

**Дніпровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна**

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ТА
БЕЗПЕКА НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

Науковий журнал

№ 18, 2019

Виходить 2 рази на рік
Заснований у лютому 2011 р.

Дніпро
2019

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ТА
БЕЗПЕКА НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Засновник:
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пшінько О. М., доктор технічних наук, проф.
Гаврилюк В. І., доктор фізико-математичних наук,
проф.

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Сердюк Т. М., кандидат технічних наук, доц.
Рибалка Р. В., кандидат технічних наук, доц.

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ (УКРАЇНА):

Бабаєв М. М. – д.т.н., проф., Українська державна академія залізничного транспорту (УкрДАЗТ);
Бойнік А. Б. – д.т.н., проф., УкрДАЗТ; Гетьман Г. К. – д.т.н., проф., Дніпропетровський національний
університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ); Дубинець Л. В. – д.т.н., проф.,
ДНУЗТ; Жуковицький І. В. – д.т.н., проф., ДНУЗТ; Заблудовський В. О. – д.т.н., проф., ДНУЗТ;
Костін М. О. – д.т.н., проф., ДНУЗТ; Саєнко Ю. Л. – д.т.н., проф., Приазовський державний технічний
університет; Стасюк О. І. – д.т.н., проф., Державний економіко-технологічний університет транспорту;
Сиченко В. Г. – д.т.н., проф., ДНУЗТ; Чепцов М. М. – д.т.н., проф., Донецький інститут залізничного
транспорту Української державної академії залізничного транспорту; Профатилів В. І. – к.т.н., доц., ДНУЗТ.

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Бадьор М. П. – д.т.н., проф., Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація;
Бочков К. А. – д.т.н., проф., Білоруський державний університет транспорту, Республіка Білорусь;
Бялонь А. – к.т.н., Науково-технічний центр залізничного транспорту, Республіка Польща; Загарій Г. І. –
д.т.н., проф., Федеративна Республіка Німеччина; Микульський Є. – д.т.н., проф., Силезький технологічний
університет, Республіка Польща.

Журнал зареєстровано

Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України.
Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
серія КВ № 17326–6096Р від 14.10.2010 р.

Внесено

до Переліку наукових фахових видань України (затверджено наказом
Міністерства освіти і науки України № 241 від 09.03.2016 р.).

Наукометричні показники:

Index Copernicus (Poland) – ICSV 2019: 68,76.

Друкується за рішенням вченої ради університету від 23.12.2019 р., протокол № 5

Видавець

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені
академіка В. Лазаряна (м. Дніпро).
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Адреса засновника
та редакції

вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010
тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: serducheckt@gmail.com
сайт журналу: <http://ecsrt.diit.edu.ua/>

Видання публікується з 2011 р.

**Днепро́вский национальный университет железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И
БЕЗОПАСНОСТЬ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ
ТРАНСПОРТЕ**

Научный журнал

№ 18, 2019

Выходит 2 раза в год
Основан в феврале 2011 г.

Днепр
2019

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И
БЕЗОПАСНОСТЬ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

Учредитель:
ДНЕПРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА Пшинько А. Н., доктор технических наук, проф.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Гаврилюк В. И., доктор физико-математических наук, проф.

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Сердюк Т. Н., кандидат технических наук, доц.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Рыбалка Р. В., кандидат технических наук, доц.

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ (УКРАИНА):

Бабаев М. М. – д.т.н., проф., Украинская государственная академия железнодорожного транспорта (УкрГАЖТ); Бойник А. Б. – д.т.н., проф., УкрГАЖТ; Гетьман Г. К. – д.т.н., проф., Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (ДНУЖТ); Дубинец Л. В. – д.т.н., проф., ДНУЖТ; Жуковицкий І. В. – д.т.н., проф., ДНУЖТ; Заблудовский В. А. – д.т.н., проф., ДНУЖТ; Костин Н. А. – д.т.н., проф., ДНУЖТ; Саенко Ю. Л. – д.т.н., проф., Приазовский государственный технический университет; Стасюк А. И. – д.т.н., проф., Государственный экономико-технологический университет транспорта; Сыченко В. Г. – д.т.н., проф., ДНУЖТ; Чепцов М. Н. – д.т.н., проф., Донецкий институт железнодорожного транспорта Украинской государственной академии железнодорожного транспорта; Профатилов В. И. – к.т.н., доц., ДНУЖТ.

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Бадёр М. П. – д.т.н., проф., Московский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация; Бочков К. А. – д.т.н., проф., Белорусский государственный университет транспорта, Республика Беларусь; Бялонь А. – к.т.н., Научно-технический центр железнодорожного транспорта, Республика Польша; Загарий Г. И. – д.т.н., проф., Федеративная Республика Германия; Микульский Е. – д.т.н., проф., Силезский технологический университет, Республика Польша.

Журнал зарегистрирован Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины. Свидетельство о государственной регистрации печатного средства массовой информации серия КВ № 17326–6096Р от 14.10.2010 г.

Внесен в Перечень научных специализированных изданий Украины (утверждено приказом Министерства образования и науки Украины № 241 от 09.03.2016 г.).

Научометрические показатели: Index Copernicus (Poland) – IСV 2019: 68,76.

Печатается по решению ученого совета университета от 23.12.2019 г., протокол № 5

Издатель Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (г. Днепр).
Свидетельство субъекта издательского дела ДК № 1315 от 31.03.2003 г.

Адрес учредителя и редакции ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010
тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: serducheckt@gmail.com
сайт журнала: <http://ecsrt.diit.edu.ua/>

Издание публикуется с 2011 г.

**Dnipro National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan**

**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AND
SAFETY ON RAILWAY TRANSPORT**

Scientific journal

No. 18, 2019

Published two times a year
Founded in February 2011

Dnipro
2019

SCIENTIFIC JOURNAL

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY AND
SAFETY ON RAILWAY TRANSPORT

Founder:

DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT
NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN

CHAIRPERSON OF THE EDITORIAL BOARD OF THE UNIVERSITY
EDITOR-IN-CHIEF Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences, prof.

DEPUTY CHIEF EDITOR

Havryliuk V. I., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Prof.

Serdiuk T. M., Candidate of Technical Sciences, Associate Prof.

EXECUTIVE SECRETARY

Rybalka R. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Prof.

EDITORIAL BOARD MEMBERS (UKRAINE):

Babaiev M. M. – Doctor of Technical Sciences, Prof., Ukrainian State Academy of Railway Transport (UkrSART);
Boynyk A. B. – Doctor of Technical Sciences, Prof., UkrSART; Getman H. K. – Doctor of Technical Sciences,
Prof., Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT);
Dubinets L. V. – Doctor of Technical Sciences, Prof., DNURT; Zhukovytsky I. V. – Doctor of Technical Sciences,
Prof., DNURT; Zabludovskyi V. O. – Doctor of Technical Sciences, Prof., DNURT; Kostin M. O. – Doctor of
Technical Sciences, Prof., DNURT; Sayenko Yu. L. – Doctor of Technical Sciences, Prof., Pryazovskyi State
Technical University; Stasiuk O. I. – Doctor of Technical Sciences, Prof., State Economic and Technological
University of Transport; Sichenko V. H. – Doctor of Technical Sciences, Prof., DNURT; Cheptsov M. M. – Doctor
of Technical Sciences, Prof., Donetsk Railway Transport Institute of Ukrainian State Academy of Railway
Transport; Profatylov V. I. – Candidate of Technical Sciences, Associate Prof., DNURT.

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

Badyor M. P. – Doctor of Technical Sciences, Prof., Moscow State University of Railway Engineering, Russian
Federation; Bochkov K. A. – Doctor of Technical Sciences, Prof., Belorussian State University of Transport,
Republic of Belarus; Byalon A. – Candidate of Technical Science, Science and Technology Centre of Railway
Transport, Republic of Poland; Zagarii H. I. – Doctor of Technical Sciences, Prof., Federal Republic of Germany;
Mikulski J. – Doctor of Technical Sciences, Prof., Silesian University of Technology, Republic of Poland.

Journal was registered by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine.
Certificate of the State Registration of Print Media Series KV No. 17326–6096P
from 14.10.2010

It was included in the list of scientific professional publications of Ukraine (by the Order of the
Ministry of Education and Science of Ukraine No 241 09.03.2016).

Scientometric indicators: Index Copernicus (Poland) – ICV 2019: 68,76.

Published according to the decision of Academic Council of the University from 23.12.2019, Protocol No. 5

Publisher Dnipro National University of Railway Transport named after Academician
V. Lazaryan (Dnipro)
Certificate of Publisher DK No. 1315 from 31.03.2003

Address of Founder and Editorial Office St. Lazaryana, 2, Dnipro, Ukraine, 49010
tel.: +38 (056) 371-51-05, e-mail: serducheckt@gmail.com
journal site: <http://ecsrt.diit.edu.ua/>

Edition is being published since 2011

ЗМІСТ**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ НА
ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

<i>В. І. Гаврилюк</i> Моделювання впливу гармонійних завад на приймач тонального рейкового кола.....	11
<i>Х. Тагізаде Ансарі, Т. М. Сердюк, І. Мисів</i> Вплив електромагнітних завад на тягову мережу: математична модель тягової мережі	20
<i>О. В. Горпинич, О. С. Голубятни</i> Застосування суперконденсаторів для підвищення якості електроенергії в електричних мережах з розподіленою генерацією.....	26
<i>Д. С. Білухін</i> Збереження угруповань тягових двигунів при імпульсному регулюванні напруги	39
<i>О. С. Шаповалов, О. П. Карасьов</i> Випробування асинхронних трифазних двигунів	46
<i>М. М. Кедря, Т. М. Сердюк, М. Л. Кумпан, К. М. Сердюк</i> Лінеаризування математичної моделі тягового електроприводу постійного струму	51
<i>Р.В. Ботнаревская, Т. М. Сердюк</i> Аналіз роботи систем залізничного зв'язку.....	59

БЕЗПЕКА НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

<i>О. О. Гололобова, С. Ю. Буряк, В. І. Гаврилюк</i> Аналіз статистики відмов та збоїв у роботі автоматичної локомотивної сигналізації.....	66
<i>К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка</i> Комплексна система автоматичної ідентифікації рухомого складу.....	75
<i>Мохаммад Аль Саїд Ахмад, Д. В. Устименко</i> Сучасні підходи до діагностики струмоприймачів електрорухомого складу	83
<i>В. В. Лагута, Ю. Г. Козік</i> Визначення періодів відновлення корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А за спостереженнями зворотної напруги.....	89
<i>К. В. Гончаров, Н. А. Нагорна</i> Застосування штучних нейронних мереж для визначення лінійної координати поїзда.....	97
АНОТАЦІЇ.....	104

СОДЕРЖАНИЕ**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ НА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

<i>В. И. Гаврилюк</i> Моделирование воздействия гармонических помех на приемник тональных рельсовых цепей.....	11
<i>Х. Тагизаде Ансари, Т. Н. Сердюк, И. Мысив</i> Влияние электромагнитных помех на тяговую сеть: математическая модель тяговой сети	20
<i>А. В. Горпинич, А. С. Голубятник</i> Применение суперконденсаторов для повышения качества электроэнергии в электрических сетях с распределённой генерацией.....	26
<i>Д. С. Белухин</i> Сохранение группировок тяговых двигателей при импульсном регулировании напряжения.....	39
<i>А. С. Шаповалов, А. П. Карасев</i> Испытания асинхронных трехфазных двигателей	46
<i>М. М. Кедря, Т. Н. Сердюк, М. Л. Кумпан, К. Н. Сердюк</i> Линеаризация математической модели тягового электропривода постоянного тока.....	51
<i>Р. В. Ботнаревская, Т. Н. Сердюк</i> Анализ работы систем железнодорожной связи	59

БЕЗОПАСНОСТЬ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

<i>О. А. Гололобова, С. Ю. Буряк, В. И. Гаврилюк</i> Анализ статистики отказов и сбоев в работе автоматической локомотивной сигнализации.....	66
<i>К. В. Гончаров, Р. В. Рыбалка</i> Комплексная система автоматической идентификации подвижного состава.....	75
<i>Мохаммад Аль Саид Ахмад, Д. В. Устименко</i> Современные подходы к диагностике токоприемников электроподвижного состава.....	83
<i>В. В. Лагута, Ю. Г. Козик</i> Определение периодов восстановления корпусной изоляции ТЭД ЭД 118А по наблюдениям возвратного напряжения	89
<i>К. В. Гончаров, Н. А. Нагорная</i> Применение искусственных нейронных сетей для определения линейной координаты поезда	97
АННОТАЦИИ.....	104

CONTENT**ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY
ON RAILWAY TRANSPORT**

<i>V. Havryliuk</i> Simulation of the influence of harmonic interference on the tonal track circuits receiver	11
<i>H. Taghizade Ansari, T. Serdiuk, I. Mysiv</i> Impact of electromagnetic interferences on traction network: mathematical model of traction network	20
<i>A. Gorpnich, A. Golubyatnik</i> Application of supercapacitors to improve power quality in the electrical networks with distributed generation	26
<i>D. Belukhin</i> Preservation of traction motor groups with pulse voltage regulation	39
<i>O. Shapovalov, O. Karasyov</i> Testing of asynchronous three-phase motors	46
<i>M. Kedria, T. Serdiuk, M. Kumpan, K. Serdiuk</i> Linearization of the mathematical model of a traction electric motor of direct current	51
<i>R. Botnarevscaia; T. Serdiuk</i> Analysis of operation of railway communication systems	59

SAFETY ON RAILWAY TRANSPORT

<i>O. Hololobova, S. Buriak, V. Havriliuk</i> Analysis of the statistics of malfunctions and failures in the operation of automatic locomotive signaling	66
<i>K. Honcharov., R. Rybalka</i> Integrated system for automatic identification of rolling stock	75
<i>Mohammad Al Said Ahmad, D. Ustymenko</i> Modern approaches to the diagnosis of current collectors of electric rolling stock	83
<i>V. Laguta, Yu. Kozik</i> Determination of recovery periods for frame insulation of a TM ED 118A from observations of return voltage	89
<i>K. Honcharov, N. Nahorna</i> Application of artificial neural networks to determine the linear coordinate of a train	97
ABSTRACTS	104

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ON RAILWAY TRANSPORT

УДК 621.317

В.І. ГАВРИЛЮК – д.ф.-м.н., професор, зав. кафедри «Автоматика та телекомунікації»,
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка
В. Лазаряна, vl.havryliuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9954-4478

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ГАРМОНІЙНИХ ЗАВАД НА ПРИЙМАЧ ТОНАЛЬНОГО РЕЙКОВОГО КОЛА

1. Вступ

Дослідження впливу електричних завад від тягових підстанцій і електричного рухомого складу (ЕРС) на рейкові кола (РК) та методи захисту РК від завад описані в багатьох фундаментальних роботах [1-5]. Існуючі публікації з електромагнітної сумісності (ЕМС) системи тягового електропостачання з рейковими колами розглядають майже всі аспекти цієї проблеми [1-9]. Граничні рівні завад в рейковій лінії від ЕРС наведені у нормативах [10-12].

Підвищення швидкості руху поїздів та впровадження нових типів ЕРС з асинхронним тяговим приводом (АТП) та імпульсним регулюванням сприяли поновленню інтересу до електромагнітної сумісності рухомого складу з системами сигналізації та зв'язку внаслідок генерації новим типом рухомого складу неканонічних гармонійних завад у широкому діапазоні частот, що можуть попадати смугу пропускання захисних фільтрів РК [6, 9].

З урахуванням великої кількості різних типів рейкових кіл, а також особливостей умов їх експлуатації, нормами [10] пропонується доповнювати вимірювання завад від рухомого складу проведенням моделювання їх розповсюдження в тяговій мережі та аналізом їх впливу на колійні приймачі рейкових кіл.

Таким чином розробка комп'ютерних моделей, що дозволяють визначити параметри струму на вході колійного приймача РК в залежності від кількості, розташування, режимів роботи джерел електромагнітних завад (ЕМЗ) по довжині фідерної зони, осо-

бливостей каналізації зворотного тягового струму в рейках, параметрів передачі сигналу РК, впливу дестабілізуючих та інших факторів має практичну значимість.

Нормування допустимого рівня впливу гармонік тягового струму від електровозу на колійний приймач безстиківкового РК необхідно провадити з урахуванням перерахованих факторів [7-9].

Нові типи рухомого складу експлуатуються на дільницях одночасно із застарілими типами електровозів, до того ж різні дільниці можуть бути обладнані різними типами рейкових кіл, що також ускладнює задачу визначення можливих збоїв в роботі рейкових кіл і локомотивної сигналізації.

Розробка та застосування моделей розповсюдження завад в рейковій лінії і їх впливу на колійні приймачі РК може бути використано на етапі розробки та проектування нових систем електрорухомого складу та систем сигналізації і зв'язку.

Дослідження завадостійкості колійних приймачів тональних рейкових кіл (ТРК) шляхом подавання у фізичну модель рейкових кіл сигнального струму ТРК і електричних завад, що були синтезовані комп'ютерною програмою або тягового струму, що був зареєстрований в процесі випробувань нових типів рухомого складу, описані [7-9]. В результаті досліджень отримано значення допустимого рівня гармонійних завад для колійних приймачів, які випробувалися в роботі, а саме ПП1–8/8 і ПП1–8/12 на рівні -12 дБ, а для ПП1–9/8 на рівні -17 дБ, тобто 0,42 мА [8].

Нормативне граничне значення струму на вході колійного приймача ТРК типу ПП1

в нормальному режимі визначено на рівні 0,55 мА шляхом множення нормативного значення струму в рейковій лінії (0,35 мА) на коефіцієнт передачі апаратури релейного кінця ТРК, що дорівнює $0,12 \cdot 0,5/38 = 1,58 \cdot 10^{-3}$ [8, 9]. Така оцінка є обґрунтованою для максимально допустимого рівня гармонійних завад на вході колійного приймача в нормальному режимі при найбільш несприятливих умовах, а саме для максимального коефіцієнту передачі сигналу в апаратурі релейного кінця.

Для аналізу впливу завад в конкретній рейковій лінії необхідно розраховувати коефіцієнт передачі апаратури релейного кінця РК з урахуванням параметрів рейкового кола.

Для забезпечення електромагнітної сумісності ТРК з тяговим струмом при максимальній розрахунковій кількості поїздів в фідерній зоні, що допускається за ДСТУ, і при рівні гармонік від кожного електровозу 0,35 А, завадостійкість приймача ТРК в нормальному режимі, а саме, максимальний струм завади, що не приводить до збоїв в роботі ТРК, має бути не менше 0,7 мА [9].

Завадостійкість ТРК в шунтовому і контрольному режимах роботи дорівнює 0,4 мА при $K_{вн} = 0,58$ і 0,83 мА при $K_{вн}=0,483$ [7, 9].

З наведеного короткого літературного огляду видно, що вплив електричних завад в зворотній тяговій мережі на рейкові кола достатньо повно досліджено в літературі. Також достатньо повно досліджено вплив імпульсних і гармонійних завад на режими роботи тональних рейкових кіл.

Але незважаючи на те, що різні аспекти проблеми ЕМС тягового електропостачання з рейковими колами широко досліджено, задача розробки математичної і комп'ютерної моделі розповсюдження електромагнітних завад в рейковій лінії від ЕРС до колійного приймача і їх впливу на колійний приймач тональних рейкових кіл, що враховує тип і конкретні параметри РК, схему каналізації тягового струму, коефіцієнт

асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту, координати ЕРС, спектральний склад зворотного тягового струму, зареєстрований при випробуваннях ЕРС, відстань між тяговими підстанціями, від підстанцій до колійного приймача і інші параметри, в прямій постановці в літературі не описано.

Основою комп'ютерної моделі є узагальнення теоретичних і експериментальних досліджень, наведених в [1-6], а також дослідження, що були проведені авторами роботи [13-17]. Комп'ютерна модель була використана при випробуваннях нових типів електропоїздів з асинхронним тяговим приводом [16]. Оскільки для нових типів рухомого складу характерним є генерація гармонійних завад, в роботі розглянуто вплив на колійний приймач тональних рейкових кіл гармонійних завад.

2. Мета роботи

Метою роботи є розробка математичної та комп'ютерної моделі розповсюдження електромагнітних завад в рейковій лінії від електрорухомого складу до колійного приймача і їх впливу на колійний приймач тональних рейкових кіл, що враховує тип і конкретні параметри рейкового кола, схему каналізації тягового струму, коефіцієнт асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту, координати рухомого складу, спектральний склад зворотного тягового струму.

Вплив гармонійних електричних завад на колійний приймач тонального рейкового кола проілюстровано шляхом знаходження сумарного струму на вході приймача як суму сигнального струму для нормального, шунтового і контрольного режиму роботи в найбільш несприятливих для цих режимів роботи умовах і максимально допустимого струму завад.

3. Модель розповсюдження завад в рейковому колі

Загальна еквівалентна схема рейкового кола може бути представлена у вигляді

трьох з'єднаних чотириполюсників Н, К та РК, що відповідають апаратурі живлячого і релейного кінця РК, а також рейковій лінії (рис. 1) [1]. До вхідних і вихідних виводів чотириполюсника РЛ під'єднані елементи, що відповідають імпедансам суміжних рейкових ліній для безстиківих РК. Схема заміщення і коефіцієнти передачі РЛ суттєво змінюються в залежності від режиму роботи (нормальний, шунтовий, контрольний), а також внаслідок зміни поперечної провідності (імпедансу) ізоляції баласту ($Var(Y_i)$) і повздожньому опорі рейкових ліній ($Var(Z_r)$) (що відбувається, головним чином, внаслідок зміни опорів рейкових з'єднувачів). Модель має враховувати також зміни напруги живлячого генератора і, за необхідності, також зміни параметрів елементів. Поряд із сигнальним струмом на колійний приймач РК впливають електромагнітні завади (ЕМЗ).

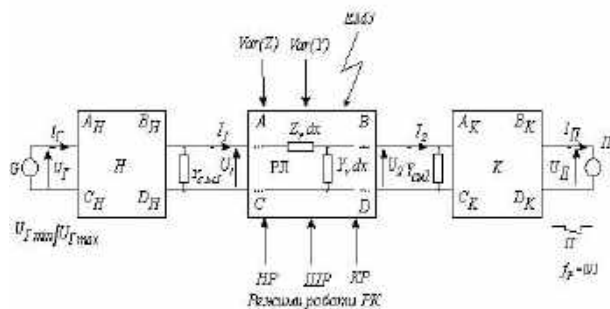


Рис. 1. Загальна еквівалентна схема тонального рейкового кола

Для аналізу впливу електричних завад на колійний приймач, в моделі необхідно визначити сумарний струм на вході колійного приймача від джерела живлення РК при найбільш несприятливих умовах передачі струму для режиму роботи рейкового кола, що аналізується, а також струм гармонійних завад від електрорухомого складу з частотою в смузі пропускання вхідного фільтра колійного приймача. Тривалість гармонійних електричних завад має бути

достатньою для того, щоби викликати збій в роботі РК.

Вихідними даними моделі є електрична схема і параметри РК, мінімальне і максимальне значення напруги живлення $U_{Г\max}$, $U_{Г\min}$, середнє квадратичне (СКЗ) значення струму гармонійних завад що віддаються ЕРС в рейкову лінію на частотах в смузі пропускання вхідного фільтра колійного приймача, їх частоти і тривалість, координати ЕРС, схема каналізації тягового струму, коефіцієнт асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту. Також в залежності від глибини аналізу, модель може включати деякі інші параметри.

Струм на вході колійного приймача рейкового кола визначається як сума сигнального струму і струму завад

$$i_n(t) = i_{cn}(t) + i_{zn}(t), \quad (1)$$

де i_{cn} і i_{zn} є, відповідно, значення сигнального струму і струму завади на вході КП.

Значення струмів i_{cn} і i_{zn} знаходять за відомими рівняннями теорії рейкових кіл [1-5]. Оскільки зсув фаз між сигнальним струмом і завадою може значно вплинути на роботу колійного приймача, в моделі зсув фаз може варіюватися в процесі дослідження.

Струм на вході колійного приймача визначається за фактичними ($\dot{U}_{Г\text{факт}}$, $\dot{I}_{Г\text{факт}}$) або граничними ($\dot{U}_{Г\max}/\dot{U}_{Г\min}$, $\dot{I}_{Г\max}/\dot{I}_{Г\min}$) значеннями напруги і струму генератора згідно до рівняння [1-5]

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{cn} \\ \dot{I}_{cn} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_0^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_{Г\text{факт}} \\ \dot{I}_{Г\text{факт}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де \mathbf{M}_0 – матриця в А-параметрах для схеми рис. 1, що є добутком всіх матриць між генератором і колійним приймачем

$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{M}_H \cdot \mathbf{M}_{CMPL1} \cdot \mathbf{M}_{PL} \cdot \mathbf{M}_{CMPL2} \cdot \mathbf{M}_K, \quad (3)$$

де \mathbf{M}_{CMPL1} , \mathbf{M}_{CMPL2} - матриці, що відповідають адмітансу суміжних рейкових ліній на початку і в кінці РЛ.

Схему чотириполюсника РК і параметри матриці \mathbf{M}_{PL} визначають відповідно до режиму роботи РК з урахуванням найбільш несприятливих умов для його виконання.

Для визначення струму, можна використати формулу [1-5]

$$\dot{I}_{cn} = [\underline{A}_0 \underline{Z}_p + \underline{B}_0]^{-1} \dot{U}_{Г\text{факт}}, \quad (4)$$

де \underline{C}_0 і \underline{D}_0 є елементами другої строки матриці \mathbf{M}_0 .

Визначення струму заводів в рейковій лінії від декількох одиниць ЕРС проаналізовано в [17]. Наведені формули дозволяють визначити струм заводів в кінці рейкової лінії в точці підключення апаратури релейного кінця РК. Відповідно струм електричних заводів на вході колійного приймача визначається через струм заводів в кінці рейкового кола і коефіцієнт передачі струму гармонічних заводів апаратурою кінця рейкового кола за формулою

$$\dot{I}_{zn} = \underline{K}_{nk} \dot{I}_{zk}, \quad (5)$$

де \dot{I}_{zk} – СКЗ струму заводів в двох рейках в кінці рейкового кола

$$\dot{I}_{zk} = \dot{I}_{zk1} + \dot{I}_{zk2}. \quad (6)$$

При відсутності насичення магнітної системи колійного трансформатора тяговим струмом можна прийняти, що коефіцієнти чотириполюсника апаратури кінця рейкового кола для гармонік тягового струму дорівнюють відповідним коефіцієнтам для сигнального струму. Таким чином вираз для коефіцієнта передачі струму гармонічних заводів запишемо у вигляді

$$\underline{K}_{nk} = 0,5 \cdot [\underline{C}_k \underline{Z}_r + \underline{D}_k]^{-1} K_a \quad (7)$$

де \underline{C}_k і \underline{D}_k є елементами другої строки матриці \mathbf{M}_k , \underline{Z}_p – опір колійного приймача, K_a – коефіцієнт асиметрії РЛ в кінці РК.

$$K_a = \left| \frac{\dot{I}_{zk1} - \dot{I}_{zk2}}{\dot{I}_{zk1} + \dot{I}_{zk2}} \right|. \quad (8)$$

4. Визначення сумарного струму на вході колійного приймача

Сумарний струм на вході колійного приймача складається із сигнального струму з несучою частотою f_c і струму завади з частотою f_z , яка у загальному випадку відрізняється від частоти f_c . Завади, що можуть викликати збій в роботі колійного приймача, мають бути в смузі пропускання вхідного фільтра КП. Оцінку їх впливу на колійний приймач необхідно провадити з урахуванням ослаблення амплітуди гармонічних заводів відповідно до амплітудно-частотної характеристики вхідного фільтру [7, 13].

Сумарний струм на вході колійного приймача, що складається із сигнального струму і струму гармонійної завади можна представити у вигляді

$$i_n(t) = i_{cn}(t) + i_{zn}(t) = I_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) + I_z \cos(\omega_z t + \varphi_z) \quad (9)$$

де I_c , ω_c , φ_c , I_z , ω_z , φ_z – відповідно, амплітудне значення, кругова частота й початкова фаза, сигнального струму й гармонійної завади.

Сумарний струм двох гармонічних струмів змінюється у часі з частотою, що дорівнює середньому арифметичному значень частот сигнального струму ω_c й завади ω_z і має биття за амплітудою і фазою відповідно до виразу

$$i_o = I_o \sin \left[\frac{\omega_c + \omega_z}{2} t - \frac{\varphi_c + \varphi_z}{2} - \varphi(t) \right], \quad (10)$$

де:

$$I_o = \left[I_c^2 + I_3^2 + 2I_c I_3 \cos[(\omega_c - \omega_3)t - \varphi_c - \varphi_3] \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$\varphi(t) = \arctg \left[\frac{I_c - I_3}{I_c + I_3} \times \right. \quad (12)$$

$$\left. \times \operatorname{tg} \left[\frac{\omega_c - \omega_3}{2} t - \frac{\varphi_c - \varphi_3}{2} \right] \right]$$

5. Аналіз завадостійкості тональних рейкових кіл

Вплив гармонійних електричних завад на колійний приймач тонального рейкового кола проілюстровано для нормального, шунтового і контрольного режимів роботи для максимально допустимих значень струму завад, що дозволило порівняти результати аналізу з результатами, наведеними в літературі [7-9].

5.1. Нормальний режим

При проведенні моделювання струму на вході ТРК, що знаходиться у нормальному режимі, для граничних значення струму для цього режиму, СКЗ сигнального струму на вході колійного приймача ТРК взято на рівні 3 мА, що відповідає мінімальному розрахунковому значенню безперервного струму, яке забезпечує надійне спрацювання колійного приймача і приймається при розрахунках регулювальних таблиць ТРК [7-9, 13].

СКЗ завад для моделювання взяті на рівні гранично допустимих значень, тобто 0,55 і 0,7 мА [7-9].

Формули (9)-(12) дозволяють визначити сумарний струм на вході колійного приймача за значеннями гармонійних завад від ЕРС в рейковій лінії.

Порівняння середне-квадратичного значення сумарного струму на вході КП зі струмом спрацювання ($f_n = 1$) або відпускання ($f_n = 0$) колійного приймача дозво-

ляє визначити стан колійного приймача при різних варіаціях параметрів моделі і визначити причини можливих збоїв в роботі РК

Моделювання проведено для сигнального струму з несучою частотою 420 Гц і частотою маніпуляції 8 і 12 Гц ідеальної форми. Дослідження на одній частоті не обмежує придатність висновків для інших частот сигнального струму ТРК, оскільки як буде на результати аналізу впливає різниця частот сигнального струму і струму завади, яка визначає період биття (коливання) амплітуди сумарного сигналу на вході колійного приймача.

На рис. 2 наведено часову залежність сумарного струму на вході приймача ТРК, отриманого підсумуванням сигнального струму із СКЗ 3 мА із завадою із СКЗ 0,7 мА.

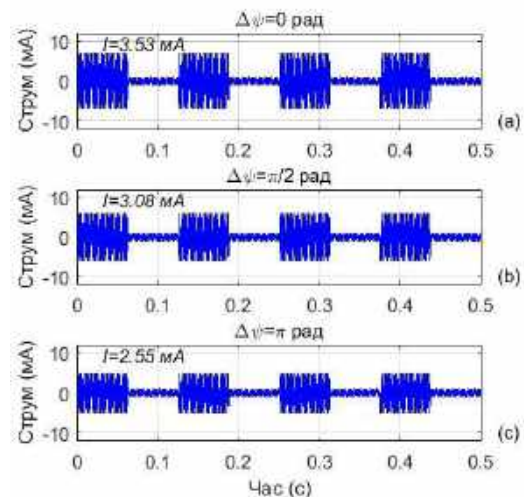


Рис. 2. Струм на вході приймача ТРК при СКЗ завади 0,7 мА

Як видно з рисунку при збільшенні зсуву фаз $\Delta\psi$ в ряду $0, \pi/2, \pi$ СКЗ сумарного струму зменшується і при найбільш несприятливому зсуві фаз, що дорівнює $\Delta\psi = \pi$, СКЗ зменшується до 2,55 мА, що менше струму спрацювання колійного приймача. Внаслідок цього можливий збій нормального режиму ТРК.

При нерівності частоти завади і частоти сигнального струму, згідно з (9)-(12) вини-

кає биття (коливання) амплітуди сумарного струму з періодом

$$T_B = \frac{2\pi}{|\omega_c - \omega_s|}$$

Биття амплітуди струму на вході колійного приймача ТРК може вплинути на роботу приймача в нормальному режимі, якщо СКЗ струму на інтервалі тривалістю більше, ніж 0,6 с зменшиться нижче СКЗ струму надійного спрацьовування приймача. Період коливань амплітуди більше 0,6 с виникає при різниці частот сигналу і завади менше ніж 1,6 Гц. Відповідно дослідження було проведено для двох значень різниці частот сигнального струму і струму гармонійної завади $\Delta f = 0,5$ і 1 Гц, а також для двох значень СКЗ струму завади, – 0,55 і 0,7 мА (рис. 3 і рис. 4).

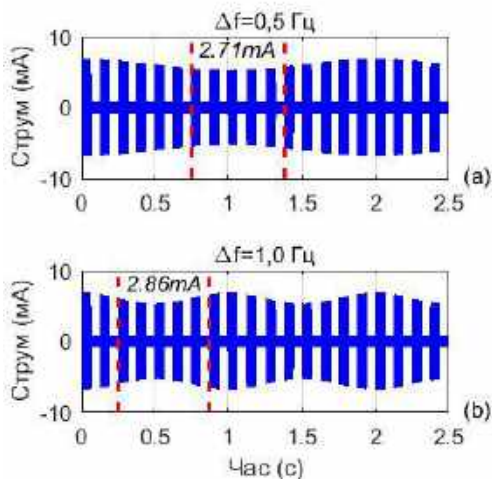


Рис. 3. Часова залежність струму на вході КП ТРК при СКЗ гармонійної завади 0,55 мА

Внаслідок коливань амплітуди сумарного струму на вході колійного приймача на його часовій залежності спостерігаються ділянки, в яких амплітуда значно зменшується. В межах цих ділянок були вибрані сегменти тривалістю $5 \times 0,125 = 0,625$ с.

Межі обраних сегментів позначені вертикальними лініями (рис. 3, 4) і для них підраховано СКЗ сумарного струму. Отримано такі результати. Для завади із СКЗ 0,7 мА при $\Delta f = 0,5$ Гц на інтервалі трива-

лістю більше 0,6 с СКЗ струму на вході колійного приймача дорівнює 2,65 мА. Це значення є меншим ніж струм надійного спрацьовування колійного реле (3 мА) і впритул наближено до струму спрацьовування колійного приймача ТРК 2,6...2,61 мА [13].

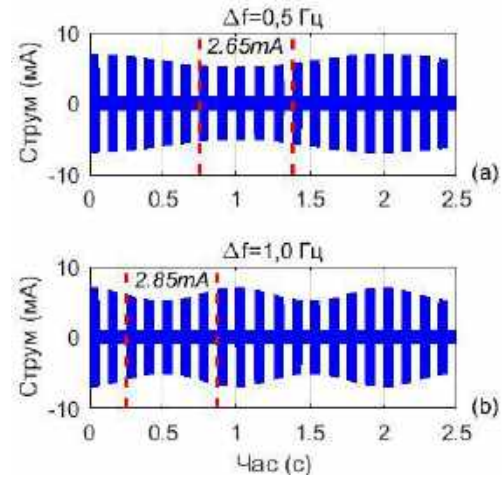


Рис. 4. Часова залежність струму на вході КП ТРК при СКЗ гармонійної завади 0,7 мА

Таким чином отримано, що під дією електричної гармонійної завади з максимально допустимим для нормального режиму СКЗ струму 0,7 мА при різниці фаз сигнального струму і струму гармонійної завади в інтервалі від 0 до 0,5 Гц при несприятливих умовах можливе виникнення в струмі на вході колійного приймача сегментів тривалістю більше 0,6 с, що періодично повторюються, СКЗ яких може бути меншим за СКЗ надійного спрацьовування колійного приймача, що може викликати збій в роботі ТРК в нормальному режимі. Такі результати узгоджуються з запропонованим в [9] граничним значенням завадостійкості приймача ТРК в нормальному режимі.

5.2. Шунтовий і контрольний режим

Аналіз впливу сумарного сигнального струму і струму завади на роботу колійного приймача ТРК в шунтовому і контрольному режимах проведено також для граничного для цих режимів значення струму на вході колійного приймача. Залишкова напруга на

вході колійного приймача ТРК в шунтовому і контрольному режимах не може перевищувати 0,23 В, що відповідає струму 1,4 мА [13]. Відповідно СКЗ сигнального струму 1,4 мА на вході приймача взято як граничне значення для найбільш несприятливих для шунтового і контрольного режимів умов.

