в первой части является геометрической прогрессией, у которой первый и последний члены, а также знаменатель равны, соответственно, $e^{-jq\theta}$, $e^{jq\theta}$ и $e^{j\theta}$, поэтому

$$s = \frac{e^{-jq\theta} - e^{j(q+1)\theta}}{T(1 - e^{j\theta})} \quad (22)$$

Умножая числитель и знаменатель на $e^{-j0,5\theta}$, получим в результате

$$s = \frac{e^{-j(q+0,5)\theta} - e^{j(q+0,5)\theta}}{T(e^{-j0,5\theta} - e^{j0,5\theta})} = \frac{\sin[(q+0,5)\theta]}{T \sin(0,5\theta)} \quad (23)$$

В двух точках на периоде знаменатель обращается в нуль, поэтому соответствующее значение импульсной характеристики получаем предельным переходом

$$s(0) = s(T) = \frac{2q+1}{T} \quad (24)$$

На рис. 16 показаны графики относительной импульсной характеристики $s/s(0)$ для значений $q=1$ и $q=6$.

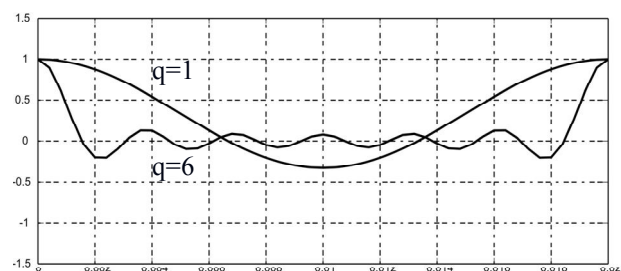


Рис. 16. Периодическая импульсная характеристика фильтра рис. 2 при $T = 0,02$ с

Число точек дискретизации импульсной характеристики на периоде T , согласно теореме Котельникова, определяется неравенством

$$m \geq 2q \quad (25)$$

Механизм действия фильтра поясняют машинограммы рис.17, полученные на Matlab-модели фильтра при $m=96$ при выделении из идеального меандра (рис.7,а), содержащего, как известно, все нечетные гармоники до 11-й включительно, для чего задавалось $q=12$. Фильтр, как видно, действует с задержкой $t_z = T$, необходимой для первоначального создания массива значений входного сигнала на периоде

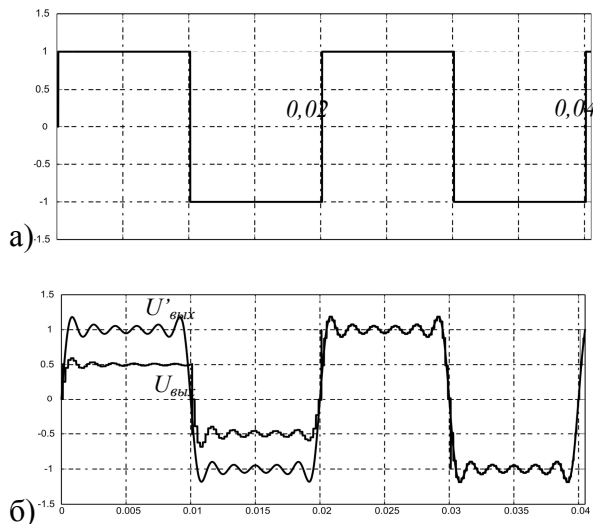


Рис.17. Действие фильтра на идеальный меандр с периодом $T=0,02$ сек: а) – входной сигнал; б) – $u_{\text{вых}}$ – реальный выходной сигнал, $u'_{\text{вых}}$ – расчетный выходной сигнал

Некоторые свойства фильтра

Из сказанного ясно, что рассматриваемый фильтр обладает прямоугольной частотной характеристикой вида рис. 12 лишь на дискретной совокупности рабочих частот, соответствующих периодическому сигналу. Поэтому можно сказать, что он принадлежит к классу фильтров дискретных частот (ФДЧ). Значения этих частот

$$\omega_k = k\omega_1 = 2\pi k/T, \quad -\infty < k < \infty \text{ при } m \rightarrow \infty \quad (26)$$

где величина периода T является параметром импульсной характеристики $s(t)$ согласно (23).

При отклонении фактических частот внешнего возмущения от значений (25) частотная характеристика ФДЧ уже не соответствует рис.12. В частности, она изменится и при отклонении периода внешнего

возмущения от значения T , являющегося параметром импульсной характеристики. Если это отклонение существенно, то может быть целесообразно автоподстройка ФДЧ согласно структурной схеме рис.18. Импульсная характеристика базового фильтра соответствует (23), а импульсная характеристика производного получается дифференцированием выражения (23) по параметру $\omega_1 = 2\pi/T$. Схема рис.18 дает линейное приближение для импульсной характеристики ФДЧ при отклонении фактической частоты периодического возмущения от расчетного значения.

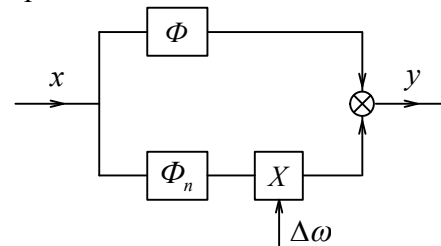


Рис.18. Структурная схема ФДЧ с автоподстройкой рабочих частот:

Φ и Φ_n – базовый и производный фильтры; сигнал пропорциональный отклонению фактической частоты первой гармоники от расчетного значения

Выводы

1. В параллельном АФ целесообразно использование инвертора тока, что позволяет исключить одну инерционность и повысить устойчивость системы против низкочастотных автоколебаний.

2. Между последовательным и параллельными звеньями АФ целесообразно разделение функций по частоте подавляемых гармоник: гармоники с частотами до 600 Гц подавляет последовательное звено, а более высокочастотные – параллельное.

3. Для применения в цепях обратных связей силовых активных фильтров полезен ФДЧ, который на дискретной совокупности частот периодического возмущения обладает прямоугольной частотной характеристикой вида рис.12. Тем самым, отделяются воспроизводимые составляющие сигналов обратных связей от невоспроизводимых.

4. Периодическая импульсная характеристика ФДЧ может быть представлена в замкнутой форме путем суммирования гармонических составляющих.

5. Использование ФДЧ для чернового подавления гармоник в разомкнутой управляющей структуре позволяет сократить число резонансных звеньев в основном замкнутом канале и снизить величины их коэффициентов усиления, что облегчает обеспечение условий устойчивости замкнутого канала. Может быть также исключен традиционный ПИ-регулятор выходного напряжения с возложением его функций на ФДЧ.

Библиографический список

1. Панасенко, Н. В. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог [Текст] / Н. В. Панасенко, В. В. Божко, Ю. П. Гончаров // Залізничний транспорт України. – 2007. – №4. – с. 76-80.

2. Гончаров, Ю. П. Полупроводниковый преобразователь с вольтодобавкой в качестве активного фильтра [Текст] / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. В. Замаруев // Технічна електродинаміка, тем. випуск Силова електроніка і енергоефективність. – 2007. – с. 56 – 62.

3. Гончаров, Ю. П. Тяговый выпрямляч з реверсивним вольтододатком на запираємих напівпровідникових приладах. [Текст] / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко // Технічна електродинаміка. – 2007. – №6.

4. Шербак, Я. В. Замкнутые системы компенсации неканонических гармоник полупроводниковых преобразователей. [Текст] / Я. В. Шербак // Транспорт Украины. – 1999. – 155 с.

5. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи. [Текст] / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 2001. – 464 с.

6. Гончаров, Ю. П. Зависимости между входными и выходными гармониками в автономных инверторах [Текст] / Ю. П. Гончаров // Электричество. – 1971. – №2. – С. 53 – 57.

7. Браун, М. Источники питания. Расчёт и конструирование. [Текст] / М. Браун. – Киев. – 2005. – 279 с.

8. Никитин, А. В. Полупроводниковые преобразователи с активными фильтрами для питания аппаратуры связи. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. 1998г.

9. Хворост, Н. В. Силовые активные фильтры для систем частотно-регулируемого привода на электрическом транспорте [Текст] / Н. В. Хворост, Ю. П. Гончаров, Ю. В. Чурсіна // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2006. – ч. I. – С. 19 – 26.

10. Гончаров, Ю. П. Перетворювальна техніка [Текст] / Ю. П. Гончаров, С. В. Будьонний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко, В. Я. Ромашко, В. С. Руденко // Харків: Фоліо. – 2000. – 357 с.

11. Гончаров, Ю. П. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу [Текст] / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, А. І. Семененко, М. В. Хворост // Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – 190 с.

12. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника [Текст] / У. Титце, К. Шенк, – М.: Мир. – 1982. – 512 с.

13. Сокол, Є. І. Спеціалізовані мікроконтролерні системи. Теорія і практика: Підручник [Текст] / під ред. Сокола Є.І. - Харків, НТУ «ХПІ», 2007. – 252 с.

Ключевые слова: активная фильтрация, современные выпрямители, гармоника, инвертор тока.

Ключові слова: активна фільтрація, сучасні випрямлячі, гармоніка, інвертор струму.

Key words: active filtration, modern rectifier, harmonic, current invertig element.

Поступила в редколлегию 26.11.2010

Принята к печати 29.11.2010

СЕРДЮК Т. Н. – к.т.н., доцент (ДНУЖТ)

ШВЕЦ А. В. – д.ф.-м.н., с.н.с. (Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины)

ИВАНОВ В. К. – д.ф.-м.н., профессор (ИРФЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины)

ВЫДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ МОЩНЫХ ПОМЕХ ОТ СИЛОВЫХ СЕТЕЙ

Введение

Изолятор – это один из наиболее ответственных, но и один из самых ненадежных элементов высоковольтных линий электропередач (ЛЭП). При наличии запаса по электрической прочности, полное повреждение одного из изоляторов в гирлянде может не вызывать сразу нарушения нормальной работы ЛЭП. Однако постепенное накопление дефектных изоляторов ведет к перекрытиям, особенно в грозовой период.

Различные процессы, связанные с ухудшением состояния изоляции и появлением диагностических признаков, исследованы ведущими организациями в этой отрасли. В качестве одной из основных причин, приводящих со временем к разрушению изолятора, рассматривается явление частичных разрядов (ЧР), происходящих во внутренних полостях фарфоровых или стеклянных изоляторов.

Для предотвращения опасных ситуаций в работе ЛЭП разработаны мероприятия по проведению контроля состояния изоляции. В последнее время большое распространение получили дистанционные методы. В настоящее время для контроля изоляции высоковольтных устройств используются три основных метода: инфракрасный; электронно-оптический (по ультрафиолетовому излучению); ультразвуковой. Первые два из этих методов наиболее точны и информативны, однако эффективность их применения существенно зависит от погодных условий и времени суток, что делает практически невозможным поиск неисправностей при солнечном освещении. Ультразвуковые методы свободны от данных недостатков, однако, дистанция обнаружения неисправностей для

всех перечисленных методов ограничена несколькими десятками метров, что требует обхода (облета) ЛЭП в непосредственной близости от опор воздушных линий.

Следует отметить, что метод инспекции ЛЭП, основанный на измерении радиопомех, используется для обнаружения повреждений на линиях, однако, вследствие использования высокочастотных диапазонов дальность действия его также ограничена.

Представляет интерес использование радиоизлучения в диапазоне сверхнизких частот, который соответствует максимальной спектральной плотности излучения короны, а также частичных разрядов в изоляторах. Проблема использования данного диапазона частот связана, прежде всего, с высоким уровнем излучения ЛЭП на основной частоте (50 Гц) и на высших гармониках, а также помех от атмосферного электричества.

Целью работы является разработка методики компенсации мощных узкополосных гармоник, излучаемых силовыми сетями, для применения в компьютеризованной системе обнаружения и регистрации импульсных сигналов, связанных с частичными или коронными разрядами в изоляторах линий электропередач.

Методика выделения и компенсации мощных помех при измерениях в силовой сети

Задача сбора и анализа широкополосных сигналов возникает во многих областях науки и техники, при этом измерения часто должны проводиться в полевых условиях. К системе сбора и обработки данных предъявляются такие требования как компактность, универсальность и способность работы в условиях повышенного уровня индустриаль-

льных помех. Наиболее мощными помехами, как правило, являются гармоники силовой сети 50 Гц, существенно ограничивающие динамический диапазон исследуемых сигналов. Использование режекторных фильтров, настроенных на фиксированные частоты, бывает неэффективным даже при небольших флуктуациях частоты сети. Проблема обычно решается путем использования синхронных фильтров с фазовой автоподстройкой частоты режекции [1-3], которые обеспечивают подавление как основной, так и высших гармоник, излучаемых силовой сетью. Однако немалые размеры и сложность настройки синхронных фильтров ограничивают их применение в портативных системах сбора данных.

В настоящей работе описана система сбора с высоким разрешением, охватывающая динамический диапазон, как помехи, так и сигнала, что позволяет осуществлять фильтрацию полностью в цифровой форме и, таким образом, свести к минимуму использование аналоговых компонентов в приемно-регистрирующем устройстве.

Методика предназначена для применения в компьютеризированной системе обнаружения и регистрации импульсных сигналов, связанных с частичными или коронными разрядами в изоляторах ЛЭП. Алгоритм компенсации узкополосной помехи состоит в следующем: по спектру сигнала определяются два максимальных значения амплитуды в окрестности частоты помехи; вычисляются точные значения частоты фазы и амплитуды сигнала помехи; формируется сигнал компенсации, который вычитается из исходного сигнала. Необходимо отметить, что данная методика позволяет определить параметры помехи с точностью, превышающей частотное разрешение дискретного спектра, определяемого длительностью анализируемой реализации сигнала и частотой дискретизации. Данное обстоятельство является ключевым для успешной работы методики в случае, когда частота помехи не совпадает с одним из дискретных отсчетов спектра.

В качестве модели узкополосной помехи используется монохроматический сигнал $s(t) = a \cos(\omega_0 t + \varphi)$, умноженный на прямо-

угольное временное окно, охватывающее интервал $0 \dots T$. Спектр такого сигнала описывается формулой

$$S(\omega) = \frac{aT}{2} \left[\frac{\sin(\omega - \omega_0) \frac{T}{2}}{(\omega - \omega_0) \frac{T}{2}} \times e^{i\varphi} \times e^{-i(\omega - \omega_0) \frac{T}{2}} + \frac{\sin(\omega + \omega_0) \frac{T}{2}}{(\omega + \omega_0) \frac{T}{2}} \times e^{i\varphi} \times e^{-i(\omega + \omega_0) \frac{T}{2}} \right], \quad (1)$$

Он содержит два пика на частотах $\pm \omega_0$, ширина которых определяется количеством периодов высокочастотного заполнения, попадающих в интервал $0 \dots T$. При переходе к дискретному спектру ширина этих пиков будет зависеть еще и от соотношения между длительностью реализации и периодом высокочастотного заполнения. Если в течении времени T попадает целое количество периодов, то за счет периодичности в спектре получаются бесконечно узкие линии на участках высокочастотного заполнения (рис.1). Величина дробной части δ , являющейся остатком деления интервала T на период высокочастотного заполнения $t_0 = 2\pi/\omega_0$, определяет ширину пиков и появление «крыльев», которые при значительной амплитуде узкополосного сигнала могут существенно исказить форму спектра в достаточно удаленной

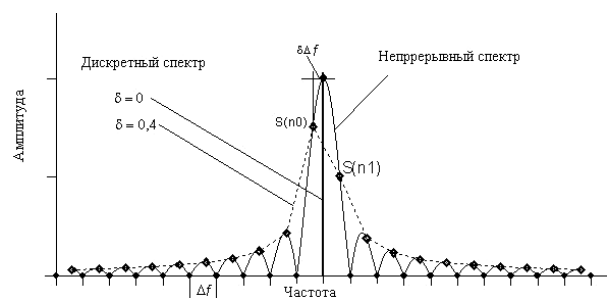


Рис.1. Формирование дискретного спектра синусоидального сигнала, ограниченного во времени, при дробном и целом соотношениях между длительностью реализации и периодом сигнала

области частот. Так, при $\delta = 0$ частота сигнала совпадает с дискретным отсчетом в спектре, а при дробном значении, например $\delta = 0,4$, частота сигнала находится в проме-

жутке между соседними отсчетами в спектре - точки $S(n_0)$ и $S(n_1)$. В дискретном представлении (1) имеет следующий вид:

$$S(n) = \frac{aT}{2} \left(\frac{\sin \pi(n - n_0 - \delta)}{\pi(n - n_0 - \delta)} e^{i\varphi} e^{i\pi(n - n_0 - \delta)} + \frac{\sin \pi(n + n_0 + \delta)}{\pi(n + n_0 + \delta)} e^{-i\varphi} e^{i\pi(n + n_0 + \delta)} \right), \quad (2)$$

где n – текущий отсчет в дискретном спектре, n_0 – результат целочисленного деления ω_0 на величину $2\pi\Delta f$ ($\Delta f = 1/T$ – частотное разрешение спектра).

Учитывая только положительные частоты и делая элементарные преобразования, получим следующее выражение для спектральной плотности:

$$S(n) \cong \frac{aT}{2} e^{i(\pi\delta + \varphi)} \frac{\sin \pi\delta}{\pi(n - n_0 - \delta)} \quad (3)$$

Для компенсации сигнала помехи необходимо определить точные значения его частоты ω_0 , фазы φ и амплитуды α , что выполняется путем определения параметров двух отсчетов в дискретном спектре в окрестности частоты помехи на основе выражения (3).

Алгоритм компенсации узкополосных помех состоит в следующем:

1) по спектру сигнала определяются два максимальных значения амплитуды $S(n_0)$ и $S(n_1)$ в окрестности частоты помехи;

2) определяются параметры сигнала помехи по следующим формулам, полученным из (3):

$$\delta = \frac{|S(n_1)|}{|S(n_0)| + |S(n_1)|}, \quad \omega_0 = 2\pi\Delta f(n_0 + \delta),$$

$$\varphi = \arg S(n_0) - \pi\delta,$$

$$a = \frac{2}{T} [|S(n_0)| + |S(n_1)|] \cdot \frac{\pi\delta(1 - \delta)}{\sin \pi\delta}, \quad (4)$$

3) формируется сигнал компенсации $s(k) = a \cos\left(\frac{\omega_0}{f_s} k + \varphi\right)$, который затем вычитается из исходного сигнала (f_s – частота дискретизации).

Компьютеризованная система обнаружения и регистрации импульсных сигналов

Предлагается создание мобильного комплекса для измерения низкочастотных импульсных помех от высоковольтных сетей вызванных коронными или частичными разрядами. Мобильный комплекс предназначен для использования во время проведения периодического осмотра технического состояния подвесных изоляторов с проведением измерений при обходе высоковольтных воздушных линий.

Комплекс для обнаружения и регистрации импульсных сигналов включает в себя набор датчиков для измерения низкочастотного магнитного и электрического поля (индукционные датчики с ферромагнитным сердечником и штыревая антенна), многоканальный аналого-цифровой преобразователь и компьютер для накопления и обработки данных.

Для предотвращения проникновения внешних наводок, характерных для встраиваемых систем, и для достижения универсальности был создан отдельный блок аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования АЦП/ЦАП, управляемый из компьютера через стандартный интерфейс (коммуникационный порт). Таким образом, построение системы сбора данных свелось к комбинации датчиков измеряемых сигналов, симметричной проводной линии связи, выносного блока АЦП/ЦАП и внешнего компьютера с комплексом программ для управления приемом и передачей данных через последовательный порт и обработки и накопления принимаемых данных.

Выносной блок АЦП/ЦАП (рис.2) включает в себя: четыре АЦП; ЦАП разрядностью 10 бит, применяемый для калибровки приемной аппаратуры; микропроцессорный блок управления АЦП/ЦАП с интерфейсом

RS-232; программное обеспечение для микроконтроллера, обеспечивающее инициализацию, получение данных от АЦП, передачу данных на ЦАП, связь с внешним компьютером.

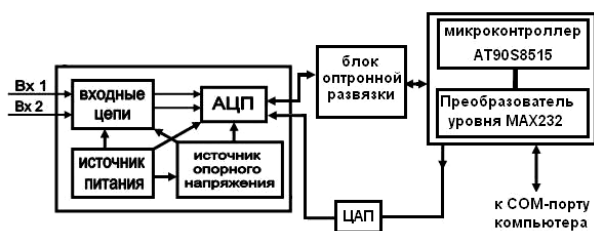


Рис. 2. Структурная схема измерения и компенсации мощных помех в силовых сетях

Конструктивно устройство состоит из шести плат 65×75 мм, сочлененных гибкими соединителями: четыре платы АЦП, плата ЦАП и плата управления/согласования. Сборка из четырех плат АЦП помещена в экран из пермаллоевой фольги. Вся система размещена в пластиковом корпусе 200×90×48 мм. В корпус вмонтирован 9-штырьковый разъем последовательного интерфейса, входной разъем для аналоговых сигналов, разъем и тумблер питания.

Для получения высокой разрядности применен аналого-цифровой преобразователь AD7714 со встроенным шестиканальным мультиплексором. В качестве буферного каскада, в котором измеряемый входной диапазон регистратора (дифференциальный сигнал амплитудой 10 В) перестраивается во входной диапазон АЦП (+0,6...–1,85 В), применен инструментальный усилитель AD623. Смещение диапазона сигнала производится с помощью резистивного делителя на входе усилителя. Питание каждой сборки АЦП (0...+5 В) с входными каскадами производится от своего прецизионного источника питания. Так как для AD7714 необходим внешний источник опорного напряжения (1,25 В), мы использовали источник ADR291R, для уменьшения помех расположенный в непосредственной близости от AD7714.

Управление модулями АЦП и ЦАП, а также их сопряжение с внешним компьютером производится с помощью микроконтроллера AT90S8515 со встроенным конт-

ролером последовательного интерфейса (UART) и преобразователя уровня TTL/RS-232 (MAX232). Через последовательный синхронный канал связи (стандарт SPI) микроконтроллер управляет работой и принимает данные от АЦП, передает данные на ЦАП. Для обеспечения синхронности получаемых по всем каналам отсчетов обращение ко всем модулям преобразователей производится одновременно.

Алгоритм работы устройства состоит в следующем. При включении питания выполняется внутренняя калибровка АЦП, микроконтроллер инициализирует АЦП на автоматический перезапуск, устанавливает скорость 150 преобразований/с и подключает первый канал входного мультиплексора в каждом из модулей АЦП. После прихода сигнала окончания преобразования из первого модуля АЦП схема управления считывает данные из буферных регистров всех АЦП во внутреннюю память микроконтроллера. Затем из полученных данных формируется шестнадцатибайтовая посылка, которая со скоростью 115200 бод передается через последовательный интерфейс в компьютер [4]. В каждый байт посылки включен признак канала: число в двух старших битах соответствует номеру модуля АЦП, с которого получены данные.

Для управления устройством предусмотрены следующие возможности: выбор скорости преобразования из набора 10; 25; 50; 75; 100; 150; 171,4286; 250 Гц; установка номера опрашиваемого канала (0,1); установка напряжения на выходе ЦАП; перезапуск и синхронизация АЦП.

Управление осуществляется подачей управляющего слова из компьютера в дуплексном режиме.