Граничне значення СКЗ гармонійної завади взято на рівні 0,4 мА при $K_{BH} = 0,58$ [7-9]. Моделювання сумарного струму на вході колійного приймача ТРК в шунтовому і контрольному режимі проведено для двох значень різниці частот сигнального струму і завади $\Delta f = 0,5$ і 1 Гц (рис. 5). Внаслідок биття амплітуди на часовій залежності струму в шунтовому або контрольному режимі спостерігаються сегменти тривалістю $5 \times 0,125 = 0,625$ с, що періодично повторюються, амплітуда яких суттєво зростає. Межі обраних сегментів позначені вертикальними лініями (рис. 5). Для них підраховано СКЗ сумарного струму на вході колійного приймача.

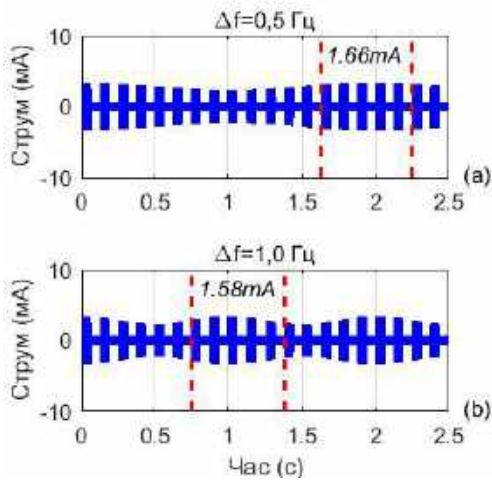


Рис. 5. Часова залежність струму на вході КП ТРК в шунтовому режимі при СКЗ гармонійної завади 0,4 мА

Для $\Delta f = 0,5$ Гц СКЗ струму на вході приймача дорівнює 1,66 мА, а для $\Delta f = 1$ Гц СКЗ дорівнює 1,58 мА. Ці значення перевищують граничне значення

1,4 мА для шунтового або контрольного режимів. Таким чином, під дією електричної гармонійної завади з максимально допустимим для шунтового або контрольного режимів СКЗ струму (0,4 мА) при несприятливих умовах можливе виникнення в струмі на вході колійного приймача ТРК сегментів тривалістю більше 0,6 с, що періодично повторюються, СКЗ яких перевищує граничне значення, внаслідок чого може виникнути небезпечна відмова в роботі тональних рейкових кіл.

Висновки

У роботі досліджено вплив гармонійних завад на приймач тонального рейкового кола на основі розробленої математичної та комп'ютерної моделі, що описує поширення електромагнітних завад у рейках від електрорухомого складу до колійного приймача, а також їх вплив на приймач. Модель враховує тип і конкретні параметри рейкового кола, схему каналізації тягового струму, коефіцієнт асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту, координати рухомого складу, спектральний склад зворотного тягового струму. Вплив гармонійних завад на колійний приймач тонального рейкового кола проілюстровано шляхом знаходження сумарного струму на вході приймача у вигляді суми сигнального струму для нормального, шунтового і контрольного режимів роботи рейкового кола в найбільш несприятливих для цих режимів роботи умовах і максимально допустимому струму завад.

Значення сигнального струму в запропонованій моделі визначається через напругу генератора і коефіцієнт передачі струму, який згідно з відомими формулами знаходиться через матриці чотириполюсників загальної еквівалентної схеми рейкового кола. Середнє квадратичне значення сумарного струму завад на вході колійного приймача від усіх одиниць електрорухомого складу в межах фідерної зони моделі визначається за запропонованою методикою з

урахуванням коефіцієнта передачі апаратури кінця рейкового кола. Адекватність розробленої моделі була експериментально перевірена шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними результатами, отриманими при реєстрації струму на вході колійного приймача при подачі на нього сигнального струму від генератора ГПУ та гармонійної завади від керованого генератора. Для моделювання струму на вході колійного приймача в нормальному режимі граничні значення струмів на його вході взяті з технічної документації, а саме: середньоквадратичне значення сигнального струму на вході приймача взято на рівні 3 мА; середньоквадратичне значення завади взято на рівні 0,55 і 0,7 мА. З аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що завади на вході приймача з частотою в смузі $\pm(0..0,5)$ Гц що-до частоти сигнального струму викликають появу періодичних змін струму нижче рівня його надійного спрацьовування з тривалістю більше 0,6 с, що може призвести до збою в роботі рейкового кола у нормальному режимі. Для моделювання струму на вході колійного приймача у шунтовому та контрольному режимах граничні значення струму на його вході прийняті такими: залишкове напруга на вході приймача 0,23 В; середньоквадратичне значення гармонійної завади – 0,4 мА. В результаті зроблено висновок, що завади на вході приймача з частотою в смузі $\pm(0..0,5)$ Гц щодо частоти сигнального струму викликають підвищення струму на його вході вище за рівень надійного відпускання приймача з тривалістю більше 0,6 с, що може призвести до збою в роботі ТРК у шунтовому та контрольному режимах.

Бібліографічний список

1. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник – 3-е издание, переработанное и дополненное [Текст] / В. С. Аркатов, Ю. В. Аркатов, С. В. Казеев, Ю. В. Ободовский. – М.: ООО Миссия-М, 2006. – 496 с.
2. Аркатов, В. С. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание [Текст] / В. С. Аркатов, Ю. А. Кравцов, Б. М. Степенский. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
3. Брылеев, А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей [Текст] / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – М.: Транспорт, 1978. - 344 с.
4. Путевая блокировка и авторегулировка: Учебник для вузов [Текст] / Н. Ф. Котляренко, А. В. Шишляков, Ю. В. Соболев и др. Под ред. Н. Ф.Котляренко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 408 с.
5. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость: учеб. для вузов железнодорожного транспорта [Текст] / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
6. Ogunsola, A. Electromagnetic compatibility in railways. Analysis and management. [Text] / A. Ogunsola, A. Mariscotti. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2013. – 528 p.
7. Бестемьянов, П. Ф. Методика оценки работоспособности рельсовых цепей тональной частоты при воздействии тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом [Текст] / П. Ф. Бестемьянов, Ю. А. Кравцов, Е. Г. Щербина, А. Б. Чегуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – №. 1. – С. 87-92.
8. Кравцов, Ю. А. Исследование помехоустойчивости путевых приемников тональных рельсовых цепей [Текст] / Ю. А. Кравцов, В. И. Линьков, П. Е. Мащенко, А. Е. Щербина // Наука и техника транспорта. – 2009. – №. 1. – С. 86-91.
9. Кравцов, Ю. А. Методика проверки помехоустойчивости приёмников тональных рельсовых цепей [Текст] / Ю. А.

- Кравцов, А. А. Антонов, М. Е. Бакин // Мир транспорта. – 2015. – Т. 13. – №. 6. – С. 102-109.
10. CENELEC CLC/TR 50507. (2005). Railway applications – Interference limits of existing track circuits used on European railways.
 11. CENELEC CLC/TS 50238-2, (2010). Railway applications – Compatibility between rolling stock and train detection systems – Part 2: Compatibility with track circuits.
 12. CENELEC EN 50388. (2005). Railway applications – Power supply and rolling stock – Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock to achieve interoperability.
 13. Кулик, П. Д. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности [Текст] / П. Д. Кулик, Н. С. Ивакин, А. А. Удовиков. К.: Изд. дом «Мануфактура. – 2004.
 14. Анохов, И.В. Про електромагнітну сумісність електрифікованих залізничних ліній постійного струму [Текст] / И. В. Анохов, М. М. Бадер, В. И. Гаврилюк, В. Г. Сыченко // Залізничний транспорт України. 2002. № 2. С. 10-12.
 15. Гаврилюк, В.І. Аналіз електромагнітного впливу тягового електропостачання на роботу рейкових кіл [Текст] // Вісник Дніпропетровського національн. ун-ту ім. В. Лазаряна. 2003. № 1. С. 3-7.
 16. Gavrilyuk, V. The modelling of electromagnetic influence of traction electrosupply system on track circuits [Text] / V. Gavrilyuk, A. Zavgorodnij // Transport Systems Telematics, IV Intern. Conf., Katowice-Ustron. pp. 18-19, 2004.
 17. Гаврилюк, В. И. Испытания новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами сигнализации и связи [Текст] / В. И.

- Гаврилюк, В. И. Щека, В. В. Мелешко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 5(59). – С. 7–15.
18. Havryliuk, V. Modelling of the Return Traction Current Harmonics Distribution in Rails for AC Electric Railway System [Text] // 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). – IEEE, 2018. – P. 251-254.

Ключові слова: тональні рейкові кола, тяговий струм, електромагнітна сумісність.

Ключевые слова: тональные рельсовые цепи, тяговый ток, электромагнитная совместимость.

Keywords: tonal track circuits, traction current, electromagnetic compatibility.

Рецензенти:

д.т.н., проф. А. Б. Бойнік,

д.т.н., проф. А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 15.09.2019 р.

Прийнята до друку 30.09.2019 р.

UDK 656.259.1

H. TAGHIZADE ANSARI – PhD Student, Iran University of Science & Technologies, Islamic Republic of Iran, hosein.ta.72@gmail.com

T. SERDIUK – Associate Professor, Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Ukraine, serducheckt@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2609-4071

IVAN MYSIV – LPP «Cifrotech Kazakhstan», Kazakhstan

IMPACT OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCES ON TRACTION NETWORK: MATHEMATICAL MODEL OF TRACTION NETWORK

Introduction

The railway development has been significant since the beginning of the 20th century. The most significant components of the railway system are the trains. In the beginning, the power of the train was generated using steam and diesel. But, in 1897, Siemens presented the first electrically powered locomotive at the Berlin Commerce Fair. The maximum speed of the Siemens train was 13 km/h. Since then, the electrically powered trains have been improved. There are two types of railway electrical supply networks in Europe: direct current (DC), single-phase alternating current (AC). In the AC system, power is fed to the train by an overhead line (OHL). An OHL system is shown in Fig. 1. A third rail placed aside the railway track is usually used to feed the train in the DC system. An example of this type of system is shown in Fig. 2 [1, 2].



Fig. 1. An OHL system

There are three main categories under the AC power supply system, including the rail-return (RR) system, booster-transformer (BT) system, and auto-transformer (AT) system.

These three systems mainly differ in how the traction current is fed into the train and the return current leaving the train flows back to the power supply. The results of [2] have shown that the auto-transformer and booster-transformer systems can reduce the interferences in the signaling cable, compared to the rail-return system. But, the disadvantage of the booster-transformer system is the voltage drop along the overhead line [2].



Fig. 2. A third rail system

Objective

This paper introduces a mathematical model of the railway network which can be helpful in analysis of the impact of different faults on the railway network.

Overview of Electrical Railway System in Ukraine

In Ukraine, 47% of railway lines are electrified and 53% have diesel traction. Ukraine has 25 kV-50 Hz AC traction system with a

length of 5500 km like Russia, China, France, the UK, Hungary, Germany, Denmark, Italy, and Portugal. Also, Ukraine has 3kV DC traction system like Russia, Belgium, Spain, Italy, and Poland with a length of 5000 km. There are 25 Hz and 75 Hz track circuits used in AC traction systems and 50 Hz track circuits used in DC traction systems in Ukraine [3, 4]. The automatic locomotive signaling (ALS) system and automatic block systems are used to transfer the codes between the locomotive and receiving devices of the track circuit. In fact, they regulate the traffic of trains on the railway sections [5].

$$Z_{ii,ext} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i} + 2(\Delta R_{ii} + j\Delta X_{ii}) \quad (1)$$

$$Z_{ij,ext} = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} + 2(\Delta R_{ij} + j\Delta X_{ij}) \quad (2)$$

Electromagnetic Interferences in Railway System

There is a huge number of faults in automatic devices of the railway. These faults occur because of the stray currents, presence of harmonics which originated from locomotive's motors, communication devices, IGBTs, thyristors, etc., and impulse interferences on the return traction current. Statistics in Ukraine show that 9.2% of failures are due to the interferences of traction currents [4, 5].

Fig. 3 shows the block diagram of the AC traction power supply system with an AC motor. In this diagram, the AC is converted to DC by the rectifier. After passing the filter, the DC is converted to the 3-phase power by the inverter. Several stages between the power supply and the motor and unwanted electromagnetic disturbance (interferences) can be generated at any of the aforementioned steps. These interferences can be distributed in the cables and radiated through different loop circuits. The interferences are generated because the rectifier and inverter can extend to the megahertz scale [1].

It is evident that the complexity of the railway system increases with the increase of

electronics device usage. On the other hand, it is mentioned that the environment of the railway tracks is exposed the electromagnetic interferences from the traction power supply, power transmission lines, and other sources.

The presence of these electromagnetic interferences and more sensitive electronics devices make the railway system more sensitive and vulnerable [6].

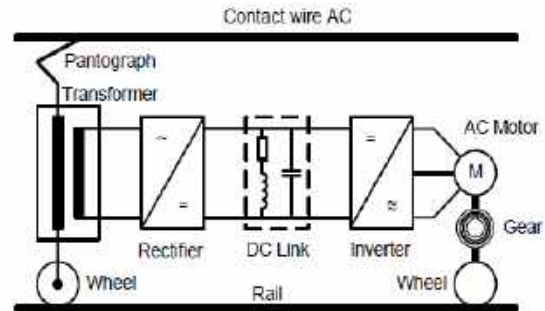


Fig. 3. Block diagram of the AC traction power supply system

As mentioned before, ALS systems are vital for safety and efficiency. These interferences can cause a false signal and cause an accident in railway systems. So, electromagnetic compatibility (EMC) becomes a very important issue in the railway system.

Impact of EMI on Railway System

To investigate the electromagnetic interferences' impact on automatic devices of the railway system, firstly, all of the electromagnetic interference sources in the railway system should be known and investigated. Some works investigate the harmonics and pulses in traction currents in rail lines. For example, in [3, 7], the authors performed an experimental work and obtained the rail line current spectrum. The work in [7] was performed in DC and AC traction power supply systems. Secondly, all parts of the railway system should be modeled accurately. Some works investigate the model for traction net. Thirdly, the performance of automatic devices like track circuits should be investigated in presence of the electromagnetic interferences. In this re-

gard, the accurate model of the track circuits can be very helpful.

Mathematical Model of Traction Network

There are a number of mathematical models of the traction power supply system, in which the local load (electrical locomotive, consuming electrical energy from the contact network) is replaced by a uniformly distributed load, which is typical for rail sections with high intensity traffic working. In [8], the authors proposed a mathematical model for traction network to investigate the propagation of the harmonics in rail lines. This model consists of different impedances related to a different part of the network.

In electric traction, rail lines are used not only as a channel for the flow of the signal and the code currents, but also to allow a return of traction current. Code current, which flows in the rail circuit, is influenced by various sources of impacts. The proposed mathematical model is constructed for the case when the current consumption by electric locomotive, acting in a rail network, divides into the currents I_1 and I_2 , flowing in traction lines. In this case, part of the reverse traction current returns to the substation not by the rail lines, and through the ground. The magnitude of leakage current is determined by the conductivity of contours rail – rail, rail – ground, contact network – rails, and the contact network – the ground.

For the analysis of dynamic processes in electric circuits it is proposed to consider the rail circuit as a six-poles, and power train - as a 2n-poles. Such a representation of the circuit, which is shown in Fig. 4, takes into account the influence of various noise sources and effects of external factors that lead to a change in the parameters of the rail line and impact on work of related devices of railway automatics and remote control and communication lines.

Results

For above mathematical model, system of differential equations (3) can be written, com-

posed by the methods of contour currents for internal and external contours of eight-poles, which have a transverse element (earth), and the base unit (b), and the method of nodal potentials.

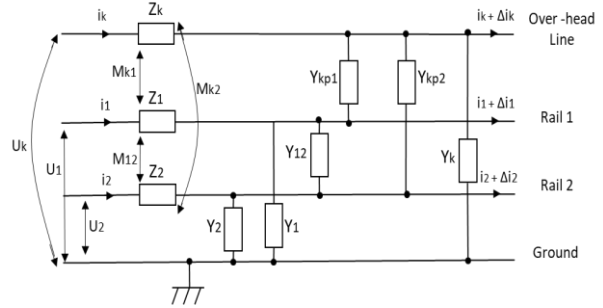


Fig. 4. Mathematical model of the traction network of a single-track section

$$\left\{ \begin{aligned}
 -\frac{d\dot{U}_k}{dx} &= \dot{I}_k \cdot \underline{Z}_k - \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_{M1k} - \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_{M2k}, \\
 -\frac{d\dot{U}_1}{dx} &= \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 - \dot{I}_k \cdot \underline{Z}_{M1k} - \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_{M12}, \\
 -\frac{d\dot{U}_2}{dx} &= \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 - \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_{M12} - \dot{I}_k \cdot \underline{Z}_{M2k}, \\
 -\frac{d\dot{U}_{12}}{dx} &= -\frac{d\dot{U}_1}{dx} + \frac{d\dot{U}_2}{dx}, \\
 -\frac{d\dot{U}_{k1}}{dx} &= -\frac{d\dot{U}_k}{dx} + \frac{d\dot{U}_1}{dx}, \\
 -\frac{d\dot{U}_{k2}}{dx} &= -\frac{d\dot{U}_k}{dx} + \frac{d\dot{U}_2}{dx}, \\
 -\frac{d\dot{I}_1}{dx} &= \underline{Y}_1 \cdot \dot{U}_1 + \underline{Y}_{12} \cdot (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) - \underline{Y}_{kp1} \cdot (\dot{U}_1 - \dot{U}_k), \\
 -\frac{d\dot{I}_2}{dx} &= \underline{Y}_2 \cdot \dot{U}_2 + \underline{Y}_{12} \cdot (\dot{U}_2 - \dot{U}_1) - \underline{Y}_{kp2} \cdot (\dot{U}_2 - \dot{U}_k), \\
 -\frac{d\dot{I}_k}{dx} &= \underline{Y}_k \cdot \dot{U}_k + \underline{Y}_{kp1} \cdot (\dot{U}_k - \dot{U}_1) - \underline{Y}_{kp2} \cdot (\dot{U}_k - \dot{U}_2),
 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

where $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_k, \dot{U}_{12}, \dot{U}_{k1}, \dot{U}_{k2}$ – are complex values of voltage drops across 1 km length contours: rail1 – ground, rail2 – ground, contact network – ground, rail 1 – rail 2, contact network – rail 1, contact network – rail 2, respectively, V; $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_k$ – are complex values of current per 1 km in following contours: rail1 – ground, rail 2 – ground, contact network – ground respectively, A; $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_k$ – are a complex resistivity in those contours respectively, Ohm/km; $\underline{Z}_{M1k}, \underline{Z}_{M2k}, \underline{Z}_{M12}$ – are a complex resistivity of mutual induction in the contours: contact network – rail 1, contact network – rail 2, rail 1 – rail 2, respectively, Ohm/km; $\underline{Y}_1, \underline{Y}_2, \underline{Y}_k, \underline{Y}_{12}, \underline{Y}_{kp1}, \underline{Y}_{kp2}$ – are a complex of conductivities in the contours: rail1 – ground, rail 2 – ground, contact network – ground, rail 1 – rail 2, contact network – rail 1, contact network – rail 2, respectively, S/km.

Conductivity between the overhead line and rails can be assumed to be zero because their value is very small [1-2, 10, 11]:

$$Y_{kp1} = Y_{kp2} = Y_k = 0. \quad (4)$$

Also, we can write these equations [1-2]:

$$Y_1 + Y_{12} = Y_{11} \quad \& \quad Y_2 + Y_{12} = Y_{22}. \quad (5)$$

Due to the symmetry of the rail lines, we can write [9-10]:

$$Z_{M1k} = Z_{M2k} = Z_M \quad (6)$$

Taking into account these equations we have:

$$-\frac{d^2 \dot{U}_1}{dx^2} = \dot{U}_1(-Z_1 Y_{11} - Z_{M12} Y_{12}) + U_2 \quad (7)$$

$$-\frac{d^2 \dot{U}_2}{dx^2} = \dot{U}_2(-Z_2 Y_{22} - Z_{M12} Y_{12}) + \dot{U}_1(Z_2 Y_{12} + Z_{M12} Y_{11}) \quad (8)$$

$$-\frac{d^2 \dot{U}_k}{dx^2} = \dot{U}_1(Z_M Y_1) + \dot{U}_2(Z_M Y_2) \quad (9)$$

Considering (5) and (6) as differential equation systems, we can write:

$$\frac{d^2}{dx^2} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} Z_1 Y_{11} + Z_{M12} Y_{12} & -Z_1 Y_{12} - Z_{M12} Y_{22} \\ -Z_2 Y_{12} - Z_{M12} Y_{11} & Z_2 Y_{22} + Z_{M12} Y_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{pmatrix}$$

The equation (8) is similar to the mass-spring system equation. This system can be written as:

$$\ddot{U} = -KU,$$

$$K = - \begin{pmatrix} Z_1 Y_{11} + Z_{M12} Y_{12} & -Z_1 Y_{12} - Z_{M12} Y_{22} \\ -Z_2 Y_{12} - Z_{M12} Y_{11} & Z_2 Y_{22} + Z_{M12} Y_{12} \end{pmatrix} \quad (10)$$

This system can be solved by guessing a form for the solution. We could guess:

$$U = ae^{wx} \quad (11)$$

Inserting (10) into the (9) gives:

$$(K - w^2 I)a = 0 \quad (12)$$

This is a homogeneous system. It is a generalized eigenvalue problem for eigenvalues w^2 and eigenvectors a . We solve this in a similar way to the standard matrix eigenvalue problems. The eigenvalue equation is found as:

$$\det(K - w^2 I) = 0 \quad (13)$$

Once the eigenvalues are found, then one determines the eigenvectors and constructs the solution.

Solutions for this kind of differential equation can be classified into 3 cases [12].

Case I: Two real, distinct roots

Solve the eigenvalue problem $Av = \lambda v$ for each eigenvalue, obtaining two eigenvectors \vec{v}_1, \vec{v}_2 . Then write the general solution as a linear combination $(x) = c_1 e^{\lambda_1 x} \cdot \vec{v}_1 + c_2 e^{\lambda_2 x} \cdot \vec{v}_2$.

Case II: One Repeated Root

Solve the eigenvalue problem $Av = \lambda v$ for one eigenvalue w^2 , obtaining the first eigenvector \vec{v}_1 . One then needs a second linearly independent solution. This is obtained

by solving the nonhomogeneous problem $A \vec{v}_2 - \lambda \vec{v}_2 = \vec{v}_1$ for \vec{v}_2 .

The general solution is then given by $U(x) = c_1 e^{\lambda_1 x} \cdot \vec{v}_1 + c_2 e^{\lambda_2 x} \cdot (\vec{v}_2 + x \vec{v}_1)$.

Case III: Two complex conjugate roots

Solve the eigenvalue problem $Av = \lambda v$ for one eigenvalue $\lambda = \alpha + i\beta$, obtaining one eigenvector v . Note that this eigenvector may have complex entries. Thus, one can write the vector $y(x) = e^{\lambda x} v = e^{\alpha x} (\cos \beta x + i \sin \beta x) v$. Now, construct two linearly independent solutions to the problem using the real and imaginary parts of $y(x)$: $y_1(x) = \text{Re}(y(x))$ and $y_2(x) = \text{Im}(y(x))$. Then the general solution can be written as $U(x) = c_1 y_1(x) + c_2 y_2(x)$.

Then, $U(x) = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$ can be determined using one of the above cases which are related to the problem. So, having \dot{U}_1 and \dot{U}_2 , we can calculate the \dot{U}_k using equation (7). Now, having \dot{U}_1, \dot{U}_2 and \dot{U}_k , we can calculate \dot{I}_1, \dot{I}_2 and \dot{I}_k using (1).

Conclusion

As mentioned before, one of the main steps to investigate the electromagnetic interferences' impact on automatic devices of the railway system is the accurate model of traction network. This paper introduced a mathematical model for traction network. The proposed model can be used when the electric locomotive current divides into two different current which flow in traction lines. Moreover, a system of differential equation regarding the proposed model was written and a solution to this system was introduced. All rail currents and the return current can be calculated from the above solution. Therefore, the impact of electromagnetic interferences on these current can be investigated.

References

1. Jia, K. Electromagnetic Noise Generated in the Electrified Railway Propulsion Sys-

- tem [Text] / K. Jia // Licentiate Thesis. - KTH University. - Sweden. - 2011.
2. Fei, Z. AC railway electrification systems — An EMC perspective [Text] / Z. Fei, T. Konefal, R. Armstrong // IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine. - 2019. - Vol. 8, No. 4. P. 62-69.
3. Serdiuk, T. About electromagnetic compatibility of track circuits with the traction supply system of railway [Text] / T. Serdiuk, M. Feliziani, K. Serdiuk // Proc. of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018), Amsterdam, The Netherlands, August 27-30, 2018, pp. 242-247.
4. Serdiuk, T. Propagation of Harmonics of Return Traction Current in Rail lines [Text] / T. Serdiuk, V. Havryliuk, M. Feliziani // International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. - 2019. - Spain.
5. Serdiuk, T. Improvement of Technical Service of Track Circuits [Text] / T. Serdiuk, V. Kuznetsov, K. Serdiuk // IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). - 2019. - Ukraine.
6. Morant, A. Railway EMI impact on train operation and environment [Text] / A. Morant, A. Wisten, D. Galar // International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. - 2012. - Italy.
7. Serdiuk, T. About Electromagnetic Compatibility of Rail Circuits with the Traction Supply System of Railway [Text] // T. Serdiuk, K. Vitaliy, K. Yevheniia // IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). - 2018. - Ukraine.
8. Serdiuk, T. Mathematic Model of Traction Net for the Investigation of Propagation of Harmonics in Rail Lines [Text] / T. Serdiuk, V. Havryliuk // Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. - 2011. - No. 2. - P. 50-55.

9. Havryliuk, V. Simulation of the distribution of reverse traction current harmonics in rails [Text] // Electromagnetic compatibility and safety in railway transport. – 2017. – No. 13.
10. Havryliuk, V. Modelling of the Return Traction Current Harmonics Distribution in Rails for AC Electric Railway System [Text] / International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). – 2018. – P. 251-254. – Netherlands.
11. Serdyuk, T. N. Measurement of electromagnetic interference in the station rail circuits / T. N. Serduyk // Proc. of the 10th Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2011), York, UK, September 26-30, 2011. - IEEE Cat. No. CFP1106F-CDR. Print ISBN: 978-0-9541146-3-3. – York (United Kingdom). – 2011. - p.214-217.
12. Edwards, C. H. Linear Algebra and Differential Equations with Introductory Partial Differential Equations and Fourier Se-

ries [Text] / C. H. Edwards, D. E. Penney, R. Haberman // Prentice-Hall. – 2014.

Ключові слова: система тягового електропостачання, рейкові кола, експериментальні дослідження, гармонійні завади.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, рельсовые цепи, экспериментальные исследования, гармонические помехи.

Keywords: system of traction electrosupplying, track circuits, experimental investigation, harmonic interferences.

Рецензенти:

д.т.н., проф. А. Б. Бойнік,
д.т.н., проф. А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 15.09.2019 р.
Прийнята до друку 30.09.2019 р.

УДК 621.311.004.12

А. В. ГОРПИНИЧ – к. т. н., доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, gorginich@ieeee.org

А. С. ГОЛУБЯТНИК – магистр, электромонтёр по ремонту и обслуживанию электрооборудования, ЧАО «МК «Азовсталь», г. Мариуполь, goloobytnik96@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Распространение источников электроэнергии с распределённой генерацией (солнечные и ветровые электростанции, электростанции с использованием топливных элементов, когенерационные установки и др.), помимо положительного эффекта, связанного со снижением вредных выбросов в атмосферу, снижением потерь электроэнергии (ЭЭ) за счёт максимального приближения таких источников к потребителям, повышением степени резервирования и т.д., приводит и к ряду проблем, вызванных ухудшением качества электроэнергии (КЭ) в распределительной сети. Например, подключение солнечных и ветровых электростанций к «слабой» сети может привести к ухудшению качества напряжения в точке общего присоединения за счёт возникновения значительных отклонений напряжения, обусловленных переменным характером генерации активной мощности. Кроме того, широкое использование современных преобразователей частоты в источниках ЭЭ с распределённой генерацией (РГ) приводит к повышению содержания высших гармоник, субгармоник, интергармоник и высокочастотных составляющих напряжения с частотами в несколько кГц в кривой напряжения питающей сети.

Для устранения проблем, связанных с ухудшением качества напряжения в электрических сетях с РГ, можно использовать аккумуляторные батареи (АБ), потоковые электрохимические батареи, магнитные аккумуляторы с использованием эффекта сверхпроводимости, маховиковые накопи-

тели ЭЭ и суперконденсаторы (СК). Практический интерес представляют экспериментальные исследования эффективности использования СК как средств сглаживания отклонений и колебаний напряжения в реальной микросети, например, с солнечной панелью (СП). СК как достойная замена АБ становятся доступнее. За счёт своих преимуществ (большое количество циклов «заряд-разряд», широкий диапазон рабочих температур, высокий КПД и т.п.) их использование в сфере альтернативной электроэнергетики в дальнейшем будет только увеличиваться.

За счёт большой ёмкости и соответствующей постоянной времени разряда СК можно использовать как средства сглаживания, например, отклонений напряжения, вызванных переменным характером генерации активной мощности в нетрадиционных источниках ЭЭ. В качестве примера можно привести фотоэлектрические установки (ФУ), генерация ЭЭ с помощью которых сопровождается ухудшением качества напряжения в точке общего присоединения, потому что наличие облаков (особенно в осенний и весенний периоды) приводит к изменению солнечной радиации, которая используется СП. Следует отметить, что изменения солнечной активности могут быть как длительными, так и кратковременными. Именно в случае кратковременных изменений (несколько мс – единицы с) и используются СК для сглаживания отклонений напряжения, так как АБ имеют недопустимо большое время реакции [1, 2]. Типичная за-

висимость солнечной активности от продолжительности светового дня, полученная с помощью пиранометра исследователями из университета Аристотеля в Салониках (Греция), показана на рис. 1 [1]. В результате исследований было установлено, что наибольшие изменения солнечной радиа-

ции наблюдались 10.09.2016 г., когда их продолжительность достигла 2,4 с (рис. 2). На рис. 2 приведены зависимости от времени активной мощности, генерируемой СП ($P_{СП}$), и активной мощности, выдаваемой в сеть (P_C).

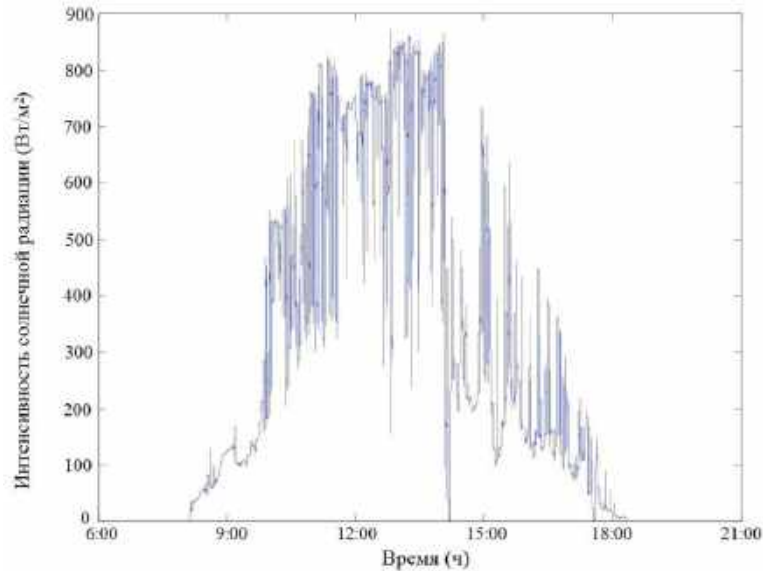


Рис. 1. Зависимость солнечной активности от продолжительности светового дня

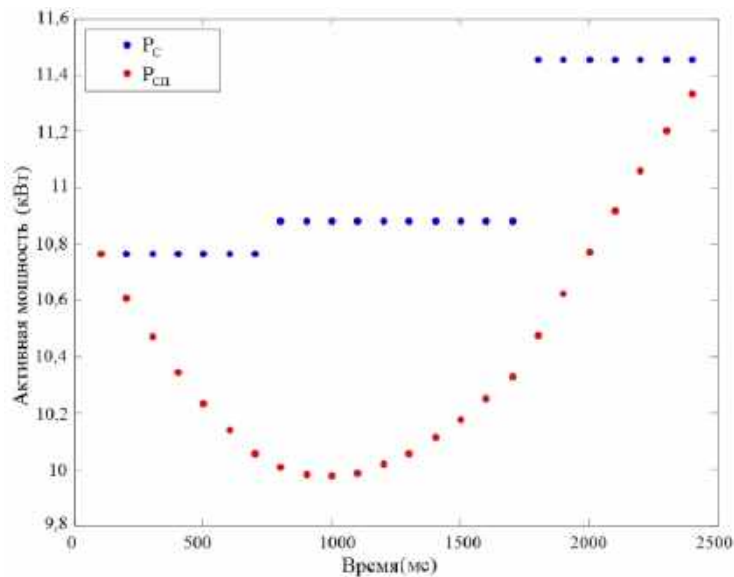


Рис. 2. Наибольшие изменения солнечной радиации продолжительностью 2,4 с

При наличии средств сглаживания, например, в виде СК:

$$P_c = P_{сп} + P_{ск}, \quad (1)$$

где $P_{ск}$ – составляющая активной мощности, которая обеспечивается за счёт СК.

В последнее время вопросам сглаживания отклонений и колебаний напряжения в электрических сетях с СП, как и вопросам увеличения срока службы традиционно применяемых свинцово-кислотных АБ (за счёт оптимизации параметров гибридных накопительных модулей (ГНМ)), уделяется значительное внимание в зарубежной научной литературе [3-7]. Например, в работе [3] предложена двухуровневая иерархическая модель управления, позволяющая решить проблему улучшения параметров ЭЭ, получаемой от источников с РГ, путём добавления СК в исходную схему с АБ. Предлагаемая авторами модель может быть использована при решении вопросов КЭ в электрических сетях с РГ.

Стратегия управления ГНМ (состоит из АБ и СК) на базе модифицированного метода роя частиц предложена в [4]. Разработанный алгоритм позволяет получить оптимальное соотношение мощности между АБ и СК при условии обеспечения минимального уровня колебаний мощности, генерируемой нетрадиционными источниками ЭЭ.

Состояние разработок в области накопительных модулей, используемых в системах электроснабжения зданий с СП, как и современные методы оптимизации параметров ГНМ при различных критериях оптимизации, рассмотрены в [5]. Авторы также делают вывод о перспективности дальнейших исследований в области оптимизации параметров ГНМ, влияния их работы на сеть энергоснабжающей организации, выбора наилучшей стратегии управления.

В работе [6] предложен подход к снижению колебаний активной мощности, выда-

ваемой ФУ, основанный на ограничении режима работы контроллера для отслеживания точки максимальной мощности (maximum power point tracking controller – MPPT-controller). На базе этого подхода авторами разработана специальная скоординированная стратегия управления ГНМ. С математической точки зрения эта стратегия базируется на использовании модификации метода роя частиц с применением так называемого «коэффициента инерции» (inertia weight). При решении анализируемой проблемы её рассматривали как проблему сложной многокритериальной частично целочисленной комбинаторной нелинейной оптимизации с заданными ограничениями в виде равенств и неравенств, поскольку при этом учитывались такие критерии, как минимизация суммарных потерь мощности в элементах ГНМ, оптимальное значение уровня заряда АБ и СК, получение максимального годового дохода от генерации ЭЭ с помощью ФУ, обеспечение минимальных инвестиционных затрат, затрат на обслуживание и эксплуатацию ФУ, минимальных затрат из-за ухудшения свойств АБ, а также минимальной величины возможных штрафных санкций за превышение допустимых пределов уровня активной колебаний мощности.

В [7] представлен «умный» встраиваемый модуль, состоящий из СК, литий-ионной батареи, двунаправленных преобразователей, контроллера мощности и контроллера режима, который предназначен для увеличения срока службы свинцово-кислотных АБ за счёт снижения негативного влияния колебаний и бросков тока, вызванных изменениями солнечной радиации. Эффективность применения предлагаемого модуля была верифицирована путём имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink с реальными данными об изменениях солнечной радиации в сельской местности в районе г. Кучинг (провинция Саравак, Малайзия). Результаты

имитационного моделирования были подтверждены авторами статьи на практике с помощью прототипа реальной ФУ и многочисленных экспериментов.

Цель работы – продемонстрировать возможности экспериментальной установки, которая позволяет осуществить мониторинг и анализ протекающих электромагнитных процессов в электрических сетях с СП (выполнить измерения параметров режима (токи, напряжения) и параметров элементов схемы (кривые заряда и разряда СК, остаточное напряжение и т.д.)); представить результаты экспериментальных исследований эффективности применения СК как средств сглаживания отклонений и колебаний напряжения, которые могут возникнуть при работе СП, и результаты имитационного моделирования в среде PSCAD (Канада).

На кафедре электроэнергетических комплексов и систем ГВУЗ «Приазовский гос-

ударственный технический университет» была собрана экспериментальная установка, состоящая из СП мощностью 10 Вт, СК типа Power Store с номинальным напряжением 2,7 В и ёмкостью 100 Ф, современных преобразователей напряжения и цифрового мультиметра Sanwa (Япония), подключенного к ноутбуку с помощью специального кабеля, что позволило в режиме реального времени фиксировать 2-3 замера за секунду, используя программу PC Link (Япония). Внешний вид экспериментальной установки показан на рис. 3, а внешний вид СК – на рис. 4. Экспериментальная установка используется в учебном процессе ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» при проведении лабораторных работ по дисциплине «Альтернативные источники электроэнергии». Схемы замещения СП и СК приведены на рис. 5, 6 [8-15].



Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки



Рис. 4. Внешний вид СК типа Power Store

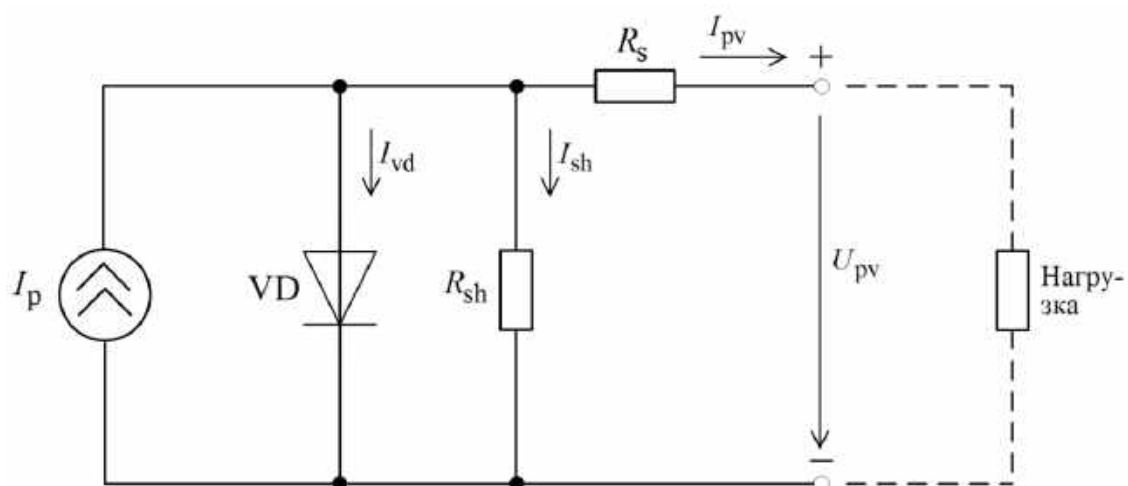


Рис. 5. Схема замещения СП

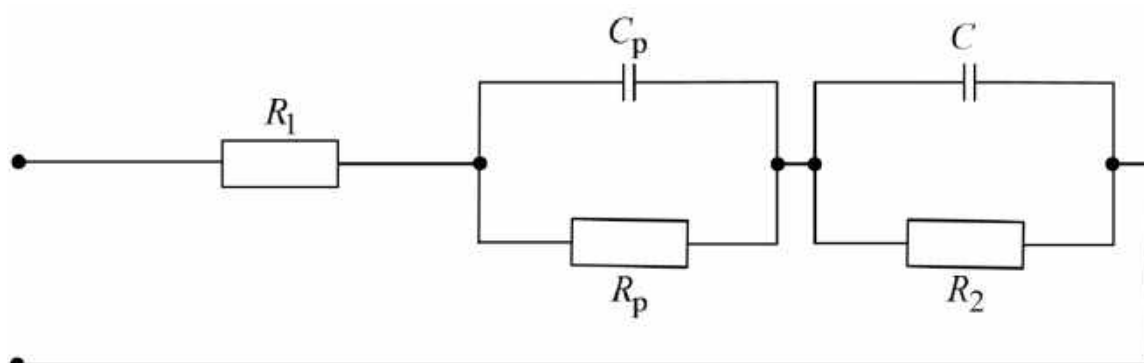


Рис. 6. Схема замещения СК

На схеме замещения СП (рис. 5) обозначены: I_p – эквивалентный источник тока; R_s – последовательное сопротивление, характеризующее наличие сопротивления контактов; R_{sh} – эквивалентное шунтирующее сопротивление. На схеме замещения СК (рис. 6) обозначены: R_1 – сопротивление, отображающее потери мощности, обусловленные процессами «заряд-разряд»; R_p , C_p – сопротивление и ёмкость, отображающие быстропротекающие процессы «заряд-разряд», соответственно; C – ёмкость, характеризующая способность накапливать заряд (энергию); R_2 – сопротивление, отображающее влияние эффекта саморазряда.

В соответствии с результатами исследований [12, 13] ёмкость C_p можно определить следующим образом:

$$C_p = C/13. \quad (2)$$

Сопротивление R_p и ёмкость C_p связаны с постоянной времени τ , отображающей время циклов «заряд-разряд», известным соотношением:

$$R_p = \tau/C_p. \quad (3)$$

Величину сопротивления R_2 , отображающего влияние эффекта саморазряда, для практических расчётов можно принять равной $R_2 = 18$ кОм [12].

Схема замещения СП (рис. 5) используется для проведения исследований (моделирования) в условиях, отличных от условий стандартного теста (standard test condition (STC)). Именно для условий стандартного теста производители ФУ приводят паспортные данные СП (интенсивность солнечной радиации составляет $G_n = 1000$ Вт/м², а температура СП – $T_n = 25$ °С).

Уравнение, которое математически описывает вольт-амперную характеристику

(ВАХ) реальной СП, состоящей из ряда последовательно и параллельно соединённых ячеек, можно представить в виде:

$$I_{pv} = I_p - I_0 \left(\exp \left(\frac{U_{pv} + R_s I_{pv}}{\alpha N_s \phi_t} \right) - 1 \right) - \frac{U_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}}, \quad (4)$$

где I_p – ток, генерируемый реальной ФУ; I_0 – обратный ток диода, показанного на рис. 5; U_{pv} – напряжение на зажимах нагрузки; $\phi_t = kT/q$ – тепловой (температурный) потенциал; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; T – температура р-п-перехода, К; $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; при $T_n = 25$ °С тепловой потенциал $\phi_t = 0,026$ В; $\alpha = 1 \div 2$ – коэффициент идеальности диода, зависящий от материала полупроводника; N_s – количество последовательно соединённых ячеек в составе СП.

Уравнение (4) описывает так называемую «однодиодную модель», представленную на рис. 5 [8-11]. В качестве примера на рис. 7 показана типичная ВАХ реальной СП, построенная с учётом уравнения (4). На этой ВАХ можно выделить три характерные точки: точка, соответствующая режиму короткого замыкания (КЗ), – $(0, I_{KЗ})$; точка максимальной мощности (maximum power point (MPP)) – (U_{MPP}, I_{MPP}) ; точка, соответствующая режиму холостого хода (ХХ) – $(U_{ХХ}, 0)$.

Вид ВАХ реальной СП, показанной на рис. 7, зависит как от внутренних параметров СП (сопротивления R_s и R_{sh}), так и от параметров окружающей среды (реальная температура СП T и реальная интенсивность солнечной радиации G).

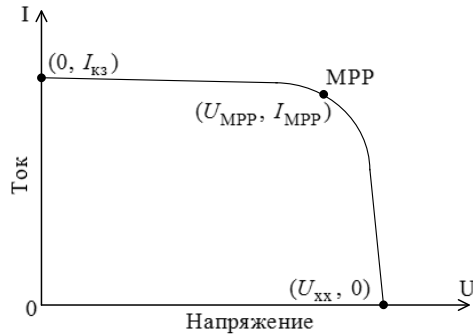


Рис. 7. Типичная ВАХ реальной ФУ

Входящие в уравнение (4) параметры I_p , R_s , R_{sh} , α , I_0 в паспортных данных на СП производителями не приводятся. Большинство производителей приводят, как правило, только ряд экспериментально полученных данных, касающихся электрических и тепловых характеристик СП для условий STC: максимальная мощность $P_{max n}$; ток КЗ $I_{k3 n}$; напряжение ХХ $U_{xx n}$; ток, соответствующий точке максимальной мощности I_{MPP} ; напряжение, соответствующее точке максимальной мощности U_{MPP} ; температурный коэффициент изменения тока K_I (по отношению к току $I_{k3 n}$); температурный коэффициент изменения напряжения K_U (по отношению к напряжению $U_{xx n}$). В качестве примера в табл. 1 приведены параметры СП мощностью 10 Вт, используемой в составе экспериментальной установки, показанной на рис. 3.

Таблица 1

Параметры СП

$P_{max n}$	10 Вт
$I_{k3 n}$	0,61 А
$U_{xx n}$	21,75 В
I_{MPP}	0,56 А
U_{MPP}	17,83 В
K_I	0,05 %/°C
K_U	-0,036 %/°C

Ток I_p линейно зависит от интенсивности солнечной радиации и температуры. Ток I_p можно найти из выражения [9, 10]:

$$I_p = \left(I_{k3 n} + K_I(T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} \quad (5)$$

Ток I_0 можно определить следующим образом [9, 10]:

$$I_0 = \frac{I_{k3 n} + K_I(T - T_n)}{\exp\left(\frac{U_{xx n} + K_U(T - T_n)}{\alpha N_s \phi_t}\right) - 1} \quad (6)$$

Для условий STC с достаточной для практических расчётов точностью можно принять сопротивление R_{sh} равным бесконечности ($R_{sh} = \infty$). В этом случае ток $I_p = I_{k3 n}$ и сопротивление R_s можно рассчитать по формуле [11]:

$$R_s = \frac{\alpha \phi_t \ln\left(1 - \frac{I_{MPP}}{I_p}\right) - U_{MPP} + U_{xx n}}{I_{MPP}} \quad (7)$$

В табл. 2 представлены результаты расчёта параметров R_s и I_0 по формулам (6), (7) для условий STC ($I_p = I_{k3 n}$) при значениях коэффициента идеальности диода $\alpha = 1$ и $\alpha = 2$ с учётом паспортных данных СП мощностью 10 Вт, представленных в табл. 1 (для рассматриваемой СП $N_s = 36$). Приведенные в табл. 2 параметры могут быть использованы на практике для получения значений (U_{pv}, I_{pv}) при изменении параметров окружающей среды.

Таблица 2

Результаты расчёта параметров R_s и I_0

$\alpha = 1$	$\alpha = 2$
$R_s = 6,88 \text{ Ом}$	$R_s = 6,77 \text{ Ом}$
$I_0 = 4,95 \cdot 10^{-11} \text{ А}$	$I_0 = 5,49 \cdot 10^{-6} \text{ А}$

Паспортные данные используемых в составе экспериментальной установки СК типа Power Store приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры СК	
Номинальное напряжение при 65 °С	2,7 В
Максимально допустимое кратковременное перенапряжение (< 1 с)	2,85 В
Номинальная ёмкость	100 Ф
Максимальное отклонение ёмкости	0 – +20 %
Среднее отклонение ёмкости	0 – +10 %
Максимальное значение эквивалентного последовательного сопротивления, нормируемого при постоянном токе	12 мОм
Среднее значение эквивалентного последовательного сопротивления, нормируемого при постоянном токе	8 мОм
Максимальное значение тока утечки	0,26 мА
Максимальное значение длительно допустимого тока	10 А
Максимальное амплитудное значение неповторяющегося тока	61 А
Максимальное значение запасаемой энергии при номинальном напряжении	0,1 Вт·ч
Удельная мощность	3,47 Вт/кг
Диапазон рабочих температур	-40 °С ÷ ÷ 65 °С
Наработка до отказа	1500 ч
Срок службы при комнатной температуре и при номинальном напряжении	10 лет
Количество циклов «заряд-разряд» до разрушения	500000

Поскольку СК типа Power Store имеют номинальное напряжение 2,7 В, а напряжение СП $U_{\text{ххп}} = 21,75 \text{ В}$, то для согласования напряжений СП и СК используется понижающий преобразователь напряжения 4,5-35 В / 1,23-34 В, параметры которого представлены в табл. 4, а внешний вид показан на рис. 8. Так как в качестве нагрузки используется лампа накаливания мощностью 4 Вт напряжением 12 В, то для согласования напряжений СП и нагрузки используется ещё один понижающий преобразователь напряжения 4,5-35 В / 1,23-34 В. Кроме этого, в составе экспериментальной установки задействован и повышающий преобразователь напряжения 2-24 В / 5-28 В, параметры которого приведены в табл. 5, а внешний вид показан на рис. 9.

Таблица 4

Параметры понижающего преобразователя напряжения

Диапазон регулирования входного напряжения	4,5-35 В
Диапазон регулирования выходного напряжения	1,23-34 В
Выходной ток при наличии дополнительного радиатора охлаждения	3 А
КПД	92 %
Диапазон рабочих температур	-40 °С ÷ ÷ 85 °С



Рис. 8. Внешний вид понижающего преобразователя напряжения

Таблиця 5

Параметры повышающего преобразователя напряжения

Диапазон регулирования входного напряжения	2-24 В
Диапазон регулирования выходного напряжения	5-28 В
Выходной ток	2 А
КПД	94 %
Диапазон рабочих температур	-40 °С ÷ 85 °С



Рис. 9. Внешний вид повышающего преобразователя напряжения

На первом этапе исследований были выполнены измерения напряжения на СК с целью получения данных о процессах заряда и разряда. Для регистрации напряжения в режиме реального времени был использован цифровой мультиметр Sanwa типа PC 510a (внешний вид представлен на рис. 10), который был подключен к ноутбуку с помощью специального кабеля, что позволило фиксировать 2-3 измерения за секунду, используя программу PC Link (Япония).

Графики, которые демонстрируют изменение напряжения на СК в процессе заряда и разряда, приведены на рис. 11, 12 (эксперимент проводился с использованием четырёх СК – два последовательно соединённых СК были параллельно включены с ещё двумя последовательно соединёнными СК с целью согласования напряжения между повышающим преобразователем напряжения и СК).



Рис. 10. Внешний вид цифрового мультиметра Sanwa типа PC 510a

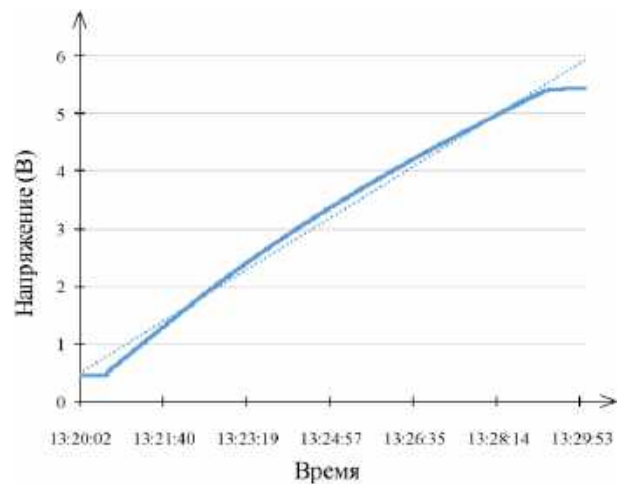


Рис. 11. График, который демонстрирует изменение напряжения на СК в процессе заряда

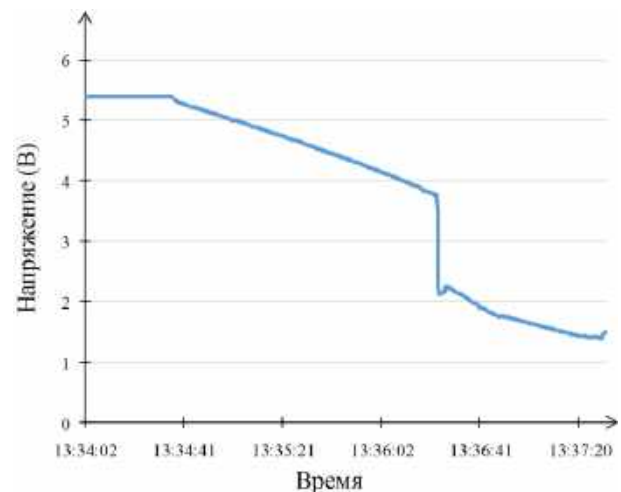


Рис. 12. График, который демонстрирует изменение напряжения на СК в процессе разряда на нагрузку в виде лампы накаливания мощностью 4 Вт напряжением 12 В

Как видно из рис. 11, заряд СК начинается с какого-то начального напряжения, обусловленного наличием остаточного заряда (точное значение этого начального напряжения по данным эксперимента составило 0,12 В). На рис. 12 в момент времени 13:36:22 наблюдается резкий спад напряжения, вызванный наличием минимально допустимого напряжения на входе повышающего преобразователя напряжения и качеством предшествующего процесса заряда с точки зрения накопленной ёмкости.

Следующий этап исследований предусматривал регистрацию напряжений при изменении солнечной радиации. На рис. 13 показан график изменения напряжения, зарегистрированного на выходе исследуемой СП при имитации облаков или других преград, вызывающих затемнение. График изменения напряжения на рис. 13 получен непосредственно с помощью программы PC Link.

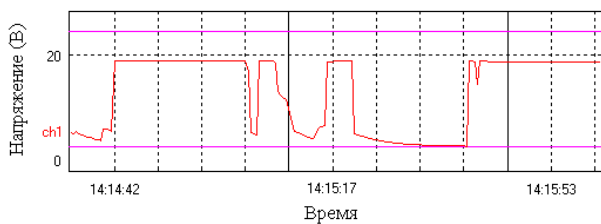


Рис. 13. График изменения напряжения, зарегистрированного на выходе исследуемой СП при имитации облаков или других преград, вызывающих затемнение

Эффективность применения СК как средств сглаживания отклонений и колебаний напряжения, которые могут возникнуть при работе СП, продемонстрирована на рис. 14. Изменения напряжения, наблюдающиеся до момента времени 14:17:14, возникли за счёт изменения солнечной радиации при появлении облаков (до указанного времени СК не были подключены). После указанного времени отклонения и колебаний напряжения не наблюдаются, что подтверждает эффективность применения СК.

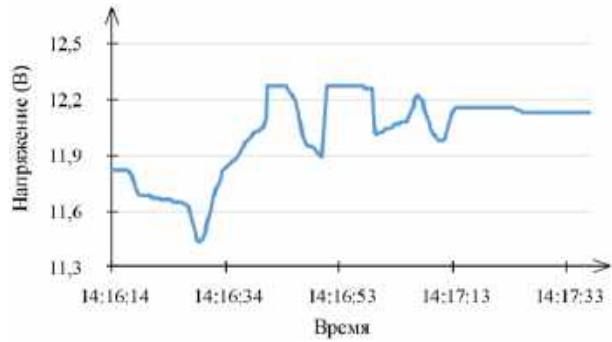


Рис. 14. График изменения напряжения в точке подключения нагрузки

Помимо экспериментальных исследований с использованием цифрового мультиметра Sanwa типа PC 510a и программы PC Link, было выполнено имитационное моделирование в среде PSCAD (Канада) с целью получения графика изменения напряжения на СК в процессе заряда. Программа PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) представляет собой графический интерфейс пользователя для программы моделирования электромагнитных переходных процессов EMTDC (Electromagnetic Transients including DC). Она содержит библиотеку готовых простых и сложных электрических элементов, элементов управления, элементов отображения графиков, измерительных приборов и т.д., что позволяет выполнять схематическое построение электрических цепей, анализировать результаты моделирования и управлять данными. Если в библиотеке готовых элементов отсутствует требуемая модель, пользователь может создать собственную путём соединения существующих элементов в схему или путём создания её с нуля.

На рис. 15 представлена имитационная модель эквивалентной схемы замещения СК (рис. 6), разработанная в среде PSCAD [12, 13] (эквивалентная схема замещения экспериментальной установки и график изменения напряжения на СК в процессе заряда показаны на рис. 16 и 17, соответственно).

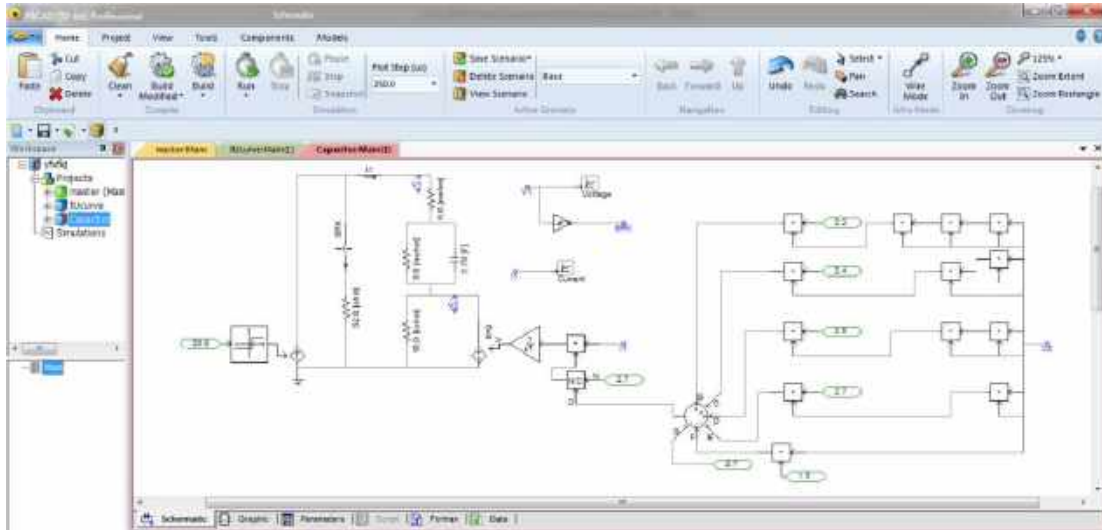


Рис. 15. Эквивалентная схема замещения СК, разработанная в среде PSCAD

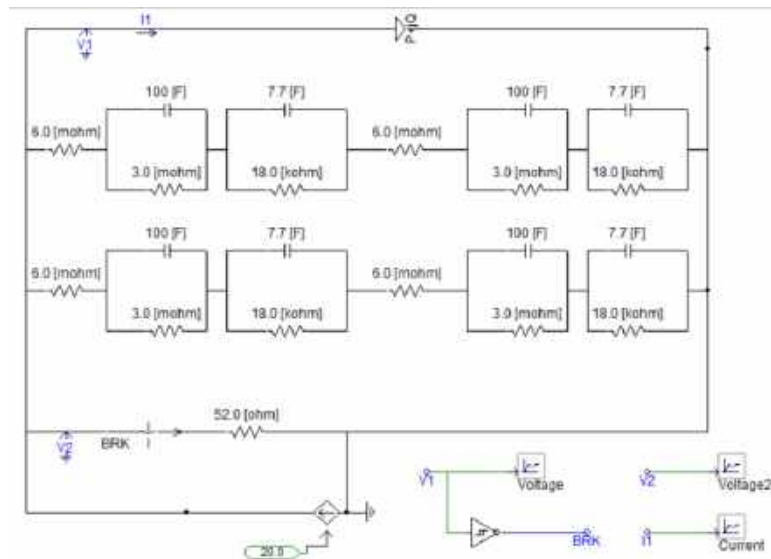


Рис. 16. Эквивалентная схема замещения экспериментальной установки в среде PSCAD

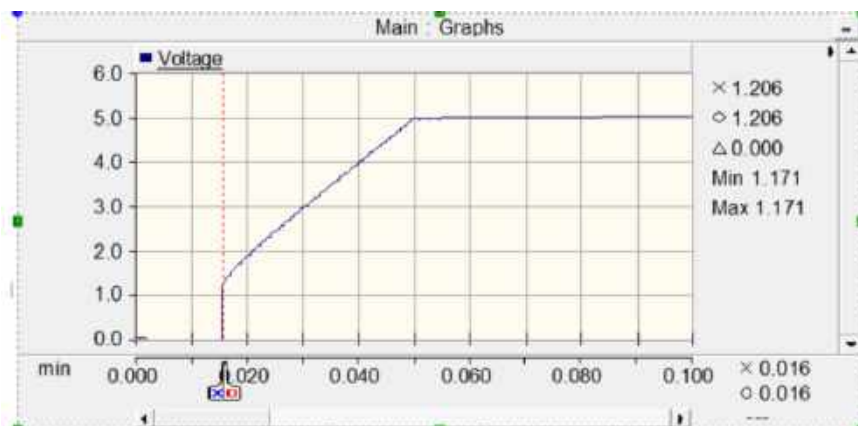


Рис. 17. График изменения напряжения на СК в процессе заряда

Висновки

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработана экспериментальная установка, состоящая из СП мощностью 10 Вт, СК с номинальным напряжением 2,7 В и ёмкостью 100 Ф каждый, преобразователей напряжения и нагрузки в виде лампы накаливания мощностью 4 Вт напряжением 12 В, которая позволяет осуществить мониторинг и анализ протекающих электромагнитных процессов в электрических сетях с СП (выполнить измерения параметров режима (токи, напряжения) и параметров элементов схемы (кривые заряда и разряда СК, остаточное напряжение и т.д.)).

2. Измерения и регистрация напряжений в разных точках схемы были выполнены с помощью цифрового мультиметра Sanwa (Япония), подключенного к ноутбуку с помощью специального кабеля, что позволило в режиме реального времени фиксировать 2-3 измерения за секунду, используя программу PC Link (Япония).

3. Экспериментально подтверждена эффективность применения СК как средств сглаживания отклонений и колебаний напряжения, которые могут возникнуть при работе СП.

4. В среде PSCAD (Канада) разработаны имитационные модели эквивалентной схемы замещения СК и эквивалентной схемы замещения экспериментальной установки, которые позволили получить график изменения напряжения на СК в процессе заряда.

5. Представленная в работе экспериментальная установка используется в учебном процессе ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» при проведении лабораторных работ по дисциплине «Альтернативные источники электроэнергии».

6. В настоящее время проводятся исследования в области оптимизации параметров ГНМ с целью увеличения срока службы традиционно применяемых в составе ФУ

СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АБ.

Библиографический список

1. Tragianni, S. Supercapacitor sizing based on comparative study of PV power smoothing methods [Text] / S. D. Tragianni, O. K. Oureilidis, S. C. Demoulias // Proc. 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). – 28-31 August 2017. – Heraklion (Greece). – P. 1 – 6.
2. Pegueroles-Queralt, J. A power smoothing system based on supercapacitors for renewable distributed generation [Text] / J. Pegueroles-Queralt, F. D. Bianchi, O. Gomis-Bellmunt // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2015. – Vol. 62. – No. 1. – P. 343 – 350.
3. Masaki, M. S. A hierarchical predictive control for supercapacitor-retrofitted grid-connected hybrid renewable systems [Text] / M. S. Masaki, L. Zhang, X. Xia // Applied Energy. – 2019. – Vol. 242. – No. 9. – P. 393 – 402.
4. A capacity configuration control strategy to alleviate power fluctuation of hybrid energy storage system based on improved particle swarm optimization [Text] / T. Wu, X. Shi, L. Liao, C. Zhou, H. Zhou, Y. Su // Energies. – 2019. – Vol. 12. – No. 4. – P. 642 – 653.
5. Overview on hybrid solar photovoltaic-electrical energy storage technologies for power supply to buildings [Text] / J. Liu, X. Chen, S. Cao, H. Yang // Energy Conversion and Management. – 2019. – Vol. 187. – No. 9. – P. 103 – 121.
6. Optimal allocation of hybrid energy storage systems for smoothing photovoltaic power fluctuations considering the active power curtailment of photovoltaic [Text] / W. Ma, W. Wang, X. Wu, R. Hu, F. Tang, W. Zhang, X. Han, L. Ding // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – No. 1. – P. 74787 – 74799.

7. Battery lifetime enhancement via smart hybrid energy storage plug-in module in standalone photovoltaic power system [Text] / W. Jing, C. H. Lai, D. K. X. Ling, W. S. H. Wong, M. L. D. Wong // Journal of Energy Storage. – 2019. – Vol. 21. – No. 1. – P. 586 – 598.
8. Rekioua, D. Optimization of photovoltaic power systems: modelization, simulation and control [Text] / D. Rekioua, E. Matagne. – London: Springer-Verlag, 2012. – 296 p. – ISBN 978-1-4471-2348-4.
9. Villalva, M. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays [Text] / M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. R. Filho // IEEE Transaction on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24. – No. 5. – P. 1198 – 2008.
10. Villalva, M. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays [Text] / M. G. Villalva, J. R. Gazoli, E. R. Filho // Proc. Brazilian Power Electronics Conference (COBEP). – 27 September – 1 October 2009. – Bonito-Mato Grosso do Sul (Brazil). – P. 1244 – 1254.
11. Development of a new compound method to extract the five parameters of PV modules [Text] / J. Bai, S. Liu, Y. Hao, Z. Zhang, M. Jiang, Y. Zhang // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 79. – No. 3. – P. 294 – 303.
12. Johansson, P. Comparison of simulation programs for supercapacitor modelling [Text] / P. Johansson, B. Andersson. – M.Sc. thesis, Dept. of Energy and Environment, Div. of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2008. – 131 p.
13. Hadartz, M. Battery-supercapacitor energy storage [Text] / M. Hadartz, M. Julander. – M.Sc. thesis, Dept. of Energy and Environment, Div. of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2008. – 117 p.
14. Cultura, A. B. Modeling, evaluation and simulation of a supercapacitor module energy storage application [Text] / A. B. Cultura, Z. M. Salameh // Proc. International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications (CISIA 2015). – 28-29 June 2015. – Bangkok (Thailand). – P. 876 – 882.
15. Saha, P. Equivalent circuit model of supercapacitor for self-discharge analysis – A Comparative Study [Text] / P. Saha, M. Hanra // Proc. International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPE). – 3-5 October 2016. – Paralakhemundi (India). – P. 1381 – 1386.

Ключові слова: суперконденсатор, сонячна панель, експериментальна установка, якість електроенергії, згладжування, криві заряду та розряду, програмне забезпечення PSCAD, моделювання.

Ключевые слова: суперконденсатор, солнечная панель, экспериментальная установка, качество электроэнергии, сглаживание, кривые заряда и разряда, программное обеспечение PSCAD, моделирование.

Keywords: supercapacitor, photovoltaic panel, experimental setup, power quality, smoothing, charge and discharge curves, PSCAD software, simulation.

Рецензенти:
проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,
проф., д.ф.-м.н., В.І. Гаврилюк.

Поступила в редколлегию 10.05.2019
Принята к печати 17.05.2019

УДК 621.331

Д. С. БЕЛУХИН - к.т.н, доцент, каф. «Электроподвижной состав железных дорог»,
Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика
В. Лазаряна, comandor04@mail.ru, ORCID 0000-0002-2791-617X

СОХРАНЕНИЕ ГРУППИРОВОК ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Введение

В настоящее время на железных дорогах Украины эксплуатируются электровозы и электропоезда постоянного тока номинального напряжения 3000 В, у которых пусковой режим и регулирование скорости движения осуществляется способом, включающим операции переключения пусковых резисторов контакторами, трехкратное переключение схемы соединения тяговых двигателей, уменьшение тока через обмотки главных полюсов тяговых двигателей шунтированием их резисторами с помощью контакторов. При этом в переходном режиме пуска и регулирования скорости движения электроподвижного состава (ЭПС) затрачивается значительная доля потребляемой на тягу электроэнергии. При частых пусках потери электроэнергии значительно возрастают.

Многократное переключение большого количества пусковых и шунтирующих резисторов электропневматическими контакторами при больших токах обуславливает их износ и увеличение эксплуатационных расходов на обслуживание и ремонт.

Указанные выше недостатки ЭПС могут быть устранены при оборудовании его импульсным преобразователем для регулирования напряжения на тяговых двигателях [1]. Такой преобразователь содержит преобразователь на основе тиристоров, диод, LC-фильтр переменной составляющей тока на входе и сглаживающий реактор в цепи якоря тягового двигателя. Коммутационная способность полупроводниковых приборов импульсного преобразователя должна быть

рассчитана на полное рабочее напряжение и максимальный суммарный ток двигателей, что обуславливает высокие динамические характеристики тиристоров и диодов.

Обзор научных исследований

К настоящему времени проблема импульсного регулирования исследована в теоретическом плане достаточно полно, особенно в части изучения электромагнитных процессов в силовых цепях, синтеза схем преобразователей, взаимодействия системы импульсного регулирования с питающей сетью. Однако, большинство исследований посвящены внедрению импульсного регулирования на электропоездах постоянного тока [2]. Эти попытки внедрения оправдываются существенным экономическим эффектом по сравнению с электровозной тягой, где отсутствуют частые остановки. Но очевидные преимущества импульсного регулирования могут быть приемлемы и для оборудования электровозов такими системами. Так или иначе, а электровозы, которые выпущены относительно недавно (например ДЕ1, ВЛ11) имеют систему реостатного пуска, что создает предпосылки для их возможной модернизации.

Несмотря на то, что на ЭПС современной постройки с асинхронными тяговыми двигателями применяются тяговые статические преобразователи 4-го и 5-го поколений [2], в которых выполняется преобразование энергии для питания тяговых асинхронных двигателей, интерес к импульсному регулированию напряжения на тяговых двигателях постоянного тока сохраняется.

Так в работе [3] рассматриваются специфические особенности управления тяговыми преобразователями электроподвижного состава на основе тиристоров, раскрываются новые сведения о появлении дополнительных частот, инвариантных к частотам переключения тиристоров, их взаимодействие с системами безопасности движения поездов, раскрывается реальное число позиций регулирования цифровой системы управления в зависимости от времени коммутации силовых тиристоров преобразователя. В статье [4] рассматриваются вопросы повышения надежности многофазных систем тиристорного импульсного регулирования напряжения на электроподвижном составе постоянного тока. Таким образом, напрашивается логичный вывод, что тиристорное импульсное регулирование еще представляет некоторый научный и практический интерес.

В настоящее время новый электроподвижной состав создается на основе бесколлекторных тяговых двигателей с прямым частотно-импульсным регулированием напряжения без промежуточных регуляторов при питании от контактной сети постоянного тока и с применением неуправляемых выпрямителей с широтно-импульсным регулированием при питании от контактной сети переменного тока. Поэтому применение импульсного регулирования напряжения ЭПС постоянного тока на данном этапе может быть интересным в целях модернизации. Направлений внедрения широтно-импульсного регулирования в цепях находящегося в эксплуатации ЭПС не так уж и много. Это внедрение импульсного регулирования в цепях тяговых и собственных нужд. В тяговых цепях более перспективно, т. к. дает больший экономический эффект.

По условиям электромагнитной совместимости в тяговых электроприводах используют широтно-импульсное регулирование (ШИР) [1]. Рабочую частоту f стабилизируют на уровне, определяемом из сле-

дующих условий: для сглаживания пульсации первичного тока и тока двигателя следует повышать f ; повышение f ограничено частотными свойствами тиристорно-импульсного преобразователя, т. е. его быстродействием; частота f должна удовлетворять требованиям электромагнитной совместимости тягового электропривода с устройствами железнодорожной автоматики и связи.

Одним из общепринятых способов сглаживания пульсаций тока двигателя, если нет возможности повышения частоты, является увеличение расчетных параметров фильтров, что влечет за собой увеличение массы и габаритов. Рассмотрим влияние сохранения группировок соединения тяговых двигателей на параметры сглаживающего реактора.

В работе [5] рассматривается возможность сохранения группировок тяговых двигателей при внедрении импульсного регулирования для двух электропоездов: 6-осный (ЧС2) и 8-осный (ВЛ8). Оба электропоезда считаются достаточно устаревшими, однако большая часть грузовых и пассажирских перевозок на железных дорогах электрифицированных постоянным током осуществляется именно этими электропоездами. Известна модернизация электропоезда ЧС2, которая осуществлялась на Ярославском электропоездостроительном заводе [6]. Суть модернизации заключалась в замене группового контроллера на индивидуальные электропневматические контакторы и микропроцессорную систему управления. Однако, реостатный способ регулирования сохранен.

Методика

В качестве схемы преобразователя выбираем общеизвестную схему ключа постоянного тока на основе силовых тиристоров с коммутацией напряжением. Причиной такого выбора является наличие проверенных временем методик расчета элементов

таких преобразователей [7, 8]. Расчетная схема преобразователя представлена на рис. 1.

Схема имеет ряд недостатков, которые ограничивают ее применение, но целью работы является не выбор наиболее рациональной схемы силового преобразователя, а оценка ряда энергетических показателей при сохранении ступенчатого регулирования напряжения.

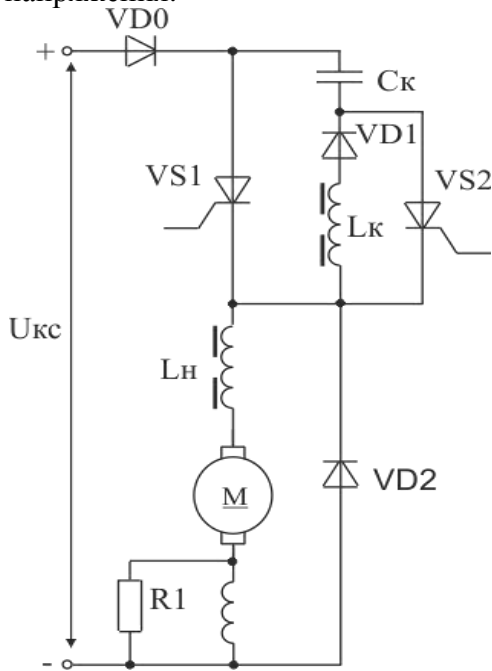


Рис. 1. Расчетная схема тиристорного преобразователя

Такие преобразователи предлагается делать многофазными [1]. Принимаем для расчета два параллельно включенных преобразователя на основе тиристорov, работающих на общую нагрузку в виде сглаживающего реактора и группы двигателей, а во входной цепи общий фильтр. Это позволяет повысить общую частоту, которую принимаем 800 Гц, а частота одной ветви преобразователя 400 Гц, что позволяет использовать современные силовые тиристоры.