Испытания устройства сбора данных проводились с помощью программы, разработанной для регистрации спектров низкочастотных сигналов [2,3] и адаптированной для приема данных через последовательный порт. Спектры шумов, усредненных в течение 5 мин по реализациям длиной 2048 точек (что соответствует 12 с), при частоте дискретизации 171 Гц и приведенных к входам по двум каналам АЦП, показаны на рис. 2.

Можно видеть, что спектр шума практически постоянен в области от 0 до ~25 Гц и далее равномерно нарастает с частотой. Характер измеренных спектров объясняется наличием двух источников шума. Во-первых, это частотно-независимые собственные шумы модулятора АЦП, которые преобладают в области нижних частот. С повышением частоты увеличиваются и становятся преобладающими шумы квантования в используемых микросхемах сигма-дельта АЦП [5]. В спектрах также присутствует ряд узкополосных пиков, связанных, по-видимому, с проникновением сигналов кварцевых тактовых генераторов АЦП, незначительно различающихся по частоте (пики в районе 80 Гц), а также других цифровых сигналов (пики в низкочастотной области спектров).

Результаты сравнения шумовых параметров, полученных в разработанной системе сбора данных для различных скоростей преобразования, с анонсированными параметрами микросхемы AD7714 [5] приведены в таблице.

Из результатов проведенного анализа следует, что при низких частотах дискретизации шумы в 2–3 раза превышают анонсированные данные, тогда как для частот выше 50 Гц наблюдается достаточно хорошее совпадение шумовых параметров системы с параметрами использованных микросхем АЦП.

Результаты исследования измерительной компьютеризированной системы

Описанное в предыдущем разделе устройство сбора аналоговых данных было использовано в системе регистрации естественного электромагнитного поля в диапазоне сверхнизких частот (с.н.ч.) – Шумановских резонансов. Шумановские резонансы несут информацию как о свойствах полости, образованной поверхностью Земли и нижней кромкой ионосферы, так и об источниках с.н.ч.-излучения – молниях, и представляют интерес как индикатор глобальных изменений окружающей среды [6,7]. Задача измерения Шумановских резонансов включает две стороны, отражающие спектральное и временное представления си-

гналов. Это накопление средних спектров фонового сигнала, формируемого совокупностью молниевых разрядов, происходящих на Земле, и выделение всплесков с.н.ч. – сигналов, порождаемых дальними сверхмощными молниями и превышающих амплитуду фона в 3–10 раз. Одной из основных помех для измерений является излучение гармоник силовой сети 50, 100 Гц и т.д., амплитуда которых превышает уровень естественного сигнала на 40...70 дБ.

Таблица 1

Анализ эффективности использования микросхемы AD7714 на различных скоростях преобразования сигнала

Частота дискретизации, Гц	Характеристики AD7714		Результаты измерений	
	Эффективное разрешение, бит	Средне-квадратичное отклонение шумов, бит (мкВ)	Средне-квадратичное отклонение шумов, бит	Максимальный размах напряжения шума, бит
10	21.5	6 (0.78)	17	110
25	21	9 (1.1)	21	115
50	20	16 (2.06)	20	130
75			34	230
100	18.5	46 (5.9)	44	290
150			151	930
171			230	1335
250	15.5	453 (58)	396	2619

При таком соотношении уровней полезного сигнала и сигнала помехи даже при использовании АЦП высокой разрядности «крылья» от сигнала узкополосных помех могут существенно исказить спектр измеряемого сигнала. Данная ситуация продемонстрирована на рис.3, на котором приведены спектры с применением компенсации сигналов частотой 50 Гц (график выполнен сплошной жирной линией) и без нее (график выполнен штрихом). По оси ординат отло-

жена вертикальная составляющая электрического поля Земли. Измерение горизонтальной компоненты электрического поля не выполнялось, поскольку ее значения малы в сравнении с вертикальной.

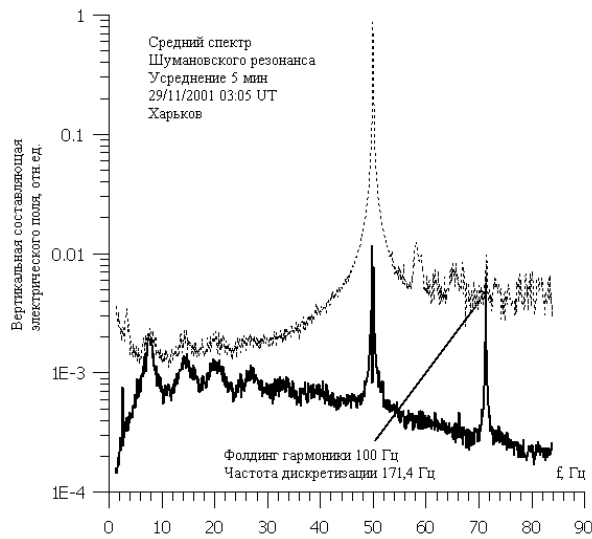


Рис. 3. Результаты спектрального анализа сигнала Шумановского резонанса с использованием компенсации помехи частотой 50 Гц и без нее

Из рис. 3 видно, что на частоте 71,4 Гц наблюдается фолдинг сигнала помехи частотой 100 Гц – перенос (зеркальное отображение) сигналов частотой большей половины частоты дискретизации 85,7 Гц. Резонансные пики на частотах 8, 14, 20, 26, 32, 39 Гц представляют собой Шумановские резонансы.

Эффект использования предложенной методики компенсации для выделения импульсных сигналов (всплесков с.н.ч.) на фоне узкополосных помех представлен на рис.4. Как можно видеть, эффективность подавления достаточно высока при условии неизменности параметров помех на интервале анализируемых временных реализаций.

К недостатку методики можно отнести ее чувствительность к скачкам фазы и амплитуды сигнала помехи.

Данная проблема может быть сведена к минимуму путем разбиения полного интервала на более короткие участки и последующего выполнения компенсации для каждого из них.

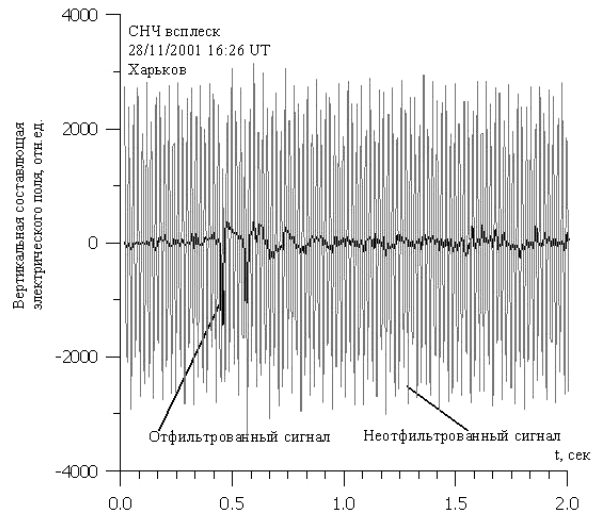


Рис. 4. Выделение импульсного сигнала на фоне сильной сетевой узкополосной помехи

Следует отметить, что преимущество предложенной компенсационной методики фильтрации заключается в отсутствии искажений спектров, получаемых вследствие их умножения на соответствующие передаточные характеристики при использовании традиционных фильтров, а также ее применимость для выделения сигналов, как во временной, так и в частотной области.

Выводы

В заключение перечислим основные результаты работы.

Разработана мобильная многоканальная система автоматизированного сбора и анализа низкочастотных импульсных сигналов при наличии в нем мощных узкополосных помех.

Разработан компенсационный алгоритм фильтрации узкополосных помех, позволяющий устранить влияние их «крыльев» на форму спектров анализируемых слабых сигналов, а также выделять импульсные сигналы во временной области. Фильтрация узкополосных помех основана на использовании АЦП с высоким разрешением, позволяющего охватить динамический диапазон сигнала и помехи.

Работа системы продемонстрирована на примере регистрации естественных электромагнитных импульсных сигналов, возбуждаемых совокупностью происходящих на Земле молний, в полости Земля-ионосфера в ди-

апазоне свэрхнизких частот (Шумановских резонансов).

Разработанная методика реализована и протестирована в системе сбора данных естественных радиоизлучений в диапазоне свэрхнизких частот. Измерения проводились с помощью датчиков вертикального электрического поля и датчиков горизонтальных магнитных компонент в полевых условиях. Применение методики позволило накопить банки данных импульсных сигналов естественного происхождения в условиях мощных узкополосных помех от окружающих пункт наблюдений воздушных линий электропередач.

Библиографический список

1. Щекотов, А. Ю. Следящий режекторный фильтр на частоту сети и ее гармоники [Текст] / А. Ю. Щекотов, А. М. Голявин // Приборы и техника эксперимента. – 1978. – № 4. – С. 175.

2. Наблюдения за движением мировой грозовой активности по анализу трехкомпонентных измерений Шумановских резонансов [Текст] / Г. Г. Беляев и др. // Радиофизика и электроника. – 1999. – Т. 4. – № 1. – С. 63.

3. Schumann resonance observed live the Poynting vector spectra [Текст] / G. G. Belyaev and itc. // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. – 1999. – V. 61. – P. 751.

4. Новиков, Ю. В. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC [Текст] / Ю. В. Новиков, О. А. Калашников, С. Е. Гуляев – М.: Эком, 1997. – 215 с.

5. 1999 Design – In Reference Manual [Текст] / Analog Device Inc. – USA., 1999. – 11 p.

6. Блюх, П. В. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера. [Текст] / П. В. Блюх, А. П. Николаенко, Ю. Ф. Филиппов. – Киев: Наукова думка, 1977. – 200 с.

7. Williams, E. R. The Schumann Resonance: A global tropical thermometer [Текст] / E. R. Williams. – Science, 1992. – V.256. – P. 1184-1187

Ключевые слова: мощные узкополосные гармоники, спектр сигнала, амплитуда помехи.

Ключові слова: потужних вузькосмугових гармонік, спектр сигналу, амплітуда завади.

Key words: powerful narrow-band harmonics, spectrum of the signal, amplitude of the interference.

Поступила в редколлегию 4.11.2010.

Принята к печати 9.11.2010.

ОРГАНІЗАЦІЯ ЗАХИСТУ РЕЙКОВИХ КІЛ ВІД ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД З БОКУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ

Представив д.ф-м.н., проф. Гаврилюк В. І.

Вступ

Розвиток економіки та промисловості України супроводжується збільшенням вантажообігу та підвищенням швидкостей перевезення, що в свою чергу потребує відповідного розвитку залізничного транспорту. Виникає потреба впровадження нових більш потужних ліній транспортування, при збереженні відповідного високого рівня безпеки руху. Це в свою чергу зумовило підвищення вимог до електромагнітної сумісності тягової мережі з пристроями залізничної автоматики.

Сучасний електрорухомий склад (ЕРС) споживає з контактної мережі (КМ) значну потужності, що викликає протікання в проводах мережі тягового струму великого значення, який здатний створювати несприятливе електромагнітне оточення та викликати появу завад в усіх прилеглих електричних системах, зокрема в рейкових колах. [1]

Оскільки електромагнітні завади можуть бути причиною збоїв в роботі рейкових кіл, перекриття світлофорів та зупинки потягів необхідне впровадження систем захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу тягової мережі.

Особливу увагу звернемо на ділянки залізниць, де тягова мережа змінного струму знаходиться у безпосередній близькості до тягових мереж постійного струму (перегони, які мають дільниці зближення двох різних тягових мереж; станції стикування), оскільки частота сигнального струму рейкових кіл при тязі постійного струму збіга-

ється з частотою тягової мережі змінного струму.

Постановка задачі

При русі потягу в зоні колії утворюється низькочастотне магнітне поле, що зростає пропорційно збільшенню тягового струму в КМ, воно спрямоване перпендикулярно до осі колії. Під дією цього поля індукуються заважаючи повздовжні електрорушійні сили (ЕРС) в рейкових лініях, кабелях зв'язку та інших лініях автоматики, прокладених вздовж колії. Індуковані в рейках повздовжні ЕРС викликають протікання в них струмів завад, які можуть бути причиною відмов в роботі рейкових кіл.

Якщо розглядати одноколіїну ділянку залізниці, то наведені повздовжні ЕРС у рейках будуть приблизно однаковими, бо КМ розташована симетрично відносно рейкової лінії. Таким чином електромагнітний вплив від КМ своєї колії буде незначним. Але при розгляданні багатоколіїних ділянок (дво-, трьохколіїні перегони; ділянки зближення; тощо) треба враховувати вплив КМ однієї колії на рейкові лінії сусідніх колій. В цьому випадку, наприклад, відстань від впливаючого контактного проводу до рейок суміжної колії буде різною, а отже наведені повздовжні ЕРС матимуть різні значення, що призведе до появи різницевого струму в рейках, який може спричинити заважаючий, або навіть небезпечний вплив на роботу рейкових кіл [2].

Метою роботи є розробка системи, що дозволить організувати захист рейкових кіл від електромагнітного впливу КМ суміжної колії.

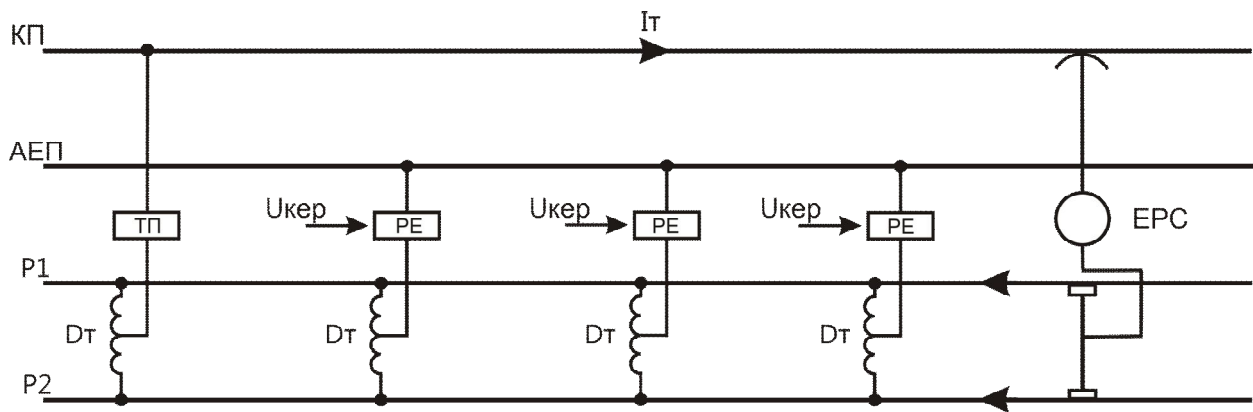


Рис. 1. Структурна схема системи захисту рейкових кіл

Системи з ЕУП

В якості вирішення поставленої проблеми може бути використана тягова мережа в структурі якої окрім КМ та рейок присутні додаткові провідники.

Найпоширенішою на залізницях СНД є система тягової мережі з екрануючим та підсилюючим проводами (ЕПП). Ця система з'явилась ще у кінці 70-х років на залізницях СРСР та мала основною задачею зменшення опору КМ та збільшення потужності тягової ділянки [3].

В такій системі КМ та несучий трос з'єднані паралельно з підсилюючим проводом, який розміщується на ізоляторах з нетягової сторони опори. Екрануючий провід під'єднується паралельно рейкам через середні точки дросель-трансформаторів, або просто заземлюється за допомогою індивідуального заземлення. Існують варіанти під'єднання екрануючого проводу секціями, завдяки чому відсутній електричний зв'язок між дросель-трансформаторами, що розташовані по обидві сторони ізолюючого стику [4].

Ці системи відносяться до класу систем з використанням пасивного (заземленого) екрануючого проводу, наявність якого знижує електромагнітний вплив тягової мережі на ізольовані кабельні лінії та лінії зв'язку. Так як електромагнітний вплив на рейки зменшується не суттєво, то захист рейкових кіл відсутній.

Більш сучасним та перспективним способом вирішення поставленої проблеми є

використання систем з активним екрануючим проводом (АЕП). Такі системи передбачають пропуск зворотного тягового струму через АЕП за допомогою додаткових регулюючих пристроїв. В Європі широко використовується система, в якій весь зворотній тяговий струм пропускається через АЕП [5], таким чином тяговий струм в рейках відсутній. Але в цьому випадку струм в АЕП, як і в контактному, має приблизно постійне значення, отже такий спосіб розрахований в першу чергу на захист ізольованих від землі ліній (кабелів, ліній зв'язку), що мають постійний рівень напруги по всій своїй довжині. Рейкова лінія має сполучення з землею через опір ізоляції, тобто рівень струму в рейковій лінії змінюється в залежності від місцезнаходження рухомого складу. Таким чином описаний спосіб не дозволяє в достатній мірі зменшити електромагнітний вплив на рейкові кола.

Система захисту рейкових кіл

Запропонований спосіб зменшення електромагнітного впливу тягової мережі змінного струму на рейкові кола суміжної колії заснований на використанні АЕП, який через певні проміжки під'єднується до середньої точки дросель-трансформатора рейкової лінії (РЛ) колії з електротягою змінного струму (див. рис. 1). Під'єднання АЕП проводиться за допомогою регулюючих елементів (РЕ), що контролюють відгалуження

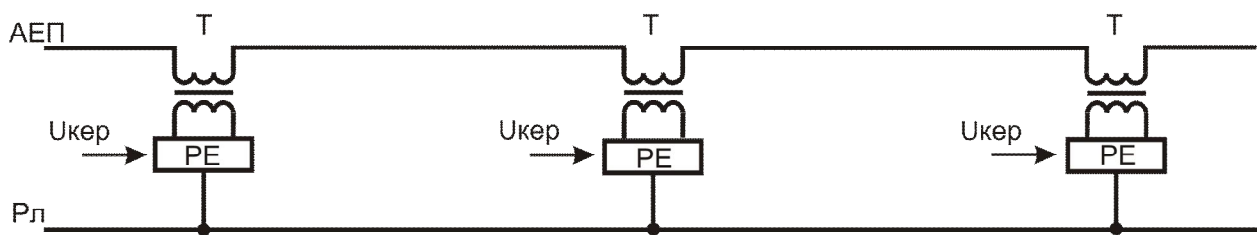


Рис. 2. Схема підключення АЕП за допомогою трансформаторів

зворотного тягового струму з рейок в екрануючий провід. Забезпечення максимального захисту рейкових кіл досягається шляхом визначення зворотного тягового струму в АЕП виходячи з умови мінімуму електромагнітних завад в РЛ суміжної колії, електрифікованої з тягою постійного струму.

Для досягнення ще більшого ефекту та забезпечення більшої надійності та безпечності роботи тягової мережі та рейкових кіл під'єднання АЕП може відбуватися з використанням додаткових силових трансформаторів, одна обмотка якого під'єднується до РЕ, друга включається послідовно в АЕП (див. рис. 2).

Використання трансформаторів дозволяє створювати більший струм в АЕП, а також забезпечує гальванічний розв'язок між РЛ та АЕП.

Такий спосіб є більш ефективним, але й більш дорогим: додаткове встановлення силових трансформаторів суттєво збільшує термін окупності системи захисту внаслідок чого її впровадження може бути економічно невигідним на певних ділянках.

Розглянемо більш детально роботу системи захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу тягової мережі суміжної колії.

Відмінною рисою системи, що пропонується, є автоматична компенсація електромагнітних завад на ділянках, де це необхідно. Компенсація завад відбувається виходячи з безпосереднього рівня струму завади в рейках. Для аналізу струму в рейках необхідно встановити первинний датчик, за допомогою якого цей струм повинен поступати до керуючих елементів. В якості

такого датчику доцільно використовувати датчик струму (ДС), що побудований на ефекті Холла (див. рис. 3). Такий датчик є безконтактним, а отже не впливає на роботу рейкових кіл, крім цього він є досить чутливим, надійним та недорогим. Так як АЕП через певні проміжки під'єднується до середніх виводів дросель-трансформаторів, що встановлені на сигнальних точках, то ДС доцільно встановлювати після колійного трансформатора (КТ), підключеного до вторинної обмотки дроселя, але перед колійним приймачем (КП).

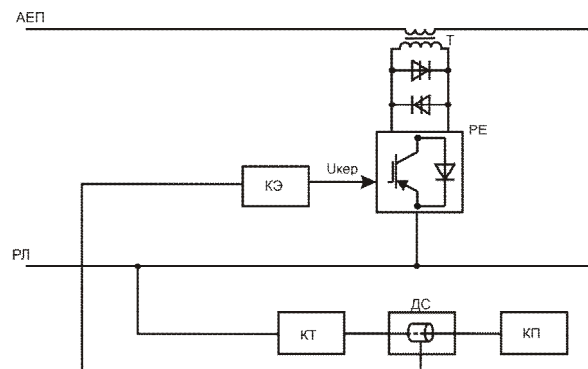


Рис. 3. Структурна схема регулюючого пункту

Струм з ДС поступає до керуючого елемента (КЕ) задачами якого є: ідентифікація наявності завади в сигнальному струмі рейкового кола; визначення рівня струму завади; формування, виходячи з рівня завади, інформаційного сигналу керування; підсилення інформаційного сигналу керування ($U_{кер}$) для подачі його на РЕ; організація гальванічного розв'язку між інформаційними колами КЕ та силовими колами РЕ.

Сформований сигнал потрапляє на РЕ, який відгалужує необхідну і достатню для компенсації електромагнітних завад час-

тину тягового струму з рейок в АЕП. Враховуючи великі значення струму через РЕ доцільно створювати його на потужних транзисторах IGBT [6].

Для захисту системи від короткого замикання в тяговій мережі, встановлюється тиристорний вимикач (ВТ), що складається з двох силових некерованих тиристорів. Вимикач ВТ у випадку короткого замикання перетворює АЕП на звичайний пасивний ЕП, тобто відмикає всю апаратуру системи захисту рейкових кіл. В наслідок цього знижується вартість системи, оскільки в цьому випадку її елементи не потрібно розраховувати на струм короткого замикання.

В системі присутній зворотній зв'язок, так як чим більший струм завади в РЛ тим більший струм буде відгалужуватися в АЕП, а це в свою чергу призведе до зменшення завад в РЛ. В результаті такої побудови системи компенсація електромагнітних завад відбувається автоматично в реальному часі та по мірі необхідності, наявність зворотного зв'язку підвищує надійність та стабільність системи захисту, а також виключає можливість перекомпенсації.

Економічна ефективність

Основною задачею залізничного транспорту є якісне і повне задоволення потреб народного господарства і населення в перевезеннях. Задачею служби сигналізації та зв'язку, в свою чергу, є підвищення економічної ефективності роботи залізниці та забезпечення безпеки руху.

Відмова пристроїв сигналізації, а саме рейкових кіл, супроводжується зупинкою потягу та простоєм рухомого складу, що призводить до економічних втрат залізниці по причині несправності пристроїв СЦБ. Додаткові втрати пов'язані з витратами часу та матеріальних ресурсів на ліквідацію відмов експлуатуючим персоналом.

Загальні економічні втрати залізниці від простою поїздів по причинах відмов рейкових кіл, що пов'язані з електромагнітними завадами складає 0,307 млн грн/рік на одну фідерну зону.