Определимся с исходными данными для расчета плеча преобразователя. На электровозе ЧС2 установлены 6 тяговых двигателей типа АL-4846еТ номинальным

напряжением 1500 В, мощностью часовой режима 700 кВт, током часовой режима 495 А. На параллельном соединении часовой ток трех параллельных ветвей составляет 1485 А. На электровозе ВЛ8 установлены 8 тяговых двигателей типа НБ-406Б номинальным напряжением 1500 В, мощностью часовой режима 525 кВт, током часовой режима 380 А. На параллельном соединении часовой ток четырех параллельных ветвей составляет 1520 А. В одной фазе преобразователя принимаем расчетное значение тока 760 А в целях унификации преобразователя для указанных электровозов. Напряжение контактной сети 2400...4000 В. Результаты расчетов группового соединения полупроводниковых приборов в одной фазе плеча (см. рис. 1) преобразователя по методике [8] представлены в таблице 1. Полупроводниковые приборы для импульсного преобразователя выбраны доступные, т. е., выпускаемые электротехнической промышленностью. С целью снижения габаритных размеров преобразователя и количества элементов приняты в расчете приборы, которые исключают параллельное соединение – одна параллель тиристорov. Сам расчет элементов преобразователя не приводится, т. к. является типовым.

Системы импульсного регулирования предполагают разгон электровоза без перегруппировок двигателей. На электровозах постоянного тока принято ступенчатое реостатное регулирование с перегруппировкой тяговых двигателей. Рассмотрим влияние наличия группировок тяговых двигателей на такие параметры как потери мощности в преобразователи и коэффициент пульсаций во время пуска. Вполне очевидно, что сохранение группировок позволяет иметь промежуточные ходовые позиции, характерные для последовательного и последовательно-параллельного соединений. Сохранение таких позиций позволяет выполнять работу электровозом в случае наличия ограничений скорости или при стационарной работе.

Для выполнения качественного сравнения выполним анализ потерь энергии в реостатах и в элементах преобразователя. В качестве исходных данных принимаем два поезда под управлением электровозов. Первый поезд пассажирский, например № 63 Днепр – Одесса (17 вагонов в составе) под управлением электровоза ЧС2. Отправление в направлении станции Горяиново. Второй поезд грузовой под управление электровоза ВЛ8, состав 36 полувагонов, вес 3400 т. Оба электровоза имеют три типовых соединения тяговых двигателей: С – серийное, СП – серийно-параллельное, П – параллельное.

Для определения потерь в реостатах выполнен стандартный тяговый расчет по методике МПС [9, 10]. Детали расчета не приводим. На рис. 2 показаны зависимости скорости движения $V(S)$, тока электровоза $I(S)$ и времени движения $t(S)$ от пройденного пути до момента времени, когда выводится последний реостат. Рис. 2 построен для электровоза ЧС2. При скорости 28 км/ч происходит переход с С-соединения на СП-соединение. Этот момент происходит через 0,7 мин от начала движения, ток изменяется от 495 А до 990А. Переход с СП к П соединению через 2 мин от начала движения при скорости 59,5 км/ч и изменением тока до 1485 А. Вывод последней реостатной ступени параллельного соединения осуществляется при скорости 90 км/ч. Это происходит через 4 минуты после начала движения. Аналогичные расчеты графоаналитическим методом по методике МПС были проведены для электровоза ВЛ8. Процесс разгона до вывода последней реостатной ступени имеет следующие характерные моменты: переход с С на СП, скорость 10 км/ч, 1,1 мин, ток от 380 А до 760А; переход с СП к П через 2,4 мин при скорости 20,5 км/ч и изменением тока до 1520 А. Вывод последней реостатной ступени параллельного соединения осуществ-

ляется при скорости 43,3 км/ч через 5,9 минуты после начала движения.

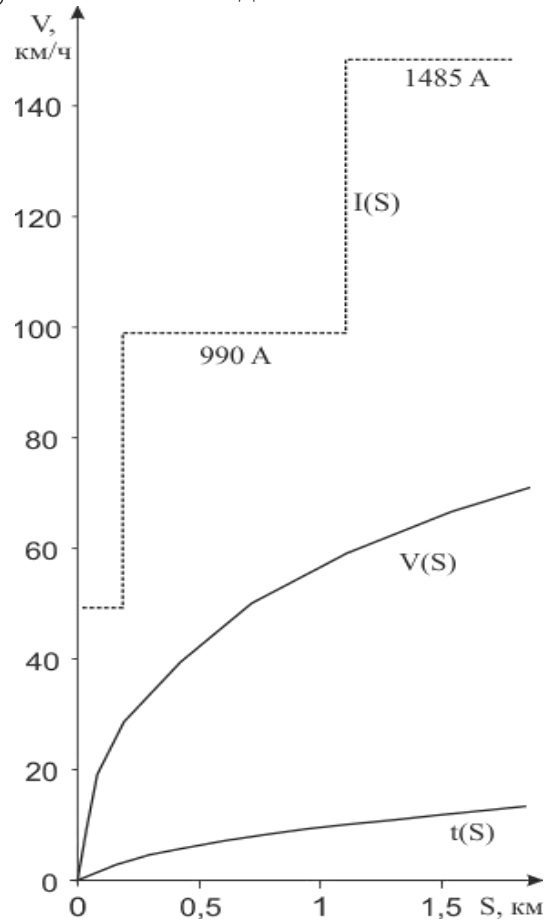


Рис. 2. Зависимости скорости, тока, времени движения электровоза ЧС2 с расчетным поездом в режиме пуска

Потребленная энергия на участке пуска электровозом [9]

$$A = \frac{\sum U_3 I_3 \Delta t}{60 \cdot 1000}, \quad (1)$$

где Δt – время, мин.; U_3 – напряжение на токоприемнике. Принимаем 3000 В; I_3 – средний ток электровоза в течение времени Δt .

В результате расчетов получено для электровоза ВЛ8 – 336,3 кВт·ч, для электровоза ЧС2 – 230 кВт·ч при пуске с поездами принятыми в расчете.

Таблица 1

Групповое соединение полупроводниковых приборов одного плеча преобразователя

Схемное обозначение (см. рис. 1)	VS1	VS2	VD1	VD2
Тип прибора	ТБ153-1000-24	ТБ151-50-12	ДЛ131-80-15	ДЛ1243-1000-28
Последовательно	4	6	3	4
Параллельно	1	1	1	1

Рассмотрим потери энергии в цепях преобразователя при безреостатном пуске. Основные элементы преобразователя, которые ощутимо влияют на потери энергии в цепях преобразователя, показаны на рис. 3.

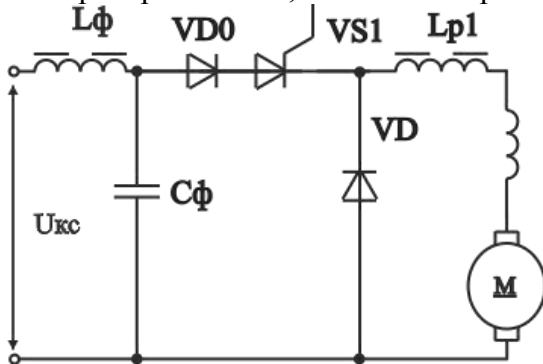


Рис. 3. Расчетная схема определения потерь энергии в цепях преобразователя

Потери мощности в элементах преобразователя определяются

$$\sum \Delta P = 2 \cdot (P_{F(AV)} + P_{T(AV)} + P'_{T(AV)} + P'_y + P_{L_k} + P_{L_p}) + P_{L_\phi}, \quad (2)$$

где $P_{F(AV)}$, $P_{T(AV)}$ – потери в цепях диодов и главного тиристора соответственно; $P'_{T(AV)}$ – потери в контуре коммутации; P'_y – потери в цепи управления; P_{L_k} – потери в коммутирующем реакторе; P_{L_p} – потери в реакторе входного фильтра; P_{L_ϕ} – потери в реакторе выходного фильтра.

Расчет перечисленных составляющих потерь выполнен по методике, предлагаемой в [11] и, в дальнейшем, не детализируется. Анализ потерь велся при разных ко-

эффициентах заполнения импульсной последовательности работы полупроводникового ключа λ . Результаты расчетов представлены на рис. 4 для электровоза ЧС2. Расчеты проведены исходя из того что, в одной фазе преобразователя на С-соединении коэффициент заполнения изменяется в диапазоне $0,01 \leq \lambda_{1\phi} \leq 0,5$, для СП-соединения $0,25 \leq \lambda_{1\phi} \leq 0,5$, для П-соединения $0,33 \leq \lambda_{1\phi} \leq 0,5$. Штриховой линией для П-соединения показан случай разгона электровоза только на П-соединении, т. е при изменении $0,01 \leq \lambda_{1\phi} \leq 0,5$.

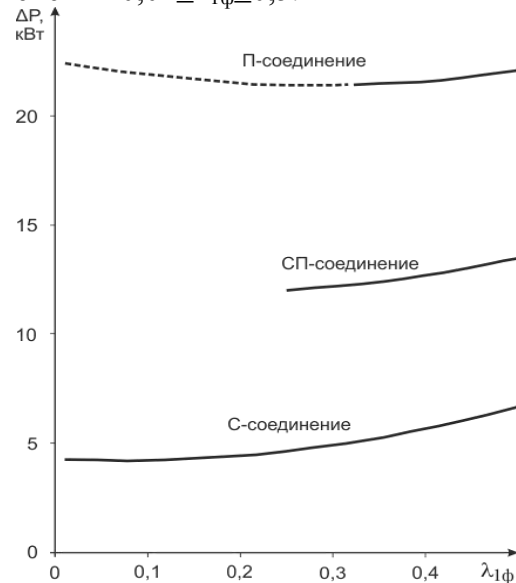


Рис. 4. Потери мощности в элементах преобразователя для электровоза ЧС2

Полагая, что время выхода на ходовую позицию П-соединения электровоза совпадает со временем реостатного пуска можно определить потери пуска при импульсном регулировании

$$A_p = \frac{\sum \Delta P_{cp} \cdot \Delta t}{60}, \quad (3)$$

где ΔP_{cp} – среднее значение потерь мощности преобразователя при работе на отдельном соединении двигателей.

Так для электровоза ЧС2 при наличии перегруппировок тяговых двигателей потери в цепях преобразователя составляют ≈ 1 кВт·ч, а в случае пуска только на П-соединении – $\approx 1,4$ кВт·ч. Для электровоза ВЛ8 в аналогичном случае 2 и 2,4 кВт·ч соответственно. Расчет подтверждает существенную экономию энергии при импульсном регулировании. Сохранение группировок дает дальнейшую экономию энергии и позволяет выполнять работу на промежуточных позициях с шунтированным преобразователем. Кроме того, в процессе пуска снижается интенсивность нагрева преобразователя за счет малой токовой нагрузки на С и СП соединениях.

Следующим аспектом, на который следует обратить внимание это размах пульсаций тока в цепях тяговых двигателей. Общеизвестно [1, 2, 8, 9, 11], что размах пульсаций в цепях тяговых двигателей при импульсном регулировании достигает максимума при коэффициенте заполнения $\lambda=0,5$. В общем случае пульсация тока определяется выражением

$$\Delta I = \frac{U_H \lambda (1-\lambda)}{Lf}, \quad (4)$$

где U_H – напряжение соединения; L – общая индуктивность цепи; f – частота работы ключа.

На рис. 5 показаны максимальные пульсации тока 6-осного электровоза в зависимости от λ , рассчитанные для параметров электровоза ЧС2. Сплошной линией показан возможный коэффициент заполнения при сохранении группировок тяговых двигателей. Наибольший максимум пульсации возможен на П-соединении при коэффициенте заполнения $\lambda=0,66$, что на 11% ниже,

чем при $\lambda=0,5$. Это позволяет уменьшить массу и габариты входных и выходных фильтров, либо при сохранении этих показателей снизить амплитуды пульсаций в цепях тяговых двигателей и воздействие на контактную сеть.

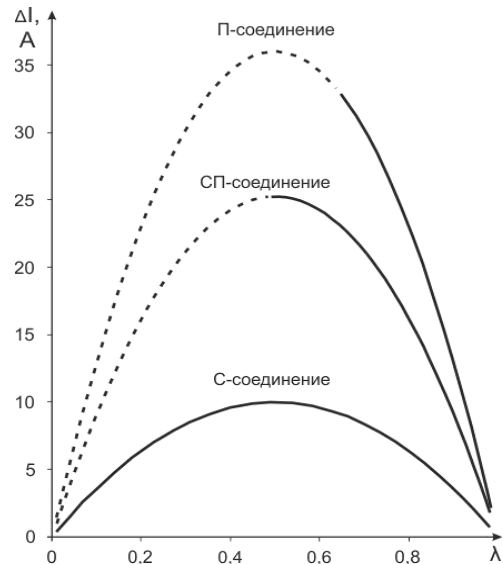


Рис. 5. Пульсации тока в цепи тяговых двигателей 6-осного электровоза

Для 8-осных электровозов, как показал расчет для электровоза ВЛ8, такого эффекта не наблюдается.

Выводы

Мировая практика имеет существенный опыт внедрения систем импульсного регулирования в цепях тяговых двигателей постоянного тока для электроподвижного состава. Себестоимость силовых полупроводниковых приборов снижается, что при росте тарифов на электрическую энергию позволяет сократить темпы окупаемости таких устройств при модернизации.

Выполненный в работе анализ для внедрения импульсного регулирования на электровозах ЧС2 и ВЛ8, которые еще массово применяются для вождения поездов в Украине подтвердил концепцию экономии энергоресурсов. Так внедрение импульсного регулирования в процессе пуска на электровозе ЧС2 позволяет снизить потери до

75 раз, а на ВЛ8 до 60 раз по сравнению с реостатами.

Сохранение группировок тяговых двигателей при внедрении импульсного регулирования позволяет получить промежуточные уровни скоростей, характерных группировкам (С-соединение, СП-соединение) с отключенным регулятором, дополнительно снизить потери и нагрев преобразователя. Для 6-осных электровозов (ЧС2) снизить до 11 % пульсации тока либо снизить габариты реакторов.

Библиографический список

1. Тихменев Б.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования: учебник [для студ. вузов]/ Б.Н. Тихменев, Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
2. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко та ін. – Х.: НТУ «ХП», 2007. – 192 с.
3. Калиниченко А. Я. Особенности работы цифровых систем управления тиристорными преобразователями на электроподвижном составе. / Развитие современной науки и прикладные аспекты. Сборник статей студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей. Том. Выпуск 7 Пермь: ИП Сигитов Т. М., 2016 С:10–13. ISBN: 978-5-9908647-2-6
4. Калиниченко А. Я., Фесечко А. И. Системы управления многофазными преобразователями. Вестник международного института управления. Частное образовательное учреждение высшего образования "Институт управления" (Архангельск), Номер: 3-4 (133-134). 2015 С: 102–105.
5. Белухин Д. С. Преимущества сохранения группировок тяговых двигателей при импульсном регулировании напряжения. // Проблемы и перспективы раз-

вития железнодорожного транспорта: Тезисы 73 Международной научно-практической конференции. – Д.: ДИИТ, 2013. – С.110-111.

6. Регулятор скорости для электровоза ЧС2К с индивидуальными электропневматическими контакторами реостатного пуска. Антонюк М. С. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. по спец. 05.22.07 - «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» Москва 2007 – 24 с.
7. Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление; Справ. пособие: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
8. Білухін Д. С. Електроніка та мікросхемотехніка: завдання на курсову роботу з методичними вказівками / Дніпропетр. націон. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – Д. – 2004. – 28 с.
9. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги: учебник для вузов ж.-д. трансп. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
10. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
11. Бирзниец Л. В. «Импульсные преобразователи постоянного тока» – М.: Энергия, 1974– 256 с.

Ключевые слова: электровоз, преобразователь, потери.

Ключові слова: электровоз, перетворювач, втрати.

Keywords: electric locomotive, converter, losses.

Рецензенты:

д. т. н., проф. Д. А. Босый
к. т. н., доц. В. Е. Кажан

Поступила в редколлегию 15.09.2019 р.
Принята в печать 30.09.2019 р.

УДК 621.321

О. С. ШАПОВАЛОВ – аспірант, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, sssanya1993@ukr.net

О. П. КАРАСЬОВ – студент, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 1998karasiov@gmail.com

ВИПРОБУВАННЯ АСИНХРОННИХ ТРИФАЗНИХ ДВИГУНІВ

Вступ

Відповідно до ГОСТ 2582-81 [1] електричні машини тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту випробовують при приймально-здавальних випробуваннях. Ці випробування є невід'ємною частиною технологічного процесу виготовлення або ремонту електричних машин.

Правила ремонту електричних машин [2] допускають скорочений регламент при проведенні випробувань асинхронних електричних машин, який складається з виміру опору ізоляції відносно корпусу машини і між котушками, вимір опору обмоток постійному струму та робота двигуна без навантаження. Це в першу чергу пов'язано з відсутністю спеціалізованих стендів для випробування асинхронних двигунів, але дане рішення призводить до зниження якості ремонту, оскільки не може виявити скритих дефектів, які можливо виявити лише при навантаженні.

Мета статті

Аналіз можливих схемних рішень реалізації системи взаємного навантаження при випробуванні асинхронних машин. Характеристика методів навантаження асинхронних двигунів.

Матеріал і результати роботи

Випробування під навантаженням без віддачі електроенергії для асинхронних машин характеризуються простотою реалізації, але й непродуктивними витратами

електроенергії, що на сьогодні є неприпустимим.

Сучасний розвиток напівпровідникової та мікропроцесорної техніки дозволив зменшити ціну на перетворювачі частоти до прийняттого рівня (наприклад перетворювачі частоти потужністю 50...100 кВт коштують 70...170 тис. грн. в залежності від модифікації), що дозволяє використовувати їх при побудові універсальних стендів з випробування трифазних асинхронних машин.

Однак на сьогодні відкритим залишається питання вибору схемного рішення системи взаємного навантаження трифазний асинхронних двигунів. Рядом авторів [3–4] було запропоновано схеми взаємного навантаження трифазних асинхронних двигунів з використанням асинхронних, синхронних генераторів, а також генераторів постійного струму, проаналізуємо ці схеми:

1) Система асинхронний двигун – асинхронний генератор з механічним перетворювачем частоти (рис. 1).

Дана схема являє собою дві однотипні асинхронні машини, асинхронний двигун (АД) і асинхронний генератор (АГ), вали роторів яких з'єднані між собою за допомогою редуктора. В машинах низької і середньої потужності замість редуктора також можливе використання ремінних варіаторів, а також гідравлічних передач.

Система працює наступним чином, асинхронний двигун отримує живлення з мережі, і через редуктор приводить в рух асинхронний генератор який працює зі збудженням від мережі. Редуктор потрібен для того щоб підвищити частоту обертання ге-

нератора вище синхронної, що є обов'язковою умовою роботи асинхронного генератора.

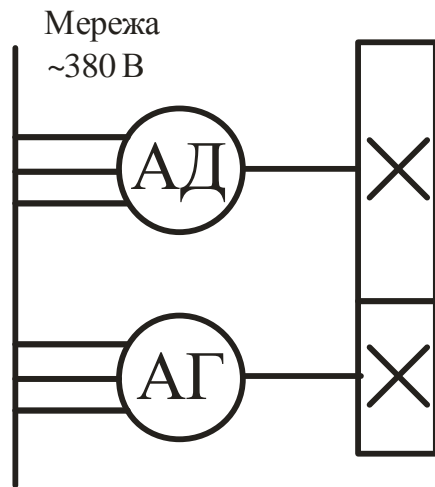


Рис. 1. Принципова схема взаємного навантаження асинхронних двигунів з механічним перетворювачем частоти

Перевагами даної схеми є:

а) відсутність частотних перетворювачів;

б) простота регулювання.

Недоліки даної схеми:

а) ступінчате регулювання при зубчатому редукторі;

б) прослизання ремня при використанні варіатора;

в) неможливість проводити випробування в широкому діапазоні частот.

2) Система асинхронний двигун – синхронний генератор з ланкою постійного струму (рис. 2).

Дана схема складається з двох машин змінного струму (асинхронного двигуна і синхронного генератора) і двох машин постійного струму (двигуна і генератора). Ротор асинхронного двигуна з'єднано з якорем генератора постійного струму, ротор синхронного генератора з'єднано з якорем двигуна постійного струму.

Працює схема наступним чином: асинхронний двигун отримує живлення від мережі, і навантажується генератором постійного струму. Генератор постійного струму

живить двигун постійного струму, який в свою чергу обертає ротор синхронного генератора. Генератор віддає частину енергії в мережу. Ланка постійного струму використовується для підвищення частоти обертання асинхронного генератора.

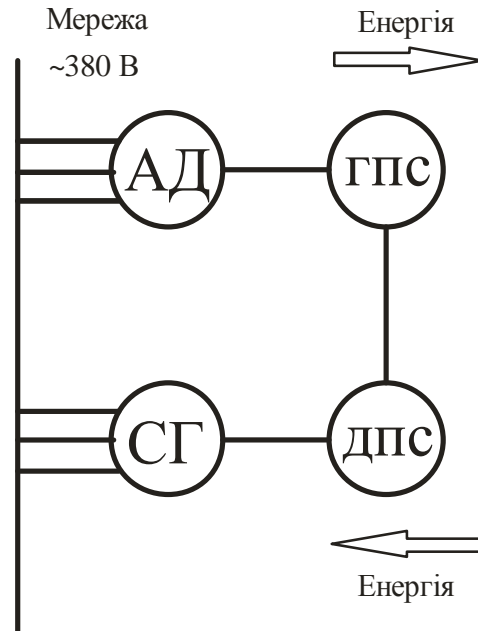


Рис. 2. Схема взаємного навантаження асинхронний двигун – синхронний генератор з ланкою постійного струму

Перевагою даної схеми є відсутність частотних перетворювачів.

Недоліки даної схеми:

а) велика кількість обладнання

б) низька енергоефективність

в) неможливість проводити випробування в широкому діапазоні частот

3) Система асинхронний двигун – асинхронний генератор з одним перетворювачем частоти (рис. 3).

Дана схема являє собою дві однотипні асинхронні машини, вали роторів яких з'єднані між собою за допомогою муфти. Асинхронний двигун отримує живлення від перетворювача частоти, що дозволяє підвищити частоту вище мережевої. Генератор працює зі збудженням від мережі.

Перевагою даної схеми є плавність регулювання.

Недоліки даної схеми:

- а) наявність частотного перетворювача;
- б) неможливість проводити випробування в широкому діапазоні частот.

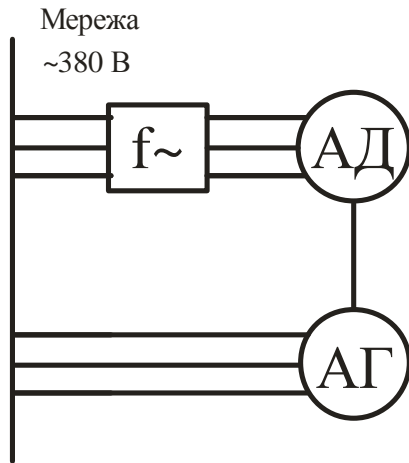


Рис. 3. Схема взаємного навантаження асинхронних двигунів з одним перетворювачем частоти

- 4) Система асинхронний двигун – асинхронний генератор з двома перетворювачами частоти(рис. 4).

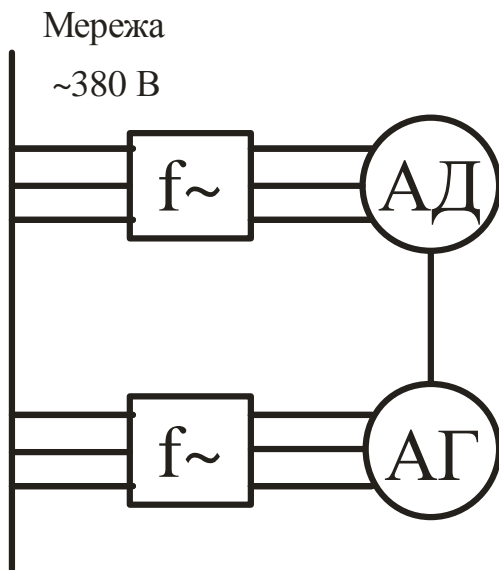


Рис. 4. Схема взаємного навантаження асинхронних двигунів з двома перетворювачами частоти

Дана схема являє собою дві однотипні асинхронні машини, вали роторів яких з'єднані між собою за допомогою муфти.

Живлення асинхронні машини отримують від двох перетворювачів частоти. При чому частотний перетворювач який живить асинхронний генератор повинен мати на вході (зі сторони мережі) керований випрямляч, для можливості віддачі енергії в мережу.

Перевагою даної схеми є можливість проводити випробування в широкому діапазоні живлячих частот.

Недоліки даної схеми:

- а) наявність двох перетворювачів частоти;
- б) перетворювач частоти який працює в парі з асинхронним генератором повинен мати інвертор з керованим випрямлячем.

- 5) Система асинхронний двигун – асинхронний генератор з двома перетворювачами частоти і ланкою постійного струму (ЛПС) між перетворювачами(рис. 5).

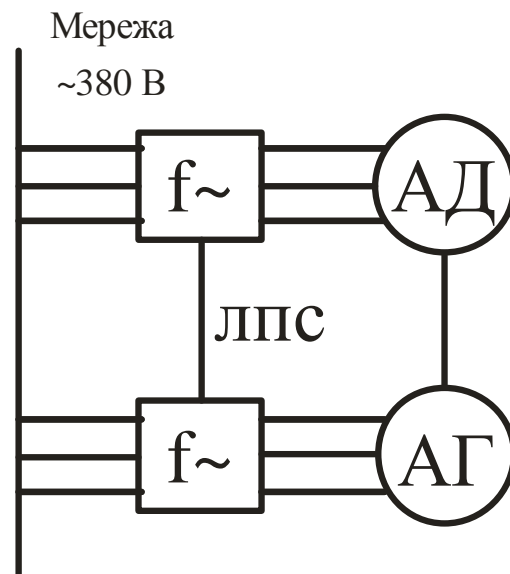


Рис. 5. Схема взаємного навантаження асинхронних двигунів з двома перетворювачами частоти і ланкою постійного струму між перетворювачами

Дана схема являє собою дві однотипні асинхронні машини, вали роторів яких з'єднані між собою муфтою. Живлення асинхронні машини отримують від двох однотипних перетворювачів частоти, які з'єднуються між собою за допомогою шини постійного струму. Вироблена генератором

енергія передається двигуну через ланку постійного струму.

Перевагою даної схеми є можливість проводити випробування в широкому діапазоні живлячих частот.

Недолік даної схеми наявність двох перетворювачів частоти.

б) Система асинхронний двигун – генератор постійного струму(ГПС) (рис.6).

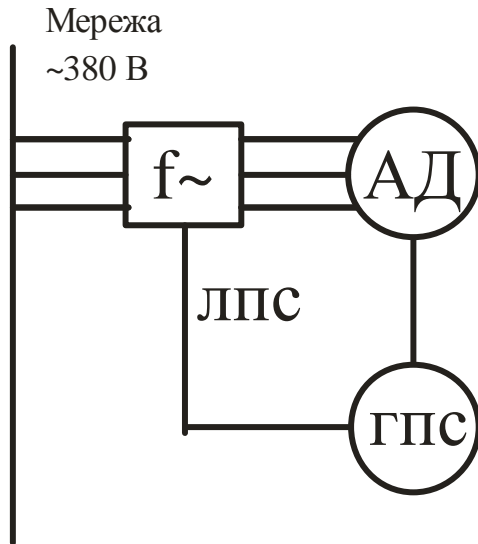


Рис. 6. Схема взаємного навантаження асинхронний двигун – генератор постійного струму

В даній схемі взаємне навантаження реалізується наступним чином: вал ротора асинхронного двигуна і вал якоря генератора постійного струму з'єднані за допомогою муфти, асинхронний двигун отримує живлення від статичного частотного перетворювача. В якості навантаження виступає генератор постійного струму, який віддає енергію в ланку постійного струму частотного перетворювача.

Перевагою даної схеми є можливість проводити випробування в широкому діапазоні живлячих частот.

Недоліки даної схеми:

а) одночасне випробування лише однієї машини змінного струму;

б) складність центровки валів машин різних типів і розмірів.

7) Система асинхронний двигун – синхронний генератор.

Дана схема являє собою дві машини змінного струму(асинхронна і синхронна) вали роторів яких з'єднані між собою. Асинхронний двигун отримує живлення від частотного перетворювача. В якості навантаження виступає синхронний генератор який віддає енергію в мережу.

Перевагою даної схеми є можливість компенсації реактивної енергії яка споживається стендом.

Недоліки даної схеми:

а) одночасне випробування лише однієї машини змінного струму;

б) складність центровки валів машин різних типів.

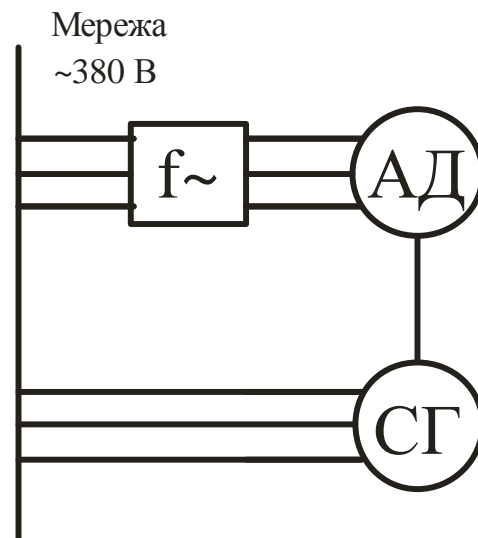


Рис. 7. Схема взаємного навантаження асинхронний двигун – синхронний генератор

Висновки

Попередній аналіз систем випробування трифазних асинхронних двигунів показав можливість реалізації взаємного навантаження як зі статичним перетворювачем частоти так і без нього, кожна зі схем має як свої переваги так і недоліки. Раціональність використання кожної окремої схеми потребує більш детального дослідження і обґрунтування виходячи з призначення і потужності випробовуваних електричних машин.

Бібліографічний список

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия [Текст]. – Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 34 с.
2. Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063 [Текст]. – К. : Видавничий дім «САМ», 2003. – 286 с.
3. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. – Л: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. – 408 с.
4. Авилов, В.Д. Патент RU 2433419 U1 «Испытание электрических машин» / В. Д. Авилов, А. И. Володин, В. Т. Данковцев, В. В. Лукьяненко. – Заявлено 15.06.2010; Опубл 10.11.2011г.

Ключові слова: взаємне навантаження, асинхронний двигун, енергозбереження, статичний перетворювач.

Ключевые слова: взаимная нагрузка, асинхронный двигатель, энергосбережения, статический преобразователь.

Keywords: mutual load, asynchronous motor, energy saving, static converter.

Рецензенти:

проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,
проф., д.т.н., А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 15.10.2019.

Прийнята до друку 28.10.2019.

УДК 621.321

М. М. КЕДРЯ – к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Т. М. СЕРДЮК – к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, serducheck-t@rambler.ru, ORCID:

М. Л. КУМΠΑН - Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

К. М. СЕРДЮК – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, serducheckt@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3338-099X

ЛІНЕАРИЗУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Побудова математичної моделі з електричним приводом постійного струму для транспортних засобів передбачає урахування перехідних процесів, які в свою чергу пов'язані з накопиченням або розсіюванням електромагнітної енергії в колах машин, а також механічної енергії обертаючих мас при переході від одного постійного стану до другого. Переважна більшість різних перехідних процесів у системі електричної тяги призводить до різкої зміни струму якоря двигуна (частіше його збільшення). У цих режимах помітно виявляється вплив індуктивності обмоток, нелінійності магнітних характеристик, вихрових струмів у магнітопроводах і ін. При цьому спостерігаються суттєві ускладнення в роботі двигунів, пов'язані в основному з тим, що зміна магнітного потоку значно відстає за часом від зміни струму отже, затримується зміна ЕРС, а рівновага напруг досягається тільки за рахунок збільшення спаду напруги в якірному колі, тобто струму якоря.

У системах регулювання тяги та гальмування в електрорухомому складі об'єктом регулювання звичайно вважають тяговий двигун. Статичні характеристики двигунів – залежності від струму якоря магнітного потоку $\Phi(i)$, швидкості $V(i)$ та сили тяги $F(i)$ – а також характеристика індуктивності $L(i)$ нелінійні [1 – 9]. Нелінійність за-

лежностей зумовлена кривою намагнічування, впливом вихрових струмів та розмагнічувальною реакцією якоря.

В першому наближенні, розглядаючи тяговий електропривод як лінеаризований об'єкт, можна припустити, що відхилення вхідних величин від сталих значень малі. В межах цих малих відхилень регульовані величини можна замінювати в точках, що відповідають сталому режиму.

Метою наукової роботи є розробка математичної моделі тягового електроприводу електровозу постійного струму для дослідження впливу зміни напруги в контактній мережі на тяговий електропривод.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити та лінеаризувати основні рівняння та залежності, що описують процес роботи електропривода – тягового двигуна електровоза ДЕ1;

- розробити динамічну структуру за системою лінеаризованих рівнянь та проаналізувати її;

- побудувати частотні характеристики роботи тягового електропривода;

- провести моделювання перехідних процесів в електроприводі при раптовій зміні напруги та буксуванні колісної пари.

Математична модель тягового електродвигуна

В статті розглядається електровоз постійного струму з індивідуальним тяговим приводом послідовного збудження. Такий привід можна представити у вигляді одновимірної електромеханічної системи, в якій керованою величиною є дотична сила тяги на ободі колісної пари. Керуючим впливом на привід буде напруга живлення двигуна. Режим управління приводом залежить від швидкості руху електровоза і струму двигуна [10].

На основі електричної схеми електровоза ДЕ-1 [1, 2] побудовано еквівалентну електричну розрахункову схему електропривода (рис. 1), де процес енергоперетворення представлений в приростах, відносно початкового рівноважного стану, основних величин: вхідна координата – приріст вхідної напруги Δu_k , а вихідна – відповідний йому приріст швидкості ΔV .

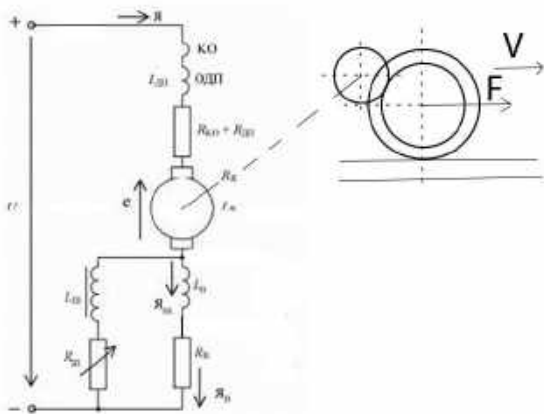


Рис. 1. Еквівалентна розрахункова схема тягового електроприводу

На рис. 1 використано такі позначення: $R_я$ – опір обмотки якоря; $L_я$ – індуктивність обмоток якоря; $L_в$ – індуктивність обмотки збудження; $R_в$ – опір обмотки збудження; $L_ш$ – індуктивність шунта; $R_ш$ – опір шунта; u_d – приріст напруги, прикладеної до двигуна; e – приріст ЕРС двигуна.

Для оцінки динамічних властивостей приводу необхідно мати диференціальні рівняння, які складаються на базі розрахункової схеми (див. рис. 1). Методика отримання рівнянь динаміки тягового приводу з певними припущеннями приведена в [10 – 13].

При складанні рівнянь було обумовлено, що магнітний потік, струм, проти-ЕРС, момент на валу і напруга, що підводиться до двигуна, мають малі відхилення від сталих значень. При таких змінах відхилення сили тяги і швидкості також приймаються малими. Крім цього, при складанні рівнянь передбачалося, що задані статичні характеристики $\Phi(i)$, $V(i)$, $F(i)$ представляють собою залежності магнітного потоку, швидкості і сили тяги від струму відповідно. Ці залежності отримують аналітично або експериментально для конкретних типів двигунів.

Диференціальне рівняння, що зв'язує напругу u_d зі струмом i має вид [3 - 5]:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = u_d - e, \quad (1)$$

де L – індуктивність, R – активний опір двигуна, e – електрорушійна сила (ЕРС).

Задавши малі прирости координатам i , u_d , e щодо початкового рівноважного стану, визначеного струмом i_0 , напругою u_{d0} , та ЕРС e_0 і підставивши ці вирази в диференціальне рівняння (1), було отримано:

$$L \frac{d(i_0 + \Delta i)}{dt} + R(i_0 + \Delta i) = (u_{d0} + \Delta u_d) - (e_0 - \Delta e). \quad (2)$$

Враховуючи, що $L \frac{di_0}{dt} = 0$ і для початкового рівноважного стану рівняння $Ri_0 = u_{d0} - e_0$, диференціальне рівняння (2) приймає вигляд:

$$L \frac{d(\Delta i)}{dt} + R\Delta i = \Delta u_{\text{д}} - \Delta e. \quad (3)$$

В операторній формі рівняння (3) можна записати у вигляді

$$(T_1 s + 1)\Delta i(s) = k_1[\Delta u_{\text{д}} - \Delta e], \quad (4)$$

де $T_1 = \frac{L}{R} = 0.0635 \text{ с}$ – стала часу;

$k_1 = \frac{1}{R} = 10,914 \text{ См}$ – коефіцієнт передачі.

Передаюча функція, що зв'яже вхідну $\Delta u_{\text{д}}(s) - \Delta e(s)$ і вихідну $\Delta i(s)$ координати:

$$W_1(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} = \frac{10,914}{0.0635s + 1}. \quad (5)$$

Аналогічно було знайдено передаючі функції для інших рівнянь, які описують процеси енергоперетворення в тяговому двигуні в приростах відповідних величин для регулювання двигуна постійного струму послідовного збудження. Отже, лінеаризована система рівнянь в малих приростах така:

$$\begin{cases} L \frac{d(\Delta i)}{dt} + R\Delta i = \Delta u_{\text{д}} - \Delta e, \\ \Delta \Phi = k_2 \Delta i, \\ \Delta e = k_3' \Delta V + k_3'' \Delta \Phi, \\ \Delta F_{\text{кд}} = k_4 \Delta i, \\ \Delta V(s)(T_2 s + 1) = k_5' \Delta F_{\text{кд}}(s) - k_5'' \Delta w_i(s); \end{cases} \quad (6)$$

де k_2 - коефіцієнт, отриманий після апроксимації характеристики намагнічування $\Delta \Phi = (3a_3 i_0^2 + 2a_2 i_0 + a_1) = k_2 \Delta i$; k_3' , k_3'' - коефіцієнти отримані з рівняння приросту ЕРС при збільшенні швидкості $\Delta e = C_1(\Phi \Delta V + V \Delta \Phi) = k_3' \Delta V + k_3'' \Delta \Phi$, k_4 – кутовий коефіцієнт дотичної до кривої $F_{\text{кд}}(i)$ при малих прирощеннях,

$k_4 = \frac{\Delta F_{\text{кд}}}{\Delta i}$; k_5' , k_5'' – коефіцієнти, отримані при виведенні рівняння прирощення швидкості,

$k_5' = \frac{n}{m_{\text{ел}}(1 + \gamma)(a_1 + 2a_2 V)}$,

$k_5'' = \frac{1}{a_1 + 2a_2 V}$, де n – кількість колісних пар електровозу, $m_{\text{ел}}$ – маса електровоза,

γ – приведений коефіцієнт інерції мас, що обертаються, T_2 – стала часу,

$T_2 = \frac{1}{\xi(a_1 + 2a_2 V)}$, (при визначенні коефі-

цієнтів k_5' , k_5'' і T_2 коефіцієнти a_1 , a_2 – це ті, що використовуються в рівнянні основного питомого руху поїзда

$w_0 = a_0 + a_1 V + a_2 V^2$, [2, 3, 6]) ξ – перевідний коефіцієнт значення якого відповідає вимірюванню ваги потягу в кН, сили тяги в Н, швидкості в км/год, питомого опору руху в Н/кН і часу в с, Δw_i – питомий опір руху від ухилів та кривих.

Рівняння в зображеннях по Лапласу мають вигляд:

$$\begin{cases} \Delta I(s) = W_1(s)[\Delta U(s) - \Delta E(s)], \\ \Delta \Phi(s) = W_2(s)\Delta I(s), \\ \Delta M(s) = W_3'(s)\Delta I(s) + W_3''(s)\Delta \Phi(s), \\ \Delta F(s) = W_4(s)\Delta M(s), \\ \Delta E(s) = W_5'(s)\Delta V(s) + W_5''(s)\Delta \Phi(s). \end{cases} \quad (7)$$

Передаючі функції:

$$\begin{aligned} W_2(s) &= \frac{\Delta \Phi(s)}{\Delta I(s)} = k_2, \\ W_3'(s) &= \frac{\Delta e(s)}{\Delta \Phi(s)} = k_3', \\ W_3''(s) &= \frac{\Delta e(s)}{\Delta \Phi(s)} = k_3'', \\ W_4(s) &= k_4, \\ W_5'(s) &= \frac{k_5'}{T_2 s + 1}, \quad W_5''(s) = \frac{k_5''}{T_2 s + 1}. \end{aligned} \quad (8)$$

У рівняннях $\Delta I(s)$, $\Delta \Phi(s)$, $\Delta M(s)$, $\Delta E(s)$, $\Delta U(s)$ - зображення відхилень струму, магнітного потоку, моменту, протидії ЕРС і напруги відповідно. $\Delta F(s)$ і $\Delta V(s)$ - зображення відхилень сили тяги F і швидкості V .

Крім зображень відхилень змінних в рівняння (1) входять передаточні функції. Передаточна функція відповідає аперіодичній ланці першого порядку, а передаточні функції – пропорційним ланкам.

Передаточна функція містить постійну часу, яка визначена індуктивністю і омичним опором двигуна. інші передаточні функції мають коефіцієнти передачі, що залежать від параметрів двигуна, тягової передачі, а також від статичних характеристик, розглянутих вище.

Рівнянням (7) відповідає структурна схема, наведена на рис. 2. Спрощена структурна схема дана на рис. 3, яка містить три передаточні ланки $W_{e1}(s)$, $W_{e2}'(s)$ – комбіновані ланки, $W_5''(s)$ – передаточна функція пропорційної ланки, де

$$W_{e1}(s) = W_1(s)W_4(s)(W_3'(s) + W_2(s)W_3''(s))$$

$$W_{e2}'(s) = W_2(s)W_5'(s)W_5''(s)^{-1}, \quad (9)$$

Передаточна функція системи за вхідною напругою $\Delta U(s)$ при $\Delta V(s)=0$

$$W_{\Delta F \Delta U}(s) = \frac{\Delta F(s)}{\Delta U(s)} = \frac{W_{e1}(s)}{1 + W_{e1}(s)W_{e2}'(s)W_5''(s)} =$$

$$= \frac{W_1(s)W_4(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)W_4(s)W_5'(s)} \times$$

$$\times \frac{W_3'(s) + W_2(s)W_3''(s)}{W_3'(s) + W_2(s)W_3''(s)}. \quad (10)$$

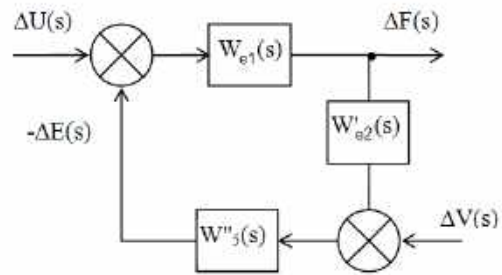


Рис. 3. Перетворена структурна схема одновимірної електромеханічної системи приводу

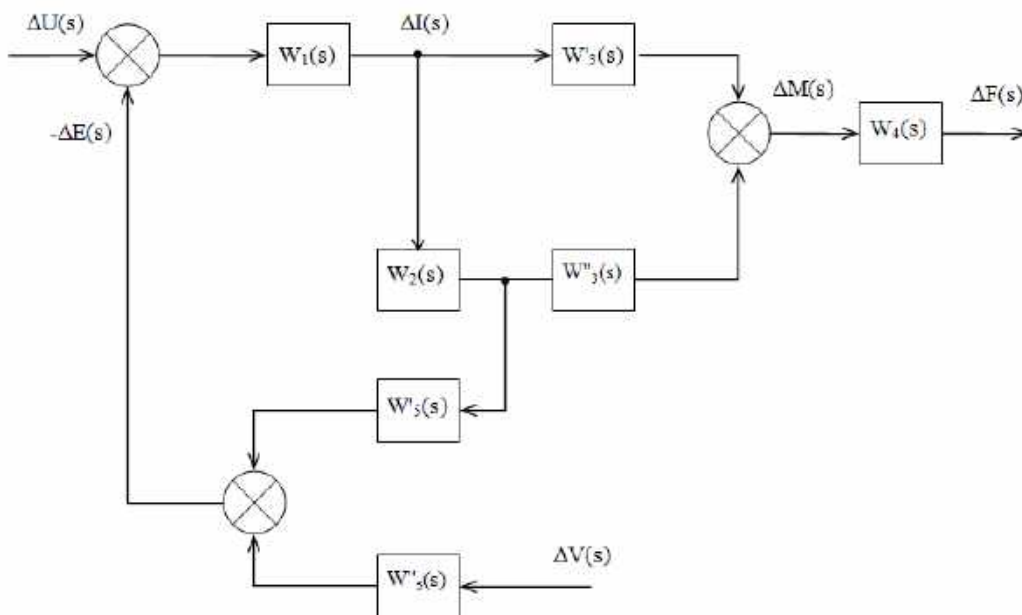


Рис. 2. Структурна схема одновимірної електромеханічної системи приводу

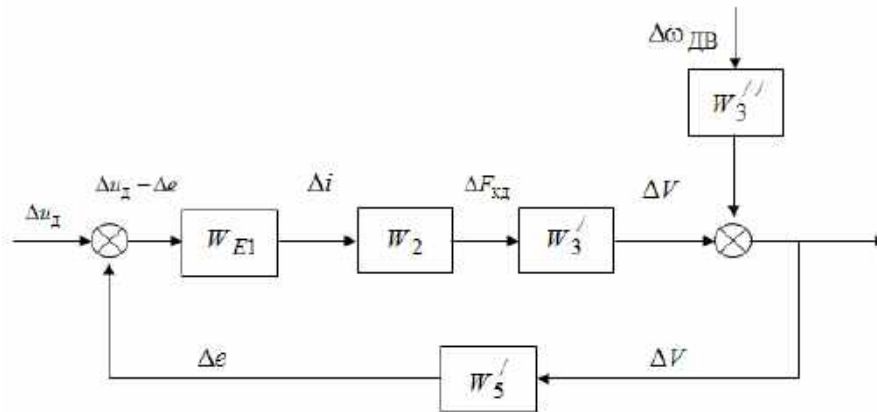


Рис. 4. Перетворена структурна схема тягового електродвигуна з регулюванням швидкості

Як зазначалося раніше $W_1(s) - W_5(s)$ - передаточні функції типових ланок [1].

$$W_1(s) = \frac{k_1}{1+T_1s}; \quad W_2(s) = k_2; \quad W_3'(s) = k_3';$$

$$W_3''(s) = k_3''; \quad W_4(s) = k_4; \quad W_5'(s) = k_5';$$

$$W_5''(s) = k_5''.$$

Отже передаточна функція системи

$$W_{\Delta F \Delta U}(s) = \frac{k_{e1}}{1+T_{e1}s}, \quad (11)$$

де k_{e1} - коефіцієнт підсилення системи, T_{e1} - постійна часу.

$$k_{e1} = \frac{k_1 k_4 (k_3' + k_2 k_3'')}{1 + k_1 k_2 k_4 k_5' (k_3' + k_2 k_3'')},$$

$$T_{e1} = \frac{T_1}{1 + k_1 k_2 k_4 (k_3' + k_2 k_3'')}.$$

Для тягового електродвигуна ЕД-141У1

$$W_{\Delta F \Delta U}(s) = \frac{0,88}{1 + 5,48 \cdot 10^{-5} s}.$$

Структурну схему тягового електродвигуна з регулюванням швидкості дано на рис. 4. Передаточна функція контуру з регулюванням швидкості обертання ротора двигуна з регулятором напруги має вигляд:

$$W_{E2}(s) = \frac{W_{E1}(s) W_2(s) W_3'(s)}{1 + W_{E1}(s) W_2(s) W_3'(s) W_5'(s)} =$$

$$= \frac{k}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1}. \quad (12)$$

$$W_{E2}(s) = \frac{0,0356}{0,221s^2 + 40,275s + 1}.$$

Частотні характеристики електропривода

Для побудови частотних характеристик використовуємо передаточну функцію двигуна по вхідній напрузі Δu_d і виходом по швидкості ΔV має вигляд:

$$W_{E2}(j\omega) = \frac{k}{T_1^2 (j\omega)^2 + T_2 j\omega + 1}, \quad (13)$$

$$W_{E2}(j\omega) = \frac{0,0356}{0,221(j\omega)^2 + 40,275j\omega + 1}.$$

Логарифмічні амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики (ЛАЧХ та ЛФЧХ) для заданого тягового двигуна дано на рис. 5, 6.

Передаточна функція дозволяє отримати перехідну характеристику тягового електропривода. Графік перехідної характеристики наведено на рис. 7.

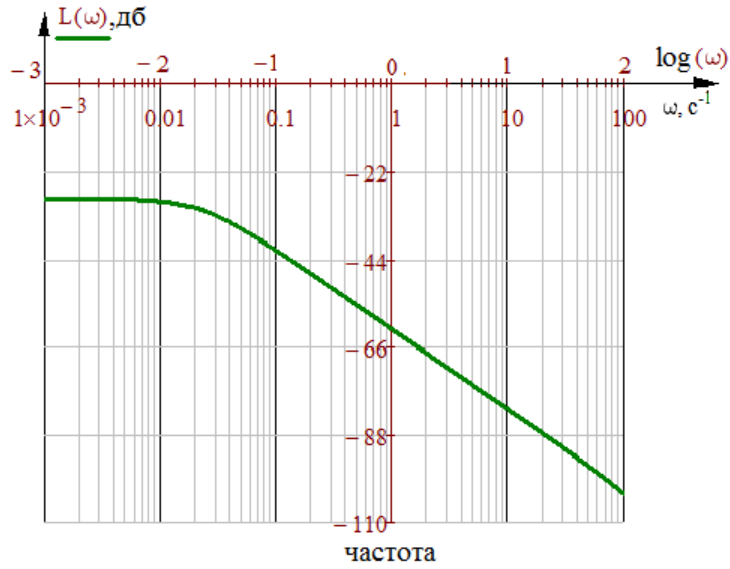


Рис. 5. Логарифмічна амплітудна частотна характеристика

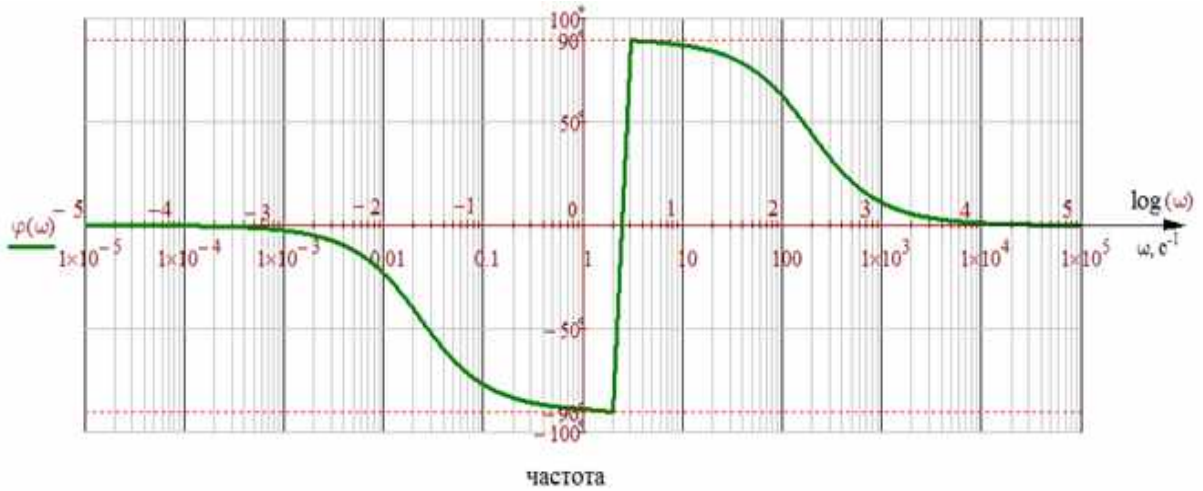


Рис. 6. Логарифмічна фазова частотна характеристика

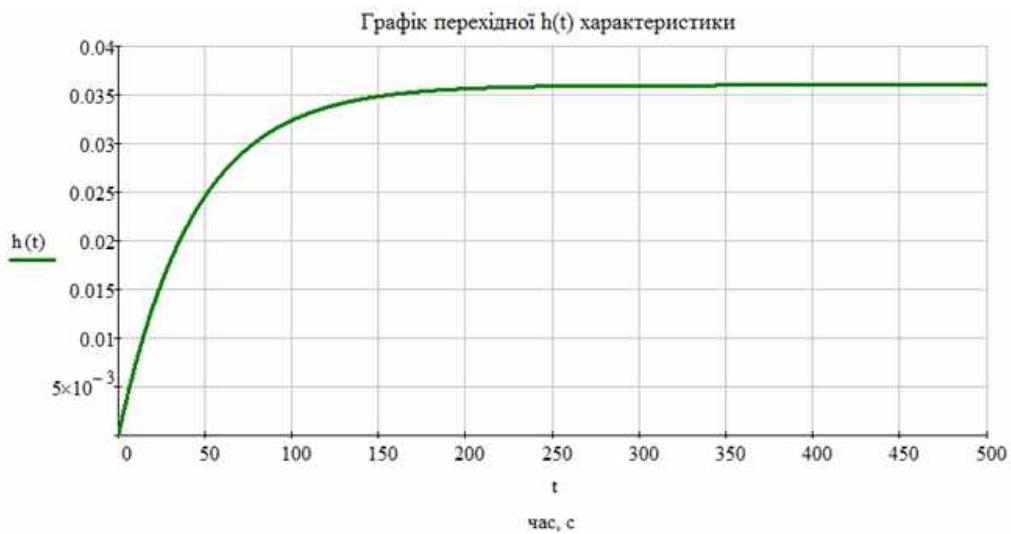


Рис.7. Перехідна характеристика тягового двигуна

$$W_{\Delta V \Delta u_d}(s) = \frac{\Delta V(s)}{\Delta u_d(s)} = \frac{k}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1}, \quad (14)$$

$$h(t) = \Delta V(t) = L^{-1} \left\{ \frac{k}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1} \cdot \frac{1}{s} \right\}, \quad (15)$$

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{0.036}{0.475^2 s^2 + 43.281s + 1} \cdot \frac{1}{s} \right\}$$

$$h(t) = 0,036 + 4,015 \cdot 10^{-6} e^{-207,2t} - 0,036 e^{-0,0213t}$$

Проаналізуємо отримані результати. Частотні та часові функції, їх характеристики і те, що $T_2/2T_1 > 1$ показує, що привод електровоза ДЕ1 має властивості аперіодичної ланки другого порядку. Характеристичне рівняння має другий порядок.

$$0.475^2 \lambda^2 + 43.281\lambda + 1 = 0.$$

Згідно критерію Гурвіца необхідна і достатня умови стійкості – позитивні коефіцієнти характеристичного рівняння. Ця умова виконується і тому тяговий електропривод типу ЕД-141У1 електровоза ДЕ-1 є стійким.

Висновки

Основні результати полягають у наступному:

- створено математичну модель тягового електропривода електровоза ДЕ-1, яка дозволяє досліджувати динамічні режими роботи, обумовлені допущеннями моделі;

- математична модель складається з трьох форм: перша форма – лінеаризовані диференційні рівняння; друга – структурні схеми та передаточні функції; третя – частотні характеристики.

Запропонована математична модель може бути використана для будь-якого виду тягового електроприводу постійного струму з урахуванням його особливостей.

Библиографический список

1. Электровоз магистральный ДЭ-1. Техническое описание. ЗТП.000.020-03 ТО. – 1999. – 188 с.
2. Моисеев С. А. Электровоз магистральный ДЭ-1 [Текст]: Руководство по эксплуатации. / С. А. Моисеев, – М.: «Транспорт», – 2007. – 83 с.
3. Безрученко В. М. Тягові електричні машини електрорухомого складу [Текст]: навчальний посібник / В. М. Безрученко, В. К. Варченко, В. В. Чумак. – Д.: ДНУЗТ, 2003. – 252 с.
4. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст]: учеб. для вузов [3-е изд., перер. и доп.]. / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
5. Вольдек В. И. Электрические машины [Текст]: / В. И. Вольдек. – М.: Высш. шк., 1974. – 832 с.
6. Осипов С. И. Основы тяги поездов [Текст]: учебн. для студ. техникумов и колледжей ж. д. тр-та / С. И. Осипов, С. С. Осипов. – М.: УМК МПС России, 2000. – 592 с.
7. Кедря М. М., Устименко Д. В. Передаточная функция электропривода транспортного средства. Транспорт: Зб. наук. пр. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 1999.
8. Теория автоматического управления. Ч.1 Л. С. Гольдфарб и др. Под ред. проф. А. В. Нетушила. – М.: Высшая школа, 1968.
9. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. СПб.: БХВ – Петербург, 2007.
10. Кедря М. М. Динамические свойства тягового привода как одномерной электромеханической системы / М. М. Кедря, М. Л. Кумпан // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009. – № 29. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. Нац. Ун-ту заліз. Трансп. ім. Акад. В. Лазаряна, 2009. – С. 68-70.
11. Сердюк Т. Н. Мониторинг и эксплуатационная диагностика двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением [Текст] / Т. Н. Сердюк // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2016. – № 4(49). – Харків: Вид-во Харк. нац. Ун-т Повітр. Сил ім. І. Кожедуба, 2016. – С. 134–141.

12. Капица М. И. Определение системы диагностирования ТЭД с учетом выбора предпочтительных элементов с изменяющейся интенсивностью отказов [Текст] / М.И. Капица, В. В. Лагута, Т. Н. Сердюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2017. – № 4. – Харьков: Видво УкрДУЗТ, 2017. – С. 9 – 15.
13. В. В. Лагута. Моделирование эффективной системы диагностирования тягового электродвигателя с учетом выбора вариантов комплектации его элементов [Текст] / В. В. Лагута, Т.Н. Сердюк // Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна «Транспортні системи та технології перевезень». – 2017. – Вип. 13. – С. 52–58.

Ключові слова: передаточна функція, тяговий електричний двигун постійного струму, математична модель.

Ключевые слова: передаточная функция, тяговый электродвигатель постоянного тока, математическая модель.

Keywords: transfer function, traction electric motor of direct current, mathematical model.

Рецензенти:
проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,
проф., д.т.н., А. М. Муха.

Надійшла до редколегію 15.10.2019.
Прийнята до друку 28.10.2019.

UDK 656.259.1

R. BOTNAREVSCAIA –Railway of Moldova, rodicanaspeac@gmail.com

T. SERDIUK – Associate Professor, Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Ukraine, serducheckt@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-2609-4071

ANALYSIS OF OPERATION OF RAILWAY COMMUNICATION SYSTEMS

Introduction

Economic and technical progress world-wide opens up new horizons for technical re-equipment and large-scale implementation of electronic equipment in various areas of our lives. Electronic equipment is widely introduced on the railways of Ukraine. This is where the main question of the compatibility of the types of electric traction used at the Ukrzalyaznytsia enterprise and its electromagnetic effect on electromagnetic influence on the operating electronic equipment used in communication lines.

In Eastern Europe, communication systems on the railroad were built in approximately the same way: cable communication lines (CCL) and overhead communication lines (OCL) and radio communications. Cable communication lines in a metal sheath combined with plastic sheaths protect cable chains from external electromagnetic influences created by traction currents of electrified railways, power lines, and other sources. CCL between large nodes, the connection is laid by a trunk cable and sealing equipment on both sides of the K-60p. The equipment of the K-60p system is developed on semiconductor devices in the 12/252 kHz spectrum and provides 60 channels of tone frequency (with a transmitted frequency band in each channel from 300 to 3400 Hz). Levels for transmission -1.5 Np, for receiving +0.5 Np at a test frequency of 800 Hz [1 - 9].

The peak of the mass introduction of this equipment fell on the 70-80 years, and it was advanced at that time. Despite the fact that all the service life of this equipment has passed in

terms of the safety factor, the K-60 continues to operate to this day. The modernization and replacement of the communication system is very slow and there is a temporary imbalance between the old communication equipment and the emergence of new locomotives, new modern control systems for railway processes, and the question arises about the electromagnetic compatibility of old equipment and new sources of electromagnetic radiation. So, the scientific work deals with the analysis of operation of railway communication systems are actuality.

The object of research is railway communication lines.

The main purpose is to evaluate the quality of different kinds of railway communication and the reasons of noise and interference in these systems.

It is needed to carry out the follows steps to achieve these goals:

- to analysis the reasons of appearance noises in the telecommunication channels (radio and wire communications);
- to evaluate the main faults in the overhead communication lines and their influence on the quality of communication;
- to research the electromagnetic interferences in the communication lines and their frequency diapasons;
- to plan further ways of investigation and simulation of influence traction and non-traction systems on the communication channels.

Appearance of noise in the communication channels

One of the disadvantages of this system during the operation was the appearance of crosstalk between the system's channels, which can increase the nonlinear distortion in the channel. Depending on the magnitude and nature of the interference caused by parasitic components of one type or another, the degree of their suppression is about 55-60 dB [1, 4-6, 11-14].

Such a situation can lead to a misunderstanding of what has been said and can lead to severe violations in train traffic safety.

Long-term lack of funding for significant repairs of trunk cables leads to the possibility of only «patching» the cable, replacing heavily damaged sections with cable inserts, and the appearance of a large number of couplings on the cable, which in itself deteriorates the quality of communication. Over time, the couplings themselves can lose their insulating qualities and, with an increase in soil moisture, leads to the appearance of «transient» noise when information from another channel is listened to in the communication channel. Also, in the «locked» cable, the operation of the transmitter relay from the automation devices can be monitored when the train passes, along the track circuit, near the point of deterioration of the insulation in the cable. The most unpleasant moment for such a cable can be damaging insulators on high-voltage transmission lines. Leakage currents and short-circuits to the ground lead to severe crackling and noise in the communication channel. With such interference, it is almost impossible to understand the transmitted information and makes it unbearable to be near the loudspeaker of the train dispatcher's communication console for a long time.

Overhead communication line

In the Post-Soviet Era, there are still sections with overhead communication lines (OCL), some of them use two-wire systems

(V-3, VS-3; V-3-3, V-Z-Zs OV-3-3 and OV-12-3). These systems operate as two- and three-channel two-wire transmission systems covering a frequency range of 4 to 31 kHz [1, 4-6, 14 - 15].

The «enemy» of this system is the bad weather condition: the wind leads to the intertwining of the overhead lines, falling branches from near growing trees and icing - to the breakage of communication lines. Cases of theft of VLS by the population have become more frequent against the background of general impoverishment. External sources of electromagnetic interference which can be damaging the quality of communication: switching, short circuits in high, medium, low voltage networks; external, internal sources of radiofrequency radiation; discharges of static electricity; lightning strikes; sources of conducted noise on power supply circuits; electromagnetic radiation from various sources of industrial enterprises. At the final point of communication, as a result, they are heard in the form of strong crackling, noise and lead to a misunderstanding of the transmitted information between subscribers.

Radio communication

One of the most vulnerable and dangerous places of influence of electromagnetic fields of high-voltage communication lines and traction rolling stock is radio communication. Let us consider the problem using the example of a train dispatcher radio communication (DSC) – a station attendant – a locomotive (driver). This type of communication is organized according to the following points:

- Stationary radio communication console at the train dispatcher.
- Radio communication equipment.
- Compaction equipment in LAZ.
- Trunk communication cable.
- Introductory station equipment.
- Antenna transmitting device at the station.
- Ether.

- Antenna transmitting device in the locomotive.

- Radio station in the locomotive [3-5, 7-9].

Such a combined scheme allows the DNTs to communicate with the driver of any locomotive located on its site.

To organize train radio communication, the hectometer range (HF) is more often used: frequencies of 2.13 MHz (channel I) and 2.15 MHz (channel II). Radio interference levels in the hectometer range are high, therefore, for a good quality radio communication, a high level of radio signals must be provided at the input of radio station receivers. To reduce the level of interference and increase the level of the radio signal in the hectometer range, guide lines are used - waveguides suspended on the supports of the contact network or wires of power supply lines and overhead communication lines running along the railway. But all the classical protection measures for devices are not ideal, and the quality of radio communication continues to suffer from electromagnetic influences (EMI), for example, when current collection is disturbed. As a result of the research, it is necessary to develop technical measures to ensure the electromagnetic compatibility (EMC) of train radio communication systems. When carrying out work, it is necessary to take into account the speed of train movement, weather conditions, and also analyze the main factors that arise when the current collection is disturbed. It is planned to develop a mathematical model for the investigation of electromagnetic influence of traction and non-traction power supply systems on the railway communication channels and systems in the different modes of their work.

Electromagnetic interferences in the communication lines

The most problematic of these EM interferences are the low frequency magnetic fields created by the currents (including the earth leakage currents) on the high voltage power distribution system. To analyze the magnetic

fields, a 3D simulation of vehicle geometry needs to be carried out.

Generally, for definition the electromagnetic interference (EMI) in the traction supply railway system two main types can be considered: alternative current (AC) systems and direct current (DC) traction systems. There are two current standards for electrified railways on the Ukrainian railway: direct current with a voltage of 3.0 kV and alternating current with a voltage of 25 kV and an industrial frequency of 50 Hz. The fundamental part of the AC traction system causing the EMI is the overhead contact system (OCS) [2, 5, 6, 8]. This system is a source for electric trains and is located above the track. In this case, the rails and ground serve as return circuits. Therefore, if the feeding and return conductors are not symmetrical with respect to the ground or locomotive's pantograph has a bad contact with OCS, it can be a source of EMI. However, optimization of the system allows decreasing the electromagnetic radiation. But issue connecting with noise generated in the communication lines does not disappear.

The DC traction systems' interference is caused by existing high voltage and currents between the running rails and ground. This traction current generates a significant electromagnetic field that could cause corrosion in different structures. Furthermore, it could interfere in the communication lines and in the sensitive equipment near plants, hospitals, and universities.

Nevertheless, it is important to consider not only the internal systems but also the external EMI sources. If the train is defined as a black-box system, including communication, power and signal lines, and On-board Train Control Systems in the modern locomotives, we must gauge and estimate the EMI from the environment. Such interference can be separated into several categories. First of all, it is artificial radiators that do not connect with the railway. There are a lot of cell towers and television antennas throughout the railways. On the other hand are natural EMI sources, for exam-

ple, lighting and other electrostatic discharges or intense solar magnetic storms. Natural sources usually don't produce high-frequency radiations, but there are exceptions.

The main source of EMI in electrified traction is harmonics originated from traction transformers, traction converters, electrical motors, pantograph arcing etc. Traction converters play a vital role in electric traction systems as high power energy flow control devices. Nevertheless, the rapidly changing voltage frequency, required by the working process might cause a strong electromagnetic emission effect. AC motors are considered to be the cheapest and effective solution for a wide range of electric traction (ET). Working with the converter's high-frequency power supply it becomes an EM transponder, making it barely impossible to provide feedback information required by the control system, especially at the compact interior of the ET. The EMIs generated by traction converters include high frequency harmonic noise caused by PWM control, surges in the current and the voltage caused by switching process, etc. The strong EMIs will interfere with the communication system and control system and affect the vehicles' safety. Therefore, these EMIs should be limited to meet EMC standards. The principal challenge in this case is having the opportunity to predict possible future events with EMI and to forecast the consequences. This knowledge will allow to us develop re-equipment means and techniques to prevent failures.

Role of simulation

The 3D model would help identify and track magnetic field intensity over the ET's structure. The simulations could be verified using multiple magnetic sensors such as Bartington fluxgate and field probes at different positions of the structure. The experimental setup described in radiated current measurement tests of standards such as CISPR 12 and CISPR 22 can be used for magnetic field scanning. These measurements, however, are not

straightforward as the fields are time varying and broadband, moreover these standards only envision conventional combustion engines and mechanical counterparts for the emission tests, which only produces static fields. Therefore, the measurements need to be strengthened mathematically and methods like inverse Fourier transform needs to be explored to investigate the fields spatially. A detailed analysis of spatial properties of the fields, along with the vehicle's structure and materials properties are required to recommend mitigation techniques.

Proposed method concludes in the follows.

This study outlines the methods of measuring magnetic fields in ET and their significance with relevance to EMC. A survey of previous studies relevant to the topic will also be carried out with discussions on the advancement of measurement techniques.

To analyze the processes of electromagnetic influence on cable and overhead communication lines, it is proposed to use a mathematical model, in which the experimental section of the communication line will be presented as an eight-pole. Such a representation of the circuit takes into account the influence of various noise sources and the influence of external factors leading to a change in parameters and affecting the operation of related devices of electric rolling stock, railway automation and industrial leaks. For the specified model, you can write a system of differential equations. Moreover, the above system of differential equations can be solved as an equation of the mass-spring system. And also for making a final decision and summing up - compare the results.

Regarding the purpose of our research and taking measures to reduce electromagnetic crosstalk and other types of interference associated with changing the normal operation of digital devices, I would like to propose the following plan:

- Search and analysis of the operation of equipment for measuring the electromagnetic influence of external sources on digital equip-

ment, as well as analysis of the compatibility of the equipment in terms of electrical parameters with the existing communication systems on the railway network in Ukraine.

- Development of measurement methods.
- Interfacing of measurement equipment with existing digital systems on the railway network in Ukraine and methods of reflecting the measurement results on a computer.
- Development of a plan, timing of measurements.
- Coordination with the management of the Signaling and Communication Service of Ukrzalyaznytsia of the time, conditions and requirements for carrying out measurements.
- Measure the parameters of digital equipment in ideal conditions (in the absence of the influence of external sources of interference).
- Measure parameters under the influence of external sources of interference.
- Registration of statistics and measurement results.
- Summarizing.
- Development of a system and methods for multichannel measurements in the time domain to assess the problems of electromagnetic compatibility in railway transport.

Conclusions

The reasons of appearance noises in the telecommunication channels (radio and wire communications) were analyzed.

The main faults in the overhead communication lines and their influence on the quality of communication were evaluated.

The electromagnetic interferences in the communication lines and their frequency dispersions were researched.

The further ways of investigation and simulation of influence traction and non-traction systems on the communication channels were described.

The novelty is in the proposition of use CST simulation to investigate electromagnetic influence of traction and non-traction power

system on the communication channels with the 8-poles mathematic modeling.

Electromagnetic effects can manifest themselves in the form of reversible and irreversible disturbances. So, noise during a telephone conversation can be called a reversible violation. Irreversible violations include a failure in the operation of the relay protection system, which led to the disconnection of the load.

References

1. Vinogradov, V.V. Lines of railway automation, telemechanics and communications / V.V. Vinogradov, S.E. Kusteshev. - Moscow: Transport, 2002. - 433 pp.
2. Rules for the implementation of electricity. SD-0055: Approved: Order of the Ministry of Transport and Communications of Ukraine 23.11.04. No. 1026 / Min-in transport. and communications of Ukraine – 2005. – 181 pp.
3. Complex of radio monitoring AVK ORION. Manual. DUU 1.200.000 NO
4. Vinogradov V.V., Kotov V.K., Nuprik V.E. Fiber-optic communication lines: a textbook for technical schools and colleges of the railway. / V. V. Vinogradov, V. K. Kotov, V. E. Nuprik. Moscow: Zheldorizdat. – 2002 – 278 pp.
5. Sapozhnikov, Vl. V. Power supply of railway automation, telemechanics and communication devices / Vl. V. Sapozhnikov, N. P. Kovalev, V. A. Konoyov, A. M. Kostromirov, B. S. Sergeev. - Moscow: Route. –2005. -453 pp.
6. Mikhailov, A. F. Power supply devices and linear structures of automation, telemechanics and communication of railway transport / A. F. Mikhailov, L. A. Fretedov – Moscow: Transport, 1987.– 383 pp.
7. Akbashev, B. B. Protection of telecommunication objects from electromagnetic actions / B. B. Akbashev, N. V. Balyuk,

- L. N. Kechie - Moscow: Griffin, 2013 – 472 pp.
8. Gorelov, V.G. The theory of signal transmission in railway transport / V. G. Gorelov. Moscow –1999. – 416 p.
 9. Volkov, A. A. Radio transmitting devices / A. A. Volkov– Moscow: 2002. – 352 pp.
 10. Technologies and means of communication. - No. 6. – 1999.
 11. Semyon, A. B. Structured cabling systems/ A. B. Semyon, S. K. Strizhakov I. R. Suncheley – Moscow: 1999.
 12. Lebedinsky, A. K. Telephone switching systems / A.K. Lebedinsky. Moscow. – 2003. – 496 pp.
 13. Kozlov, L.N. Lines of automation, telemechanics and communication in railway transport / L. N. Kozlov, V. I. Kuzmin. Moscow: Transport. – 1981. – 232 pp.
 14. Grodnev, I. I. Linear communication facilities / I. I. Grodnev, N. D. Kurbatov Moscow: Communication, 1978. –296 pp.
 15. Rules for the protection of wired communication devices from the impact of the

traction network of direct current electric railways. Part I, Moscow: Transport, 1969. – 44 pp.