Впровадження системи захисту рейкових кіл від електромагнітного впливу тягової мережі змінного струму дозволить знизити кількість відмов рейкових кіл по причині електромагнітних завад та підвищити їх надійність, що в кінцевому результаті дозволить підвищити безпеку руху та отримати економічний ефект від зменшення втрат при простоях рухомого складу.

Передача енергії від тягової підстанції до рухомого складу супроводжується падінням напруги вздовж тракту передачі. Внаслідок цього знижується діюче значення напруги на струмоприймачі потягу, тобто відбувається зменшення потужності, що передається тяговою мережею, по причині втрат у проводах.

Уникнути втрат потужності можна завдяки зменшенню опору тягової мережі. Використання АЕП призводить не тільки до зменшення електромагнітних завад в рейкових колах, але й знижує опір тягової мережі на 32 % [7] та дозволяє підвищити максимальне значення тягового струму в КМ.

При русі сучасного потягу, потужність якого може досягати 8...16 МВт [3], з КМ споживається значний тяговий струм. Збільшення тягового струму викликає в свою чергу збільшення падіння напруги в проводах КМ, тобто відбувається збільшення втрат електроенергії на тягу поїздів. На рис. 4 наведено графік залежності втрат потужності в КМ від середньої потужності локомотивів та довжини ділянки, якою вони рухаються. Поверхню 1 на графіку показано втрати при звичайній системі тягового електропостачання, поверхню 2 показує втрати в проводах при використанні запропонованої системи.

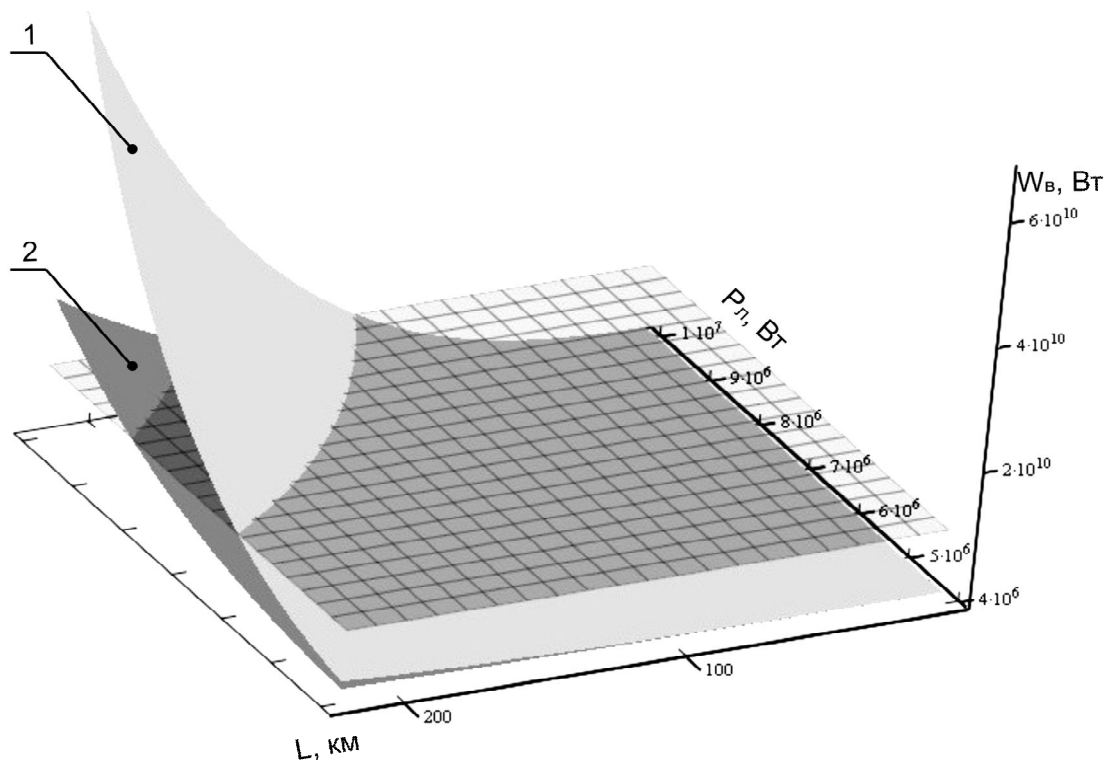


Рис. 4. Залежність втрат в проводах від середньої потужності локомотивів та довжини ділянки

При русі сучасного потягу, потужність якого може досягати 8...16 МВт [3], з КМ споживається значний тяговий струм. Збільшення тягового струму викликає в свою чергу збільшення падіння напруги в проводах КМ, тобто відбувається збільшення втрат електроенергії на тягу поїздів. На рис. 4 наведено графік залежності втрат потужності в КМ від середньої потужності локомотивів та довжини ділянки, якою вони рухаються. Поверхнею 1 на графіку показано втрати при звичайній системі тягового електропостачання, поверхня 2 показує втрати в проводах при використанні запропонованої системи.

З графіку видно, що збільшення потужності локомотивів призводить до збільшення втрат в проводах, але використання АЕП дозволяє суттєво їх знизити по відношенню до звичайної тягової мережі. Проведений розрахунок показує, що втрати електроенергії на фідерній зоні при русі в ній локомотивів з середньою потужністю 12 МВт можуть досягати $6,76139 \cdot 10^6$ кВт·год на рік. Застосування системи з АЕП знижує ці втрати до $2,07408 \cdot 10^6$ кВт·год на рік, тобто майже в три рази. Такі зниження витрат електроенергії на тягу поїздів при нинішніх

цінах дозволять зекономити близько 2,043 млн грн/рік.

Для більш детального відображення характеру графіків проведена січна площина. За допомогою січної наглядно представлена можливість при використанні запропонованої системи збільшити середню потужність локомотивів на тяговій дільниці при збереженні також рівня втрат в КМ, який існує без використання системи. Збереження середньої потужності локомотивів при використанні АЕП дає можливість знизити рівень втрат в КМ втричі.

Капітальні затрати на обладнання фідерної зони системою складають приблизно 0,803 млн грн. У цей час впровадження системи захисту рейкових кіл дозволить отримати економію коштів у розмірі 2,043 млн грн/рік на фідерну зону. Тоді коефіцієнт економічної ефективності впровадження системи захисту складає:

$$E = \frac{P}{K} = \frac{2,043}{0,803} = 2,544$$

при нормі в галузі автоматики та зв'язку 0.15 [8], а термін окупності:

$$T = \frac{1}{E} = \frac{1}{2,544} = 0,393 \text{ роки.}$$

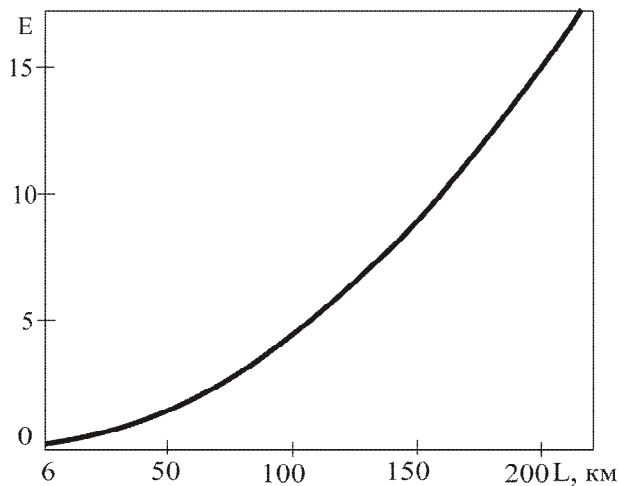


Рис. 5. Залежність коефіцієнта економічної ефективності від довжини ділянки

На рис. 5 наведений графік залежності коефіцієнта економічної ефективності впровадження системи з АЕП від довжини ділянки, що обладнана системою. Графік побудований виходячи з умов встановлення регулюючих елементів, які повинні розділятися декількома блок-ділянками, таким чином мінімальна ділянка, що підлягає обладнанню, повинна приблизно 6 км завдовжки. З графіку видно, що коефіцієнт економічної ефективності стрімко зростає зі збільшенням ділянки, що обладнується. Для забезпечення нормативного коефіцієнта економічної ефективності пристроїв СЦБ (0,15 [8]) довжина ділянки, що обладнується, повинна складати приблизно 10 км.

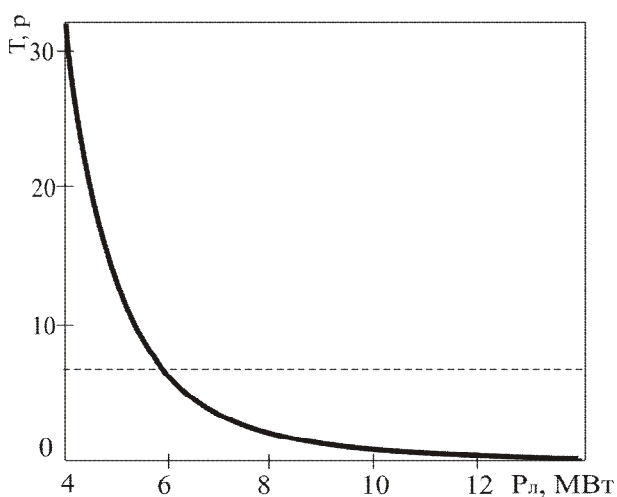


Рис. 6. Залежність терміну окупності від середньої потужності локомотивів

На рис. 6 наведений графік залежності терміну окупності системи з АЕП від середньої потужності локомотивів, що рухаються у фідерній зоні. З графіку видно, що термін окупності системи стрімко зменшується зі збільшенням середньої потужності локомотивів.

Але використання системи на мало діючих ділянках, або на ділянках з рухом малопотужних локомотивів не дасть бажаного економічного ефекту. Для забезпечення нормативного терміну окупності пристроїв СЦБ (6,6 років [8] – пунктирна лінія на графіку) середньої потужності локомотивів, що рухаються у фідерній зоні повинна складати приблизно 6 МВт.

Висновки

Розвиток швидкісного руху став причиною значного підвищення потужності, що передається тяговою мережею залізниці. Рух сучасного пасажирського швидкісного або важкого вантажного потягу супроводжується споживанням з контактної мережі (КМ) значної потужності, що викликає протікання в проводах мережі великого струму. Цей струм є причиною появи електромагнітних завад в усіх суміжних системах і в рейкових колах зокрема. Впровадження запропонованої системи дозволяє забезпечити захист рейкових кіл від електромагнітного впливу КМ суміжної колії та знизити рівень завад в рейках до припустимих значень. Процес компенсації електромагнітних завад повністю автоматичний, а наявність зворотного зв'язку забезпечує стабільність, раціональність та інтелектуальність процесу компенсації. Крім того використання в системі АЕП знижує опір тягової мережі, що дозволяє зменшити втрати електроенергії в мережі та збільшити рівень тягового струму в КМ.

Впровадження системи захисту рейкових кіл призводить до значної економії електроенергії на тягу поїздів, внаслідок чого знижується термін окупності системи. Економічна ефективність впровадження системи зростає при збільшенні потужності локомотивів та при збільшенні ділянки, що обладнується. Таким чином пояснюється

перспективність системи захисту. Приведені графіки, ілюструють можливий економічний ефект та окреслюють умови, за яких впровадження системи з АЕП є економічно ефективним заходом.

Бібліографічний список

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – М: УМК МПС, 2002. – 638 с.

2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог - 4-е изд., перераб. и дополн [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. К. Г. Марквардт. - М.: Транспорт, 1982. - 528 с.

3. Бочев, А. С. Электротяговая сеть с усиливающим и обратным проводами [Текст] / А. С. Бочев, В. В. Мунькин, Е. П. Фигурнов // Железные дороги мира. - 1997. - № 11. - С. 8-12.

4. Бочев, А. С. Эффективность экранирующих проводов многопроводной тяговой сети переменного [Текст] / А. С. Бочев, Т. П. Добровольскис, В. А. Мишель // Вестник ВНИИЖТа. - 1990. - № 8. - С. 17-20.

5. Tuttas, Ch. Elektrische Bahnen [Text] / Ch. Tuttas // 2001, - № 6/7, - S. 262 - 267.

6. Runge, W. Eisenbahntechnische Rundschau [Text] / W. Runge // 2005, - № 7/8, - S. 443 - 453.

7. Марквардт, К. Г. Справочник по электроснабжению железных дорог [Текст]: в 2 т. / Ю. Н. Макас, В. М. Эрлих, П. М. Шилкин, Б. Е. Геронимус, И. Б. Мостинский и др.; Под ред. К. Г. Марквардта. - М.: Транспорт, 1980-1981. – 238 с.

8. Карпов, И. В. Экономика, организация и планирования хозяйства сигнализации и связи [Текст]: учебник для техникумов и колледжей ж.-д. трансп. / И. В. Карпов, С. Г. Климович, Л. И. Хляпов. - М.: Маршрут, 2002. - 436 с.

Ключові слова: контактна мережа, електромагнітні завади, втрати електроенергії в проводах, системи захисту рейкових кіл, економічна ефективність.

Ключевые слова: контактная сеть, электромагнитные помехи, потери электроэнергии в проводах, система защиты рельсовых цепей, экономическая эффективность.

Key words: contact net, electromagnetic hindrances, wire electric power loss, track circuit protection system, cost efficiency.

Надійшла до редколегії 16.12.2010.

Прийнята до друку 21.12.2010.

БАДЕР М. П. – д.т.н., профессор (Московский государственный университет путей сообщения)

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

В последние годы идет активное развитие и внедрение перспективных видов электроподвижного состава (ЭПС) с асинхронными тяговыми двигателями (АТД). Для применения асинхронных двигателей необходимо обеспечить преобразование однофазного тока, подводимого по тяговой сети к электровазам, в трехфазный ток, что достигается с помощью тиристорно-импульсных преобразователей, в частности автономного инвертора напряжения (АИН). Анализ применяемых в настоящее время структурных схем электроподвижного состава постоянного тока на Российских и зарубежных железных дорогах показывает, что наиболее часто применяется ЭПС с АТД и непосредственным подключением АИН к тяговой сети через фильтры, снижающие до допустимых значений электромагнитное воздействие переменных составляющих тяговых токов на устройства связи и железнодорожной автоматики. Последние, в том числе автоматическая локомотивная сигнализация (АЛС) и сигнализация, централизация и блокировка (СЦБ) призваны обеспечить безопасность движения поездов, поэтому проблема электромагнитной совместимости их с перспективной системой электрической тяги приобретает первостепенное, остро актуальное значение, особенно при условии сохранения высоких энергетических и жестко ограниченных массогабаритных показателей преобразовательного оборудования и фильтров ЭПС. Для определения электромагнитной совместимости выше указанных технических средств тягового электроснабжения необходимо математическое описание электромагнитных процессов, происходящих в выпрямительно-инверторных преобразователях тяговых подстанций и преобразователях постоянно-переменного тока ЭПС, которое позволяет реализовать математическую мо-

дель и провести гармонический анализ тока в любой цепи преобразователей, на входе ЭПС и в тяговой сети.

Целью работы является анализ и синтез электромагнитной совместимости тягового электроснабжения, систем управления и телекоммуникаций. В основу исследований положены кусочно-линейный метод, основанный на численном интегрировании дифференциальных уравнений [1], и спектральный метод, основанный на использовании преобразования Фурье. Связь между мгновенными значениями входных и выходных величин полупроводникового коммутатора выражаться с помощью коммутационных функций, позволяющих заменить, преобразовательные вентильные цепи эквивалентными цепями без вентилей. В схемах вентильных преобразователей, содержащих один вентильный коммутатор предполагается заранее известная конфигурация электрической цепи, а, следовательно, и значения коммутационной функции. Автономные инверторы при условии непрерывности токов относятся к тому классу преобразовательных устройств, у которых состояние вентилей однозначно определяется алгоритмом их управления, что позволяет практически без существенных допущений использовать спектральные методы для анализа электромагнитных процессов.

Несмотря на то, что в АИН возможно большое разнообразие методов и способов импульсной модуляции, следует заметить, что входные токи и напряжения во всех случаях могут быть представлены в виде суммы гармонических составляющих с частотами, кратными частоте основной гармоник и комбинационными частотами. Получены выражения для коммутационных функций, которые охватывают практически

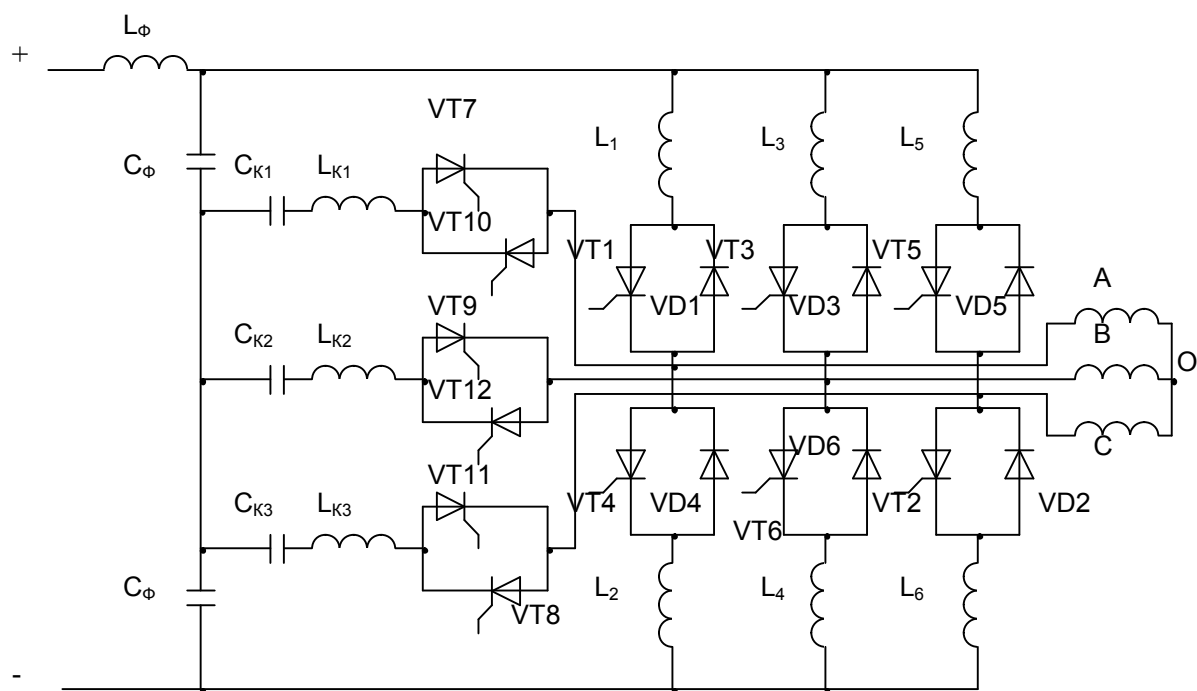


Рис. 1. Принципиальная схема АИН

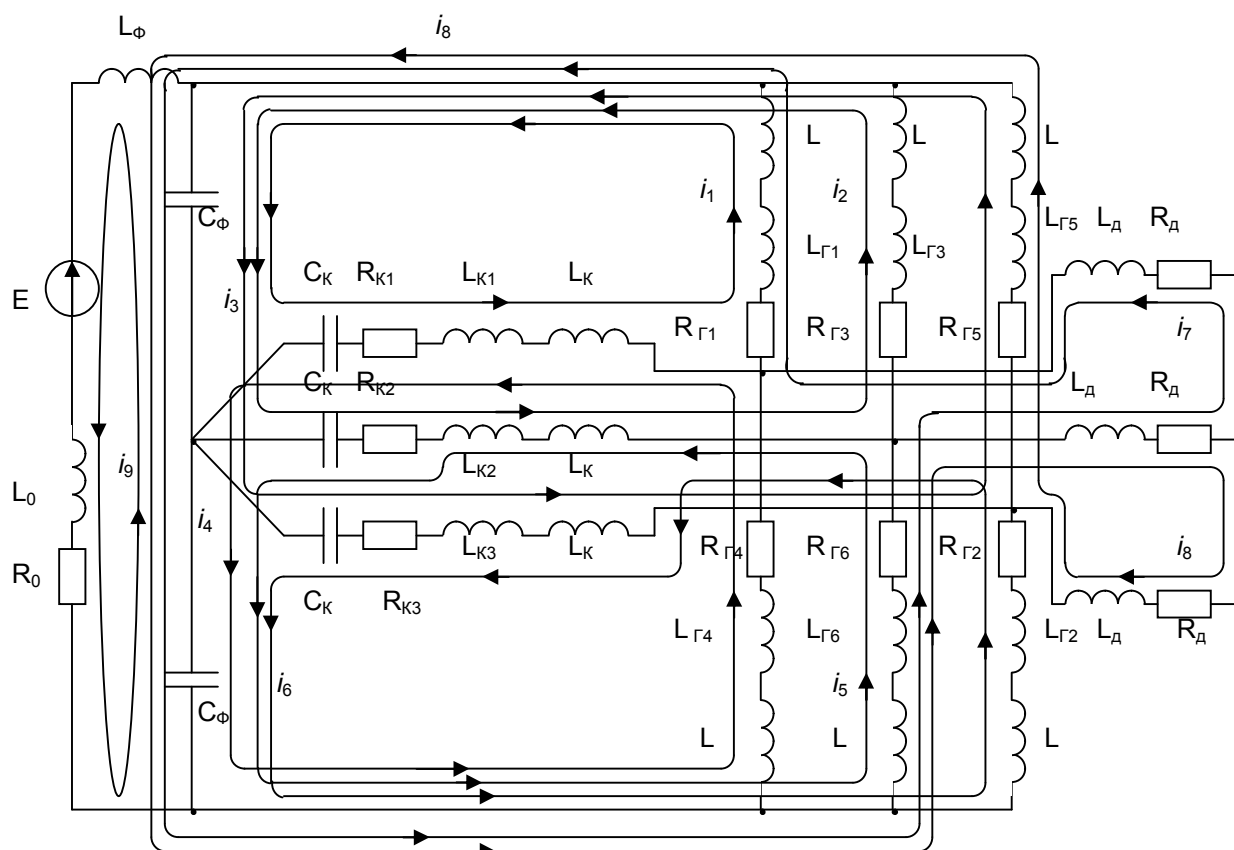


Рис. 2. Схема замещения АИН

все типы полупроводниковых преобразователей и позволяют производить расчеты гармонических составляющих токов и напряжений в силовых цепях преобразователей тяговых подстанций и электроподвижного состава постоянного тока и тем самым определять уровни гармоник тока генерируемых в тяговую сеть.

Для математического моделирования идеальные вентили АИН замещаются последовательным соединением активного и индуктивного сопротивления. На рис. 2 приведена расчетная схема замещения АИН. При этом, сопротивлениям, замещающим проводящие вентили, придается значение намного меньше [2], а замещающим непроводящие вентили – намного больше, чем сопротивления остальных эле-

ментов схемы, что различие в режимах схем с идеальными вентилями и вентилями замещенными конечными сопротивлениями, может быть сделано достаточно малым. Тогда схема преобразователя может быть описана системой дифференциальных уравнений, включающих значения этих сопротивлений как параметры. Полученная система дифференциальных уравнений численно интегрируется на ЭВМ, и в момент времени, когда создаются условия для открытия или записания вентилей, замещающие их сопротивления изменяются по величине, что вызывает изменение коэффициентов системы, но не ее структуры.