Ключові слова: система тягового електропостачання, лінії зв'язку, експериментальні дослідження, гармонічні перешкоди, електромагнітна сумісність.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, линии связи, экспериментальные исследования, гармонические помехи, электромагнитная совместимость.

Keywords: traction power supply system, communication lines, experimental research, harmonic interference, electromagnetic compatibility.

Рецензенти:

д.т.н., проф. А. Б. Бойнік,
д.т.н., проф. А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 15.09.2019 р.
Прийнята до друку 30.09.2019 р.

**БЕЗПЕКА НА
ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ**

**БЕЗОПАСНОСТЬ НА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

**SAFETY ON
RAILWAY TRANSPORT**

УДК 656.259.2

О. О. ГОЛОЛОБОВА – асистент кафедри «Автоматика та телекомунікації», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, gololobova_oksana@i.ua, ORCID 0000-0003-1857-8196

С. Ю. БУРЯК – к.т.н., доцент кафедри «Автоматика та телекомунікації», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ser.buryak@gmail.com, ORCID 0000-0002-8251-785X

В. І. ГАВРИЛЮК – д. ф.-м. наук, професор кафедри «Автоматика та телекомунікації», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, vl.gavrilyuk@gmail.com, ORCID 0000-0001-9954-4478

АНАЛІЗ СТАТИСТИКИ ВІДМОВ ТА ЗБОЇВ У РОБОТІ АВТОМАТИЧНОЇ ЛОКОМОТИВНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ

Вступ

Залізничний транспорт в Україні забезпечує перевезення тисячі пасажирів і мільйони тон вантажів, являючи собою один з найпопулярніших видів транспорту. Безпека на залізничному транспорті та його безперерйна робота значно залежить від надійності роботи засобів залізничної автоматики та зв'язку. При цьому особлива роль у забезпеченні ефективної та безпечної роботи залізниць належить системам інтервального регулювання руху поїздів (ІРРП), а також автоматичній локомотивній сигналізації (АЛС) у поєднанні з системами контролю пильності машиніста та автостопом. Кожен збій, відмова чи транспортна подія, що сталися на залізниці, в залежності від конкретних обставин, може становити загрозу для життя людей та привести до значних матеріальних збитків, і щоб мати можливість цьому запобігти, необхідно підвищувати надійність роботи та покращувати методи обслуговування залізничних пристроїв [12].

Для максимально ефективного вирішення цих завдань необхідно проаналізувати статистику відмов всіх пристроїв залізничної автоматики, приділивши особливу увагу причинам

відмов та збоїв у роботі АЛС, як системи, що є найбільш вразливою для зовнішніх несприятливих факторів. А це, в свою чергу, надасть змогу визначити параметри та методи їх контролю для забезпечення безпеки руху поїздів.

Відповідно у роботі поставлено мета провести аналіз статистики відмов та збоїв у роботі автоматичної локомотивної сигналізації в сучасних умовах, що характеризуються з одного боку збільшенням швидкості руху та потужності нових типів поїздів, появою нового типу поїздів та локомотивів з асинхронним тяговим приводом, а з іншого боку – значним моральним і фізичним старінням парку локомотивів і поїздів залізниць України, більшість з яких відпрацювала свій ресурс.

Аналіз статистики відмов об'єктів залізничної автоматики

Аналіз проведено на основі даних з шести залізниць України за дослідні п'ять років в порівнянні з аналогічними дослідженнями, наведеними в літературі за минулі роки [1, 2].

Кількість транспортних подій за 2013–2017 роки наведена на рис. 1.

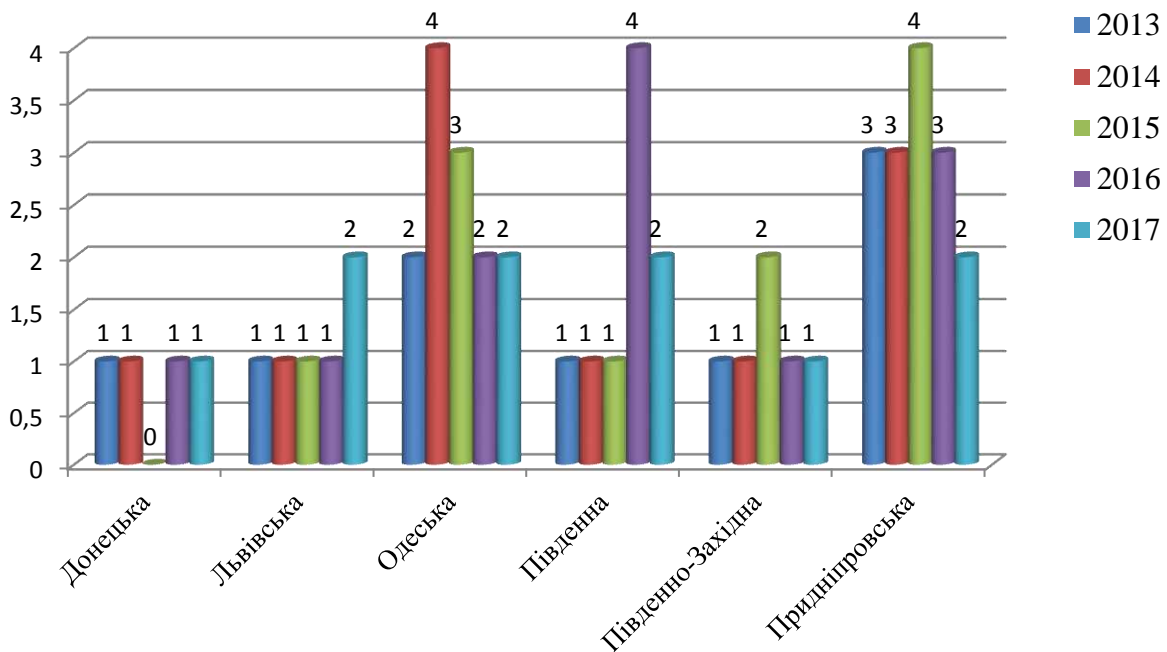


Рис. 1. Кількість транспортних подій за період 2013-2017 років

Аналіз динаміки показує, що у 2013 році загальна кількість подій, що сталася, складає 9 випадків, у 2014 р. – 11, 2015 р. – 11, 2016 р. – 12, 2017 р. – 10.

З загальної кількості 10 інцидентів, які віднесені за господарствами сигналізації та зв'язку у 2017 році, з вини дистанцій сигналізації та зв'язку допущено 8 інцидентів або 80 % від загальної кількості.

Причинами цих транспортних подій є:

- порушення технології виконання робіт (неоперативна організація усунення відмов, недотримання вимог технологічних карт та керівництв з експлуатації). Ця причина призвела до виникнення 5 інцидентів, що становить 63 % від загальної кількості;

- невиконання робіт, передбачених планами технічного обслуговування пристроїв СЦБ, інструкціями та керівними вказівками. З цієї причини допущено 3 інциденти, що становить 37 %;

- інші причини (вплив грозових та комутаційних перенапруг, ожеледиця,

повінь та інші). З цієї причини в 2017 році не були встановлені інциденти.

Окремо проаналізуємо надійність роботи пристроїв СЦБ – рис. 2. Кількість відмов пристроїв СЦБ у 2017 році в порівнянні з аналогічним періодом 2016 року збільшилась на 23,6% і склала 5310 проти 4296 у 2016. А загальна кількість відмов за останні 5 років склала 23472 випадків.

Якщо розглянути відмови пристроїв СЦБ, віднесених за господарством сигналізації та зв'язку в 2017 році, то основними об'єктами даних відмов є (рис. 3):

1. Вихід з ладу реле, блоків, трансформаторів, трансмітерів, конденсаторів та конденсаторних блоків, випрямлячів, безконтактної апаратури, пристроїв захисту – 482 відмови або 36,2 %. Найбільша кількість відмов апаратури на регіональній філії «Одеська залізниця» – 156 відмов.

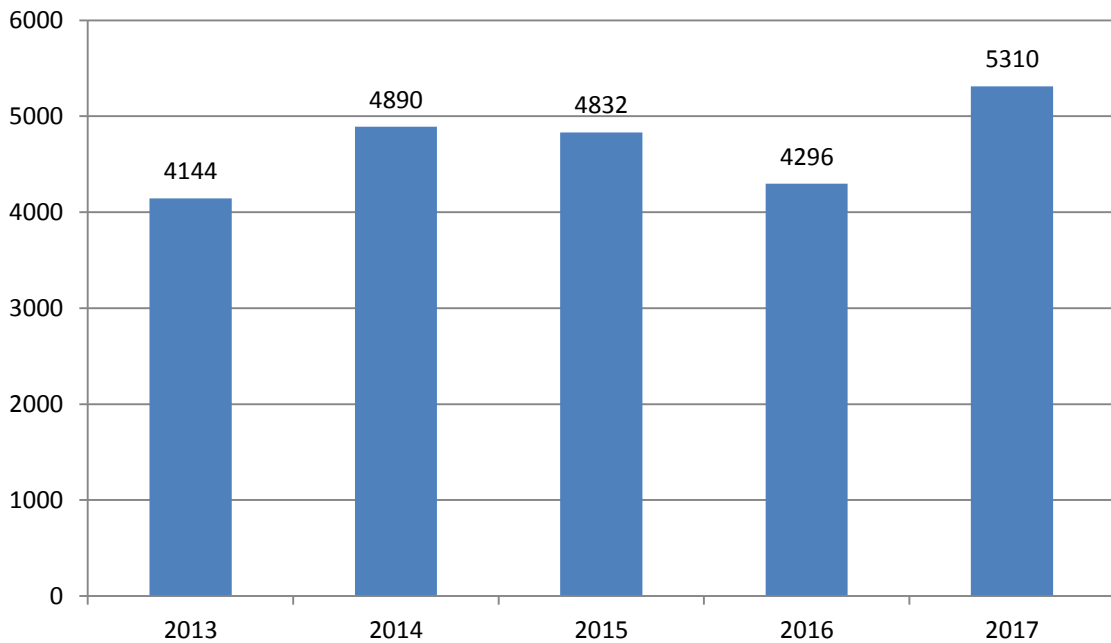


Рис. 2. Кількість відмов пристроїв СЦБ за період 2013-2017 років

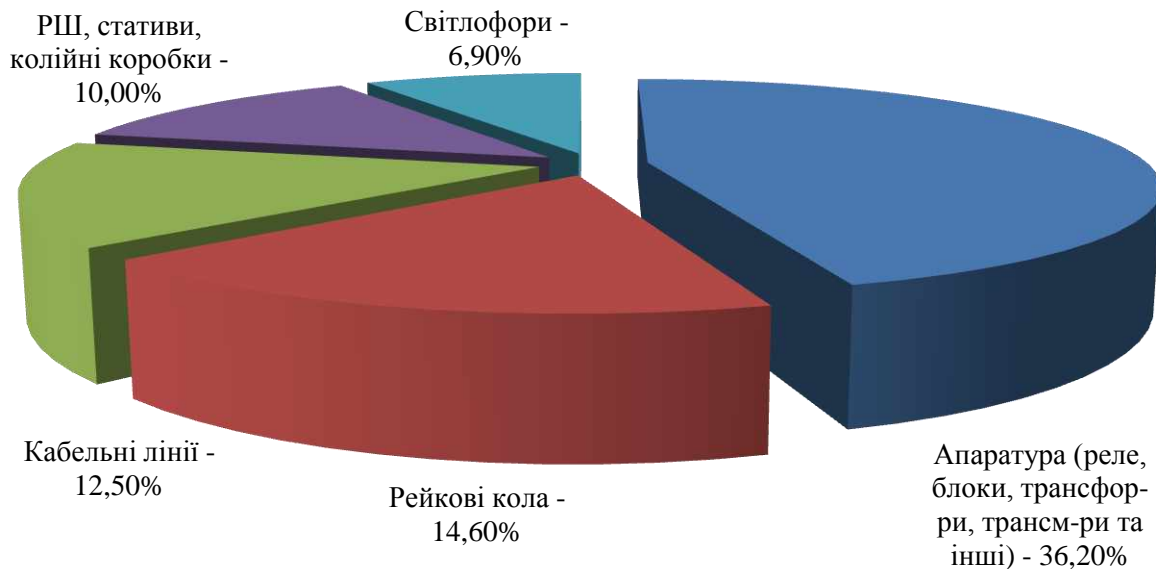


Рис. 3. Відмови пристроїв СЦБ, віднесених за господарством сигналізації та зв'язку в 2017 році

Основними причинами відмов апаратури є обрив обмоток та монтажних проводів в приладах, коротке замикання проводів, втрата ємності конденсаторів, які виникали через неякісне виконання робіт при технічному обслуговуванні ремонтних пристроїв, фізичне старіння, вплив грозових та комутаційних перенапруг.

Основні типи приладів, які найбільше виходили з ладу, – трансформатори, трансмітери, конденсатори та конденсаторні блоки.

2. Порушення роботи рейкових кіл – 195 відмов або 14,6 %. Найбільша кількість відмов рейкових кіл на регіональній філії «Львівська залізниця» – 61 відмова.

Основні причини відмов в рейкових колах – обрив або відсутність рейкових з'єднувачів.

3. Порушення роботи кабельних ліній – 166 відмов або 12,5 %. Найбільша кількість відмов кабельних ліній на регіональній філії «Одеська залізниця» – 49 відмов. Основні причини відмов кабельних ліній – внутрішній обрив жил в кабелі, обрив жил на клемах, заниження опору ізоляції.

4. Несправність в релейних шафах, на стативах, в колійних коробках – 133 відмови або 10,0 %. Найбільша кількість відмов цих пристроїв на регіональних філіях «Одеська залізниця» – 46 відмов. Основні причини відмов – несправність штепсельних плат, клем, роз'ємів, колодок, монтажу.

5. Несправність світлофорів – 86 відмов або 6,9 %. Найбільша кількість відмов цих пристроїв на регіональній філії «Придніпровська залізниця» – 27.

6. Несправність стрілочних електроприводів, гарнітури, замків Мелентьєва – 68 відмов або 5,1 %. Найбільша кількість відмов цих пристроїв на регіональній філії «Одеська залізниця» – 23 відмови.

Основними причинами цих відмов на залізницях є несправність електродвигунів, втрата контакту в автоперемикачі та несправність монтажу в електроприводі.

Основними причинами відмов пристроїв СЦБ є:

Експлуатаційні – 1135 відмов або 85,3 %. З них:

1.1. Порушення технології виконання робіт (недотримання вимог технологічних карт та керівництв з експлуатації) при технічному обслуговуванні та ремонті пристроїв СЦБ – 560 відмов або 42,1 %. Найбільша кількість таких відмов на регіональній філії «Придніпровська залізниця» – 147 відмов.

1.2. Вихід з ладу приладів, пристроїв із-за фізичного старіння – 399 відмов або 30,0 %. Найбільша кількість таких відмов

на регіональній філії «Одеська залізниця» – 216 відмов.

1.3. Неякісний ремонт та перевірка приладів в РТД СЦБ – 35 відмов або 2,6 %. Найбільша кількість таких відмов на регіональній філії «Придніпровська залізниця» – 22 відмови.

1.4. Причина не виявлена – 129 відмов або 9,7 %. Найбільше відмов з не виявленою причиною на регіональній філії «Південно-Західна залізниця» – 68 відмов.

Інші – 195 відмови або 14,7 %. З них:

2.1. Вплив грозових та комутаційних перенапруг – 103 відмови або 7,7 %. Найбільше таких відмов на регіональній філії «Південна залізниця» – 56 відмов.

2.2. Конструктивно-заводський недолік – 79 відмов або 5,9 %. Найбільше таких відмов на регіональній філії «Одеська залізниця» – 49 відмов.

Якщо проаналізувати кількість порушень дії пристроїв АЛС, що призвели до вимкнення сигналізації АЛС під час прямування поїздів, то отримуємо, що за 2013 рік на залізницях України допущено 1030 порушень, 2014 р. - 807, 2015 р. - 832, 2016 р. - 840, 2017 р. - 1011. Розподілення порушень дії пристроїв АЛС в період з 2013-2017 рр., віднесених за різними службами, зображено на рис. 4.

На прикладі, показаному на рис. 5, зображено співвідношення об'єктів, що стали причиною відмов пристроїв АЛС і призвели до вимкнення її під час прямування поїздів у період з 2016-2017 рр.

Виділимо основні з них, де зросла кількість відмов:

- дешифратор – 42/36 (2017/2016 рр. відповідно; причинами, як правило, є злам контактних пружин реле, втрата контакту та підгоряння контактів реле);

- підсилювач – 28/26 (причини - відмова конденсатора, транзистора);

- локомотивний фільтр – 10/5 (причини - котушка дроселя, механічні пошкодження, відмова конденсатора).

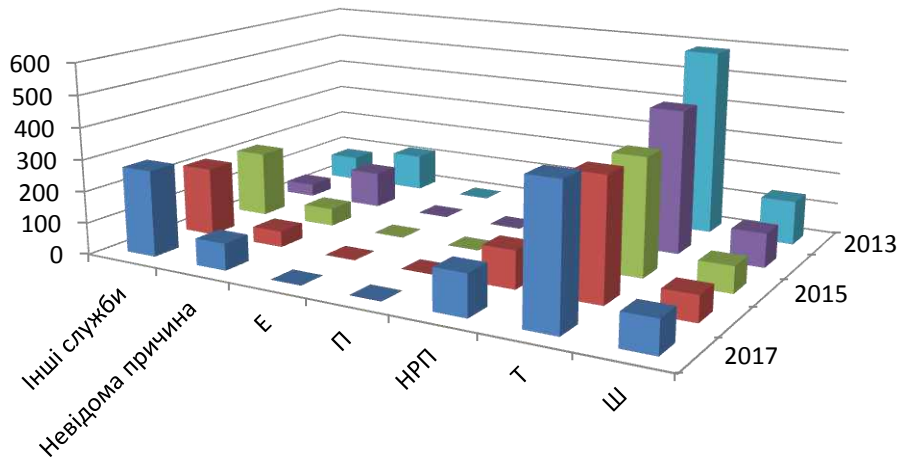


Рис.4. Розподілення кількості порушень дії пристроїв АЛС, що призвели до вимкнення її під час прямування поїздів за службами

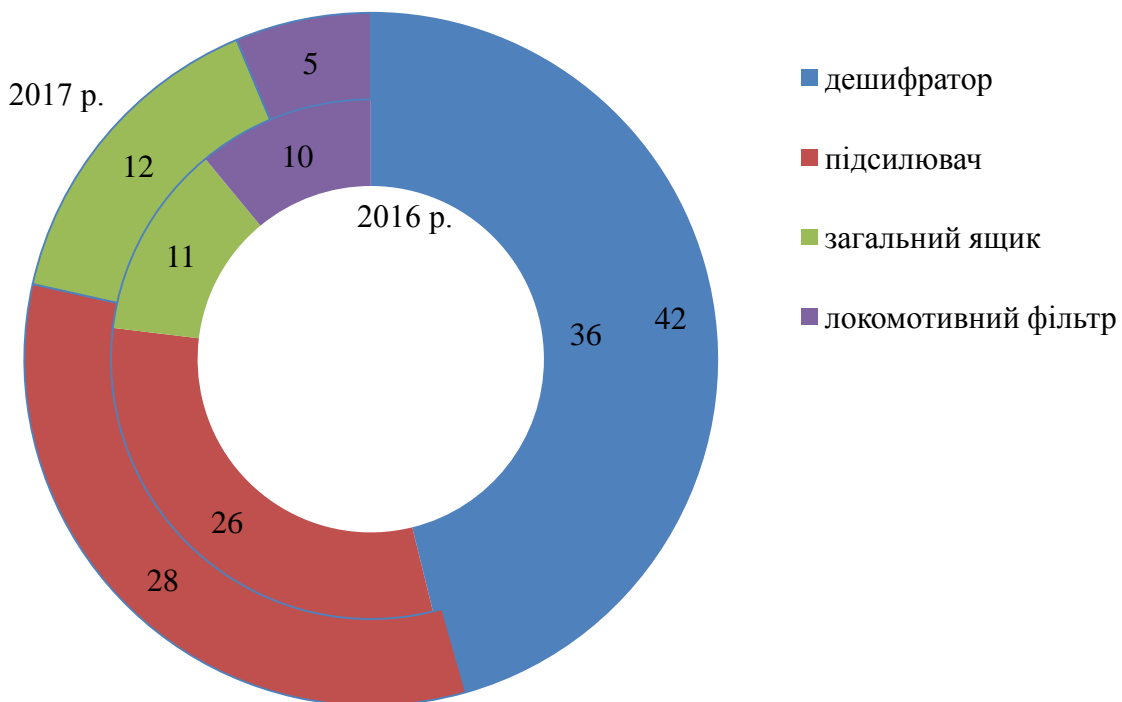


Рис. 5. Співвідношення об'єктів відмов пристроїв АЛС по службі сигналізації, централізації та блокування, що призвели до вимкнення її під час прямування поїздів

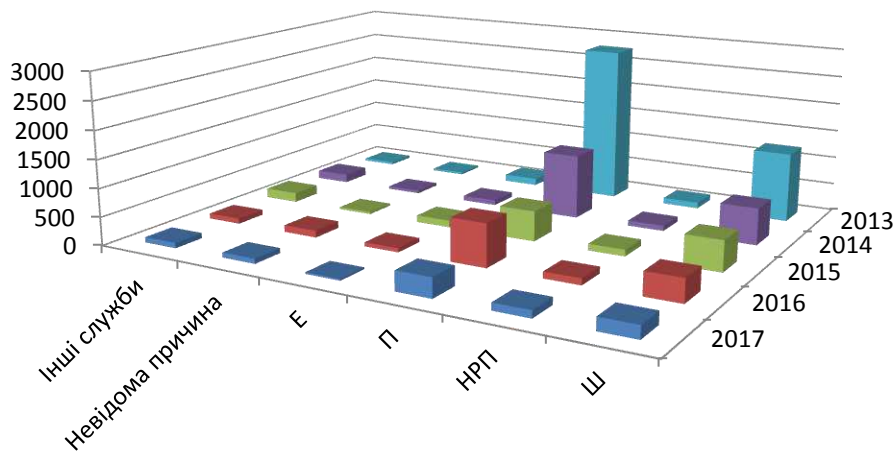


Рис. 6. Розподілення збоїв у роботі АЛС, віднесених за різними службами

А також треба відмітити, що кількість відмов дещо зменшилась у загальних ящиках – 11/12 (причини - відсутність контакту на клеммах або контактних пружинах). Треба зауважити, що основною причиною відмов локомотивних пристроїв АЛС і надалі залишається зношеність апаратури.

Також проаналізуємо загальну кількість короточасних порушень (збоїв) у роботі локомотивної сигналізації, вважаючи такими лише ті, що повторювались тричі за 3 доби на одному і тому ж місці (ізольована секція, блок-ділянка тощо). За 2013 рік відбулось 4215 випадків, 2014 р. - 2075, 2015 р. - 1408, 2016 - 1457, 2017 р. - 779. Розподілення збоїв у роботі АЛС в період з 2013-2017 рр., віднесених за різними службами, зображено на рис. 6.

Аналіз показав, що основними причинами збоїв, віднесених за наступними службами є:

- за службою Ш – несправність приладів кодування, спотворення часових параметрів коду;

- за службою П – намагніченість рейок, несправність або відсутність з'єднувачів на

перегонах, рейки, укладені поряд з залізничними коліями або усередині них;

- за службою Е – нестабільне живлення.

Аналіз відмов у роботі пристроїв СЦБ та збоїв у роботі пристроїв АЛС, які вплинули на рух швидкісних поїздів «ІНТЕРСІТІ» та «ІНТЕРСІТІ+», показав деякі особливості в статистичних даних. Розподіл збоїв АЛС по залізницях та службах наведений у табл. 1. Загальна кількість випадків збоїв становить у 2013 р. – 543, 2014 р. – 441, 2015 р. – 379, 2016 р. – 336, 2017 р. – 551.

Обговорення результатів дослідження

З проведеного аналізу видно, що середня кількість транспортних подій, які відбуваються щороку на всіх залізницях України, становить близько 10 інцидентів (див. рис. 1). При цьому, як показує статистика, 60-80 % інцидентів відбувається з вини дистанцій сигналізації та зв'язку. Головною причиною цього залишається порушення технології виконання робіт. Окрім того, окремо проаналізувавши кількість відмов пристроїв СЦБ, чітко спостерігається тенденція до зростання.

Таблиця 1

Розподіл збоїв АЛС по залізницях та службах, які вплинули на рух швидкісних поїздів
«ІНТЕРСІТІ» та «ІНТЕРСІТІ+»

Збої АЛС по службах	Рік	Залізниця						
		Донецька	Львівська	Одеська	Південна	Південно-західна	Придніпровська	Всього:
Інші	2017	0	2	10	3	26	1	42
	2016	0	1	5	0	1	3	10
	2015	0	0	3	0	0	1	4
	2014	-	-	1	-	2	-	3
	2013	-	-	-	-	-	-	-
Втручання сторонніх осіб	2017	0	0	0	0	0	0	0
	2016	0	0	0	0	0	0	0
	2015	0	0	0	2	0	1	3
	2014	-	-	-	-	1	-	1
	2013	-	-	-	-	1	-	1
Причина не встановлена	2017	11	15	51	19	132	13	241
	2016	8	8	38	14	45	15	128
	2015	0	24	23	45	13	35	140
	2014	1	19	9	64	35	30	158
	2013	3	34	4	25	-	12	80
Т	2017	0	0	0	0	3	0	3
	2016	0	0	2	0	0	0	2
	2015	0	0	0	0	0	0	0
	2014	-	-	4	5	-	3	12
	2013	-	-	-	-	-	-	-
УЗШК	2017	0	0	3	0	25	5	33
	2016	0	0	0	0	0	0	0
	2015	0	1	8	0	11	0	20
	2014	-	-	-	7	4	-	11
	2013	1	5	-	-	20	-	25
Е	2017	0	1	2	4	9	2	18
	2016	0	5	2	1	19	0	27
	2015	0	2	2	2	1	0	7
	2014	-	3	1	5	23	3	35
	2013	-	3	-	9	4	-	15
П	2017	0	6	57	1	81	0	145
	2016	0	3	71	3	31	1	109
	2015	0	2	23	3	20	1	49
	2014	-	10	8	5	92	1	116
	2013	-	16	31	31	151	-	225
Ш	2017	0	8	8	7	40	6	69
	2016	0	9	12	21	10	8	60
	2015	0	10	5	23	2	11	51
	2014	2	8	7	41	34	13	105
	2013	4	9	2	26	151	12	197
Загальна кількість збоїв по залізницях	2017	11	32	131	34	316	27	551
	2016	8	26	130	39	106	27	336
	2015	0	39	64	75	47	49	274
	2014	3	40	30	127	191	50	441
	2013	8	67	37	91	327	24	543

Основними об'єктами, що призвели до цього, є несправність дешифраторів, підсилювачів і локомотивних фільтрів, а основною причиною залишається зношеність апаратури. При цьому кількість збоїв у роботі АЛС впродовж 2013-2017 років значно більша. Це обумовлено наявністю великої кількості завод, що впливають на передавальну та приймальну апаратуру АЛС. Існує багато науково-дослідних робіт різних авторів [3, 6-8], які ставлять перед собою за мету зменшити вплив завод на роботу системи. Але і надалі проблема залишається актуальною. Що стосується швидкісних поїздів «ІНТЕРСІТІ» та «ІНТЕРСІТІ+», то аналізуючи кількість збоїв за 2013-2017 роки та їх розподіл по залізницях та службах можна дійти висновку, що основна кількість так само віднесена за службами Ш та П.

Висновки

Для підвищення ефективності та надійності роботи залізничних пристроїв виконано багато науково-дослідних робіт. Результати впроваджуються в експлуатаційну роботу, тим самим автоматизуючи велику кількість технологічних процесів, скорочуючи час на обслуговування пристроїв та підвищуючи ймовірність безвідмовної роботи апаратури [4, 5, 10]. Проте, незважаючи на це, аналіз роботи залізничних пристроїв за дослідні 2013-2017 роки показав, що людський фактор, а саме порушення технології виконання робіт, недотримання вимог технологічних карт та керівництв з експлуатації, неякісний ремонт та перевірка приладів в ремонтно-технологічних ділянках, залишається суттєво високим в надійності роботи залізничної апаратури в цілому і в системах локомотивної сигналізації зокрема. Тому і надалі не втрачають своєї актуальності розробки в сфері автоматизації процесів перевірки та

обслуговування систем безпеки на залізничному транспорті.

Бібліографічний список

1. Аналіз стану безпеки руху поїздів на залізницях України за 12 місяців 2013 – 2017 року. Міністерство транспорту України. Державна адміністрація залізничного транспорту. – 2014. – 2018.
2. Антоненко В. С. Анализ работоспособности автоматической локомотивной сигнализации числового кода / В. С. Антоненко, Ю. А. Кравцов, В. М. Сафро, А. Б. Чегуров // Известия ПГУПС. – 2011. № 1. – С. 101-112.
3. Гололобова О. А. Исследование работы системы автоматической локомотивной сигнализации в условиях помех / О. А. Гололобова // Наука и транспорт. Вестник Белорусского государственного университета транспорта. – Беларусь: БелГУТ, 2016. Вип. 2 (33). – С. 126-129.
4. Гололобова О. О. Автоматизация технического обслуживания устройств автоматической локомотивной сигнализации // «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта»: Тезисы 75 Международной научно-практической конференции. Секция 7 «Автоматизированные системы управления на транспорте». – Д.: ДНУЗТ. – 2015. – С. 196.
5. Горелик А. В. Оценка качества технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, Н. А. Тарадин А. С. Веселова, Д. В. Солдатов // Автоматика на транспорте. – 2017. – Т. 3. – № 3. – С. 319 – 334
6. Киякина Т. Е. Причины сбоев в работе автоматической локомотивной сигнализации, методы решения проблем / Т. Е. Киякина, Д. И. Селиверов // Технические науки в России и за рубежом (II): материалы междунар. заоч.

- науч. конф. ТЗ8 (г. Москва, ноябрь 2012 г.). – М.: Буки-Веди, 2012. – 166 с.
7. Лукоянов С. В. Сбоев кодов АЛСН на скоростном участке стало меньше.// Автоматика, связь, информатика. – 2011 – №9 – С. 22-25.
 8. Лукоянов С. В. Сбоев кодов АЛСН на скоростном участке стало меньше.// Автоматика, связь, информатика. – 2011 – №11 – С.34-36.
 9. Пультяков А. В. Системный анализ устойчивости работы систем автоматической локомотивной сигнализации / А. В. Пультяков, М. Э. Скоробогатов // Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация Иркутский государственный университет путей сообщения Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 1 (57). С. 79-89.
 10. Hololobova O. O. Application of fourier transform and wavelet decomposition for decoding the continuous automatic locomotive signaling code / O. O. Hololobova, V. I. Havryliuk // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д.: ДНУЗТ, 2017. Вип. 1 (67). – С. 7-17.
 11. Hololobova O. O. Study of transmission lines effect on the system operation of continuous automatic cab signaling / O. O. Hololobova, V. I. Havryliuk, M. O. Kovryhin, S. Yu. Buriak // Наука та прогрес

- транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д.: ДНУЗТ, 2014. Вип. 5 (53). – С. 17-28.
12. Theeg, G. Railway Signalling and Interlocking. International Compendium / G. Theeg, S. Vlasenko. – Hamburg : Eurailpress, 2009. – 448 p.

Ключові слова: автоматична локомотивна сигналізація, статистика відмов, аналіз причин збоїв, завади у роботі, приймальна та передавальна апаратура, кількісні та якісні показники відмов.

Ключевые слова: автоматическая локомотивная сигнализация, статистика отказов, анализ причин сбоев, помехи в работе, приемная и передающая аппаратура, количественные и качественные показатели отказов.

Keywords: automatic locomotive signaling, failure statistics, analysis of causes of failures, interference in work, receiving and transmitting equipment, quantitative and qualitative failure rates.

Рецензенти:
д.т.н., проф. Муха А.Н.
д.т.н., проф. Бойник А.Б.

Надійшла до редколегії 08.04.2019.
Прийнята до друку 22.04.2019.

УДК 656.259.2

К. В. ГОНЧАРОВ – к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, goncharovkonv@gmail.com
РИБАЛКА Р. В. – к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, r.v.rybalka@gmail.com

КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ

Постановка проблеми

Для забезпечення безпеки руху поїздів та підвищення ефективності залізничних перевезень застосовуються різноманітні інформаційно-керуючі системи. Зокрема на залізницях різних країн світу використовуються системи автоматичної ідентифікації рухомого складу (CAI PC), які забезпечують автоматичне зчитування номерів вагонів та обробку даної інформації. В результаті впровадження таких систем підвищується достовірність і оперативність звітності про стан вагонних і локомотивних парків, зменшується штат співробітників, забезпечується впровадження безпаперових інформаційних технологій, високий рівень інформаційного сервісу у внутрішніх і транзитних міжнародних перевезеннях, підвищується інтенсивність вантажоперевезень за рахунок скорочення простоїв, запізень, порожніх пробігів [1, 7, 12].

Існують декілька типів CAI PC. Найбільш розповсюдженими є системи радіочастотної ідентифікації (RFID) та оптичні системи [9].

Технологія RFID передбачає розміщення на бокових стінках кожного вагона кодових бортових датчиків (RFID-транспондерів), в яких зберігається номер вагона та інша інформація [1, 12, 14]. Живлення бортових датчиків забезпечується за рахунок енергії електромагнітних хвиль надвисоких частот, які випромінюють колійні пункти зчитування. Такі пункти розміщуються на входах та виходах станцій, а також в контрольних пунктах локомотивних та вагонних депо.

Під час проїзду вагону в зоні дії пункту зчитування бортовий датчик активується та формує зворотну модульовану електромагнітну хвилю. В результаті демодуляції та декодування такої хвилі відбувається зчитування інформації з датчика. До таких CAI PC відносяться російська система «Пальма», американська система Amtech, які виконані відповідно до міжнародного стандарту ISO 10374, а також європейська система Dunicom [7, 9]. Дані системи дозволяють зчитувати інформацію з датчиків при швидкостях рухомого складу до 150 км/год.

В роботі [4] пропонується в якості RFID-транспондерів використовувати датчики на поверхневих акустичних хвилях. Це дозволить підвищити достовірність даних в складних погодних умовах, при впливі ударів та вібрації, збільшити радіус зчитування та ідентифікації при швидкостях руху об'єкта до 300 км/год.

В цілому технологія RFID забезпечує високу достовірність даних, проте потребує розміщення на кожному вагоні додаткового пристрою – кодового бортового датчика, що вимагає значних матеріальних та часових ресурсів.

В роботах [6, 11] запропоновано здійснювати ідентифікацію поїзда за рахунок визначення його геометричних та конструкційних ознак: кількості осей, кількості вагонів, кількості осей у вагоні, типу та довжини кожного вагону. Такий підхід не потребує розміщення на вагонах додаткових датчиків. Проте поїзд ідентифікується як єдиний об'єкт і не забезпечується можливість ідентифікації кожного вагона окремо.

Оптичні САІ РС також не вимагають оснащення вагонів додатковим обладнанням. В таких системах застосовуються відеокамери, які фотографують бокові поверхні кожного вагону. В результаті програмної обробки отриманих зображень здійснюється розпізнавання номерів та ідентифікація вагонів [3, 8, 9]. В якості прикладів можна навести апаратно-програмний комплекс ARSCIS (Automated Rolling-Stocked Cars Identification System) та систему ідентифікації на базі відеоспостереження «Інтелект», які застосовуються на промислових підприємствах в Росії [9, 13]. Головним недоліком оптичних систем є залежність від кліматичних умов, забруднень та вібрації поверхні вагонів.

Таким чином, кожен тип САІ РС має свої переваги та недоліки. На нашу думку, доцільним є комплексне поєднання різних методів ідентифікації рухомих одиниць.

Мета роботи

Метою даної роботи є розробка загальних принципів побудови та алгоритмів роботи комплексної системи автоматичної ідентифікації рухомого складу.

Структура комплексної системи автоматичної ідентифікації

В рамках даної роботи пропонується комплексна САІ РС, в якій поєднуються технології радіочастотної та оптичної ідентифікації. Передбачається поетапне впровадження даної системи. На першому етапі може використовуватись лише оптична ідентифікація, яка не потребує додаткового вагонного обладнання. Після встановлення кодових бортових датчиків буде забезпечена можливість для переходу на більш достовірну радіочастотну ідентифікацію. Монтаж бортових датчиків на всіх рухомих одиницях вагонного та локомотивного парку вимагає значного часу. У зв'язку із цим

протягом перехідного періоду можливий варіант застосування комплексної системи з одночасним поєднанням оптичної та радіочастотної ідентифікації.

Структурна схема запропонованої системи представлена на рис. 1. До її складу входить колійне, постове та станційне обладнання.

Колійне обладнання складається із трьох точкових датчиків фіксації колісних пар (ТКД1-ТКД3), чотирьох відеокамер (ВК1, ВК3 – нижні, ВК2, ВК4 – верхні), джерел освітлення (ДО), які використовуються у нічний час, та RFID-антени.

До постового обладнання входить контролер датчиків, RFID-зчитувач, блок відеообробки, блок управління, а також блок передачі даних. Станційне обладнання підключається до постового обладнання через лінію зв'язку (ЛЗ) та включає в себе блок передачі даних, концентратор інформації, а також автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора.

Контролер датчиків обробляє сигнали від ТКД та вирішує наступні задачі:

- 1) підрахунок осей;
- 2) визначення вільності контрольованої ділянки методом підрахунку осей;
- 3) визначення кількості осей у кожному вагоні;
- 4) підрахунок вагонів;
- 5) фіксація вагону в зоні дії відеокамер та RFID-антени.

За відсутності рухомого складу система знаходиться в режимі самотестування, перевіряється справність всіх складових частин. Як тільки поїзд займає контрольовану ділянку система переходить в режим вимірювання, вмикаються відеокамери та активується RFID-зчитувач. В нічний час при цьому вмикаються також джерела освітлення.

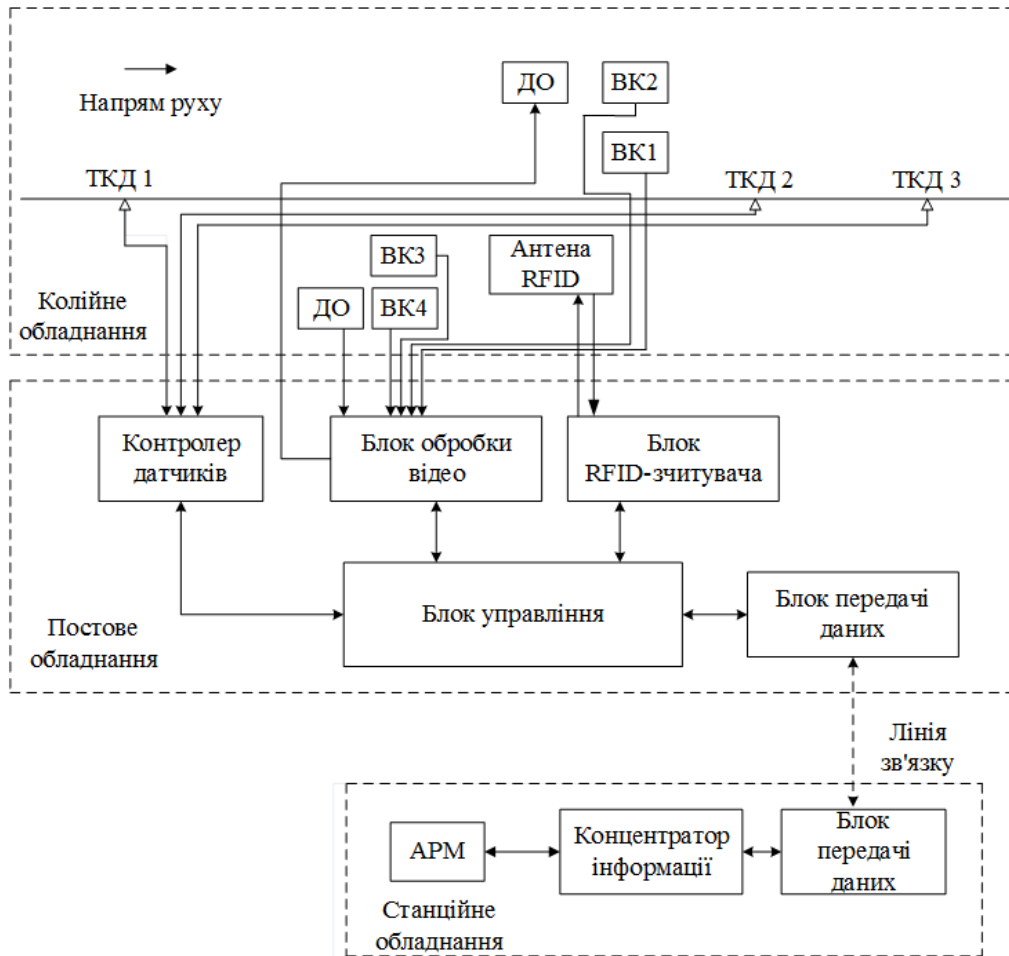


Рис. 1. Структурна схема комплексної системи автоматичної ідентифікації рухомого складу

При проїзді кожного вагону в зоні дії пункту зчитування відбувається пошук кодових бортових датчиків (КБД). Якщо вони присутні, то здійснюється радіочастотна ідентифікація вагону. В протилежному випадку відеокамери фотографують бокові поверхні вагона, на яких нанесений номер. Блок обробки відео виконує розпізнавання номеру. Отримані дані з RFID-зчитувача та блоку обробки відео передаються до блоку управління.

Після проїзду поїзда контролер датчиків фіксує вільність контрольованої ділянки. Далі блок управління формує повідомлення, яке містить інформацію про дату та час, кількість вагонів, порядкові та ідентифікаційні номери кожного вагону.

Повідомлення від постового обладнання передається на станційний (лінійний) рі-

вень системи, фіксується у концентраторі та відображається на АРМ оператора. Отримана інформація також може передаватись до інформаційних систем верхнього рівня.

Алгоритм обробки зображення

В системах оптичної ідентифікації номер визначається шляхом програмної обробки зображення бокової поверхні вагону. Пропонується наступний алгоритм обробки зображення.

1. Попередня обробка зображення:
 - а) перетворення зображення у монохромний формат;
 - б) фільтрація зображення (видалення шуму);
 - в) підвищення контрастності;

d) перетворення у бінарний формат.

2. Виділення області, на якій зображений номер вагону. Розділення цифр.

3. Розпізнавання кожної цифри за допомогою штучної нейронної мережі.

Розглянемо алгоритм більш детально. На першому етапі відбувається попередня обробка зображення. Отримана кольорова фотографія описується тришаровою двомірною матрицю, кожен шар якої відображає один із базових кольорів: червоний, зелений та синій. Спочатку така матриця перетворюється у одношарову матрицю, формується монохромне зображення. Після цього зображення фільтрується, що дозволяє зменшити рівень шуму. Далі підвищується контрастність (розширюється діапазон яскравості). Отримане зображення перетворюється у бінарний (чорно-білий) формат. Для цього значення кожного пікселя порівнюється з пороговим значенням. При перевищенні порогу вважається, що колір пікселя білий, в протилежному випадку – чорний.

На другому етапі обробки зображення здійснюється пошук області із номером вагону та виконується алгоритм розділення цифр. Даний алгоритм базується на виявленні границь чорних та білих пікселів. В результаті виявляються об'єкти, які складаються із білих пікселів на чорному фоні. При цьому вводиться ваговий коефіцієнт, що дозволяє відбракувати незначні об'єкти, які виникають через завади. Після цього зображення кожної цифри масштабується у формат 30x20 пікселів. Таким чином, формується вісім зображень стандартного розміру.

На третьому етапі відбувається розпізнавання кожної цифри за допомогою штучної нейронної мережі. В результаті визначається восьмизначний номер вагону.

Застосування штучних нейронних мереж для розпізнавання номеру вагону

Штучні нейронні мережі (ШНМ) – обчислювальні структури, які моделюють

прості біологічні процеси, що асоціюються з процесами людського мозку [2, 5, 10, 15]. Вони представляють собою системи, здатні до навчання шляхом аналізу позитивних і негативних впливів. Елементарним перетворювачем в даних мережах є штучний нейрон або просто нейрон, названий так за аналогією з біологічним прототипом.

Структура штучного нейрона показана на рис. 2 [5]. До його складу входять помножувачі (синапси), суматор і нелінійний перетворювач. Синапси здійснюють зв'язок між нейронами і множать вхідний сигнал на число, що характеризує силу зв'язку – вагу синапса. Суматор виконує додавання сигналів, що надходять через синаптичні зв'язки від інших нейронів і зовнішніх вхідних сигналів. Нелінійний перетворювач реалізує нелінійну функцію одного аргументу – виходу суматора. Ця функція називається функцією активації або передатною функцією нейрона.

Нейрон в цілому реалізує скалярну функцію векторного аргументу. Математична модель нейрона описується наступними співвідношеннями:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i + b, \quad y = f(s)$$

де w_i – вага синапсу ($i = 1 \dots n$); s – результат додавання; x_i – компонент вхідного вектора (вхідний сигнал); b – значення зміщення; y – вихідний сигнал нейрона; n – число входів нейрона; $f(s)$ – нелінійне перетворення (функція активації або передатна функція).

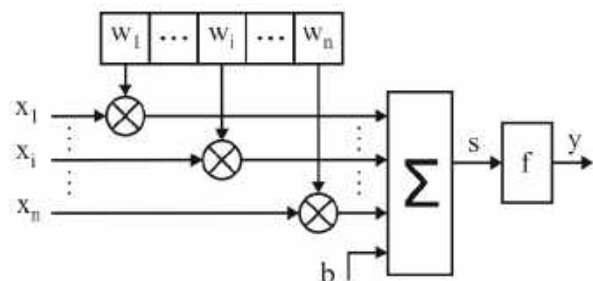


Рис. 2. Структура штучного нейрона

Однією із найбільш поширених функцій активації є сигмоїдальна (логістична) функція [5], яка описується наступним виразом:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-s}}.$$

Така функція має властивість «підсилювати» слабкі сигнали краще, ніж великі, що запобігає насиченню від великих сигналів. Ще однією важливою властивістю сигмоїдальної функції є простий вираз для похідної, що використовується в алгоритмах навчання нейронної мережі.

Структура ШНМ задається у вигляді графа, в якому кожний нейрон з довільною кількістю входів та виходів є вершиною графа, а входи і виходи нейрона представляють собою ребра (зв'язки). Зазвичай ШНМ складається з декількох шарів, кожен з яких може мати довільну кількість нейронів. Серед цих шарів розрізняють:

- вхідний шар (сенсорний): його нейрони отримують на свої входи сигнали ознак об'єктів чи процесів і передають їх своїми виходами до нейронів інших шарів;
- вихідний шар (реагуючий): його нейрони відображують реакцію ШНМ на вхідні ознаки;
- приховані шари (асоціативні) у довільній кількості: вони розміщуються між вхідним та вихідним шарами і виконують функцію проміжного логічного аналізу вхідних ознак. Вважається, що чим більше шарів і чим більше нейронів в шарах, тим складніші проблеми може розв'язувати нейронна мережа.

Характерною властивістю ШНМ є її здатність до навчання, що полягає у виробленні правильної реакції на подані їй різні вхідні ознаки. Припустимо, що \bar{X} – вектор вхідних сигналів, а \bar{Y} – вектор вихідних сигналів (реакція нейронної мережі). У базі даних зберігається множина навчальних

пар (\bar{X}, \bar{Y}) . Процес навчання виконується у наступній послідовності [5]:

- 1) обираються початкові невеликі значення вагових коефіцієнтів ШНМ;
- 2) обирається чергова навчальна пара (\bar{X}, \bar{Y}) з навчальної множини; вектор \bar{X} подається на вхід мережі (рис. 3);
- 3) розраховується вихід мережі;
- 4) розраховується різниця (помилка) між цільовим \bar{Y} та реальним виходом мережі;
- 5) вагові коефіцієнти мережі коригуються таким чином, щоб мінімізувати помилку;
- 6) пункти 2-5 повторюються для кожної пари навчальної множини поки помилки на всій множині не досягне прийнятної величини.

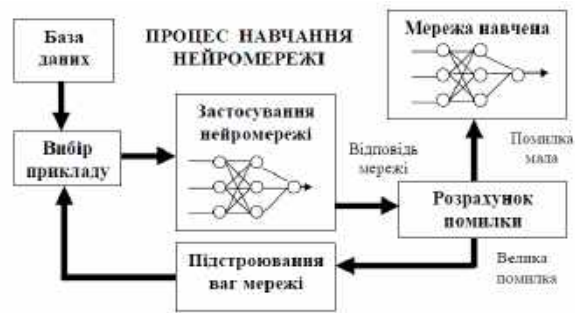


Рис. 3. Ілюстрація процесу навчання ШНМ

Для розпізнавання цифр номера вагону була обрана нейронна мережа прямого розповсюдження, яка містить 600 входів та 10 виходів (рис. 4). Бінарне зображення кожної цифри розміром 30x20 пікселів перетворюється у вектор \bar{X} довжиною 600 елементів. Отриманий вектор подається на входи ШНМ. Кожен вихід мережі відповідає одному із значень цифри (від 0 до 9). В результаті аналізу реакції ШНМ можна визначити значення цифри. Наприклад, якщо найбільше значення має місце на виході u_0 , то вважаємо, що цифра номера вагону дорівнює нулю.

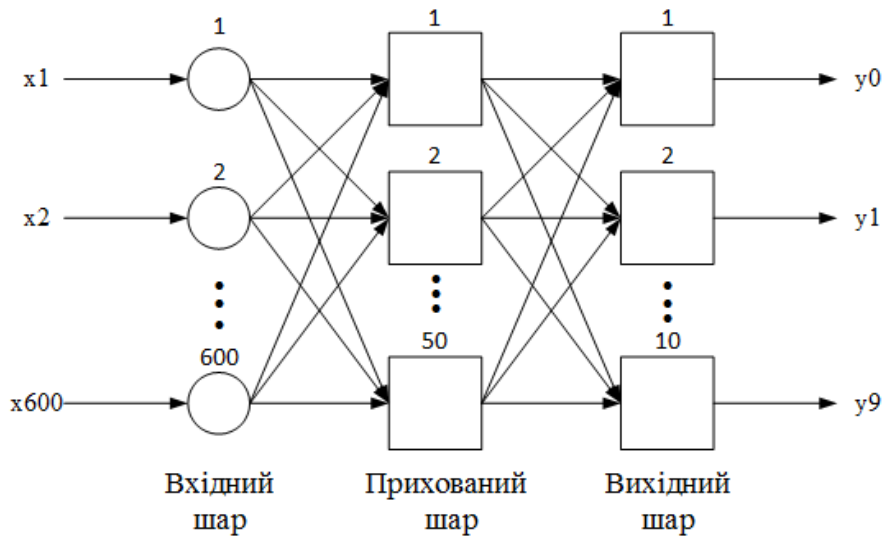


Рис.4. Нейронна мережа прямого розповсюдження

Результати імітаційного моделювання

Для перевірки працездатності запропонованих алгоритмів було проведено імітаційне моделювання в середовищі MATLAB. Для розпізнавання цифр застосовувалась нейронна мережа прямого розповсюдження з наступними параметрами:

- кількість входів – 600;
- кількість виходів – 10;
- кількість прихованих шарів – 1;
- кількість нейронів прихованого шару – 50;
- функція активації – сигмоїдальна.

Для дослідження використовували тридцять фотографій з номерами вагонів. На першому етапі провели попередню обробку та виділення зображення цифр із перших п'ятнадцяти фотографій. Таким чином була сформована навчальна множина із 120-ти зразків цифр. Після цього провели навчання нейронної мережі.

На другому етапі виконали розпізнавання номерів вагонів для п'ятнадцяти тестових фотографій. В усіх випадках номер вагону було визначено вірно. На рис. 5 – 8, в якості прикладу, показані результати обробки однієї із фотографій, а на рис. 9 – результат розпізнавання. Таким чином, про-

ведене імітаційне моделювання в цілому підтверджує працездатність запропонованих алгоритмів.

Дана робота потребує подальших досліджень за наступними напрямками:

- перевірка працездатності алгоритмів розпізнавання для більшої кількості фотографій, в тому числі отриманих в різних погодних умовах (туман, дощ, сніг), в умовах забруднень та вібрації поверхні вагонів;
- дослідження різних типів штучних нейронних мереж, вибір раціональної структури та параметрів мережі.



Рис. 5. Вихідне кольорове зображення номера вагону



Рис. 6. Монохромне зображення з підвищеною контрастністю



Рис. 7. Виділена область номера вагону



Рис. 8. Окремі зображення кожної цифри



Рис. 9. Номер вагону, отриманий за допомогою нейронної мережі

Висновки

1. Впровадження систем автоматичної ідентифікації рухомого складу дозволяє підвищити достовірність і оперативність звітності про стан вагонних і локомотивних парків, зменшити штат співробітників, під-

вищити рівень інформаційного сервісу у внутрішніх і транзитних міжнародних перевезеннях, підвищити інтенсивність вантажоперевезень за рахунок скорочення простоїв, запізньєнь, порожніх пробігів.

2. Системи радіочастотної ідентифікації забезпечують високу достовірність даних. Проте технологія RFID потребує розміщення на кожному вагоні додаткового пристрою – кодового бортового датчика, що вимагає значних матеріальних та часових ресурсів.

3. Пропонується комплексна система автоматичної ідентифікації рухомого складу, в якій поєднуються технології радіочастотної та оптичної ідентифікації. Запропонована структура та загальні принципи побудови такої системи.

4. Запропоновано алгоритм розпізнавання номерів вагонів, працездатність якого підтверджується результатами імітаційного моделювання.

5. Дана робота потребує подальших досліджень щодо перевірки працездатності алгоритмів розпізнавання в різних погодних умовах (туман, дощ, сніг), в умовах забруднень та вібрації поверхні вагонів.

Бібліографічний список

1. «ПАЛЬМА». Система автоматической идентификации транспортных средств [Текст] / В. В. Белов и др. // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 8. – С. 54-59.
2. Адаменко, В. О. Штучні нейронні мережі в задачах реалізації матеріальних об'єктів. Частина 2. Особливості проектування та застосування [Текст] / В. О. Адаменко, Г. О. Мірських // Вісник НТУУ «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – № 48. – С. 213-221.
3. Алиев, Э. В. Оптическая идентификация объектов подвижного состава в задачах управления железнодорожными перевозками [Текст] / Э. В. Алиев и др.

- // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 5. – С. 49-54.
4. Багдасарян, А. Система автоматической идентификации управления перемещением грузов на железнодорожном транспорте [Текст] / А. Багдасарян и др. // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2013. – № 3 (00125). – С. 92-98.
 5. Дьяконов, В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник [Текст] / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
 6. Жуковицкий, И. В. Идентификация поездов в информационных системах железнодорожного транспорта [Текст] / И. В. Жуковицкий, О. И. Егоров // Системные технологии. – 2015. – № 5 (100). – С. 123-131.
 7. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (основы инновационных технологий) [Текст] / В. В. Скалозуб и др. – Д.: ДНУЗТ, 2013. – 207 с.
 8. Казанский, Н. Л. Распределенная система технического зрения регистрации железнодорожных составов [Текст] / Н. Л. Казанский, С. Б. Попов // Компьютерная оптика. – 2012. – Том 36, № 3. – С. 419-428.
 9. Мурадян, Л. А. Автоматична ідентифікація окремих частин транспортного засобу при впровадженні нових концепцій системи технічного обслуговування та ремонту [Текст] / Л. А. Мурадян, В. Ю. Шапошник // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2017. – № 4. – 44-50 с.
 10. Рашид, Тарик. Создаем нейронную сеть: пер. с англ. [Текст] / Т. Рашид. – СПб.: ООО «Альфа-книга», 2017. – 272 с.
 11. Ромкин, М. В. Система автоматической идентификации типов подвижных единиц железнодорожного транспорта [Текст] / М. В. Ромкин, В. А. Засов // СамГУПС. – 2010. – с. 538-545.
 12. Русакова, Е. А.. Система автоматической идентификации транспортных средств САИТ «ПАЛЬМА» [Текст] / Е. А. Русакова. – Екатеринбург: УрГУПС, 2015. – 35 с.
 13. Система АРСИС (ARSCIS): Идентификация и осмотр вагонов, автоматизация железнодорожных весов [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mallenom.ru/products/videokontrol-i-uchet-zhd-transporta/arscis/>
 14. Финкенцеллер, Клаус. RFID- технологии: пер. с нем. [Текст] / К. Финкенцеллер. – М.: Додэка-XXI, 2010. – 496 с.
 15. Хайкин, Саймон. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. [Текст] / С. Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
- Ключові слова:** система автоматичної ідентифікації рухомого складу, радіочастотна ідентифікація, відеокамера, нейронна мережа.
- Ключевые слова:** система автоматической идентификации подвижного состава, радиочастотная идентификация, видеокамера, нейронная сеть.
- Keywords:** system for automatic identification of rolling stock, radio frequency identification, video camera, neural network.
- Рецензенти:**
проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,
проф., д.ф.-м.н., В.І. Гаврилюк.
- Надійшла до редколегії 15.10.2019.
Прийнята до друку 28.10.2019.

УДК 621.336

МОХАММАД АЛЬ САИД АХМАД – аспирант, Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Иордания, ahmadesraa20@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4056-1040

Д. В. УСТИМЕНКО – доцент кафедры «ЕТЕМ», Днипровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Украина, ustimenko.1979@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2984-4381

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ДИАГНОСТИКЕ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Введение

В настоящее время система скользящего токосъема является основным способом передачи электроэнергии от контактной сети к электроподвижному составу (ЭПС) как на электрифицированных железных дорогах, так и на городском электротранспорте. В условиях повышения скоростей движения ЭПС, внедрения нового типа локомотивов и электропоездов особенно актуальной становится проблема поддержания в работоспособном состоянии элементов контактной сети и токоприемника [1].

Одной из самых распространенных причин повреждения контактной сети является эксплуатация неисправных или разрегулированных токоприемников ЭПС [2, 3]. Обеспечение качественного токосъема в сложных условиях эксплуатации, уменьшение числа аварий и повышение надежности системы электроснабжения ЭПС связано с решением комплекса задач, одной из которых является контроль эксплуатационного состояния элементов контактной сети и токоприемников, оценка и прогнозирование уровня их износа.

Поддержание высокой надежности сложных систем и их готовности к использованию невозможно без хорошо развитых средств контроля и диагностирования их состояния. Теоретическое решение этих вопросов в последние годы развивается в рамках одного из направлений технической кибернетики – технической диагностики. Раз-

витие и обновление элементной базы средств автоматики и вычислительной техники привело к быстрому развитию методов и средств технической диагностики.

К основным целям технической диагностики относят [4]:

- определение технического состояния объекта;
- разработка методов определения технического состояния объекта;
- разработка средств определения технического состояния объекта.

При определении технического состояния объекта выделяют три типа задач:

- диагностика – определение состояния, в котором объект находится в настоящий момент времени;
- прогностика – предсказание состояния, в котором объект окажется в наперед заданный момент времени;
- генетика – определение состояния, в котором объект находился в некоторый момент в прошлом.

Классификация методов и средств диагностики

Методы и средства диагностирования подвижного состава и его узлов используются для имитации режимов их работы, измерения диагностических параметров и служат основой для постановки диагноза. По видам измеряемых диагностических параметров методы и средства диагностирования подразделяются на две группы [5]:

- функциональные, соответствующие параметрам эффективности работы транспортного средства;

- локальные, соответствующие параметрам процессов, сопутствующих функционированию объекта, или же структурным, геометрическим параметрам.

Первая группа методов и средств предназначается главным образом для определения работоспособности объекта в целом. Локальные методы и средства обеспечивают поэлементное диагностирование.

По способу исполнения диагностические средства разделяются на стендовые и портативные. Принципиальное значение приобретает классификация методов и средств диагностирования по схеме их применения – в стационарных условиях либо в движении.

Методы и средства диагностирования должны отвечать следующим требованиям [6]:

- обладать достоверностью измерений;
- иметь высокую надежность;
- отвечать требованиям технологичности;
- обладать минимальным энергопотреблением.

Диагностика токоприемников

Требования к эксплуатационным характеристикам токоприемников и в первую очередь к их надежности и экономичности постоянно повышаются. Характеристики и параметры токоприемников должны соответствовать значениям, устанавливаемым нормативным документом [7].

Токоприемник состоит из основания, нижней и верхней подвижных рам, двух кареток, полоза и подъемно-опускающего механизма. Структурная схема основных элементов токоприемника показана на рис. 1.

Из всех узлов электроподвижного состава токоприемники работают в наиболее сложных условиях, воспринимают разнообразные динамические нагрузки, выдерживают значительный по величине электрический ток (2200 А для токоприемников серии

П–5, Т–5М1 электровозов постоянного тока ВЛ-10, ВЛ-11; 2100 А – для токоприемников П-3 локомотивов ВЛ8; 2000 А – для токоприемников серии 10PP-2, 17PP-2 электровозов постоянного тока ЧС-2, ЧС-6; 500 А – для токоприемников Л-13У1 (Л-14М1) электровозов переменного тока ВЛ60, ВЛ80; 400 А – для токоприемников 2SLS-1 чешских электровозов переменного тока серии ЧС-4, ЧС-8), а в зимнее время на их работоспособности отрицательно сказываются низкая температура, снегопады и гололедообразования.

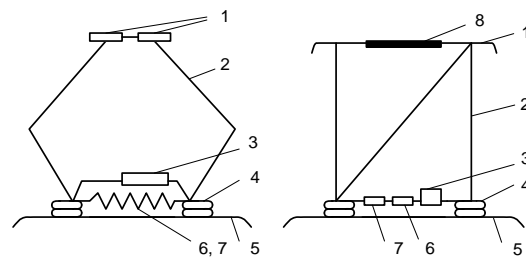


Рис. 1. Структурная схема токоприемника (главный вид и вид слева):

- 1 – полозы, 2 – рама, 3 – насос, 4 – изоляторы, 5 – корпус локомотива, 6 – опускающая пружина, 7 – поднимающая пружина, 8 – контактная вставка полоза токоприемника

В целом на долю неисправностей в узлах токоприемников приходится 10...20 % от всех отказов в ЭПС. Отказы в элементах токоприемников приводят к повышенному износу контактного провода, его обрыву или пережогу, повреждениям воздушных стрелок, фиксаторов, изоляторов.

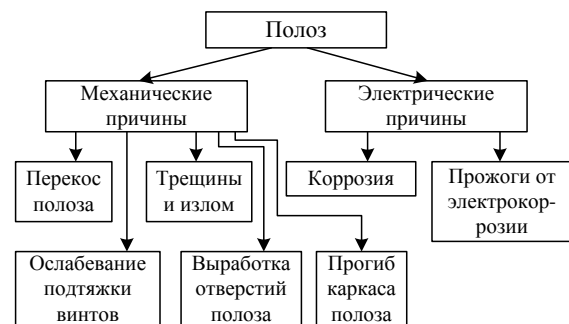


Рис. 2. Классификация дефектов полоза токоприемника, вызванная электрическими (электрохимическими) и механическими причинами

Наиболее ответственным и нагруженным узлом токоприемника является контактный узел: полз – контактные вставки.

Классификация дефектов полза токоприемника представлена на рис. 2. Полз подвержен изгибам, изломам, потери упругости, износу крепежных деталей.

На сегодняшний день на электроподвижном составе используются два основных типа материалов для изготовления контактных вставок – металлические композиционные материалы на основе меди или железа и композиционные на основе углерода, а именно кокса [8, 9]. Классификация дефектов угольно-графитных накладок полза токоприемника представлена на рис. 3. На контактных вставках могут возникать поперечные трещины, сколы, пропилы, износ и ослабление крепежа.

Неудовлетворительное состояние токоприемника может стать причиной выхода из строя контактной сети [10]. На рис. 4 представлена классификация отказов контактной сети, вызванных неудовлетворительным состоянием пантографов электроподвижного состава.

В связи с этим для обеспечения надежного и экономичного токосъема необходим тщательный контроль состояния токопри-

емника в процессе эксплуатации, который осуществляется различными диагностическими устройствами [11].



Рис. 3. Виды и причины возникновения дефектов в угольно-графитных вставках

В целях проведения аппаратурной диагностики состояния токоприемника следует выделить признаки, параметры которых могут внезапно измениться во время работы на линии, а также те, параметры которых медленно изменяются во времени и контролируются на осмотрах и ремонтах в депо.

В первую группу входят признаки:

- наличие зарезов на рабочей поверхности контактной вставки;
- пространственное положение токоприемника.

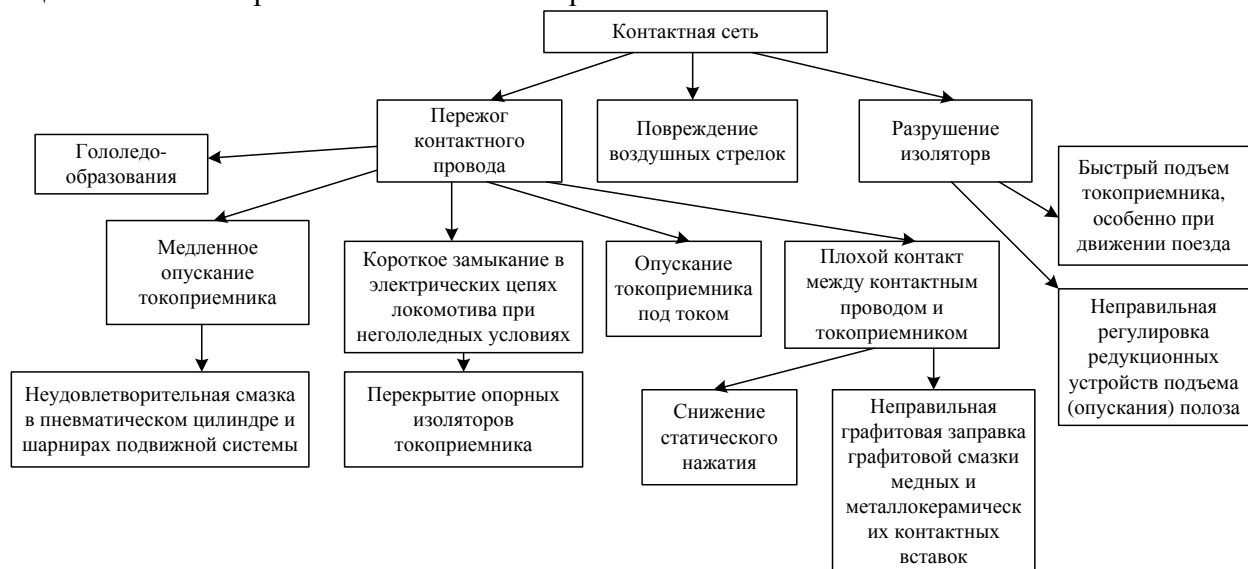


Рис. 4. Классификация и причины отказов в контактной сети

Ко второй группе относятся следующие параметры:

- характеристика статического нажатия токоприемника;
- поперечная жесткость токоприемника;
- толщина контактной вставки полоза токоприемника;
- поперечный люфт.

К числу наиболее эффективных методов автоматической диагностики относится дистанционный контроль параметров токоприемников, проходящих через контрольный пункт [12]. Такой подход позволяет контролировать состояние всех токоприемников, поступающих на линию. Дистанционный способ диагностики не требует остановки подвижного состава и проводится без участия обслуживающего персонала.

Для технической реализации систем дистанционной диагностики основных геометрических параметров токоприемников могут применяться системы компьютерного зрения, а для измерения статического нажатия возможно применение электромеханических датчиков, размещаемых на контактной сети в зоне контрольного пункта.

Большая работа в области диагностики токоприемников проводилась Харьковским национальным университетом городского хозяйства имени А. Н. Бекетова (ХНУГХ им. А. Н. Бекетова) [13]. Предложенное устройство для автоматического контроля нажатия токоприемника на контактный провод содержит рычажно-пружинный механизм. При прохождении токоприемника под измерительным ползцом происходит перемещение последнего вверх воздействуя через рычажную систему на рабочую пружину. Величина перемещения измерительного ползца пропорциональна силе нажатия токоприемника на его контактный провод и регулируется в устройстве изменением натяжения рабочей пружины.

Системы диагностики токоприемников, основанные на принципе анализа визуальных данных, позволяют получать информацию о состоянии узла без механического

взаимодействия с ним. Примером может выступать система автоматического мониторинга, предназначенная для регистрации изображения приближающегося токоприемника при помощи цифрового фотоаппарата. На основании полученных снимков происходит определение исправности контактных вставок ползьев токоприемника. Основные сложности при реализации таких систем:

- реализация алгоритмов распознавания изображений токоприемников и обнаружение дефектов в автоматическом режиме без участия оператора;
- высокие требования к скорости и точности фотофиксации;
- ограничения работы в темное время суток.

С помощью фронтальной камеры определяются геометрическое положение и форма токоприемника, путем сравнения фото с шаблонными изображениями.

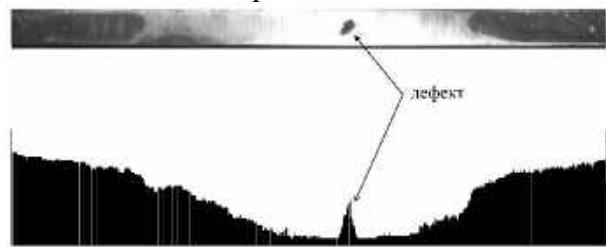


Рис. 5. Определение состояния контактных вставок ползца токоприемника

Вертикальная камера позволяет получить фото поверхности контактной вставки, получив из которого гистограмму уровней яркости по длине ползца система позволяет определить наличие подгаров, сколов, их количество и размер (рис. 5).

Основными преимуществами данной системы является бесконтактный способ измерения, отсутствие человеческого фактора, а также непрерывный контроль технического состояния токоприемников.

Выводы

Проанализированы разные виды неисправностей токоприемников электропо-

движного состава и контактной сети. Установлено, что из всех узлов локомотива около 20 % отказов приходится на токоприемник.

Выполнена классификация дефектов токоприемника, его полоза и контактных вставок. Определены признаки для проведения аппаратурной диагностики токоприемников.

Проанализированы методы и способы автоматической диагностики технического состояния токоприемников. Перспективным направлением в развитии систем автоматической диагностики состояния токоприемников следует признать системы, не смотря на ряд трудностей, основанные на принципе анализа визуальных данных, позволяющие получать информацию о состоянии узла без механического взаимодействия с ним.

Библиографический список

1. Устименко, Д. В. Сучасний стан проблеми струмознімання на електрифікованих залізницях [текст] / Д. В. Устименко // Електрифікація транспорту. – 2016. – №12.
2. Сидоров О. А. Исследование и прогнозирование износа контактных пар систем токосъема с жестким токопроводом: Монография [Текст] / О. А. Сидоров, С. А. Ступаков. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2012. – 174 с.
3. Паранин А. В. Экспериментальное исследование работы электрического контакта «контактный провод – токосъемная пластина» в статическом положении / А. В. Паранин, Н. А. Акиншин, А. Б. Батрашов / Транспорт Урала. – Екатеринбург, 2013. Вип. 4(39) – С. 93-96.
4. Калугин М.В. Диагностика электромеханических систем транспортного комплекса / М. В. Калугин, В. В. Бирюков, под общ. Редакцией В. В. Бирюкова. – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2014. – 92с.
5. Пархоменко П.П. Основы технической диагностики / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомоян. – М.: Энергия, 1981. – 320 с.
6. Карибский В. В. Основы технической диагностики / В.В. Карибский, П.П. Пархоменко, Е.С. Согомоян, В.Ф. Халчев; под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
7. Рекомендации по техническим требованиям к конструкции токоприемников электрического тягового подвижного состава. Р650 [Текст]: Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). Варшава, Польша, 2014. – 12 с.
8. Муха А. М. Контактні вставки полозів струмоприймачів електрорухомого складу з покращеними показниками [Текст]/ А. М. Муха, Д. В. Устименко, О. Ю. Балійчук, О. Я. Куриленко, І. В. Малишко, Ю. О. Адамович // Залізничний транспорт України. – 2018. – № 2. – С. 33–39.
9. ГОСТ 32680 Токосъемные элементы контактные токоприемников электроподвижного состава. Общие технические условия.
10. Емельянова М. Н. Повышение качества токосъема за счёт выбора рационального натяжения проводов контактной подвески [Текст]: дис. канд. техн. наук: спец. 05.22.07. – Москва, 2015. – 105 с.
11. Смирнов В. А. Повышение качества контроля технического состояния токоприемников электрического подвижного состава магистральных железных дорог [Текст]: дис. канд. техн. наук: спец. 05.22.07 РГБ ОД, 61:07-5/2075. – Омск, 2007. – 127 с.
12. Смердин А. Н. Автоматизированная система диагностики состояния токоприемников электроподвижного состава на основе видеоизмерительного комплекса. [Текст] / А. Н. Смердин, А. С. Голубков, С. Н. Найден // Известия Транссиба: Транспортная энергетика. – 2012. – № 2(10). – С.103 – 109.
13. Далека В.Ф. Устройство автоматического контроля нажатия токоприёмников электроподвижного состава на контактный провод / В.Ф. Далека, П.Г. Кофман, А.В. Федотов Наука и техника в город. хоз-ве: сб. трудов / НИКТИ ГХ. – Киев, 1982. – Вып. 51. – С. 67–70.

Ключові слова: ковзний контакт, струмоприймач, контактний провід, контактна вставка пантографа, діагностика.