Для этой схемы система дифференциальных уравнений в контурных токах имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_1 dt + (L_{\kappa 1} + L_{\Gamma 1} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_1}{dt} + (R_{\Gamma 1} + R_{\kappa 1}) \cdot i_1 + R_{\Gamma 1} \cdot i_7 + (L_{\Gamma 1} + L) \cdot \frac{di_7}{dt} - \\
& - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_4 dt - (L_{\kappa 1} + L_\kappa) \cdot \frac{di_4}{dt} - R_{\kappa 1} \cdot i_4 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_2 + i_3 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0 \\
& \left(\frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_2 dt + (L_{\kappa 3} + L_{\Gamma 3} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_2}{dt} + (R_{\Gamma 3} + R_{\kappa 3}) \cdot i_2 - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_5 dt - (L_{\kappa 3} + L_\kappa) \cdot \frac{di_5}{dt} - \\
& - R_{\kappa 3} \cdot i_5 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_1 + i_3 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0 \\
& \left(\frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_3 dt + (L_{\kappa 2} + L_{\Gamma 5} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_3}{dt} + (R_{\Gamma 5} + R_{\kappa 2}) \cdot i_3 + R_{\Gamma 5} \cdot i_8 + (L_{\Gamma 5} + L) \cdot \frac{di_8}{dt} - \\
& - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_6 dt - (L_{\kappa 2} + L_\kappa) \cdot \frac{di_6}{dt} - R_{\kappa 2} \cdot i_6 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_1 + i_2 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0 \\
& \left(\frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_4 dt + (L_{\kappa 1} + L_{\Gamma 4} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_4}{dt} + (R_{\Gamma 4} + R_{\kappa 1}) \cdot i_4 - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_1 dt - (L_{\kappa 1} + L_\kappa) \cdot \frac{di_1}{dt} - \\
& - R_{\kappa 1} \cdot i_1 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_5 + i_6 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0 \\
& \left(\frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_5 dt + (L_{\kappa 3} + L_{\Gamma 6} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_5}{dt} + (R_{\Gamma 6} + R_{\kappa 3}) \cdot i_5 + R_{\Gamma 6} \cdot i_7 + (L_{\Gamma 6} + L) \cdot \frac{di_7}{dt} + R_{\Gamma 6} \cdot i_8 + \\
& + (L_{\Gamma 6} + L) \cdot \frac{di_8}{dt} - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_2 dt - (L_{\kappa 3} + L_\kappa) \cdot \frac{di_2}{dt} - R_{\kappa 3} \cdot i_2 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_4 + i_6 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{1}{C_\phi} + \frac{1}{C_\kappa} \right) \cdot \int_0^t i_6 dt + (L_{\kappa 2} + L_{\Gamma 2} + L_\kappa + L) \cdot \frac{di_6}{dt} + (R_{\Gamma 2} + R_{\kappa 2}) \cdot i_6 - \frac{1}{C_\kappa} \int_0^t i_3 dt - (L_{\kappa 2} + L_\kappa) \cdot \frac{di_3}{dt} - \\
& - R_{\kappa 2} \cdot i_3 + \frac{1}{C_\phi} \cdot \int_0^t (i_4 + i_5 + i_7 + i_8 - i_9) dt = 0 \\
\\
& \frac{2}{C_\phi} \int_0^t (i_7 + i_8 - i_9) dt + \frac{1}{C_\phi} \int_0^t (i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 + i_6) dt + (L_{\Gamma 1} + L_{\Gamma 6} + 2L + 2L_\phi) \frac{di_7}{dt} + 2R_\phi \cdot i_7 + \\
& + R_\phi \cdot i_8 + (L_{\Gamma 6} + L + L_\phi) \frac{di_8}{dt} + (R_{\Gamma 1} + R_{\Gamma 6}) \cdot i_7 + R_{\Gamma 1} \cdot i_1 + (L_{\Gamma 1} + L) \frac{di_1}{dt} + R_{\Gamma 6} \cdot i_5 + (L_{\Gamma 6} + L) \frac{di_5}{dt} + \\
& + R_{\Gamma 6} \cdot i_8 = 0 \\
\\
& \frac{2}{C_\phi} \int_0^t (i_7 + i_8 - i_9) dt + \frac{1}{C_\phi} \int_0^t (i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 + i_6) dt + (L_{\Gamma 5} + L_{\Gamma 6} + 2L + 2L_\phi) \frac{di_8}{dt} + 2R_\phi \cdot i_8 + \\
& + R_\phi \cdot i_7 + (L_{\Gamma 6} + L + L_\phi) \frac{di_7}{dt} + (R_{\Gamma 5} + R_{\Gamma 6}) \cdot i_8 + R_{\Gamma 5} \cdot i_3 + (L_{\Gamma 5} + L) \frac{di_3}{dt} + R_{\Gamma 6} \cdot i_5 + (L_{\Gamma 6} + L) \frac{di_5}{dt} + \\
& + R_{\Gamma 6} \cdot i_7 = 0 \\
\\
& \frac{2}{C_\phi} \int_0^t (i_9 - i_8 - i_7) dt + \frac{1}{C_\phi} \int_0^t (i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5 + i_6) dt + L_0 \frac{di_9}{dt} + R_0 \cdot i_9 = E
\end{aligned}$$

где $i_1 - i_9$ – контурные токи;

$R_{\Gamma 1} - R_{\Gamma 6}$, $L_{\Gamma 1} - L_{\Gamma 6}$ – соответственно активные сопротивления и индуктивности замещения силовых вентилях (главных тиристоров VT1-VT6 и шунтирующих их обратных диодов VD1-VD6), Ом и Гн;

$R_{\kappa 1} - R_{\kappa 3}$, $L_{\kappa 1} - L_{\kappa 3}$ – соответственно активные сопротивления и индуктивности коммутационных вентилях (VT7-VT12), Ом и Гн;

L , L_ϕ – индуктивности анодных, катодных дросселей и фильтра, Гн;

C_κ , C_ϕ – емкости коммутирующих конденсаторов и фильтра, Ф;

E – напряжение источника питания, В;

R_ϕ , L_ϕ – соответственно активная и индуктивная составляющая внутреннего сопротивления источника питания, Ом и Гн;

R_ϕ , L_ϕ – соответственно активная и индуктивная составляющая сопротивления одной фазы асинхронного тягового двигателя, Ом и Гн.

Для численного решения данной системы дифференциальных уравнений исключаем интегралы в этих уравнениях введя

новые переменные $Q_i = \int_0^t i_i dt$. Затем, эту систему дифференциальных уравнений реша-

ем относительно первых производных, рассматривая производные как искомые величины и обращаясь с остальными как с заданными. Реализация данной математической модели позволяет определить контурные токи, токи в плечах главных тиристоров, коммутационные токи, токи каждой фазы асинхронного тягового двигателя, ток на входе АИН и ток тяговой сети.

Использование преобразования Фурье позволяет получить гармонический состав тока в любой ветви АИН. Характеристики источников помех могут быть получены с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) на математической модели. Моделирование выполнено в системе анализа и проектирования электронных устройств ORCAD 9.2. Расчеты при разработке отдельных методик выполнены с помощью стандартных математических программ Matcad и Table curve.

Для определения гармонических составляющих входного тока может быть использована так же полная система уравнений привода АИН с ШИМ. Аналогично может быть выполнен гармонический анализ токов и напряжений на входе и выходе инверторно-выпрямительных агрегатов тяговых подстанций. При наличии значитель-

ной несимметрии и несинусоидальности напряжения на входе тяговых подстанций, превышающей допустимые показатели качества электрической энергии согласно ГОСТ-1310997, гармонический анализ токов и напряжений в выпрямительно-инверторных агрегатах подстанций следует проводить с учетом несимметричных режимов.

Выпрямленное напряжение тяговой подстанции, а, следовательно, и ток тяговой сети содержит ряд гармонических колебаний с частотами кратными частоте трехфазной сети [3], которые совместно с гармониками, обусловленными пульсациями тока АИН ЭПС создают дополнительные комбинационные гармоники тока и напряжения. Колебания в тяговой сети приводят к резонансам токов на некоторых частотах, что требует их подробного исследования.

Связь между напряжениями и токами в начале и конце тяговой сети, как многопроводной линии с распределенными параметрами (в общем случае $2n+1$ -полюсника) может быть представлена разными типами матричных уравнений, из которых наиболее употребляемыми являются:

$$\left. \begin{aligned} \|U_H\| &= \|A_{11}\| \|U_K\| + \|A_{12}\| \|I_K\| \\ \|I_H\| &= \|A_{21}\| \|U_K\| + \|A_{22}\| \|I_K\| \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \|I_H\| &= \|Y_{11}\| \|U_H\| + \|Y_{12}\| \|U_K\| \\ \|I_K\| &= \|Y_{21}\| \|U_H\| + \|Y_{22}\| \|U_K\| \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \|U_H\| &= \|Z_{11}\| \|I_H\| + \|Z_{12}\| \|I_K\| \\ \|U_K\| &= \|Z_{21}\| \|I_H\| + \|Z_{22}\| \|I_K\| \end{aligned} \right\}$$

Поскольку все эти уравнения могут описывать один и тот же $2n+1$ -полюсник, между блоками матриц $\|A\|$, $\|Y\|$ и $\|Z\|$ существует линейная зависимость

Известно, что цепочечное соединение многополюсников удобнее всего описываются зависимостью типа $\|A\|$, параллельное - зависимостью $\|Y\|$ и последовательное - зависимостью типа $\|Z\|$.

Для однотипного соединения m -полюсников результирующая матрица эквивалентного многополюсника определяется:

$$\|A_{\text{рез}}\| = \prod_{i=1}^m \|A_i\|.$$

Выводы

Разработанные методики и программы позволяют исследовать электромагнитные процессы в выпрямительно-инверторных агрегатах тяговых подстанций, автономном инверторе напряжения асинхронного тягового привода, определять и прогнозировать уровни гармонических составляющих тока как в самих преобразователях постоянно-переменного тока, так и тока в тяговой сети. Это дает возможность с высокой степенью точности определять электромагнитное воздействие различных силовых полупроводниковых преобразователей на устройства связи и железнодорожной автоматики и обосновывать выбор схем и параметров защит, обеспечивающих электромагнитную совместимость.

Библиографический список

1. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. / М. П. Бадер. – М: УМК МПС, 2002. – 638 с.
2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог - 4-е изд., перераб. и дополн [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. К. Г. Марквардт. - М.: Транспорт, 1982. - 528 с.
3. Костенко М. В., Перельман Л. С., Шкарин Ю. П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения [Текст] / М. В. Костенко, Л. С. Перельман, Ю. П. Шкарин – М.: Энергия, 1973. – 272с.
4. Марквардт, К. Г. Справочник по электроснабжению железных дорог [Текст]: в 2 т. / Ю. Н. Макас, В. М. Эрлих, П. М. Шилкин, Б. Е. Геронимус, И. Б. Мостинский и др.; Под ред. К. Г. Марквардта. - М.: Транспорт, 1980-1981. – 238 с.
5. Бочев, А. С. Электротяговая сеть с усиливающим и обратным проводами [Текст] / А. С. Бочев, В. В. Мунькин, Е. П. Фигурнов

// Железные дороги мира. - 1997. - № 11. - С. 8-12.

Ключові слова: математичний опис, тягова мережа, автономний інвертор напруги, асинхронний тяговий привід, гармонійні складові перетворювача.

Ключевые слова: математическое описание, тяговая сеть, автономный инвертор напряжения, асинхронный тяговый привод,

гармонические составляющие преобразователя.

Key words: mathematical description, traction network, voltage autonomous inverter, asynchronous propulsion drive, harmonic components of converter.

Поступила в редколлегию 24.11.2010.

Принята к печати 26.11.2010.

УДК 621.331 : 621.332

ЗАВГОРОДНИЙ А. В. – главный инженер (Приднепровская железная дорога)
ГАВРИЛЮК В. И. – д.ф.-м.н., профессор (ДНУЖТ)

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИМПЕДАНСА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Постановка задачи

При проектировании систем сигнализации, связи, тягового электроснабжения на электрифицированных железных дорогах необходимы численные значения импеданса рельсовых линий, линий контактной сети, продольного электроснабжения, проводной связи, а также других линий, расположенных на опорах контактной сети или на отдельно стоящих опорах вблизи железнодорожного пути. Сведения о частотной зависимости собственной и взаимной индуктивности таких линий необходимы также для обеспечения их электромагнитной совместимости.

Целью работы является анализ методов расчета импеданса линий электрифицированных железных дорог. Импеданс электрических линий зависит от их взаимного расположения, расстояния до земли, а также проводимости, диэлектрической и магнитной проницаемости земли.

Выражения для расчета импеданса проводников, расположенных над поверхностью земли, получены впервые Карсоном [1]

и, независимо от него, Полачеком [2] при следующих предположениях:

- земля однородна;
- диэлектрическая и магнитная проницаемости земли и воздуха одинаковы;
- токи смещения в земле пренебрежимо малы;
- параллельный адмитанс между проводниками и землей не влияет на проводимость земли.

Решение получено для квази-ТЕМ мод электромагнитного поля (т.е. в предположении, что электромагнитное поле имеет только продольные моды). Импеданс проводников выражен через несобственные интегралы, для приближенного вычисления которых предложены формулы, аппроксимирующие интегралы в виде бесконечных рядов.

В [3,4] задача решена в более общем виде, что позволило снять ограничения, связанные с предположением о равенстве диэлектрических и магнитных проницаемостей земли и воздуха. В [5] **Ошибка! Источник ссылки не найден.** обобщены резуль-

таты предшествующих работ и предложена общая формула, известна как формула Вайса-Занде. В [6] получены формулы для импеданса проводников, расположенных над поверхностью земли, в широком диапазоне частот (выше 106 Гц). В [7,8] предложены формулы для расчета собственного и взаимного импеданса проводников, основанные на предположении, что индуцированный в земле переменный ток сосредоточен в поверхностном слое, толщина которого условно представлена как комплексная величина, что позволило учесть активную и реактивную составляющие импеданса.

В практике инженерных расчетов собственного и взаимного импеданса проводников наибольшее распространение получили формулы, полученные в [1,2]. В [9, 10]. отмечено невысокая точность расчетов по этих формулам, особенно. при увеличении частоты тока и проводимости земли.

Использование на железнодорожном транспорте новых типов рельсовых цепей тональной частоты (до ~6 кГц), электрического подвижного состава с импульсным регулированием, микропроцессорных систем управления движением поездов, сделало еще более актуальной задачу нахождения импеданса линий электрифицированных железных дорог в диапазоне частот до 105 Гц..

Особенностью расчета частотной зависимости импеданса рельсовой линии и их взаимной индукции с другими линиями является близкое расположения рельсовых нитей к поверхности земли и наличие распределенной по их длине гальванической связи с землей.

Несмотря на практическую значимость рассматриваемой задачи, в литературе приведены результаты экспериментальных измерений импеданса рельсовых линий для небольшого количества частот (главным образом для промышленной и близкой к ней частоте). В ряде публикаций не приведена проводимость земли, что затрудняет использование экспериментальных данных.

Целью работы является проведение сравнительного анализа результатов расчета собственного и взаимного импеданса рельсовых нитей, а также рельсовой линии и

контактного провода в диапазоне частот до 105 Гц по основным формулам, приведенным в литературе [1-10].

Вследствие недостаточного количества экспериментальных данных, в работе приведены также предварительные результаты измерений импеданса линий при повышенных частотах.

Краткие теоретические сведения

Собственный импеданс линии включает три компонента [1-4]:

$$\underline{Z}_{ii} = \underline{Z}_I + \underline{Z}_E + \underline{Z}_{Gii}, \quad (1)$$

где \underline{Z}_I , \underline{Z}_E – соответственно, внутренний и внешний импеданс линии, \underline{Z}_{Gii} – импеданс, вносимый электрическим влиянием земли. Внешний импеданс \underline{Z}_E определяется как импеданс контура, образованного проводником и землей, в предположении, что земля является совершенным проводником (с бесконечно большой проводимостью)

$$\underline{Z}_E = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i}, \quad (2)$$

где h_i – высота проводника i над поверхностью земли, r_i радиус проводника, μ_0 – магнитная постоянная, ω – круговая частота.

Взаимный импеданс двух проводников i и j , параллельных поверхности земли, определяется выражением

$$\underline{Z}_m = j\omega L_{ij} + \underline{Z}_{Gij}, \quad (3)$$

где L_{ij} – взаимная индуктивность между двумя проводниками в предположении, что земля имеет бесконечно большую проводимость; \underline{Z}_{Gij} – импеданс, вносимый электрическим влиянием земли. Поскольку выражения для импеданса проводников без учета влияния земли хорошо известны из физики, ограничимся рассмотрением импеданса линий, вносимого присутствием земли.

Собственный и взаимный импеданс линий \underline{Z}_{Gii} и \underline{Z}_{Gij} , учитывающий влияние земли, определяется выражениями

$$\underline{Z}_{Gii} = R_{Gii} + jX_{Gii} = \omega \frac{\mu}{\pi} \underline{J}_s, \quad (4)$$

$$\underline{Z}_{Gij} = R_{Gij} + jX_{Gij} = \omega \frac{\mu}{\pi} \underline{J}_m, \quad (5)$$

в которых корректирующие члены \underline{J}_s и \underline{J}_m получены в виде несобственных интегралов [1]

$$\begin{aligned} \underline{J}_s &= P_s + jQ_s = \\ &= \int_0^\infty \frac{j e^{-2h_i \lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma_g}} d\lambda, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \underline{J}_m &= P_m + jQ_m = \\ &= \int_0^\infty \frac{j e^{-(h_i+h_j)\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma_g}} \cos(d_{ij}\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (7)$$

где h_j – высота проводника j над поверхностью земли, σ_g – проводимость земли.

Для расчетов по (5), (6) в литературе предложены аппроксимирующие выражения для несобственных интегралов в виде бесконечных сходящихся рядов

$$\begin{aligned} R_g &= 4\omega 10^{-7} \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 k + b_2 (C_2 - \right. \\ &\quad \left. - \ln k) k^2 + b_3 k^3 - d_4 k^4 - \dots \right\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_g &= 4\omega 10^{-7} \left\{ \frac{1}{2} (0,615315 - \ln k) + b_1 k - \right. \\ &\quad \left. - d_2 k^2 + b_3 k^3 - b_4 (C_4 - \ln k) k^4 + \dots \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{gm} &= 4\omega 10^{-7} \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 k_m \cos \theta + \right. \\ &\quad b_2 [(C_2 - \ln k_m) k_m^2 \cos 2\theta] + \theta k_m^2 \sin 2\theta + \\ &\quad \left. + b_3 k_m^3 \cos 3\theta - d_4 k_m^4 \cos 4\theta - \dots \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{gm} &= 4\omega 10^{-7} \left\{ \frac{1}{2} (0,615315 - \ln k_m) \right. \\ &\quad + b_1 k_m \cos \theta - d_2 k_m^2 \cos 2\theta + b_3 k_m^3 \cos 3\theta \\ &\quad \left. - b_4 [(C_4 - \ln k_m) k_m^4 \cos 4\theta + \theta k_m^4 \sin 4\theta] + \dots \right\} \end{aligned}$$

где b_i , C_i , d_i – коэффициенты, определяемые выражениями

$$b_i = b_{i-2} \frac{\text{sign}}{i(i+2)},$$

$$C_i = C_{i-2} + \frac{1}{i} + \frac{1}{i+2},$$

$$d_i = \frac{\pi}{4} b_i$$

$$k = 4\pi\sqrt{5}10^{-4} 2h_i \sqrt{f\sigma_g}$$

$$k_m = 4\pi\sqrt{5}10^{-4} D_{ij} \sqrt{f\sigma_g}$$

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{d_{ij}}{D_{ij}}\right)$$

Бесконечный ряд для вычисления \underline{Z}_{Gii} и \underline{Z}_{Gij} согласно выражениям, полученным Карсоном [1], сходится достаточно быстро при низких частотах. При увеличении частоты сходимость ряда существенно ухудшается и, соответственно, увеличивается количество членов ряда, необходимых для достижения достаточной точности расчета.

Выражения для собственной и взаимной индуктивности линий, обусловленных электрическим влиянием земли, получены в [2] в виде

$$\underline{L}_e = \left[1 + 2 \ln \frac{10^4}{\gamma R \sqrt{10\pi\omega\sigma_g}} - j \frac{\pi}{2} - \right. \quad (8)$$

$$\left. - j \frac{16h_i 10^{-4}}{3} \sqrt{10\pi\omega\sigma_g} \right] 10^{-4}$$

$$\begin{aligned} \underline{M}_{ij}(\omega) &= \left[1 + 2 \ln \frac{10^4}{\gamma (d_{ij} - r) \sqrt{10\pi\sigma_g \omega}} - \right. \\ &\quad \left. - j \frac{\pi}{2} - j \frac{16(h_i + h_j) 10^{-4}}{3} \sqrt{10\pi\omega\sigma_g} \right] 10^{-4} \end{aligned} \quad (9)$$

где $\gamma = 1,7811$ – постоянная Эйлера.

В [4, 5] на основе обобщения результатов предложена более точное выражение для импеданса проводников, проходящих над поверхностью земли, в диапазоне высоких частот (формула Вайса-Занде)

$$\underline{Z}_{Gij} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{j e^{-(h_i+h_j)\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \gamma_g^2}} \cos(d_{ij}\lambda) d\lambda, \quad (10)$$

где γ_g – константа распространения электромагнитной волны в земле, определяемая выражением

$$\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_g)}, \quad (11)$$

где ε_0 - диэлектрическая постоянная, ε_g - относительная диэлектрическая проницаемость земли.

Из (10) видно, что для частот ниже критической ($f \ll f_{cr}$), выражение (9) после пренебрежения малыми членами преобразуются в формулу, полученную в [1].

В [7, 8] предложены формулы для собственного и взаимного импеданса проводников, расположенных над поверхностью земли, в предположении, что ток в земле сосредоточен в поверхностном слое толщиной p с конечным значением проводимости

$$Z_{ii} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2(h_i + p)}{r_i}, \quad (12)$$

$$Z_{ij} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(h_i + h_j + 2p)^2 + d_{ij}^2}}{\sqrt{(h_i - h_j)^2 + d_{ij}^2}} =$$

$$= j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ij}''}{D_{ij}}$$

где D_{ij} – расстояния между проводниками i и j , D_{ij}' – расстояния между проводником i и его отображением j' , p – поверхностный слой земли, в котором сосредоточен ток, индуцированный переменным электрическим полем (рис. 1). Отображение проводника располагается на глубине $2(h + p)$. Толщину поверхностного слоя p условно рассматривают как комплексную величину.

Результаты

Для сравнительного анализа результатов расчета импеданса рельсовых линий и контактного провода по формулам, приведенным в [1-8] использованы экспериментальные данные для частот 50, 100, 150 Гц [9-11]. Результаты работы [11] отличаются от данных [9-11], что возможно связано с конструктивными особенностями верхнего строения железнодорожного пути, а также отличиями в проводимости земли.

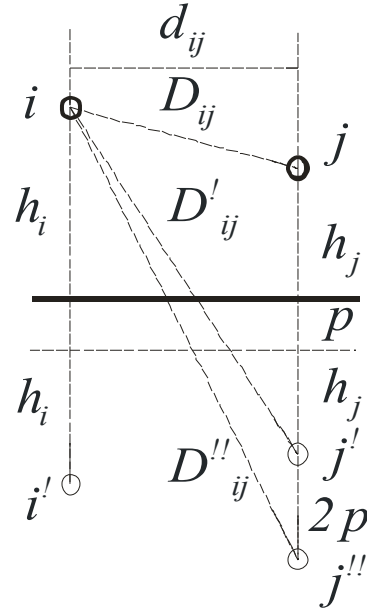


Рис. 1. Схематическое изображение проводников i , j и их зеркальных отображений.

Таблица 1
Взаимный импеданс между рельсами
(Ом/км)

f, Гц	Эксперимент			Расчеты по формулам		
	[9]	данная работа	[1]	[2]	[4-6]	[7,8]
50	0,34	-	0,32	0,31	0,31	0,14
100	0,62	-	0,59	0,59	0,57	0,24
1000	-	4,31	4,47	4,47	4,33	1,28
5000	-	16,4	17,56	17,53	16,9 2	-

Для проведения сравнительного анализа расчетных формул, в работе проведены измерения взаимного импеданса между контактным проводом и рельсовой линией для частот 50, 100, 1000, 5000 Гц. Результаты измерений взаимного импеданса между рельсовой линией и контактным проводом для рельсовой линии на железобетонных шпалах при удельной проводимости земли $6 \cdot 10^{-3}$ Ом·м, совместно с литературными данными и результатами расчетов приведены в таблице 1.

Из таблицы видно удовлетворительное соответствие расчетов по формулам [1-6] с экспериментальными данными. Наилучшее совпадение наблюдалось для расчетов по формулам, полученным в [4-6], что согласуется с литературными данными. Значительное отличие результатов расчетов наблюдалось для формул [7, 8], что можно объяснить небольшим расстоянием между рельсами и поверхностью земли. Это приводит к заниженной оценке поверхностного слоя земли ρ , в котором сосредоточен индуцированный ток. Такое расхождение наблюдалось как на низких, так и на высоких частотах.

На рис. 2, 3 приведены результаты расчета взаимного импеданса рельсовых нитей, а также рельсовой линии и контактного провода по формулам, приведенным в литературе [1-8], для двух значений удельной проводимости земли: $5 \cdot 10^{-3}$ Ом·м и $5 \cdot 10^{-2}$ Ом·м.

Как видно взаимный импеданс между рельсовыми нитями, а также рельсовой линией и контактным проводом увеличивается с частотой, что соответствует литературным данным [9, 10]. Уменьшение взаимного импеданса при увеличении про-

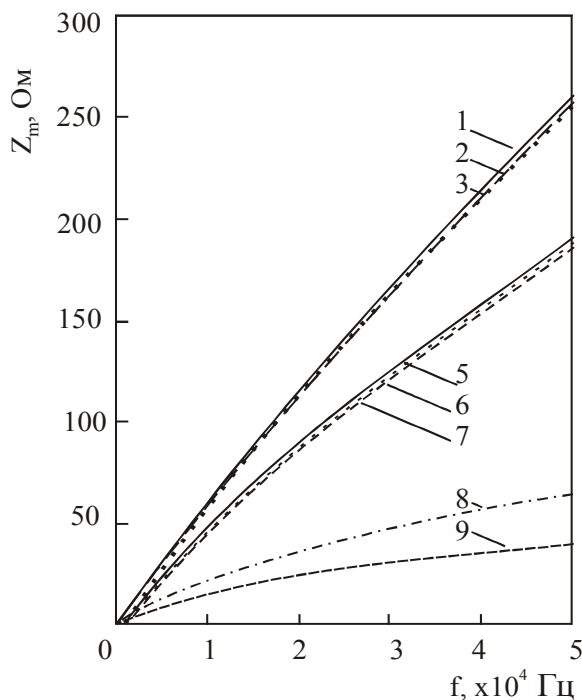


Рис. 2. Частотные зависимости взаимного импеданса двух рельсовых нитей, рассчитанные по формулам [4-6] (1, 5); [1] (2, 6); [2] (3, 7); [7, 8] (8, 9) для удельной проводимости земли $5 \cdot 10^{-3}$ Ом·м (1-3, 8), $5 \cdot 10^{-2}$ Ом·м (5-7, 9)

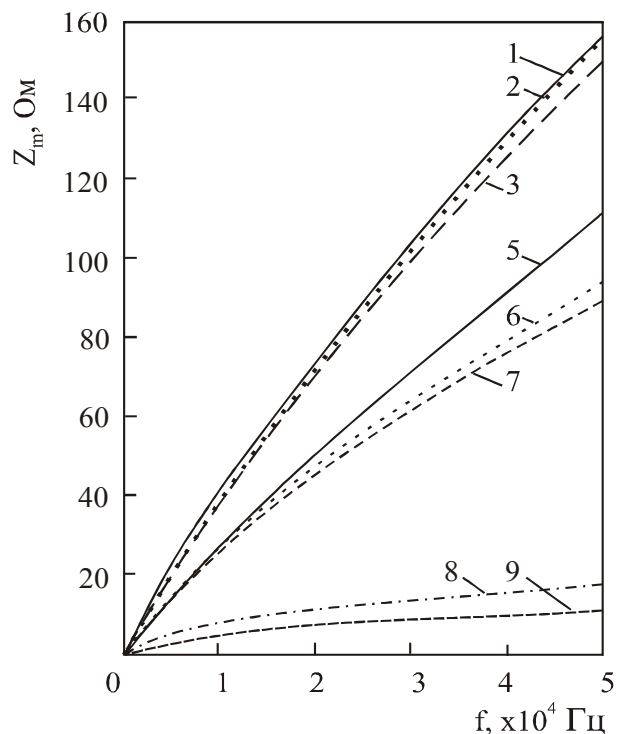


Рис. 3. Частотные зависимости взаимного импеданса рельсовой линии и контактного провода, рассчитанные по формулам [2] (1, 5); [1] (2, 6); [4-6] (3, 7); [7, 8] (8, 9) для удельной проводимости земли $5 \cdot 10^{-3}$ Ом·м (1-3, 8), $5 \cdot 10^{-2}$ Ом·м (5-7, 9)

водимости земли можно объяснить экранирующим влиянием земли. Расчеты по формулам, полученным в работах [1-6], удовлетворительно согласуются между собой, в то время как расчеты по формулам [7, 8] значительно отличаются. При увеличении частоты различие между результатами расчетов, полученных различными методами, увеличивается.

Особенно существенное расхождение между результатами расчетов взаимного импеданса по различным формулам наблюдалось для системы «рельсовая линия– контактный провод». Это расхождение увеличивалось при увеличении проводимости земли (рис. 3).

Выводы

Проведенный сравнительный анализ результатов расчетов частотной зависимости импеданса рельсовых нитей, рельсовых линий и контактного провода показал, что в диапазоне низких частот до $\sim 100 \dots 200$ Гц приемлемую для инженерных расчетов то-

чность обеспечивают расчеты по формулам Карсона [1], Поллачека [2], Вайса-Занде [4-6]. Расчеты с применением выражений, основанных на использовании комплексной толщины поверхностного слоя земли [7, 8] для рассматриваемых систем давали значительную погрешность как на низких, так и на высоких частотах. Погрешность расчетов для всех методов увеличивалась с увеличением частоты и проводимости земли. В диапазоне тональных частот приемлемую для практики точность обеспечивали расчеты по формулам Вайса-Занде [4-6].

Библиографический список

1. Carson, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell. Syst. Tech. J. 1926. No 5. P. 539-544.
2. Pollaczek, F. On the field produced by an infinitely long wire carrying alternating current // Elektrische Nachrichten Technik, 1926. Vol. III. No. 9. P. 339-359.
3. Wise, W.H. Effect of ground permeability on ground return circuits // Bell. Syst. Tech. J. 1931. No10. P. 472-484.
4. Wise, W.H. Propagation of high frequency currents in ground return circuits // Proc.Inst. Radio Engrs., 1934. No 22. P. 522-527.
5. Sunde, E.D. Earth conduction effects in transmission systems, 2nd ed. Dover Publications, 1968. P. 99-139.
6. Rachidi, F., Nucci, C.A., Ianoz, M. Transient analysis of multiconductor lines above a lossy ground // IEEE Trans. Power. Delivery, 1999. Vol 14. No 1. P. 294-302.
7. Gary C. Approche complete de la propagation multifilaire en haute frequence par l'utilisation des matrices complexe // EDF Bull. de la direction des etudes et recherches. Serie B, 1976. No 3/4. P. 5-20.
8. Deri A., Tevan G., Semlyen A., Castanheira A. The complex ground return plane. A simplified model for homogenous and multilayer earth return // IEEE Trans. On Power Systems, 1981. Vol 100. Nr. 8. P. 3686-3693.
9. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог - 4-е изд., перераб. и дополн [Текст]: учебник для вузов ж.-д. трансп. К. Г. Марквардт. - М.: Транспорт, 1982. - 528 с.
10. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость. [Текст] / М. П. Бадер. - М.: УМК МПС. - 2002. - 638 с.
11. Hill R.J., Carpenter D.C., Mellitt B., Allan J., Brown J.C. Calculation and measurement of rail impedances applicable to remoteshort-circuit fault currents // Electric Power Applications. IEE Proceedings. B. 1993. Vol 140. Issue 6. P. 417 - 420.

Ключові слова: імпеданс, рейкова лінія, контактний провід, аналіз.

Ключевые слова: импеданс, рельсовая цепь, контактний провід, аналіз.

Key words: impedance, railway line, catenary wire, analysis.

Поступила в редколлегию 11.11.2010.

Принята к печати 15.11.2010.

СУЧАСНІ ВИПРЯМЛЯЧІ ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ШВИДКІСНОГО РУХУ

Вступ

Основною ланкою нового покоління тягових підстанцій постійного струму залізниць України, яка визначає на сьогоднішній день їх електромагнітну сумісність з зовнішньою живлячою електромережею трифазного струму і тяговою мережею постійного струму є дванадцятипульсний тяговий перетворювальний агрегат на основі двох діодних трифазних мостів [1]. У порівнянні з шестипульсними діодними випрямлячами він має відносно низький рівень вищих гармонік в мережевому струмі і випрямленій напрузі та коефіцієнт потужності на стороні живлячої мережі на рівні $0,95 \div 0,96$ [2]. Однак ці характеристики суттєво погіршуються при переході на тиристорні мости [3, 4] з метою надання перетворювальним агрегатам регулювальних властивостей для забезпечення оптимального керування живленням тягової мережі [5].

Метою роботи є аналіз сучасних випрямлячів для модернізації тягових підстанцій при впровадженні швидкісного руху. З урахуванням жорстких вимог сучасних стандартів до електромагнітної сумісності тягових перетворювальних агрегатів підстанцій постійного струму з живлячою і тяговою мережами можна стверджувати, що тиристорні випрямлячі у своєму класичному виконанні, які працюють в режимі стабілізації напруги на шинах тягової підстанції не забезпечують потрібного рівня якості перетворення електроенергії трифазного змінного струму в постійний струм. Це стосується як несинусоїдальності мережевих струмів і генерованої потужності, так і гармонічного складу випрямленої напруги і достатньо великої інерційності (до 10 мс) переходу агрегата із випрямного (тягового) в інверторний (рекуперативний) режими

або режим нульової вихідної напруги (струмообмежувальний).

Традиційним, але не оптимальним технічним вирішенням проблеми електромагнітної сумісності перетворювальних агрегатів тягових підстанцій постійного струму з живлячою енергомережею є включення на стороні мережевої обмотки тягового перетворювального трансформатора пасивних LC-фільтрів, налагоджених на резонанс на найбільші по величині гармоніки струму, генеровані дванадцятипульсним випрямлячем в мережу та паралельне підключення регулюємого джерела реактивної потужності у вигляді послідовного з'єднання реактора і тиристорного регулятора [6]. Компенсація реактивної потужності і близька до синусоїди форма мережевого струму забезпечується також в перетворювальних агрегатах побудованих на дванадцятипульсних тиристорних випрямлячів (як некомпенсованих, так і компенсованих) при використанні силового активного фільтра (САФ) на основі автономного інвертора напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), тобто при використанні засобу силової електроніки [6] (рис. 1, а, б).

Однак ці два засоби приводять до значного збільшення встановленої потужності електрообладнання тягових підстанцій і не вирішують задачу забезпечення якісної електроенергії тягової мережі. Останнє потребує для забезпечення електромагнітної сумісності перетворювального агрегату з тяговою мережею установки на виході перетворювального агрегата вельми потужних багатоланкових резонансно-аперіодичних LC-фільтрів [7].

Принципово новий рівень електромагнітної сумісності тягового перетворювального агрегата з живлячою і тяговою мережами може бути реалізований при переході на

випрямлячі напруги з широтно-імпульсним регулюванням (ШІР-випрямлячі) [8, 9].

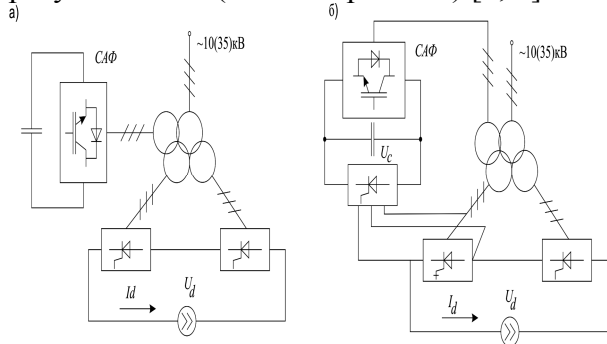


Рис. 1. Силові схеми дванадцятипульсних тиристорних випрямлячів з коефіцієнтом потужності близьким до 1 і синусоїдальною формою мережевого струму: а) некомпенсованого; б) компенсованого

Однак сьогодні цей засіб сигової електроніки ще не може бути ефективно реалізованим на потужностях перетворювальних агрегатів, задіяних на підсистемах постійного струму залізниць у зв'язку з відсутністю на ринку сигової електроніки достатньо потужних високовольтних повністю керованих напівпровідникових приладів з робочою частотою перемикачів 1 і більше кГц.

Запропонованим на сьогоднішній день для практики побудови тягових перетворювальних агрегатів (ТПА) підстанцій постійного струму залізниць засобом сигової електроніки є використання в якості їх випрямлячів-стабілізаторів напруги дванадцятипульсних напівкерованих (діодно-тиристорних) або керованих (тиристорних) випрямлячів вольтододаткового типу [4, 10] (рис. 2, а, б).

Використання в якості вольтододатка реверсивного вольтододатка з двоквадрантними ключами знакозмінної напруги на основі запираємих напівпровідникових приладів (рис. 2, б), працюючого в режимі однополярної синусоїдальної ШІМ, дає можливість на сучасній системній базі сигової електроніки при збільшенні встановленої потужності перетворювача на 20-25% у порівнянні з встановленою потужністю чисто діодного (тиристорного) дванадцятипульсного випрямляча реалізувати при прийнятних величинах встановленої потужності додаткового фільтрокомпенсуючого електрообладнання практично повну елект-

ромагнітну сумісність тягової підстанції постійного струму з живлячою і тяговими мережами в робочих (сталих) і аварійних (перехідних) режимах роботи [3, 11-14].

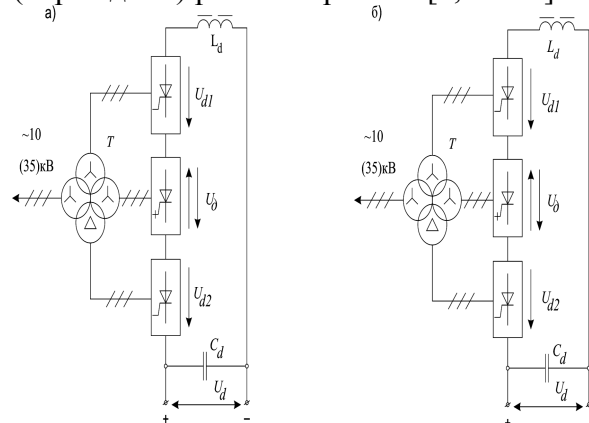


Рис. 2. Силові схеми дванадцятипульсних напівкерованих випрямлячів вольтододаткового типу: а) з реверсивним вольтододатком на одноопераційних тиристорах; б) з реверсивним вольтододатком на двоопераційних тиристорах

Як показують розрахунки, за допомогою дванадцятипульсного напівкерованого випрямляча з реверсивним запираємих вольтододатком (рис. 2, б), виконаного на сучасній елементній базі сигової електроніки, забезпечується необхідний рівень електромагнітної сумісності при приблизно на 30% меншій масі Г-подібного вихідного LC-фільтру та без установки додаткових фільтрів-пробок. Подальше зниження маси Г-подібного LC-фільтру при збереженні рівня електромагнітної сумісності обмежується необхідністю придушення гармонік з частотою ШІМ вольтододатка, яка може реально реалізуватися в межах 1200-1800 Гц, а також комбінаційних гармонік більш низької частоти, генерованих вольтододатком при його роботі в якості активного фільтру. Всі ці гармоніки приходяться на пік софтометричної кривої [7] і отже, повинні придушуватися. Ця перешкода на шляху подальшого зниження маси Г-подібного вихідного LC-фільтру усувається при використанні в якості вихідного фільтру гібридного фільтру на основі малопотужного активного фільтру паралельного типу [15]. Один з варіантів такого гібридного фільтру (Ф) на базі автономного інвертора струму

для використання на тягових підстанціях постійного струму з дванадцятипульсними випрямлячами вольтододадового типу показаний на рис. 3.

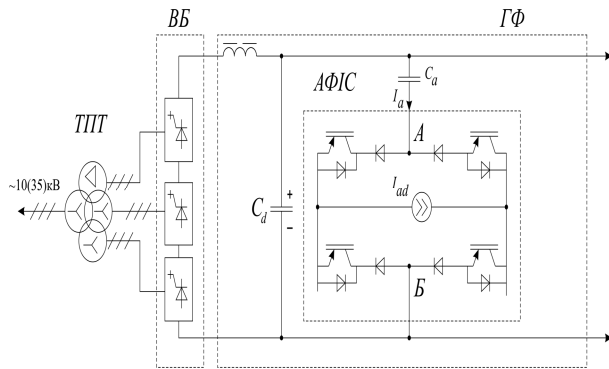


Рис. 3. Структура гібридного фільтра з активним фільтром паралельного типу на базі автономного інвертора струму (АФІС)

Динамічна модель комутатора ВП

Вона необхідна для аналізу динамічних властивостей ВП, що працює як АФ. Можливі різні алгоритми управління комутатором випрямляча напруги [16, 17]. Проте динамічні властивості мало залежать від особливостей конкретного алгоритму і можуть бути пояснені на прикладі алгоритму, пропонуваного в [17]. При цьому керуюча дія впливає на амплітуду трифазної системи синусоїдальних струмів завдання $i_3(1) - i_3(3)$ на вході ВП (амплітуду результуючого вектора), яку для вирішення завдань цієї роботи досить прийняти співпадаючою по фазі з напругою (рис. 4, а). Номер фази вказаний в дужках. У вихідній напрузі u_d чергуються імпульси, коли точки АБ підключені парою ключів різних фаз до однієї з трьох лінійних входних напруг і паузи, коли точки АБ з'єднані парою ключів однієї з фаз накоротко. Процеси на інтервалах імпульсів аналізуються, приймаючи допущення про малість періоду ШІМ $T_{ш}$ порівняно з періодом мережі $T_c = 2\pi / \omega_c$, що дозволяє нехтувати зміною напруги і струмів завдання усередині періоду ШІМ. Тоді на періоді ШІМ в кожній фазі проводить струм i_d той з ключів, напрям провідності якого відповідає необхідному напрямку вхідного струму і відносна тривалість інтерва-

лу його провідності дорівнює відносному струму $i_{3(m)}/i_d$.

Розглянемо той період ШІМ, в якому знаходиться точка максимуму одного з фазної напруги (t_1 на рис. 4,а). На цьому періоді ключ 1 проводить спільно з 4 і 6, а на вихід в рівній пропорції по тривалості поступає лінійна напруга $u_{(12)} = u_{(1)} - u_{(2)}$ і $u_{(13)} = u_{(1)} - u_{(3)}$. З урахуванням допущення про малість періоду ШІМ вони мають однакову величину $\sqrt{3}/2$ від амплітуди (рис. 4,б).

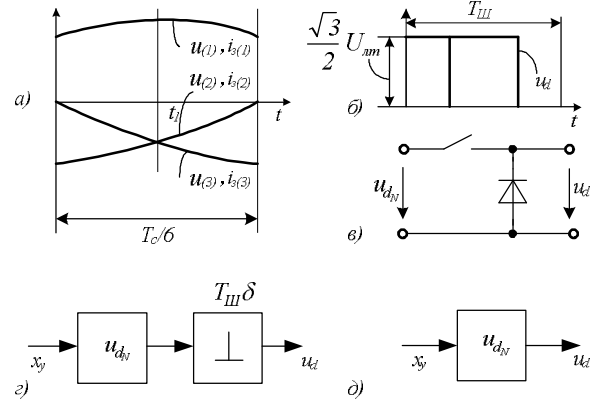


Рис. 4. Приведення перетворювача до еквівалентного понижуючого ШІП:

а – вхідна напруга і струми завдання на періоді повторюваності параметрів комутатора $T_m/6$; б – еквівалентна вихідна напруга на періоді ШІМ – $T_{ш}$; в – еквівалентний ШІП; г, д – імпульсна і безперервна моделі комутатора ВП

На інших періодах ШІМ, розташованих зліва і справа відносно t_1 , вихідна напруга приблизно зберігає середнє значення, оскільки сумарна тривалість імпульсу, визначувана відносним струмом $i_{3(m)}/i_d$, майже постійна, а збільшення одне з лінійної напруги компенсується зниженням другого. Оскільки, далі, інтервал $T_m/6$ є періодом повторюваності процесу по відношенню до вихідної напруги, то можна прийняти, що вихідна напруга має форму приведену на рис. 3, б для всіх періодів ШІМ і тоді ВП по характеру процесів не відрізняється від простого знижуючого широко-імпульсного перетворювача (ШІМ) (рис. 4, в). У тому, що вхідна напруга еквівалентного ШІМ дорівнює номінальній вихідній напрузі u_{dN} фактичного перетворювача, неважко переконатися, прирівнюючи активні потужності на вході і виході при максимальному кое-

фіцієнти заповнення $3/2 U_m I_m = u_{dN} i_d$ звідки з урахуванням $I_m = i_d$ маємо

$$u_{dN} = 3/2 U_m = \sqrt{3}/2 U_{\text{лн}}, \quad (1)$$

де U_m і I_m – амплітудні значення фазної напруги і струму на вході.

Отже, як і в знижуючому ШІМ, приріст вихідної напруги при нескінченно малому прирості відносного керуючого сигналу x_y має форму нескінченно короткого імпульсу з вольтсекундною площею $u_{dN} T_{\text{ш}} \Delta x_y$, що відповідає еквівалентній схемі рис. 3, г. Імпульсний елемент δ має, за визначенням, одиничну площу миттєвих імпульсів, а при їх усереднюванні на періоді $T_{\text{ш}}$ отримуємо безперервну модель комутатора рис. 4, д.

Таким чином, лінеаризований комутатор ВП є по відношенню до відносного сигналу, що управляє, пропорційною ланкою з передавальним коефіцієнтом u_{dN} . Отже, згідно з відомою теоремою Котельникова, ВП як АФ може компенсувати гармоніки ОВ при частотах до половини частоти ШІМ.

Характеристики ВП, як активного фільтру

На рис. 5, а показана загальна структура системи при заміщенні вольтодобавочного знижуючого перетворювача ШІМ. Джерело е.р.с. e заміщає генератор пригнічування гармонік. Сигнал помилки активного фільтру $\Delta u = e - u_d$ фіксується датчиком напруги і поступає на вхід каналу активної фільтрації, що має передавальну функцію W і що формує сигнал u_y керуючого ШІМ-контроллера.

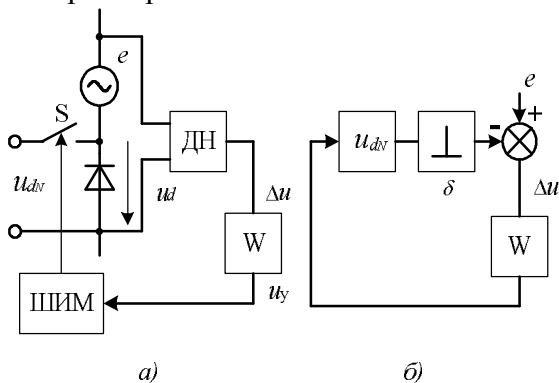


Рис. 5. Загальна структура системи:

а – структура системи активної фільтрації; б – лінеаризована модель.

Заміщаючи ШІМ разом з ШІМ-контроллером лінійною моделлю (рис. 4, з), отримуємо еквівалентну схему рис. 5, б. Переходячи до безперервної моделі рис. 4, д, отримуємо передавальну функцію замкнутої системи на низьких частотах

$$W_s \approx \Delta u / e = (1 + u_{dN} W)^{-1}. \quad (2)$$

Коефіцієнт придушення активного фільтру дорівнює відношенню модулів сигналів e и Δu .

$$k_n = |e / \Delta u| = |1 + u_{dN} W| \approx u_{dN} |W| \quad (3)$$

Теоретично повинні пригнічуватися всі гармоніки основної частоти $f_0 = 50$ Гц з кроком по номеру гармоніки $n = 1$. Практично досить подавити всі парні гармоніки і тоді крок по відношенню до основної частоти $n = 2$. За винятком декількох гармонік, що найбільш виділяються (канонічних), досить мати k_n порядку 10.

Імпульсна напругу u_d містить широкий спектр високочастотних гармонік ШІМ, які не можуть бути пригнічені і грають роль високочастотної перешкоди. Тому передавальна функція W повинна володіти властивостями фільтру низьких частот (ФНЧ).

Розглянемо два крайніх по цьому чиннику випадки.

Простим ФНЧ (ширококутовим) є інтегруюча ланка.

$$W = k / p, \quad |W| = k / \omega \quad (4)$$

де k – коефіцієнт посилення інтегратора, ω – частота пригнічуваної гармоніки.

Відомо, що чинником, що обмежує величину коефіцієнта посилення, є субгармонічні коливання, обумовлені тим, що перетворювач діє на безперервну частку системи за допомогою імпульсів («поштовхів»), що враховуються імпульсним елементом δ . При W згідно (4) граничний по умові стійкості добуток передавальних коефіцієнтів пропорційних ланок в замкнутому контурі рис. 5, б рівний двом [17] $u_{dN} T_{\text{ш}} k = 2$, що дає

$$k_n = 2 / (T_{\text{ш}} \omega) = (\pi \omega^*)^{-1}, \quad (5)$$

де $\omega^* = \omega / \omega_{\text{ш}}$ – частота пригнічуваної гармоніки у відношенні до частоти ШІМ.

Наприклад, при $f_{\text{ш}} = 2400$ Гц, що відповідає прийнятним комутаційним втратам

при використанні IGBT і $k_n=10$ маємо $\omega^*=3,2 \cdot 10^{-2}$ і $f=76$ Гц. Таким чином, при використанні широкосмугового фільтру можна задовільно подавити тільки основну частоту 50 Гц і помірно ускладнення передавальної функції фільтру в рамках широкосмугової концепції не вносить якісних змін.

Іншим крайнім випадком є використання паралельного з'єднання вузькосмугових фільтрів, електричний еквівалент кожного з яких відповідає рис. 6.

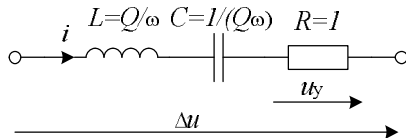


Рис. 6. Електричний еквівалент вузькосмугового фільтру

На резонансній частоті ω результуючий опір реактивної частини фільтру дорівнює нулю і тому передавальна функція дорівнює одиниці. При відхиленні від неї за рахунок виникаючої різниці індуктивного і ємнісного опорів модуль передавальної функції при достатньо високій добротності швидко падає. Для отримання заданого коефіцієнта посилення k на резонансній частоті необхідно доповнити фільтр рис. 6 пропорційною ланкою, що згідно (3) дає

$$x_y = ku_y, \quad k_n = u_{dN}k. \quad (6)$$

На високих частотах, зокрема на частоті субгармонійних автоколивань, можна при визначенні струму i враховувати лише опір дроселя pL , що для всього ланцюга паралельно сполучених фільтрів окремих гармонік дасть

$$W = k / (Qp) \sum \omega, \quad (7)$$

де прийнято, що коефіцієнт посилення k для всіх паралельно з'єднаних фільтрів однаковий.

При достатньо великій кількості паралельних ланок дискретну суму їх резонансних частот ω можна приблизно замінити інтегралом згідно рівності

$$\sum \omega = \frac{1}{\Delta \omega} \sum (\omega \Delta \omega) \approx \frac{1}{\Delta \omega} \int_0^{\omega_g} \omega d\omega = \frac{\omega_g^2}{2\Delta \omega}, \quad (8)$$

де ω_g і $\Delta \omega$ – верхня межа частоти пригнічуваної гармоніки і крок по цій частоті.

З (7) витікає, що по відношенню до автоколивань вузькосмуговий фільтр володіє властивостями інтегруючої ланки, як і розглянутий вище широкосмуговий. Отже, можна застосувати той же критерій стійкості, що урахуванням (3) дає

$$u_{dN} T_{ш} (k/Q) \omega_b^2 / (2\Delta \omega) = 2, \quad k_n = 2 / (\Delta \omega^* Q / \omega_b^{*2}), \quad (9)$$

де величина k знайдена з першого рівняння (9) як умови стійкості і підставлена як $|W|$ на резонансній частоті в (3). Як базис для відносних частот, позначених зірочкою, знов прийнята частота ШПМ.

Як впливає з (9), основним чинником підвищення коефіцієнта придушення при вузькосмугових фільтрах є можливість прийняти високу добротність Q , що робить такі фільтри малопроникними для високої частоти автоколивань. Обмеженням є відхід частоти мережі f_m від номінального значення 50 Гц. Без автопідстроювання частот фільтрів, яка сильно ускладнює алгоритм управління, можна прийняти $Q=50$. Приймемо також $\omega_b^* = 0,5$ згідно теоремі Котельникова, а також допустимо, що пригнічуються всі гармоніки частоти мережі, тобто крок $\Delta \omega_b = f_c / f_{ш}$. Тоді при $f_{ш} = 2400$ Гц знайдемо $k_n = 2,65$, що недостатньо. Якщо понизити удвічі верхню межу пригнічуваних частот (до частоти 12-ої гармоніки мережі, тобто до 600 Гц), то отримаємо прийнятний коефіцієнт придушення $k_n \approx 10$. Його можна підвищити ще удвічі, пригнічуючи тільки парні гармоніки мережі, що підвищує в 2 рази величину $\Delta \omega^*$. Для підвищення ефективності придушення як вищих частот, так і частот основної смуги можна застосувати додатковий малопотужний активний фільтр, підключений послідовно на виході за конденсатором силового фільтру. Застосовуючи в цьому фільтрі ШПМ з частотою 20...40 кГц і швидкодіючі польові транзистори при широкосмуговому ФНЧ згідно рекомендаціям роботи [17] можна отримати величину псофометричної напруги порядку 1 В, що відповідає допустимим нормам.

Перехідні електричні режими

На рис. 7 показаний комутатор вольтодобавочного перетворювача з модулем захисту від перенапружень. Розглянемо деякі аварійні режими ВП. В разі пробою послідовного прямого діода виникає коротке замикання джерела живлення при включенні *IGBT* в одній з двох інших фаз. Тому доцільно застосувати резервування прямих діодів шляхом послідовного включення додаткового діода в кожне з плечей моста. При пробі транзистора аварійних струмів не виникає, можна виконати шунтування ВП ключем *VS* при замиканні решти транзисторів, відключаючи ВП. При пробі всіх транзисторів ВП перетворюється на некерований випрямляч з прямими діодами, який додає напругу порядку 20 % до результуючої вихідної напруги перетворювача.

При перенапруженнях можна захищати транзистори шляхом їх одночасного включення у всіх трьох плечах одночасно, що дозволяє обійтися без послідовного резервування транзисторів. За наявності деякого запасу по їх робочій напрузі ВП разом з шунтуючим ланцюгом можна використовувати як вузол короткочасного струмообмеження, вимикаючи всі транзистори і включаючи ключі [11]. VS_R Струм навантаження i_d перекладається при цьому на шунтуючий ланцюг із струмообмежувальними резисторами *R*. Середня точка резисторів з'єднується із загальним виведенням конденсаторів вхідного фільтру, завдяки цьому, результуюча висока напруга на резисторах розподіляється приблизно порівну між верхньою і нижньою групами закритих транзисторів. Замикання шунтуючих ключів при переході в нормальний режим роботи виконується шляхом формування потрібної полярності вихідної напруги u_{dv} вольтодобавочного перетворювача.

Разом з тим, спосіб захисту транзисторів шляхом їх включення системою управління має наступні недоліки:

- потрібні датчики перенапружень;
- через транзистори після їх включення протікають значні струми.

Використання модуля захисту від (МЗП) усуває ці недоліки. МЗП приєднується до входу комутатора ВП і проводить обмеження на стороні змінного струму. Зокрема, такі виникають при пуску і досягають в межах двократної величини від сталої амплітуди вхідної лінійної напруги (рис. 8, а).

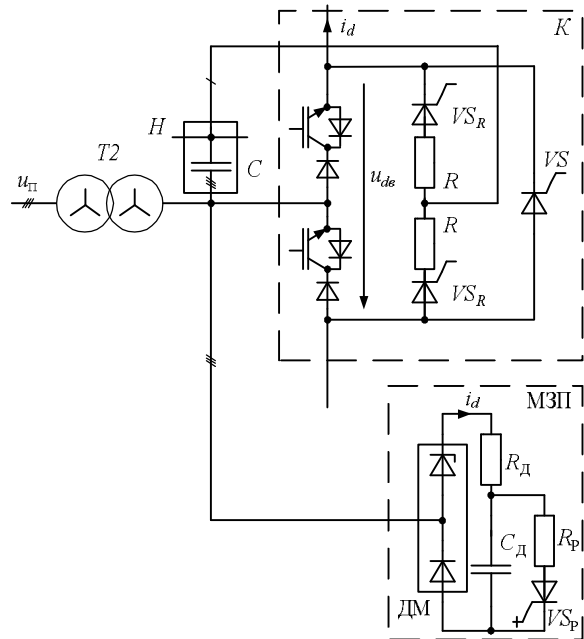


Рис. 7 – Комутатор ВП (К) з модулем захисту від (МЗП):

уп – живляча мережа; *T2* – мережевий трансформатор ВП; *3* – конденсатор вхідного фільтру ВП; *H* – нейтральна точка „зірки” конденсаторів; *R* – резистор шунтуючого ланцюга; *VS_R* – ключі шунтуючого ланцюга; *VS* – ключ повної шунтировки; ДМ – діодний міст; *RD* – демпфуючий ланцюг; *RP*, *VSP* – розрядний резистор з від'єднуючим ключем.

Причина перенапружень обумовлена коливальним зарядом конденсаторів *3* від живлячої мережі через індуктивність розсіяння *L_s* обмотки трансформатора. Для тих, що є зараз на ринку сильноточних *IGBT* такі перенапруження неприйнятні.

За наявності МЗП роль демпфера в коливальному контурі *L_sC* виконує резистор *R_d*, який через пару діодів приєднується по черзі до однієї з пар виводів вторинної обмотки трансформатора. Якість демпфування характеризується добротністю контура

$$Q = \frac{R'_d}{\rho}, \quad \rho = \sqrt{\frac{L_s}{C}}, \quad (10)$$

де ρ – характеристичний опір контура;
 $R'_д$ – опір резистора R , приведений на сторону змінного струму.

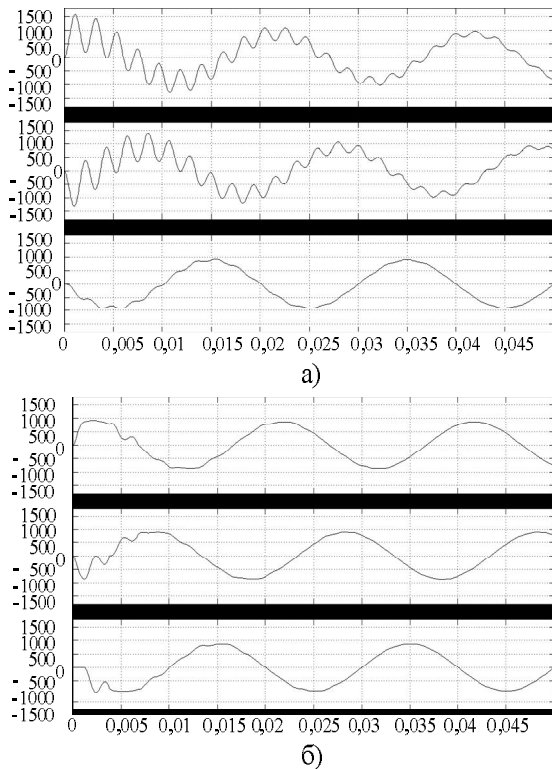


Рис. 8 – Вхідна лінійна напруга трьох фаз:

а - при пуску без МЗП, б) при пуску з МЗП

Щоб отримати той же опір між фазами 1 і 2, величина $R'_д$ повинна задовольняти рівності $R'_д = 1,5 R_д$ (рис. 10), що дає з (9)

$$R_д = Q \rho / 1,5. \quad (11)$$

Відомо, що коливальний контур повністю втрачає свою коливальність при $Q = 0,5$, що і можна прийняти, визначаючи необхідне $R_д$.

Недоліком МЗП тільки з резистором $R_д$ на стороні постійного струму ДМ було б те, що резистор необхідно відключати після пуску потужним ключем. Крім того, у момент його виключення виникає перенапруження на вході комутатора, оскільки при цьому запас енергії від протікання великого струму i_d в індуктивностях L_s переходить в конденсатори C . Це перенапруження не виникає, якщо струм i_d після пуску плавно спадає до нуля, що забезпечує конденсатор $C_д$, що поступово заряджається.

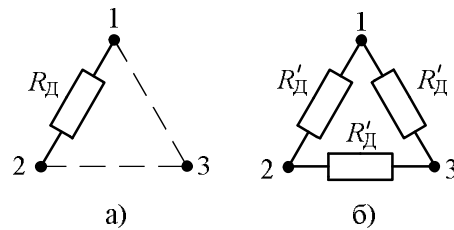


Рис. 9 – Розподіл фактичного $R_д$, що підключається діодами до двох фаз (а), на три фази вхідної напруги (б)

Необхідну ємність зручно знайти, включаючи індуктивність $L'_s = 2L_s$ двох фаз трансформатора в еквівалентну схему ланцюга постійного струму і визначаючи добротність коливального контура $Q_д$, що виходить

$$Q_д = \frac{\sqrt{L'_s / C_д}}{R_д}. \quad (12)$$

Оскільки при цьому ігнорується вплив ємності C , то, визначаючи з (11) ємність $C_д$, слід прийняти добротність $Q_д$ з деяким запасом проти граничного по тій, що коливає режиму $Q_д = 0,5$. На рис. 8, б показаний той же процес пуску за наявності МЗП з параметрами $R_д$ і $C_д$, визначуваними з (11) і (12) при граничному значенні добротності. Амплітуда лінійної напруги за наявності МЗП збільшується всього на 7% проти сталого значення.

Щоб забезпечити повторну дію МЗП, наприклад, при пуску після короткочасної перерви живлення, доцільно виконувати прискорений розряд конденсаторів $C_д$ і C через ключ VSP. Ефективність захисту від перенапружень можна істотно підвищити, якщо використовувати в одній з груп ДМ (рис. 7) лавинні діоди. Резервування діодів моста можна виконати шляхом їх паралельного з'єднання в кожному з плечей з введенням послідовного індивідуального запобіжника. При пробі одного діода він від'єднується, а решта діодів продовжує нормальну роботу.

Схема рис. 7 може використовуватися також як резервний пристрій для демпфування можливих вимушених коливань з частотою f_p^* в режимі холостого ходу пере-

творювача, коли демпфування по управлінню не діє.

Висновки

1. При використанні вольтодотаткового перетворювача на напівпровідникових приладах, що замикаються, як активний фільтр можливо повністю виключити дросель вихідного фільтру, поклавши його функції на індуктивність розсіяння двох фаз мережевого трансформатора в основному випрямлячі.

2. При частоті перемикачів напівпровідникових приладів вольтодобавки порядку 1200 Гц можна отримати гармонійний склад вихідної напруги без додаткових засобів, а при меншій частоті доцільно застосовувати додатковий малопотужний активний фільтр, який вводиться послідовно у вихідний ланцюг після конденсатора пасивного фільтру.

3. Резонансна частота вхідного фільтру знаходиться в зоні частот вищих гармонік живлячої мережі, що створює можливість аварійних режимів збудження вимушених коливань. Для зниження резонансу доцільно резонансну частоту фільтру з частотою однієї з гармонік з номерами, кратними трьом.

4. Для придушення можливого резонансу засобами управління пропонується використовувати зворотний зв'язок, що створює еквівалентну активну провідність, пропорційну струму навантаження, паралельно конденсатору фільтру.

5. Для демпфування резонансних автоколивань у вхідному фільтрі при перехідних процесах і обмеження пов'язаних з цим перенапружень пропонується використовувати демпфуючу RC-ланку, що підключається через діодний міст паралельно конденсатору фільтру і керований ланцюг формованого розряду конденсаторів, що містить.

Бібліографічний список

1. Андриенко, П. Д. Диодные выпрямители нового поколения на ток 3150 А напряжение 3300В для магистральных желез-

ных дорог. [Текст] / П. Д. Андриенко, А. Г. Ильин, В. Ф. Наконечный // Тезисы I Международной научно-практической конф. «Трансэлектро-2007», – 2007. – №1. – С. 2.

2. Барковский, Б. С. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций. [Текст] / Барковский Б. С., Магай Г. С., Маценко В. П. – М.: Транспорт, 1990. – 127с.

3. Гончаров, Ю. П. Полупроводниковый преобразователь с вольтадобавкой в качестве активного фильтра [Текст] / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. В. Замаруев // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність», част.2, 2007. – С. 112-117.

4. Хворост, М. В. Підвищення ефективності дванадцятипульсових випрямлячів тягових перетворювальних агрегатів метрополітенів з повздовжньою високовольтною лінією живлення постійного струму [Текст] / М. В. Хворост // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, –2004. –№ 3. – С.50-54.

5. Андреев, В. Н. Современные схемотехнические, конструктивные и технологические решения устройств тягового электро-снабжения. Обеспечение их наладки и эксплуатации [Текст] / В. Н. Андреев, А. В. Мизинцев, А. Д. Крндаков // Материалы Международного симпозиума «Eltrans'2001», – 2002. – С.106-107.

6. Жемеров, Г. Г. Новый класс преобразователей переменного напряжения в постоянное, электромагнитно совместимых с питающей сетью [Текст] / Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол, Д.С. Крылов // Технічна електродинаміка. Тем.вип. «Силовая електроніка та енергоефективність», част.1, – 2001. – С. 3 – 8.

7. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи [Текст] / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 2001. – 464 с.

8. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники [Текст] / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск, – 2004. – 672 с.

9. Гончаров, М. В. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу [Текст] / М. В. Гончаров, Н. В. Панасенко, О. І. Семене-

- нко, М. В. Хворост. – Харків, 2007. – 192с.
10. Хворост, М. В. Силові схеми перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітену з повздовжньою лінією живлення [Текст] / М. В. Хворост, В. В. Божко // Електротехніка і електромеханіка. – 2005, – № 1. – С. 106–109.
 11. Панасенко, Н. В. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог [Текст] / Н. В. Панасенко, В. В. Божко, Ю. П. Гончаров // Залізничний транспорт України. – 2007. – № 4. – С. 76 – 80.
 12. Гончаров, Ю. П. Перетворювач з вольтододатком на повністю керованих напівпровідникових приладах для тягових підстанцій постійного струму [Текст] / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко // Електротехніка і енергетика. – 2007. – № 2. – С. 23 – 34.
 13. Самсонкін, В. М. Энергоэффективный преобразовательный агрегат с функциями фильтрации выходного напряжения тяговой подстанции системы электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ [Текст] / В. М. Самсонкін, Н. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров // Тезиси докладов I Международной научно-практической конференции «Трансэлектро-2007». – 2007. – С. 57.
 14. Гончаров, Ю. П. Тяговый выпрямляч з реверсивним вольтододатком на запираємих напівпровідникових приладах [Текст] / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко // Технічна електродинаміка, – 2008. – № 2. – С.16 – 21.
 15. Сыченко, В. Г., Зубенко В. А. Силовой активный фильтр для тяговой подстанции постоянного тока [Текст] / В. Г. Сыченко, В. А. Зубенко // 7-й Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Материалы симпозиума. – 2007, – С. 66 – 69.
 16. Гончаров, Ю. П. Тяговый выпрямляч з реверсивним вольтододатком на двохопераційних напівпровідникових приладах [Текст] / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко // Технічна електродинаміка. Тем. вип «Проблеми сучасної електротехніки» част. 2, Київ. – 2008. – С. 16 – 21.
 17. Гончаров Ю. П. Перетворювальна техніка [Текст] / Ю. П. Гончаров, С. В. Будьонний, В. Г. Морозов. – Х.: Фоліо. – 2000. – 357 с.
 18. Хворост, М. В. Параметры вольтодобавочного входного фильтра, демпфованого по управлінню, дванадцятипульсного выпрямляча - стабилизатора нагрузки [Текст] / М. В. Хворост, В. В. Божко // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Харьков. – 2006. - № 42. - С. 14 - 20.

Ключові слова: випрямляч, вольтододаток, постійний струм, контактна мережа

Ключевые слова: выпрямитель, вольтододаток, постоянный ток, контактная сеть

Key words: rectifier, add voltage, direct current, contact net

Надійшла до редколегії 7.12.2010.

Прийнята до друку 10.12.2010.

POLISH NATIONAL EUROPEAN RAILWAY TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM PLAN

Introduction

PKP Polish Railway Lines S.A. manages about 19 000 km of railway lines in Poland. Railway lines infrastructure comprises about 28 000 km of main tracks and about 9 000 km of station tracks. Railway network in Poland is used by about 5 000 traction vehicles and about 120 000 freight wagons. Passenger transport by rail is served daily by about 3 500 scheduled passenger trains.

Railway network and traction vehicles are equipped with analogue simplex radio devices 150 MHz described in Annex B (Part 2, 10th system) of the TSI CR CCS specification. Traction vehicles are also equipped with AWS type SHP system described in Annex B (Part 1, 19th system) of the TSI CR CCS specification, which is installed on 17 000 km of tracks in Poland.

Signalling devices serve about 50 000 switches and about 50 000 light signals. About 30% of station interlockings are relay ones, about 1% are electronic ones, nearly 70% are old generations ones. The last ones are not suitable for co-operation with ETCS. Due to high variety of solutions in relay interlockings it is practically not feasible to construct unified interfaces for their co-operation with ETCS. Interlockings appropriate for co-operation with ETCS are nearly only present in corridor F, however, even there some stations still have to be equipped with appropriate interlockings. About 16 000 km of lines are equipped with a few types of relay and electronic line block systems. Out of about 15 000 level crossings about 3 000 ones are secured by crossing keepers (category A level crossings), and about 1 800 ones are secured by automatic level crossing protection systems (500 level

crossings of category B secured by barriers and road lights and 1 300 level crossings of category C secured by road lights and not equipped with barriers).

Main barriers in GSM-R and ETCS implementation :

- in GSM-R implementation are of financial nature;
- in ETCS implementation are of technical and financial nature. ETCS system can only be implemented on lines with entirely upgraded signalling. In most cases such upgrading must be preceded by changes in track layout. Therefore ETCS implementation must be done as a final phase in railway line upgrading.

GSM-R and ETCS migration strategy

As a result of many detailed studies following GSM-R and ETCS, the migration strategy has been adopted.

Strategy for railway lines:

GSM-R: Class A train radio-communication system (GSM-R) will be implemented first on part of Corridor F (Legnica – PKP/DB border), then on main lines, then on first-class lines and secondary lines in an appropriate way to enable switching-off of the 150 MHz system, on lines covered by GSM-R implementation, in two steps: first on railway lines in south-west part of the network and then on railway lines in north and in east part of the network. On lines, which are foreseen, in national ERTMS deployment plan, to be equipped with ETCS, system GSM-R will be designed and implemented in a way appropriate to ensure parameters required for using GSM-R as a transmission channel for ETCS level 2.

ETCS: Class A control command system (ETCS) will be implemented first on part of Corridor F (Legnica – PKP/DB border), then on main and first-class lines upgraded as a final phase in railway line upgrading. Railway lines will be equipped with ETCS level 2 devices. Movement authorities will be given via radio using GSM-R system.

SHP: Class B control command system (SHP), working on 17 000 km of tracks, will stay in use minimum up to the year 2025 in particular as it covers many railway lines not foreseen for the implementation of the class A system (ETCS). SHP devices will stay also on railway lines being equipped with ETCS as mixed traffic is foreseen – those lines will be used by trains equipped and trains not equipped with ETCS on-board level 2 devices.

RADIOSTOP: Function RADIOSTOP of the 150 MHz radio, on lines covered by GSM-R implementation, will be used up to the switching off of the radio system 150 MHz on those lines.

Strategy for traction vehicles

GSM-R: Owners and keepers of the traction vehicles (in particular of locomotives as well as of electrical and diesel multiple units) will be obliged to equip those vehicles with on-board GSM-R equipment necessary for voice communication in due time appropriate to maintain radio 150 MHz switch off time in two foreseen steps.

ETCS: Equipping traction vehicles (in particular locomotives as well as of electrical and diesel multiple units) with on-board ETCS equipment and on-board GSM-R equipment necessary for data transmission for ETCS level 2 needs will be done using different financial possibilities, among others:

- within infrastructure projects (for instance within the first implementation on part of Corridor F (Legnica – PKP/DB border) in order to test prototype on-board installations for four types of locomotives EP09, EU07, ET22, SU46 and electrical multiple unit EN57 it is foreseen to equip two locos/EMUs of each type),
- directly from European funds (in particular in case of traction vehicles predestined for trans-border services on ETCS equipped lines),

- from own funds of traction vehicles owners, as well as
- using other financial tools.

SHP: For SHP system an STM module will be worked out, which will fulfil SHP system functions as well as RADIOSTOP function of the 150 MHz radio system. Requirements for SHP STM are ready. This module will be designed, constructed and tested within ETCS implementation on part of Corridor F (Legnica – PKP/DB border). Traction vehicles which will run on lines equipped with SHP and not equipped with ETCS must be able to receive and correctly interpret SHP signals.

RADIOSTOP: Function RADIOSTOP of the 150 MHz radio is covered by STM module for SHP system. Traction vehicles which will run on lines equipped with 150 MHz radio, also in case when the line is already equipped with GSM-R but still equipped with 150 MHz radio, must be able to receive and correctly interpret RADIOSTOP signal.

Decisions to stop maintaining trackside light signals and trackside SHP devices on defined lines, equipped with ETCS level 2, will be taken in relation to number of traction vehicles not equipped with ETCS running on those lines year after year.

GSM-R and ETCS systems implementation plans

Detail data regarding GSM-R and ETCS systems implementation on railway lines are presented on two maps (see Fig. 1. and Fig. 2.).

GSM-R implementation covers:

- - TEN-T network priority lines on Polish territory,
- - ETCS-Net lines pointed in Annex H of the TSI CR CCS;
- - lines upgraded with the use of the European funds, and
- - other railway lines, on which GSM-R implementation is necessary to obtain benefits arising from network implementation of this system.

ETCS implementation covers:

- - TEN-T network priority lines on Polish territory,

- - ETCS-Net lines pointed in Annex H of the TSI CR CCS (Fig. 2), and
- lines upgraded with the use of the European funds.

GSM-R implementation plans for railway lines

The Telekomunikacja Kolejowa Company is responsible for supervising GSM-R implementation on railway lines in Poland and for operating and maintaining GSM-R installations, which have been put into service.

GSM-R implementation plans are shown on a map (see Fig. 1) The plans are at the map on which implementations in following years are marked with different colours.

The tender for the first common GSM-R and ETCS implementation will be organised in the first quarter of the year 2007. Common

GSM-R and ETCS construction will take place at the turn of 2007 and 2008. Eighteen weeks are foreseen for functional GSM-R tests, including the verification of Polish implementation requirements for that system.

ETCS implementation plans for railway lines

The PKP Polskie Linie Kolejowe Company is responsible for supervising ETCS implementation on railway lines in Poland and for operating and maintaining ETCS installations, which have been put into service.

ETCS implementation plans are shown on a map (see Fig. 1.). Plans are at a map, on which implementations in following years are marked with different colours.

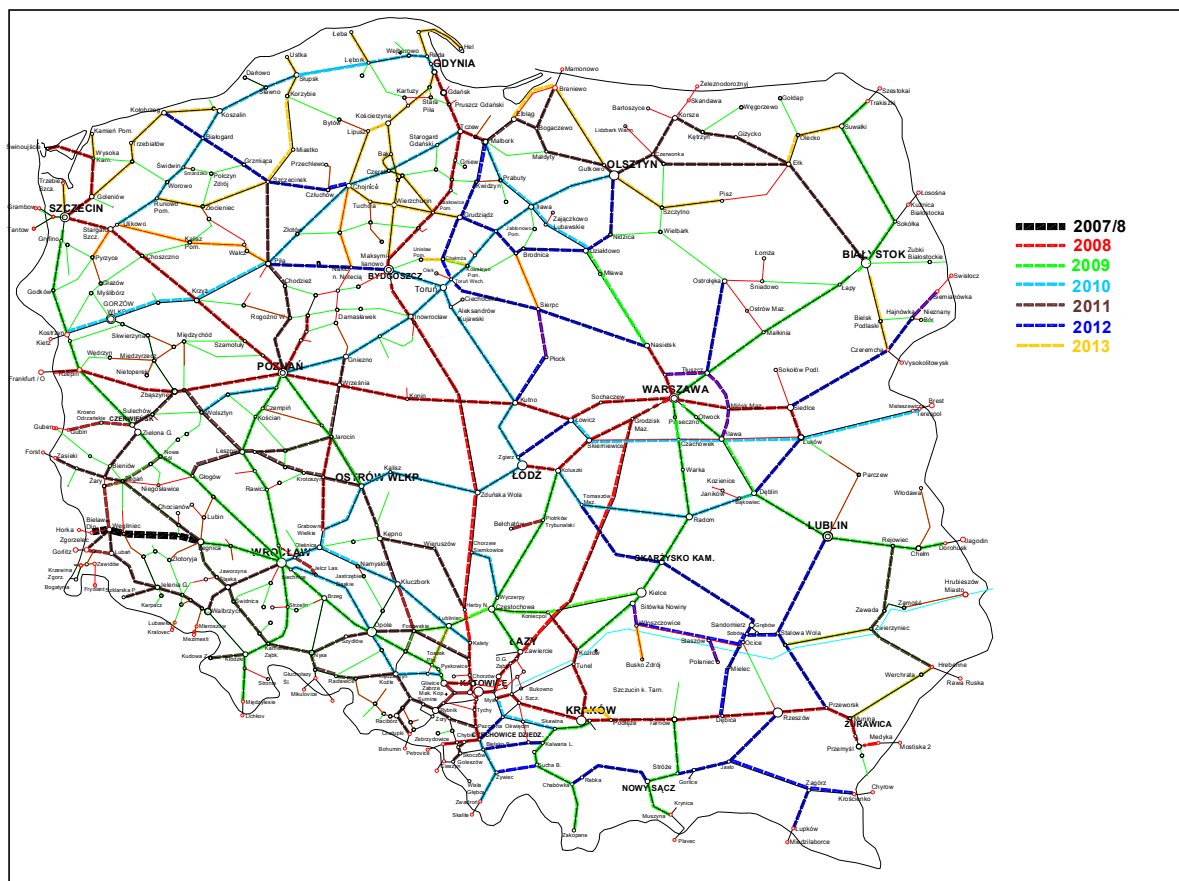


Fig. 1. GSM-R implementation plan year after year

The tender for the first common GSM-R and ETCS implementation will be organised in the first quarter of the year 2007. Common GSM-R and ETCS construction will take place at the turn of 2007 and 2008. It is expected,

that functional ETCS tests, including verification of Polish implementation requirements for that system, can take up to eighteen months.

Plans regarding equipping traction vehicles with GSM-R and ETCS

It is expected to equipping traction vehicles with on-board ETCS equipment and GSM-R equipment necessary for ensuring data transmission for ETCS level 2. On lines equipped with ETCS mixed traffic is foreseen (vehicles equipped and not equipped with ETCS). The scale of vehicles equipping will depend on many factors and decisions in that respect will

have to be undertaken by separate railway undertakings.

The first ERTMS implementation project on part of Corridor F (Legnica – PKP/DB border), in order to provide support for vehicles equipping, foresees equipping with GSM-R and ETCS five types of traction vehicles (EP09, EU07, ET22, SU46 and EN57, two vehicles of each type) and conduction of appropriate tests.

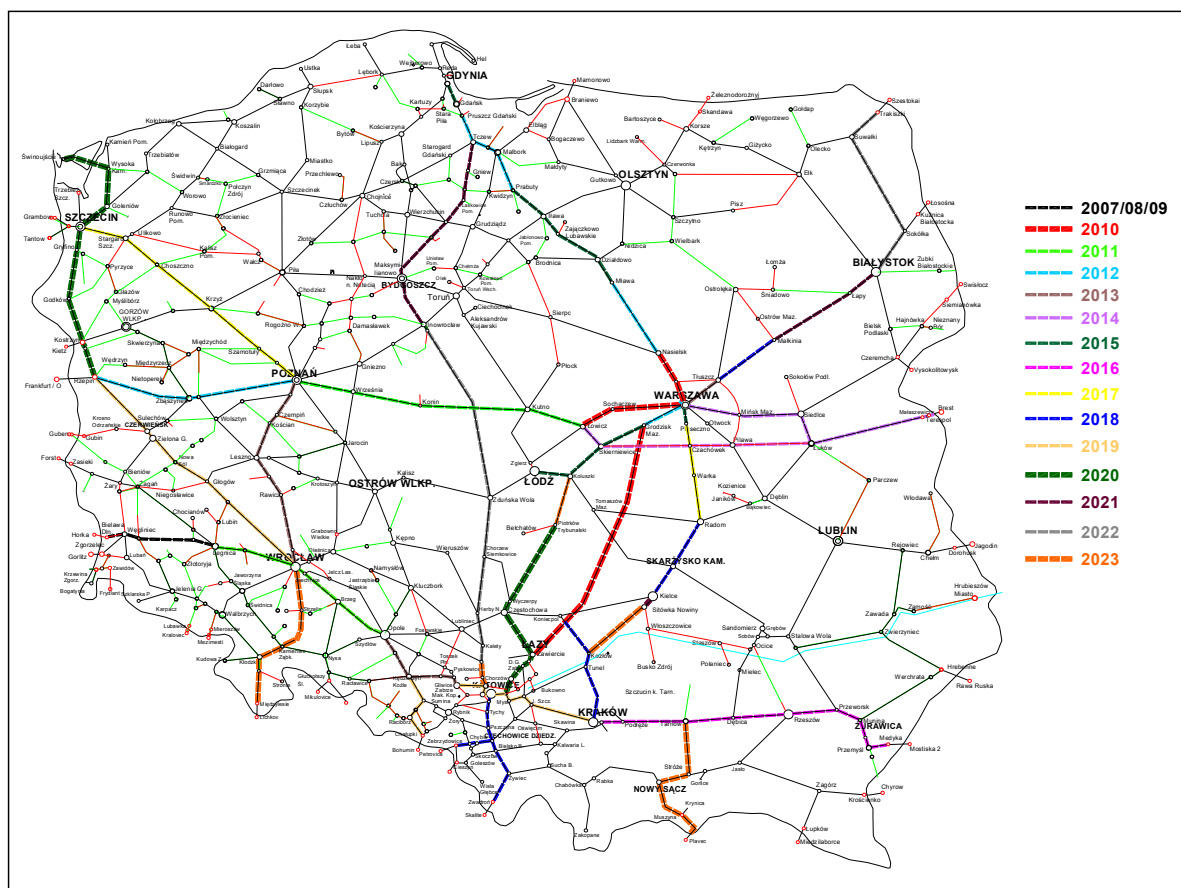


Fig. 2. ETCS implementation plan year after year

In order to support vehicles equipping it is also foreseen to consider further financing of equipping traction vehicles with ETCS within infrastructure projects as well as to differentiate access rates to lines equipped with ETCS level 2 for trains equipped and not equipped with ETCS level 2 equipment.

Not all existing traction vehicles could be and shall be equipped with on-board ETCS equipment. Some are too old. Those vehicles will be replaced by new ones and therefore it is important to adopt rules regarding ETCS in new traction vehicles.

New traction vehicles, for which negotiations and contracts are conducted and realised after approval of the “Polish National European Railway Traffic Management System Deployment Plan” would be ordered already equipped with ETCS level 2. The deviation from this rule is possible when a certain vehicle (e.g. rail-bus for local transport) is foreseen, in principle, to run on railway lines, which are not foreseen to be equipped with ETCS in the “Polish National ERTMS Deployment Plan”.

Additional requirements

For the implementation of GSM-R and ETCS it is necessary to define some requirements on a national level. Following requirements on one side ensure using the same solutions in different contracts in Poland, and on the other side ensure preserving European interoperability of the Polish GSM-R and ETCS implementations, as defined in this chapter. Polish GSM-R and ETCS implementation conditions do not go beyond functionalities defined in the European specifications of those systems.

Polish requirements for GSM-R implementation

For each railway line equipped with GSM-R as long as it is still equipped with 150 MHz radio system trackside devices must ensure, that:

- - when signal RADIOSTOP is generated by trackside equipment it is accompanied by automatically generated GSM-R alarm signal,
- - when signal RADIOSTOP is received by trackside equipment (e.g. signal generated by the driver) GSM-R alarm signal will be automatically generated,
- - when GSM-R alarm signal is generated by trackside equipment it is accompanied by automatically generated RADIOSTOP signal, and that
- - when GSM-R alarm signal is received by trackside equipment (e.g. signal generated by the driver or generated by worker moving along the tracks) a RADIOSTOP signal will be automatically generated.

An SHP STM module (covering receiving and proper interpretation of RADIOSTOP signal) has to ensure the proper interpretation of the RADIOSTOP signal by traction vehicles equipped with ETCS and SHP STM when they are running on lines equipped with SHP and 150 MHz radio and not equipped with GSM-R.

GSM-R dispatcher terminals, cab radios, and mobile terminals have to communicate with users in the Polish language. Used words and expressions will be agreed with the infrastructure manager during the first implementa-

tion on part of Corridor F (Legnica – PKP/DB border).

The possibility to transfer areas of responsibility (roles) between dispatchers must be ensured. Roles definitions and definition of possible configurations of their assignment to dispatchers will be defined by infrastructure manager. The role transfer has to be organised in the way which ensures that one and only one dispatcher is responsible for each area (role) at any moment.

Polish requirements for ETCS implementation

The level crossings of category A, B and C, equipped with autonomous protection systems (securing of the level crossing is not required to give movement authority) must be directly linked with ETCS. The information about approaching not-closed level crossing will be transferred in the ETCS language by temporary speed restriction to 20 km/h and a text message. Level crossing protection devices, for this purpose, could be linked with balises e.g. by connecting balise group (minimum two balises) to a level crossing distant signal or could be linked with Radio Block Centre. Temporary speed restriction could be cancelled if level crossing becomes closed.

ETCS system uses single balise groups and balise groups containing minimum two balises. Balise groups and single balise groups will be used depending on location. A group of minimum two balises must be used on entrance to the equipped line and exit from the equipped line. Such a group must be put also in the middle of the block section on an open line. Groupe of minimum two balises could be also connected to a level crossing distant signal. Single balise groups must be put on switches (at point of switch tongue and at fouling point on both tracks), by entrance signals, by exit signals, by station intermediate signals and by shunting limit signal.

NID_BG balise group number is assigned to each balise group, even single balise group. NID_BG numbers are assigned by the infrastructure manager.

Introducing temporary speed restrictions into ETCS system must be possible from RBC operator level as well as by installation on

track two movable balises. Such balises must be available in pairs as they are not linked with other balise groups by linking distances.

Driver interface (DMI) and RBC operator interface of the ETCS system have to communicate with users in the Polish language. Used words and expressions will be agreed with the infrastructure manager during the first implementation on part of Corridor F (Legnica – PKP/DB border). Expressions for the text messages pointed by variable Q_TEXT will also be agreed.

Preliminarily agreed values of the national variables could be changed after tests on part of corridor F (Legnica – PKP/DB border) foreseen within the first ERTMS implementation in Poland.

PKP signal aspects coding in ETCS language should be based on defining speed profiles based on data about block section occupancy as well as on operational data from station signals. At the same time data about the state of the station signals have to be taken directly from devices co-operating with certain signal (e.g. from light circuits of a certain signal), and not from aspect of the previous signal.

Interfaces between ETCS and signalling devices (which ensure source data for movement authorities) must fulfil SIL4 safety requirements.

References

1. A. Białoń, P. Gradowski, i inni ; Polish National European Railway Traffic Management System Deployment Plan. CNTK, Warszawa, 2007

Key words: management system, railway network, vehicles, implementation plans

Ключові слова: система управління, мережа залізниць, рухомий склад, плани виконання.

Ключевые слова: система управления, сеть железных дорог, подвижной состав, планы выполнения.

Received 29.11.2010

Accepted for publication 30.11.2010

О КАФЕДРЕ «АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ» ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АК. В. ЛАЗАРЯНА

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь» была основана в 1945 году. Первым заведующим кафедрой был доцент Рабинович Григорий Давидович. В 1947 году кафедру «Автоматика, телемеханика и связь» включили в состав кафедры «Станции и узлы» как лабораторию связи и железнодорожной автоматики. В 1978 году была начата подготовка студентов по специальности «Автоматика, телемеханика и связь». В марте 1980 года на базе лаборатории связи и железнодорожной автоматики кафедры «Станции и узлы» была образована выпускающая кафедра «Автоматика, телемеханика и связь».

С 1980 по 1995 год заведующим кафедрой работал доктор технических наук, профессор Разгонов Адам Пантелеевич, с 1995 и по нынешний день кафедру возглавляет доктор физико-математических наук, профессор Гаврилюк Владимир Ильич.

За тридцать два года работы кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» было подготовлено более 1000 специалистов железнодорожной автоматики, которые работают на всех железных дорогах Украины. Многие из выпускников занимают ключевые посты на сети железных дорог.

Преподаватели кафедры ведут активную изобретательскую работу. В период с 2005 по 2010 год включительно сотрудниками кафедры получено 42 патентов на изобретения. По результатам Конкурса на лучшие показатели в изобретательской работе 2010 года коллектив кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» занял первое место по университету.

Основными научными направлениями кафедры являются исследование электромагнитной совместимости устройств автоматики с современными видами подвижного состава и повышение безопасности систем железнодорожной автоматики путем совершенствования существующих и разработки новых, в том числе микропроцессорных устройств. По заказу «Укрзалізницы» выполняются научно-исследовательские работы в различных направлениях.

Аспирантам кафедры и преподавательскому составу редакция журнала желает творческих свершений!

Главный редактор, д.ф.-м.н., проф. Гаврилюк В. И.

АНОТАЦІЇ

УДК 656.25: 621.318.5

Буряк С. Ю. Математичне моделювання стрілочного електроприводу в середовищі Simulink пакету Matlab [Текст] / С. Ю. Буряк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 6-10.

Наведено спосіб математичного моделювання стрілочного електроприводу в системі MATLAB+Simulink.

Іл. – 8, список літ. – 7 назв.

УДК 656.259.1

Завгородній О. В., Гаврилюк В. І. Забезпечення функціональної безпеки рейкових кіл в умовах впливу електромагнітних завад від тягової мережі сусідньої колії на ділянках зі швидкісним рухом поїздів [Текст] / О. В. Завгородній, В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 11-15.

Запропоновано концепцію організації швидкісного руху на магістралях, що проходять по залізницях з різними родами тягового струму. Розроблено компенсуючий пристрій для зменшення індуктивних завад в рейковій ланці від тягової мережі.

Іл. – 3, список літ. – 13 назв.

УДК 656.259.1

Гончаров К. В. Підвищення функціональної безпеки пристроїв підрахунку осей рухомого складу [Текст] / К. В. Гончаров // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 16-22.

В роботі розглянуто фактори, які впливають на функціональну безпеку пристроїв підрахунку осей рухомого складу. Показана залежність між вірогідністю підрахунку осей та функціональною безпекою таких пристроїв. Для підвищення вірогідності підрахунку осей проведений синтез прийомного пристрою для виявлення вихідного сигналу електромагнітного диференціального датчика на фоні завад. Визначена імовірність помилки виявлення сигналу при використанні синтезованого приймача.

Іл. – 6, список літ. – 7 назв.

УДК 656.25

Рибалка Р. В., Маловічко В. В. Удосконалення безпеки сортувальних гірок [Текст] / Р. В. Рибалка, В. В. Маловічко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 23-31.

Пропонується удосконалити безпеку функціонування сортувальних гірок шляхом вирішення задачі контролю заповнення колій із застосуванням методу корекції спектрів.

Іл. – 10, табл. – 2, список літ. – 11 назв.

УДК: 656.25: 621.318

Разгонов А. П., Бондаренко Б. М., Профатилів В. І. Метод автоматизованого визначення контактного тиску реле залізничної автоматики [Текст] / А. П. Разгонов, Б. М. Бондаренко, В. І. Профатилів // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 31-36.

В даній статті запропоновано метод автоматизованого визначення контактного тиску реле залізничної автоматики. Метод ґрунтується на особливостях конструкції електромагнітних реле залізничної автоматики, в яких відпадання якоря здійснюється під дією власної ваги якоря. Даний метод дозволяє вирішити комплексну задачу автоматизації вимірю-

вання механічних параметрів електромагнітних реле залізничної автоматики без зняття кожуха відповідно до експлуатаційно-технічних вимог до реле першого класу надійності.

Іл. – 5, табл. – 1, список літ. – 6 назв.

УДК656.25

Романцев І. О. Визначення параметрів та критеріїв для системи автоматичного контролю станів тональних рейкових кіл [Текст] / І. О. Романцев // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 37-43.

На основі аналізу існуючих методів контролю тональних рельсових цепей проведено вибір параметрів і критеріїв для автоматизації контролю тональних рельсових цепей.

Іл. – 4, табл. – 2, список літ. – 5 назв.

УДК656.25: 621.318.5

Маловічко В. В., Гаврилюк В. І., Рибалка Р. В. Контроль та діагностування стрілочних переводів по часовій залежності струму переводу стрілки без виключення стрілочного переводу з експлуатації [Текст] / В. В. Маловічко, В. І. Гаврилюк, Р. В. Рибалка // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 43-49.

В роботі запропоновано можливість виявлення відмов стрілочних переводів по відповідних ознаках в кривій споживання струму двигуном в умовах експлуатації на залізничних станціях без перерви в роботі стрілок.

Іл. – 8, список літ. – 7 назв.

УДК 656.259.12

Дунаєв Д. В., Романцев І. О. Аналіз структури відмов і методів вимірювання параметрів рейкових кіл [Текст] / Д. В. Дунаєв, І. О. Романцев // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – Ном. 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 49-55.

В роботі проведений аналіз відмов і існуючих методів контролю стану рейкових кіл, методів вимірювання їх параметрів для подальшої розробки на цій основі методів та засобів автоматизованого контролю параметрів рейкових кіл.

Іл. – 1, список літ. – 6 назв.

УДК 629.42.05

Лагута В. В. Тягові розрахунки з використанням векторної оптимізації [Текст] / В. В. Лагута // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 55-62.

Задача оптимальних тягових розрахунків розглядається як задача про оптимальне розподілення ресурса. рішення засновано на динамічному програмуванні. використовується покрокове обчислення множини точок оптимальних по парето значень цільової функції (витрати енергії) і ресурса (час).

Іл. – 1, список літ. – 27 назв.

УДК 612.332.3:629.423

Міщенко Т. М. Метод імовірнісного аналізу випадкових електромагнітних процесів [Текст] / Т. М. Міщенко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 63-67.

Запропоновано метод імовірнісного аналізу випадкових електромагнітних процесів в електричних колах нелінійних динамічних електротехнічних систем. Завдяки методу, ви-

кладено розрахунки перехідних струмів в силових нелінійних колах першого українського електровоза ДЕ 1.

Іл. – 4, список літ. – 6 назв.

УДК 621.311

Гончаров Ю. П., Панасенко Н. В., Гаврилюк В. І., Сиченко В. Г. Принципи реалізації активної фільтрації при побудові сучасних систем електропостачання електричної тяги [Текст] / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 67-76.

Розглянуті принципи побудови активної фільтрації при впровадженні сучасних випрямлячів.

Іл. – 18, список літ. – 13 назв.

УДК 621.315.62

Сердюк Т. М., Швець А. В., Іванов В. К. Виділення імпульсних сигналів на фоні потужних завад від силових мереж [Текст] / Т. М. Сердюк, О. В. Швець, В. К. Іванов // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 77-83.

В роботі наведено методику компенсації потужних вузько смугових гармонік, які випромінюються потужними силовими мережами, для застосування в комп'ютеризованій системі визначення та реєстрації імпульсних сигналів, які пов'язані з частковими або коронними розрядами в ізоляторах ліній електропередач. Алгоритм компенсації полягає в визначенні точних значень частоти, фази та амплітуди завади за двома точками у комплексному спектрі сигналу поблизу частоти завади та формування сигналу компенсації, який віднімається з вхідного сигналу.

Іл. – 4, список літ. – 7 назв.

УДК 656.259.12

Щека В. І. Організація захисту рейкових кіл від електромагнітних завад з боку контактної мережі [Текст] / В. І. Щека // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 84-90.

В статті розглянуто побудову та принцип дії системи захисту рейкових кіл від електромагнітних завад. Проведена оцінка економічна ефективність системи та окреслено умови ефективності впровадження.

Іл. – 6, список літ. – 8 назв.

УДК 656.259.12

Бадьор М. П. Аналіз та синтез електромагнітної сумісності тягового електропостачання, систем управління та телекомунікацій [Текст] / М. П. Бадьор // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 91-96.

Розроблено математичний опис електромагнітних процесів в автономному інверторі напруги асинхронного тягового приводу. Модель дозволяє визначати і прогнозувати рівні гармонійних складових в перетворювачі та тяговій мережі.

Іл. – 2, список літ. – 5 назв.

УДК 621.331: 621.332

Завгородній О. В., Гаврилюк В. І. Методи розрахунку імпедансу ліній електрифікованих залізниць [Текст] / О. В. Завгородній, В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 96-101.

Проведено порівнювальний аналіз результатів розрахунків імпедансу рейкових ліній і контактного проводу в діапазоні частот до 105 Гц.

Іл. – 3, табл. – 1, список літ. – 11 назв.

УДК 621.311

Панасенко М. В., Гончаров Ю. П., Сиченко В. Г. Сучасні випрямлячі для модернізації тягових підстанцій при впровадженні швидкісного руху. [Текст] / М. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сиченко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 102-110.

Розглянуті питання побудови випрямляча з вольтододатком та проблеми його реалізації.

Іл. – 9, список літ. – 18 назв.

УДК 656.258.1

Бялонь А., Градовськи П. Польський Національний Європейський Системний План управління залізницями [Текст] / А. Бялонь, П. Градовськи // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2011. – С. 111-116.

В статті презентовано Польський національний Європейський Системний План управління залізницями та його реалізація на залізницях Польщі.

Іл. – 2, список літ. – 1 назв.

АННОТАЦИИ

УДК 656.25: 621.318.5

Буряк С. Ю. Математическое моделирование стрелочного электропривода в среде Simulink пакета Matlab [Текст] / С. Ю. Буряк // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 6-10.

Приведён способ математического моделирования стрелочного электропривода в системе MATLAB+Simulink

Ил. – 8, список лит. – 7 наим.

УДК 656.259.1

Завгородний А. В., Гаврилюк В. И. Обеспечение функциональной безопасности рельсовых цепей в условиях влияния электромагнитных помех от тяговой сети соседнего пути на участках со скоростным движением поездов [Текст] / А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 11-15.

Предложена концепция организации скоростного движения на магистралях железных дорог с различными родами тягового тока. Разработано компенсирующее устройство для уменьшения индуктивных помех в рельсовой линии от тяговой сети.

Ил. – 3, список лит. – 13 наим.

УДК 656.259.1

Гончаров К. В. Повышение функциональной безопасности устройств подсчета осей подвижного состава [Текст] / К. В. Гончаров // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 16-22.

В работе рассмотрены факторы, влияющие на функциональную безопасность устройств счета осей подвижного состава. Показана зависимость между достоверностью счета осей и функциональной безопасностью таких устройств. Для повышения достоверности счета осей проведен синтез приемного устройства для обнаружения выходного сигнала электромагнитного дифференциального датчика на фоне помех. Определена вероятность ошибки обнаружения сигнала при использовании синтезированного приемника.

Ил. – 6, список лит. – 7 наим.

УДК 656.25

Рыбалка Р. В., Маловичко В. В. Усовершенствование безопасности сортировочных горок [Текст] / Р. В. Рыбалка, В. В. Маловичко // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 23-31.

Предлагается усовершенствовать безопасность функционирования сортировочных горок путем решения задачи контроля заполнения путей с использованием метода коррекции спектров.

Ил. – 10, табл. – 2, список лит. – 11 наим.

УДК: 656.25: 621.318

Разгонов А. П., Бондаренко Б. М., Профатилов В. И. Метод автоматизированного определения контактного давления реле железнодорожной автоматики [Текст] / А. П. Разгонов, Б. М. Бондаренко, В. И. Профатилов // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 31-36.

В данной статье предложен метод автоматизированного определения контактного давления реле железнодорожной автоматики. Метод основывается на особенностях конструкции электромагнитных реле железнодорожной автоматики, в которых отпадание якоря осуществляется под действием собственного веса якоря. Данный метод позволяет решить комплексную задачу автоматизации измерения механических параметров электромагнитных реле железнодорожной автоматики без снятия кожуха в соответствии с эксплуатационно-техническими требованиями к реле первого класса надежности.

Ил. – 5, табл. – 1, список лит. – 6 наим.

УДК656.25

Романцев И. О. Определение параметров и критериев для системы автоматического контроля состояний тональных рельсовых цепей [Текст] / И. О. Романцев // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – с. 37-43.

На основе анализа существующих методов контроля тональных рельсовых цепей проведен выбор параметров и критериев для автоматизации контроля тональных рельсовых цепей

Ил. – 4, табл. – 2, список лит. – 5 наим.

УДК656.25: 621.318.5

Маловичко В. В., Гаврилюк В. И., Рыбалка Р. В. Контроль и диагностирование стрелочных переводов по часовой зависимости тока перевода стрелки без выключения стрелочного перевода из эксплуатации [Текст] / В. В. Маловичко, В. И. Гаврилюк, Р. В. Рыбалка // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1.– Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 43-49.

В работе предложена возможность выявления отказов стрелочных переводов по соответствующим признакам в кривой потребления тока двигателем в условиях эксплуатации на железнодорожных станциях без перерыва в работе стрелок.

Ил. – 8, список лит. – 7 наим.

УДК 656.259.12

Дунаев Д. В., Романцев И. О. Анализ структуры отказов и методов измерения параметров рельсовых цепей [Текст] / Д. В. Дунаев, И. О. Романцев // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 49-55.

В работе проведен анализ структуры отказов и существующих методов контроля состояния рельсовых цепей, методов измерения их параметров для разработки на этой основе методов и средств автоматизированного контроля параметров рельсовых цепей.

Ил. – 1, список лит. – 6 наим.

УДК 629.42.05

Лагута В. В. Тяговые расчеты с использованием векторной оптимизации. [Текст] / В. В. Лагута // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 55-62.

Задача оптимальных тяговых расчетов рассматривается как задача об оптимальном распределении ресурса. решение основывается на динамическом программировании. используется пошаговое вычисление множества точек оптимальных по парето значений целевой функции (затраты энергии) и ресурса (время).

Ил. – 1, список лит. – 27 наим.

УДК 612.332.3:629.423

Мищенко Т. Н. Метод вероятностного анализа случайных электромагнитных процессов [Текст] / Т. Н. Мищенко // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 63-67.

Предложен метод вероятностного анализа случайных электромагнитных процессов в электрических цепях нелинейных динамических электротехнических систем. Благодаря методу, изложены расчеты переходных токов в силовых нелинейных цепях первого украинского электровоза ДЭ 1.

Ил. – 4, список лит. – 6 наим.

УДК 621.311

Гончаров Ю. П., Панасенко Н. В., Гаврилюк В. И., Сыченко В. Г. Принципы реализации активной фильтрации при построении современных систем электроснабжения электрической тяги [Текст] / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. И. Гаврилюк, В. Г. Сыченко // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 67-76.

Рассмотрены принципы построения активной фильтрации при внедрении современных выпрямителей.

Ил. – 18, список лит. – 13 наим.

УДК 621.315.62

Сердюк Т. Н., Швец А. В., Иванов В. К. Выделение импульсных сигналов на фоне мощных помех от силовых сетей [Текст] / Т. Н. Сердюк, А. В. Швец, В. К. Иванов // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 77-83.

В работе представлена методика компенсации мощных узкополосных гармоник, излучаемых силовыми сетями, для применения в компьютеризованной системе обнаружения и регистрации импульсных сигналов, связанных с частичными или коронными разрядами в изоляторах линий электропередач. Алгоритм компенсации состоит в определении точных значений частоты, фазы и амплитуды помехи по двум отсчетам в комплексном спектре сигнала в окрестности частоты помехи, и формировании сигнала компенсации, который вычитается из исходного сигнала.

Ил. – 4, список лит. – 7 наим.

УДК 656.259.12

Щека В. И. Организация защиты рельсовых цепей от электромагнитных помех со стороны контактной сети [Текст] / В. И. Щека // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 84-90.

В статье рассмотрено построение и принцип действия системы защиты рельсовых цепей от электромагнитных помех. Проведена оценка экономической эффективности системы и описаны условия эффективности внедрения.

Ил. – 6, список лит. – 8 наим.

УДК 656.259.12

Бадер М. П. Анализ и синтез электромагнитной совместимости тягового электроснабжения, систем управления и телекоммуникаций [Текст] / М. П. Бадер // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 91-96.

Разработано математическое описание электромагнитных процессов в автономном инвертере напряжения асинхронного тягового привода. Модель позволяет определять и прогнозировать уровни гармонических составляющих в преобразователе и тяговой сети.

Ил. – 2, список лит. – 5 наим.

УДК 621.331: 621.332

Завгородний А. В., Гаврилюк В. И. Методы расчета импеданса линий электрифицированных железных дорог [Текст] / А. В. Завгородний, В. И. Гаврилюк // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 96-101.

Проведен сравнительный анализ результатов расчетов импеданса рельсовых линий и контактного провода в диапазоне частот до 105 Гц.

Ил. – 3, табл. – 1, список лит. – 11 наим.

УДК 621.311

Панасенко М. В., Гончаров Ю. П., Сыченко В. Г. Современные выпрямители для модернизации тяговых подстанций при введении скоростного движения. [Текст] / М. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 102-110.

Рассмотрены вопросы построения выпрямителя с вольтодобавком и проблемы его реализации.

Ил. – 9, список лит. – 18 наим.

УДК 656.259.1

Бялонь А., Градовски П. Польский Национальный Европейский Системный План управления железными дорогами [Текст] / А. Бялонь, П. Градовски // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. – 2011. – № 1. – Д.: Изд-во ДНУЖТ, 2011. – С. 111-116.

В статье представлен Польский Национальный Европейский Системный План управления железными дорогами и его реализация на железных дорогах Польши.

Ил. – 2, список лит. – 1 наим.

ANNOTATIONS

UDC 656.25: 621.318.5

Buryak S. U. The mathematical modeling of switch operating apparatus in the system Matlab+Simulink. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 6-10.

Method of mathematical modeling of pointwork in the system MATLAB+Simulink is presented.

Ill. – 8, ref. – 7 names.

UDC 621.331: 621.332

Zavgorodniy A. V., Gavrylyuk V. I. The ensuring of railway circuit functional safety in electromagnetic hindrances influence from neighbouring track traction network on railways' highways with high-speed movement. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 11 – 15.

The concept of the organization of high-speed movement on highways of railways with various sorts of a traction current is offered. The compensating device for reduction of inductive handicapes in a rail line from a traction network is developed.

Ill. – 3, ref. – 13 names.

UDC 656.259.1

Goncharov K. V. The increasing of functional safety device count of the axes of the rolling stock. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 16– 22.

In work the factors, influencing upon functional safety device count of the axes of the rolling stock are considered. Dependency between validity of the count of the axes and functional safety such device is shown. For increasing of validity of the count of the axes for finding the output signal of the electromagnetic differential sensor on background of the hindrances the syntheses receiving device is organized. The probability of the mistake of the finding the signal when use the synthesized receiver is defined.

Ill. – 6, ref. – 7 names.

UDC 656.25

Rybalka R. V., Malovichko V. V. Hump yards safety improvement. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 23 – 31.

Hump yards functioning safety increase by track occupancy control task solution with spectrums correction method use is offered.

Ill. – 10, the table – 2, ref. – 11 names.

UDC 656.25: 621.318

Razgonov A. P., Bondarenko B. M., Profatilov V. I. The method of the automated definition of contact pressure of railway automation relay. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 31 – 36.

In the given article a method is offered of the automated definition of contact pressure of railway automation relay. A method is based on the features of construction of electromagnetic railway automation relays, in which falling off of anchor is carried out under action of own anchor weight. The given method allows deciding a complex task of measuring automation of mechanical parameters of electromagnetic railway automation relays without the removal of casing in accordance with the operating-technical requirements to the first class reliability relay.

Ill. – 5, the table – 1, ref. – 6 names.

UDC 656.25

Romantsev I. O. The determination of parameters and options for the system of tonal frequency railway circuit automatization control // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 37 – 43.

Based on analysis of existing methods of tonal frequency railway circuit control, the choice of parameters and options for control automatization of tonal frequency railway circuit is produced.

Ill. – 4, the table – 2, ref. – 5 names.

UDC 656.25: 621.318.5

Malovichko V. V., Gavrylyuk V. I., Rybalka R. V. The monitoring and diagnostics of switch operating apparatus by the time dependence of point operation current without switching off the switch operating apparatus. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 43 – 49.

On the basis of the analysis of provided measurements results of time dependences and spectral structure of a switch transfer current with direct current machines at their serviceable condition, and also at various defects, the form of a curve and to a spectrum of a current depending on a technical condition of the machines are determined.

Ill. – 8, ref. – 7 names.

UDC 656.259.12

Dunaev D. V., Romantsev I. O. The analysis of failures' structure and methods of track circuit measurements. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 49 – 55.

In this article the analyses of refusal and existing methods of control of railway circuit and of measure parameters railway circuit is produced for development on this base the methods and devises of automatic control of parameters of railway circuit.

Ill. – 1, ref. – 6 names.

UDC 629.42.05

Laguta V. V. Traction calculations by vector optimization. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 55 – 62.

The problem of optimum traction calculations is considered as a problem about optimum distribution of a resource. The decision is based on dynamic programming. Step-by-step calculation of set of points optimum on Pareto values of criterion function (an expense of energy) and a resource (time) is used.

Ill. – 1, ref. – 27 names

UDC 612.332.3:629.423

Mishchenko T. M. The method of probabilistic analysis of casual electromagnetic processes. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 63 – 67.

The method of probabilistic analysis of casual electromagnetic processes is offered in the electric chains of the nonlinear dynamic electrical engineerings systems. Due to a method, the calculations of transitional currents are expounded in the power nonlinear circuits of the first Ukrainian electric locomotive of DE 1.

Ill. – 4, ref. – 6 names.

UDC 621.311

Goncharov U. P., Panasenko M. V., Gavrylyuk V. I., Sychenko V. G. The active filtration principles at the modern systems of power supply of electric traction construction. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1 – P. 67 – 76.

The active filtration principle with implementation of modern rectifier has been considered. Ill. – 18, ref. – 13 names.

UDC 621.315.62

Serdjuk T. M., Shvets A. V., Ivanov V. K. The assignment of pulse emissions against a background of powerful hindrance from power mains. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 77 – 83.

A compensation technique for rejection of powerful narrow-band harmonics radiated by power mains is developed for application in computer system of detection and registration of pulse emissions radiated by partial or crown discharges in isolators of high-voltage power lines. The compensation algorithm for rejection of narrow-band interferences consists in calculation of exact values of frequency, phase and amplitude of the mains' harmonics by two points in a complex spectrum of the signal near the frequency of the interference, and formation of a compensation signal, which is subtracted from an initial signal.

Ill. – 4, ref. – 7 names.

UDC 656.259.12

Shcheka V. I. Track circuit protection from contact net electromagnetic hindrances // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 84 – 90.

The construction and action of track circuit protection system from electromagnetic hindrances have been considered in article. The system's cost efficiency has been defined and the conditions of effectiveness applying have been described.

Ill. – 6, ref. – 8 names.

UDC 656.259.12

Badyor M. P. The analysis and synthesis of electromagnetic compatibility of traction power supply, control systems and telecommunication. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 91 – 96.

The mathematical description of electromagnetic process in voltage autonomous inverter of asynchronous propulsion drive has been designed. The model allows defining and forecasting harmonic components levels in converter and traction network.

Ill. – 2, the list of lit. – 5 names.

UDC 621.331: 621.332

Zavgorodniy A. V., Gavrylyuk V. I. The methods of catenary wire and railway lines impedance calculation of electrified railways. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 96 – 101.

The comparative analysis of calculations of the railway lines and catenary wire impedance in frequency range till 105 Hz were carried out.

Ill. – 3, the table – 1, ref. – 11 names.

UDC 621.311

Panasenko M. V., Goncharov U. P., Sychenko V. G. The modern rectifiers for traction substation modernization in introduction of high-speed movement. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 102 – 110.

The construction and implementation of rectifier with add voltage have been considered.

Ill. – 9, ref. – 18 names.

UDC 656.259.1

Bialon A., Gradowski P. Polish National European Railway Traffic Management System Plan. // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. – Dnipropetrovs'k: DNURT, 2011. – No. 1. – P. 111 – 116.

The paper presents European Railway Traffic Management System (GSM-R and ETCS) national implementation plan at Poland.

Ill. – 2, ref. – 1 name.

**НАУКОВО – ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНА
СУМІСНІСТЬ
ТА БЕЗПЕКА НА
ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

**SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL
ELECTROMAGNETIC
COMPATIBILITY
AND SAFETY ON
RAILWAY TRANSPORT**

Свідоцтво про державну реєстрацію № 17326 – 6096Р від 14.10.2010

*Передрук матеріалів здійснюється тільки за дозволу редакції
Члени редакційної колегії журналу здійснюють рецензування статей
Статті друкуються мовою оригіналу
Редакція не обов'язково поділяє думку автора і не відповідає за фактичні помилки, яких він припустився*

*Редактор: Гаврилюк В. І.
Комп'ютерна верстка: Ящук К. І.*

*Поштова адреса: кафедра «Автоматика, телемеханіка та зв'язок»,
вул. Лазаряна, 2, ДНУЗТ,
49010, м. Дніпропетровськ,
Тел.: (056)373-15-04,
E-mail: VL.Gavrilyuk@gmail.com*

*Ум.-друк. арк. 13,94. Зам №
Наклад 300 пр.*

*Надруковано у видавництві Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003.

Адреса видавництва:

Вул.. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ-10, 49010, Україна

Тел.: +38(0562)33-58-96, факс: +38(0562)33-58-97

<http://www/diitrvv.dp.ua>

© Журнал «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті»