Ключевые слова: скользящий контакт, токоприемник, контактный провод, контактная вставка пантографа, диагностика.

Keywords: sliding contact, current collector, contact wire, pantograph contact insert, diagnostics.

Рецензенти:

проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,
проф., д.т.н., А. М. Муха.

Поступила в редколлегию 15.10.2019.
Принята к печати 29.10.2019.

УДК 629.4.083

В. В. ЛАГУТА – к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, vasilij.laguta@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-4957-9178

Ю. Г. КОЗИК – ТзОВ «Прикладні залізничні технології» AEbt Angewandte Eisenbahntechnik GmbH (original name), Нюрнберг D-90429, Німеччина, kozik_yuriy@yahoo.com,
ORCID: 0000-0002-5212-2953

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТЕД ЕД-118А ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ ЗВОРОТНОЇ НАПРУГИ

Вступ

Відмови тягових електричних двигунів (ТЕД) мають різну природу, але відмови тягових двигунів з причини незадовільного стану ізоляції відбуваються досить часто. Особливої уваги, при обслуговуванні ТЕД, приділяється корпусній ізоляції. Програма оновлення тягового рухомого складу залізниць на період до 2020 року передбачає необхідність створення сучасних систем обслуговування та ремонту ТРС нового покоління та розробка відповідної нормативної документації [6].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Серед сучасних досліджень слід відзначити роботи М. Д. Глущенко, М. Г. Дурандіна, В. Н. Попова і А. С. Серебрякова, в яких розглянуті проблеми експлуатаційної діагностики тягових електродвигунів, методи прогнозування стану ізоляції електричних машин та ін. Особливий інтерес викликає робота А. С. Серебрякова в області розробки пристрою контролю ізоляції тягових двигунів по зворотній напрузі [7].

Нові підходи з питань утримування ізоляції ТЕД знайшли відображення в роботах З. Г. Гіоева, С. В. Кучерова, О. Т. Осяєва та ін. [2]. У роботі [4] описано основні види старіння ізоляції і дефекти, що в ній виникають; наведені основні методи контролю ізоляції електрообладнання

Робота [1] є фундаментальною роботою з теоретичних основ ремонтних впливів на

надійність технічних об'єктів. В роботі сформульовано ряд задач по визначенню раціонального утримування технічних об'єктів. Запропонований в роботі підхід можна застосовувати як для окремих елементів рухомого складу, так і для об'єктів в цілому.

В роботі [9] показано, що ресурс електродвигуна в основному визначається зносом ізоляції.

Вдосконалення систем утримування ТЕД, в тому числі і корпусної ізоляції, з необхідністю призводить до відповідних розробок пристроїв і систем діагностування, [3, 11, 8].

Як висновок може бути корисною публікація [10], в якій автори проводять поетапний вичерпний огляд однієї схеми ізоляції, і дають детальний звіт про стандарти, що пов'язані з системами ізоляції. У статті звертається увага на те, що жоден стандарт не може забезпечити гарантію на термін служби, і ніякі випробування ізоляції не включають всі робочі умови: термічні, механічні, вплив вологи і хімічний вплив. Як замовник, так і виробники будуть використовувати стандарти, знаючи, що такі документи не можуть повністю задовольнити їхні побажання. Автори підкреслюють, що протягом 20-ти років спостерігаються тенденція поліпшення якості ізоляції і деякі досягнення в удосконаленні стандартів.

Моделі, що стосуються прогнозуванню ресурсу ізоляції ТЕД, дослідниками однозначно не визначаються. Ресурс (життєвий

цикл) моделюється як напрацювання (час) між сусідніми неусувними відмовами. Вихідними даними, при цьому, є інформація про відмови протягом деякого часу експлуатації.

Моделі відновлення корпусної ізоляції, що пропонуються в проаналізованих публікаціях, базуються на випадкових потоках відмов (пробій ізоляції) і не враховують поточний стан ізоляції та ступінь відновлення (технологію відновлення).

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – покращення системи утримування ТЕД ЕД-118А за рахунок прогнозування ресурсу корпусної ізоляції та визначення моментів її відновлення з забезпеченням найменших питомих витрат на ПР-3 і КР-1 з врахуванням ступені відновлення, використовуючи дані про стан ізоляції за методом зворотної напруги в процесі експлуатації. [9]

Методика

Одним з ефективних неруйнівних методів контролю стану корпусної ізоляції ТЕД є метод, заснований на використанні явища абсорбції. Відомо, що про стан ізоляції і ступені її старіння судять по струму абсорбції. Контроль заряду абсорбції по струму абсорбції не дуже зручний, оскільки струм абсорбції малий і з цієї причини спотворюється оточуючими промисловими перешкодами. Тому на практиці застосовують метод вимірювання напруги саморозряду і зворотної напруги.

За вимірними значеннями напруги саморозряду і зворотної напруги можна судити про стан корпусної ізоляції безпосередньо. За рахунок різної поляризації шарів від джерела напруги до ізоляції протягом не тривалого часу протікає струм абсорбції. За рахунок струму абсорбції на кордоні розділу шарів накопичується об'ємний заряд внутрішнього поглинання (заряд абсорбції). Про процес абсорбції можна судити не

тільки по струму абсорбції, але і по накопиченому (поглиненому) заряду абсорбції, який створює зворотну напругу.

Дослід, в якому спостерігається зворотна напруга, полягає в наступному. Неоднорідна ізоляція заряджається протягом деякого часу при постійній (номінальній) напрузі U_0 , щоб в ній накопичився заряд абсорбції. Потім ізоляція відключається від джерела постійної напруги і її електроди (провід та «корпус») замикаються на коротко на малий проміжок часу Δt , після чого знову розмикаються. За час Δt геометрична ємність ізоляції повністю розряджається, а заряд абсорбції, накопичений на кордоні шарів, залишається практично незмінним. Цей заряд розподіляється на ємність ізоляції і заряджає її. Після розмикання зовнішніх електродів ізоляція буде розряджатися на опір своїх шарів. На ізоляції з'явиться напруга. Цю напругу і називають зворотною напругою U_{ret} . В наводиться пристрій, що дозволяє виміряти зворотну напругу ТЕД. [8]

В якості оцінки стану корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А в роботі використовувались данні замірів значень зворотної напруги $U_{ret}(t)$, t – час, для різних значень пробігу локомотива.

Якість стану ізоляції будемо оцінювати показником $U_{ret}^{max}(l)$ – максимальне значення зворотної напруги в поточній процедурі вимірювання відповідно до пробігу локомотива l

$$U_{ret}^{max}(l) = \max_t U_{ret}(t), t \in [0, t_{eval}], \quad (1)$$

та інтегральним показником [8]

$$A(l) = \int_0^{t_{eval}} U_{ret}(t) dt, t_{eval} = t_r + t_{midl}, \quad (2)$$

де l – пробіг локомотива, при якому виконується діагностування ТЕД;

t_{eval} – час оцінювання зворотної напруги, визначається з рівняння

$$U_{ret}(t_{eval}) = 0.5 \cdot U_{ret}^{max}(l), \quad (3)$$

де t_r – час наростання зворотної напруги до величини $U_{ret}^{max}(l)$;

t_{midl} – значення часу саморозрядження від часу t_r до величини зворотної напруги $0.5 \cdot U_{ret}^{max}(l)$.

Заміри величин зворотної напруги $U_{ret}(t)$, інтегральної оцінки $A(l)$ виконувались приладом [8]. Спостереження проводились для групи ТЕД, що встановлені на тепловозах серії 2ТЕ-116 депо «М» РФ «Придніпровська залізниця» при різних значеннях пробігу l (напрацювання).

Заміри зворотної напруги $U_{ret}(t)$ та відповідної величини інтегральної оцінки (2) проводилися для ТЕД, що проходили капітальний ремонт КР-1 на локомотиворемонтному заводі «Завод 1», електровозоремонтному заводі «Завод 2» та електромеханічному ремонтному заводі «Завод 3». Залежність значень інтегральної оцінки $A(l)$ для одного ТЕД від пробігу приведено на рис. 1.

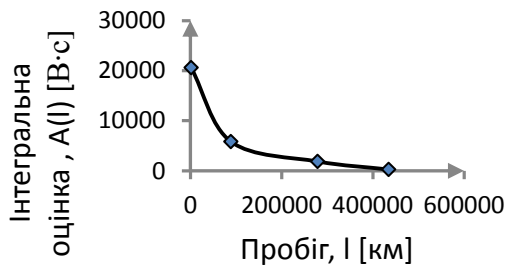


Рис. 1. Залежність значень інтегральної оцінки $A(l)$ від пробігу для одного ТЕД

Якщо величину зворотної напруги $U_{ret}^{max}(l)$ та інтегральну оцінку $A(l)$ розглядати як характеристики процесу старіння корпусної ізоляції (або як показники поступової відмови), то їх можна описати співвідношеннями

$$U_{ret}^{max}(l) = U_{ret}^{max}(0) \cdot e^{-a \cdot l}, \quad a = const; \quad (4)$$

$$A(l) = A(0) \cdot e^{-b \cdot l}, \quad b = const, \quad (4')$$

параметри a і b визначаються з задачі апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів.

Стан корпусної ізоляції при проведенні її діагностування методом зворотної напруги можна характеризувати як максимальним значенням зворотної напруги $U_{ret}^{max}(l)$, так й інтегральним показником $A(l)$.

Відновлення якості корпусної ізоляції можливе в умовах локомотивного депо під час виконання поточного ремонту ПР-3 та в умовах локомотиворемонтного заводу при проведенні капітального ремонту КР-1, та капітального ремонту КР-2.

Якщо відновлення властивостей ізоляції буде здійснюватися після КР-2 (або коли ізоляція нова) під час виконання ПР-3 з періодом відновлення τ , то інтегральна оцінка $A(l)$, з урахуванням ступеня відновлення корпусної ізоляції, буде описуватися функціональною залежністю в вигляді [5]

$$A(l) = A(0) \cdot e^{-b \cdot \left[l - \gamma \cdot \tau \cdot \left[\frac{l}{\tau} \right] \right]}, \quad (5)$$

де $\left[\frac{l}{\tau} \right]$ – ціла частина від $\left(\frac{l}{\tau} \right)$;

γ – коефіцієнт (число), що характеризує рівень відновлення ізоляції під час виконання ПР-3.

В подальшому вважаємо, що відлік напрацювання l починається від ремонту КР-2 (або з моменту початку напрацювання коли ізоляція нова).

Параметри залежності інтегральної оцінки A , зворотної напруги U_{ret}^{max} з урахуванням початкової якості ізоляції (або якості ремонту ТЕД ЕД-118А локомотиворемонтними заводами) наведено в табл. 1. Параметр b і значення величини $A(0)$ в табл. 1 визначались з розв'язання задачі апроксимації за даними спостережень величин інтегральних оцінок $A(l)$.

Таблиця 1

Початкові данні: параметри залежності інтегральної оцінки $A(l)$ і витрати коштів на відновлення за ПР-3, КР-1

Завод	$A(0)$, В·с	γ	b	g	$C_{\text{ПР3}}$, грн.	$C_{\text{КР1}}$, грн.
«Завод 1»	20540	0,40	0,00000900	0,71	6520	12648
«Завод 2»	20900	0,55	0,00000947	0,78	6520	14055
«Завод 3»	21180	0,49	0,00001015	0,75	6520	16970

В звичайній ситуації і в проведених експериментах справжнє значення величин A 0 після відновлення КР-2 для ТЕД невідомо.

В табл. 1: $C_{\text{ПР3}}$ – витрати коштів на одне відновлення за ПР-3; $C_{\text{КР1}}$ – витрати коштів на відновлення за КР-1; g – коефіцієнт, що характеризує рівень відновлення ізоляції під час виконання КР-1. Величини $C_{\text{ПР3}}$ і $C_{\text{КР1}}$ це середні витрати на одне відновлення для певного заводу.

Первинно величина L_{ren1}^* напрацювання до КР-1 визначається з розв'язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \left(L_{\text{ren1}}^* - \gamma \cdot \tau \left[\frac{L_{\text{ren1}}^*}{\tau} \right] \right)} = A_{\text{min2}} \quad (6)$$

відносно L_{ren1}^* . В рівнянні (6) величина A_{min2} є значення інтегральної оцінки A , що відповідає обмеженню знизу для значень зворотної напруги $U_{\text{ret}}^{\text{max}}$. Остаточна величина напрацювання до КР-1 визначається як

$$L_{\text{ren1}} = \begin{cases} L_{\text{ren1}}^* \\ n+1 \cdot \tau \end{cases}, \quad (7)$$

де n – кількість відновлень ПР-3 до моменту КР-1.

Значення $L_{\text{ren1}} = L_{\text{ren1}}^*$ приймається коли різниця $\vartheta = L_{\text{ren1}}^* - (n+1) \cdot \tau$ становить величину близьку до τ . Термін «близька» не означає «приблизно дорівнює» і залежить більше від людського фактору. Задача про прийняття рішення що стосується вибору значення L_{ren1} в статті не розглядається.

Іншими словами: якщо величина пробігу ϑ економічно вигідна після проведення останнього ПР-3, то тоді $L_{\text{ren1}} = L_{\text{ren1}}^*$, в іншому випадку в момент напрацювання що відповідає останньому ПР-3 буде здійснено КР-1 і тоді $L_{\text{ren1}} = (n+1) \cdot \tau$.

Моделювання моментів відновлення до КР-2 відбувається з урахуванням отриманих результатів моделювання відновлення до КР-1. Первинно величина напрацювання до КР-2 L_{ren2}^* визначається з розв'язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \cdot (L_{\text{ren2}}^* - L_{\text{ren1}} \cdot \tau \cdot g \cdot m)} = A_{\text{min2}}, \quad (8)$$

відносно L_{ren2}^* . В рівнянні (8) m – кількість відновлень ПР-3 від моменту КР-1 до КР-2; Δl – прирощення по пробігу відповідно до рівня відновлення при виконанні КР-1 (залежить від коефіцієнту відновлення ізоляції g). Величина Δl визначається з розв'язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \cdot \Delta l} = g \cdot A(0) \quad (9)$$

відносно Δl . Остаточна величина напрацювання до КР-2 визначається як

$$L_{\text{ren2}} = \begin{cases} L_{\text{ren2}}^* \\ L_{\text{ren1}} + (m+1) \cdot \tau \end{cases} \quad (10)$$

Вираз (10) аналогічний виразу (7). Розглянемо різницю $\vartheta = L_{\text{ren2}}^* - L_{\text{ren1}} - (m+1) \cdot \tau$. В випадку, якщо величина пробігу ϑ економічно вигідна після проведення останнього ПР-3 після КР-1, то $L_{\text{ren2}} = L_{\text{ren2}}^*$, в іншому випадку в момент напрацювання, що відповідає останньому ПР-3, буде здійснено КР-

2 і

$$L_{ren2} = L_{ren1} + (m+1) \cdot \tau. \quad (11)$$

Результати і обговорення

При фіксованій періодичності, коли $\tau=180000$ км та з врахуванням обмеження на зворотну напругу, значення можливого пробігу L_{ren2} (напрацювання до КР-2) по заводах наводяться в табл. 2. [5]

Таблиця 2

Прогнозування напрацювання відновлення до КР-1 та до КР-2 по заводах при періодичності відновлення $\tau = 180000$ км за Правилами [11]

Завод відновлення ізоляції	Напрацювання до КР-1 L_{ren1} , км	Напрацювання до КР-2 L_{ren2} , км	Витрати коштів $C_{прз}(n,m) + C_{срл}$, Грн.	Питомі витрати, Коп./км
«1»	513715	988164	38728	3,91
«2»	540000	1080000	40115	3,71
«3»	540000	1052015	43050	4,09

При моделюванні моментів відновлення, табл. 2, вводиться обмеження знизу в вигляді зони (A_{min1}, A_{min2}), що є обмеженням значень інтегрального показника якості ізоляції в розрахунках. Величина $A_{min1} = 950 [B \cdot c]$ відповідає величині зворотної напруги в 30 вольт, а величина $A_{min2} = 750 [B \cdot c]$ – величині в 25 вольт. Величини A_{min1}, A_{min2} обирались виходячи з досвіду експлуатації, точки зору безпеки руху і досліджень [8].

Як слідує з табл. 2 розрахунків, при однакових представлених періодах відновлення τ і кількості відновлень, на якість корпусної ізоляції впливає і прийнята технологія відновлення. Перед замовником (депо) виникає задача про прийняття рішення стосовно вибору виконавця для проведення відновлювальних робіт. Результати моделювання (послідовність відновлень та прогнозування ресурсу), що відповідають

табл. 2, надано на рис. 2 - 4.

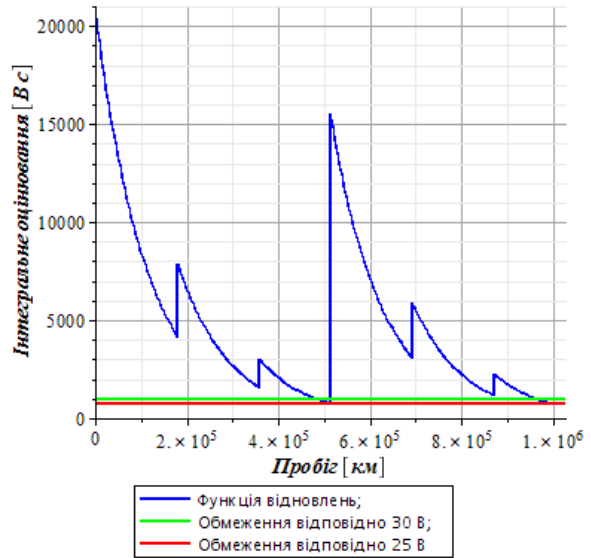


Рис. 2. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [5], технологія відновлення «Завод 1».

Моменти відновлення, км:

180000 – ПР-3; 360000 – ПР-3; 513715 – КР-1; 693715 – ПР-3; 873715 – ПР-3; 988164 – КР-2

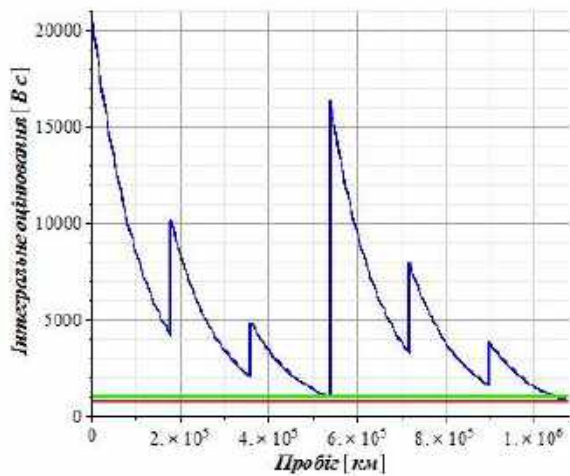


Рис. 3. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [5], технологія відновлення «Завод 2».

Моменти відновлення, км:

180000 – ПР-3; 360000 – ПР-3; 540000 – КР-1; 720000 – ПР-3; 900000 – ПР-3; 1080000 – КР-2

На рисунках зображено функцію відновлень-зносу корпусної ізоляції. Функція відновлень-зносу являє собою залежність інтегрального показника стану ізоляції від

напрацювання. У точках, що відповідають моментам відновлення, функція має розриви першого роду. Коридор з прямих ліній відповідає прийнятому обмеженню в задачі оптимізації на величину зворотної напруги відповідно 25 В і 30 В.

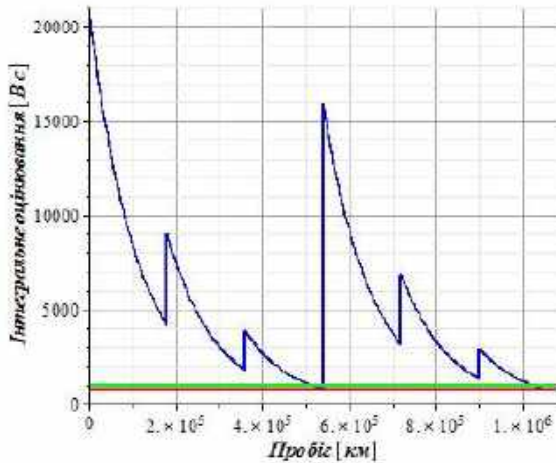


Рис. 4. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [5], технологія відновлення «Завод 3».

Моменти відновлення, км:
 180000 – ПР-3; 360000 – ПР-3; 540000 – КР-1;
 720000 – ПР-3; 900000 – ПР-3; 1052015 – КР-2

Рішення стосовно вибору моментів відновлення корпусної ізоляції і відповідного ресурсу визначимо з розв’язання наступної задачі оптимізації. Для ремонтних заводів визначимо варіанти відновлення такі, які мінімізують суму питомих витрат на відновлення ПР-3 та КР-1 за період експлуатації від КР-2 (або новий ТЕД) до наступного КР-2. Сформулюємо задачу. Нехай τ – період відновлення ізоляції, n – кількість відновлень ПР-3 до КР-1, m – кількість відновлень ПР-3 від КР-1 до КР-2, тоді

$$\min_{\tau, n, m} \frac{C(\tau, n, m)}{L_{ren2}(\tau, n, m)}, \quad \tau \in T, \quad n, m \in M, \quad (11)$$

при обмеженні

$$L_{ren2}(\tau, n, m) \geq L_{min}, \quad (12)$$

де $C(\tau, n, m)$ – сума витрат на виконання відновлень всіх ПР-3 та КР-1;

M – обмежена безліч натуральних чисел;
 T – безліч наперед заданих періодів відновлення ізоляції;

$L_{ren2}(\tau, n, m)$ – напрацювання ізоляції до КР-2;

L_{min} – мінімально допустимий пробіг (напрацювання) ТЕД, приймається відповідно [5] величиною 990000 км.

Функція цілі $C(\tau, n, m)$ є сума витрат на всі визначені при моделюванні відновлення всіх ПР-3 і КР-1 за період експлуатації від КР-2 (або новий ТЕД) до наступного КР-2. Мова йде про загальні питомі витрати на відновлення тільки корпусної ізоляції одного ТЕД.

В задачі прийнято $M = \{1, 2, 3, 4, 5\}$;
 $T = \{\tau_i\}, i = \overline{1, K}$ – дискретна безліч періодів відновлення, τ_i – періоди відновлення ізоляції, що задаються наперед при розв’язанні задачі. Розв’язання задачі значно спрощується тим, що оптимізація виконується на рахункових, обмежених безлічах T і M . Дискретна безліч періодів відновлення вибрана в зв’язку з тим, що функція цілі $C(\tau, n, m)$ не є безперервною функцією, що ускладнює використання методів типу градієнтних при вирішенні поставленої оптимізаційної задачі. Значення періодів відновлення τ_i для різних ремонтних заводів відрізняються.

Оптимізація питомих витрат з прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 1» проводилась для безлічі періодів відновлення, тис. км, $T = \{180, 150, 120, 250, 300, 320, 350, 360\}$.

Отримано наступний результат з мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР-3 $(n+m)=(1+1)$; напрацювання до КР-2 $L_{ren2} = 990430$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m) = 25688$ грн.; найменші питомі витрати склали 2,59 коп./км; період відновлення $\tau = 360000$ км. Моменти відновлення, км: 360000 – ПР-3; 513715 – КР-1; 873715 – ПР-3.

Оптимізація питомих витрат з прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 2» проводилась для безлічі періодів відновлення, тис. км, $T=\{120, 150, 180, 240, 250, 300, 350, 360\}$.

Отримано наступний результат з мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР-3 $(n+m)=(1+1)$; напрацювання до КР-2 $L_{ren2} = 1108430$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m)=25688$ грн.; найменші питомі витрати склали 2,32 коп./км; період відновлення $\tau = 360000$ км. Моменти відновлення, км: 360000 – ПР-3; 542515 – КР-1; 902515 – ПР-3.

Оптимізація питомих витрат з прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 3» проводилась для безлічі періодів відновлення, тис. км, $T=\{120, 150, 180, 240, 250, 300, 320, 360\}$.

Отримано наступний результат з мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР-3 $(n+m)=(1+1)$; напрацювання до КР-2 $L_{ren2} = 1049730$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m)=25688$ грн.; найменші питомі витрати склали 2,45 коп./км; період відновлення $\tau = 360000$ км. Моменти відновлення, км: 360000 – ПР-3; 567715 – КР-1; 927715 – ПР-3.

Варіанти оптимальних відновлень ізоляції, для поставленої задачі оптимізації, зведено в загальну таблицю для подальшого аналізу, табл. 3.

Як видно з табл. 3, найкращу технологію відновлення має «Завод 2».

Наукова новизна і практичне значення

Процедура оптимізації враховує ступінь відновлення ізоляції при виконанні ПР-3 і виконанні КР-1. Моделювання ресурсу ізоляції і періоду відновлення ПР-3 засновано на даних вимірів зворотної напруги корпусної ізоляції в залежності від пробігу. Максимальне значення зворотної напруги та значення введеної інтегральної оцінки мо-

жуть бути використані як показники що характеризують стан корпусної ізоляції ТЕД.

Таблиця 3

Зведена таблиця аналізу оптимальних варіантів технологій відновлення корпусної ізоляції по заводам

Завод відновлення КР-1, КР-2	Періодичність відновлення τ , км	Кількість відновлень ПР-3 $(n+m)$	Напрацювання до КР-2 L_{ren2} , км	Питомі витрати коп/км
«1»	360000	1+1	990430	2,59
«2»	360000	1+1	1108430	2,32
«3»	360000	1+1	1049730	2,45

Висновки

Визначено оптимальне напрацювання корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А за питомими витратами на відновлення як технічного об'єкта з поступовими відмовами з урахуванням технології відновлення. Отримано відповідні моменти відновлення. Моделювання моментів відновлення та прогнозування ресурсу корпусної ізоляції здійснювалося без урахування впливів випадкових відмов ізоляції. За статистичними даними та обраним методом прогнозування ресурсу визначено що найкращу технологією відновлення має «Завод 2». Отримані результати прийнятні до конкретних умов експлуатації. Важливо дотримання припущення, що умови експлуатації ТЕД не змінювалися зі зміною напрацювання. Останнє означає, що вагові норми, полігон обороту і організація руху за період спостереження і збору інформації не змінювалися.

Бібліографічний список

1. Босов, А. А. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог: Монография / А. А. Босов, П. А. Лоза // – Днепр: Дри-ант, 2015. – 252 с. ISBN 978-966-2394-15-3.
2. Гиев, З.Г. Основы виброакустической

- диагностики тяговых приводов локомотивов: Дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Ростов-на Дону, 1998. – 367 с.
3. Капица, М. И. Определение системы диагностирования ТЭД с учетом выбора предпочтительных элементов с изменяющейся интенсивностью отказов / М. И. Капица, В. В. Лагута, Т. Н. Сердюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2017. – № 4. – Харків: Вид-во УкрДУЗТ. – С. 9-15.
 4. Касаткин, Г.С. Контроль изоляции электро-технических устройств: Учебное пособие / Г. С. Касаткин, В. В. Федотов. – М.: МИИТ, 2009. – 56 с.
 5. Правила ремонту электрических машин тепловозів. № ЦТ-0064: Наказ Укрзалізниці від 23.02.03 р. № 53-Ц. // – К., ТОВ Видавничий дім «САМ», 2003. – 148 с.
 6. Самсонкін, В.М. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки / В. М. Самсонкін, О. М. Гончаров, С. Г. Грищенко та ін. // Укрзалізниця. – К.: ДП ДНДЦ УЗ, 2009. – 300 с.
 7. Серебряков, А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: Учебное пособие для вузов ж.д. транспорта / А. С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2005. - 280 с.
 8. Michail Kapitsa, Vasiliy Laguta, Yuriy Kozik. Selecting the Parameters of The Diagnosis of Frame Insulation Condition in Electrical Machines of Locomotives // *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7 (4.3) (2018), pp. 110-114. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.3.19718.
 9. Nefedov, R. Loginova, E. Investigation of wear of insulation of traction engines of locomotives in operation // ITM Web of Conferences. 18. 01006. [doi: 10.1051/itmconf/20181801006].
 10. Olivier Barré, Bellemain Napame. The Insulation for Machines Having a High Lifespan Expectancy // Design, Tests and Acceptance Criteria Issues. *Machines*, 2017, 5(1), 7; <https://doi.org/10.3390/machines5010007>
 11. Serdiuk T., Feliziani M., Serdiuk K. About electromagnetic compatibility of track circuits with the traction supply system of railway // Proc. of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility -EMC EUROPE 2018. - Publisher: IEEE. Conference Location: Amsterdam, Netherlands. - 27-30 Aug. 2018. - Pages: 242-247. [DOI: 10.1109 / EMCEurope.2018.8485034]

Ключові слова: корпусна ізоляція, зворотна напруга, контроль стану ізоляції, система утримування тягового електродвигуна.

Ключевые слова: корпусная изоляция, обратное напряжение, контроль состояния изоляции, система содержания тягового электродвигателя.

Keywords: frame insulation, return voltage, control of the insulation condition, traction motor maintenance system.

Рецензенти:

д.ф.-м.н., проф. В. І. Гаврилюк,
д.т.н., проф. А. В. Сохацький.

Надійшла до редколегії 15.10.2019.
Прийнята до друку 28.10.2019.

УДК 656.259.2

К. В. ГОНЧАРОВ – к.т.н., доцент, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, goncharovkonv@gmail.com
Н. А. НАГОРНА – студентка групи СК1821, Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЛІНІЙНОЇ КООРДИНАТИ ПОЇЗДА

Постановка проблеми

Пристрої локомотивної автоматики виконують цілий ряд функцій щодо забезпечення безпеки руху поїзда: прийом та дешифрування кодів автоматичної локомотивної сигналізації, керування локомотивним світлофором, перевірку пильності машиніста, контроль швидкості руху поїзда та автоматичне екстрене гальмування у разі порушення умов безпеки [2, 4, 9]. В сучасних локомотивних пристроях забезпечення безпеки руху поїзда перелік функцій суттєво розширюється, зокрема додаються контроль швидкості з урахуванням постійних та тимчасових обмежень, визначення відстані до перешкоди, а також різних залізничних об'єктів (світлофора, стрілки, переїзду та ін.), розрахунок кривої гальмування з урахуванням відстані до світлофора із забороненим показанням [1, 6]. Для виконання таких функцій пристрій локомотивної автоматики повинен визначати лінійну залізничну координату поїзда.

На сьогоднішній день застосовуються в основному два методи визначення лінійної координати поїзда. Перший передбачає використання бортових пристроїв одометрії та спеціальних індуктивних колійних прийомовідповідачів (баліз), які виконують роль своєрідних електронних маркерів [3]. Балізи розташовуються в певних опорних точках всередині колії, до їх пам'яті записується інформація про поточну лінійну координату та обмеження швидкості для даної ділянки. Під час руху поїзда над балізою за рахунок індуктивного зв'язку локо-

мотивна апаратура зчитує інформацію з балізи та визначає лінійну координату. Далі за допомогою бортового одометра визначається відстань, яку проїхав поїзд від останньої балізи та розраховується поточна лінійна координата. Такий підхід застосовується, зокрема, в Європейській системі керування залізничними перевезеннями ERTMS, Китайській системі керування рухом поїздів CTCS та інших подібних системах [1, 12]. Недоліком такого методу є похибка бортового одометра, принцип дії якого, як правило, базується на підрахунку числа оборотів колісної пари. Крім цього, такий підхід потребує наявності додаткових колійних пристроїв – баліз, які традиційно достатньо широко застосовуються в країнах західної Європи, але в Україні не використовуються.

В другому методі визначення лінійної координати поїзда використовується локомотивний модуль супутникової навігації та електронна карта, до якої записуються географічні та відповідні лінійні координати різних залізничних об'єктів для даного маршруту та опорних точок (прив'язок), в якості яких, як правило, використовуються кілометрові стовпчики. За допомогою модуля супутникової навігації визначається поточна географічна координата поїзда (довгота та широта), далі виконується пошук двох найближчих опорних точок в електронній карті та виконується розрахунок поточної лінійної координати поїзда. Такий підхід застосовується, наприклад, в російській локомотивній системі забезпечення безпеки руху поїзда КЛУБ-У [6], яка

експлуатується в деяких країнах пострадянського простору, в тому числі і в Україні, а також в українській системі ImproTRAIN-250. Аналогічні рішення використовуються також в американській системі керування рухом поїздів ITCS. На нашу думку такий метод є більш прийнятним для України, так як не потребує встановлення додаткового обладнання (баліз) вздовж залізничної колії. Проте в системі КЛУБ-У та її аналогах при визначенні поточної координати поїзда не враховується кривизна та профіль колії [7]. Вважається, що ділянка між найближчими до поїзда опорними точками (кілометровими стовпчиками) є прямолінійною. У зв'язку із цим лінійна координата визначається з похибкою.

Мета роботи

Метою даної роботи є розробка принципів застосування штучних нейронних мереж для точного визначення лінійної координати поїзда.

Похибка визначення лінійної координати поїзда

Проведемо оцінку похибку визначення лінійної координати поїзда. Припустимо, що поїзд рухається по ділянці, радіус кривизни якої є постійним. Схематично така ділянка зображена на рис. 1. Найближча до поїзда опорна точка A має декартові координати x_A, y_A та відповідну лінійну координату l_A . Припустимо, що голова поїзда знаходиться в точці C з декартовими координатами x_C, y_C . Тоді поточна лінійна координата поїзда

$$l_C = l_A \pm L, \quad (1)$$

де L – довжина дуги, яка поєднує точки A та C . Знак у виразі (1) визначається шляхом порівняння лінійних координат двох найближчих до поїзда опорних точок.

Довжина дуги L залежить від радіуса кривизни колії R та кута α (див. рис. 1).

$$L = \frac{\pi R \alpha}{180} \quad (2)$$

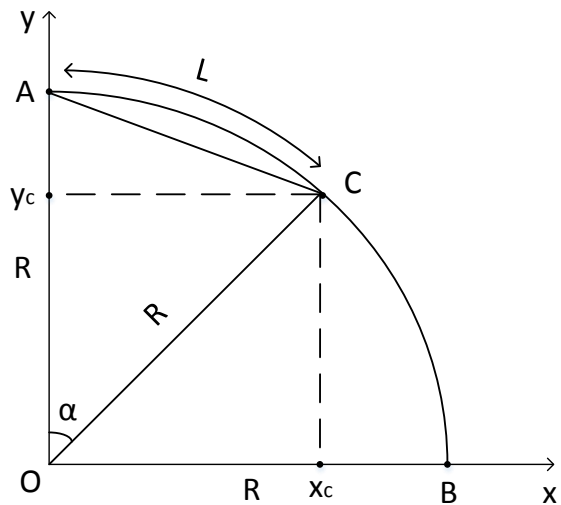


Рис. 1. Схема для визначення похибки лінійної координати

В існуючих системах локомотивної безпеки при визначенні лінійної координати поїзда не враховується кривизна колії [7]. Таким чином, замість довжини дуги L визначається довжина відрізка AC

$$AC = \sqrt{(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2}. \quad (3)$$

Відповідно до обраної моделі координати точок A та C визначаються наступним чином: $x_A = 0, y_A = R, x_C = R \cdot \sin \alpha, y_C = R \cdot \cos \alpha$.

Похибка визначення лінійної координати поїзда без врахування кривизни колії представляє собою різницю між довжиною дуги L та довжиною відрізка AC

$$\Delta L = L - AC. \quad (4)$$

Слід зазначити, що система супутникової навігації визначає не декартові, а географічні координати. При цьому довжина відрізка AC визначається наступним чином

$$AC = \sqrt{(\Delta L_\varphi (\varphi_A - \varphi_C))^2 + (\Delta L_\lambda (\lambda_A - \lambda_C))^2},$$

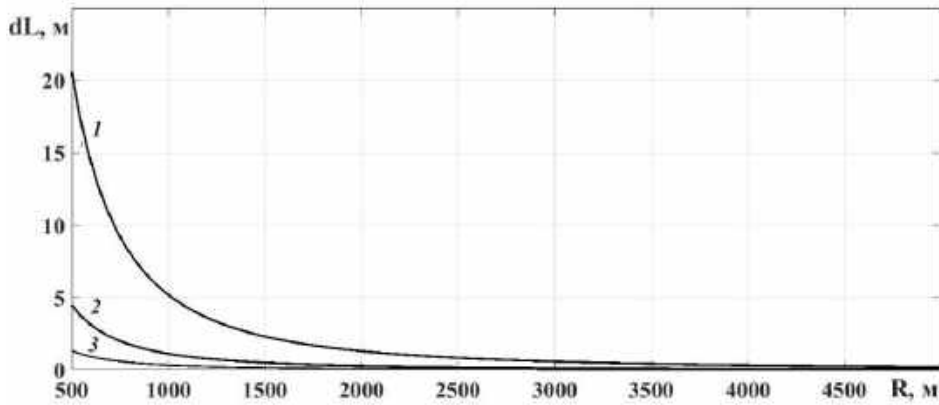


Рис. 2. Залежність похибки від радіуса кривизни:
 1 – відстань до опорної точки 500 м; 2 – 300 м; 3 – 200 м

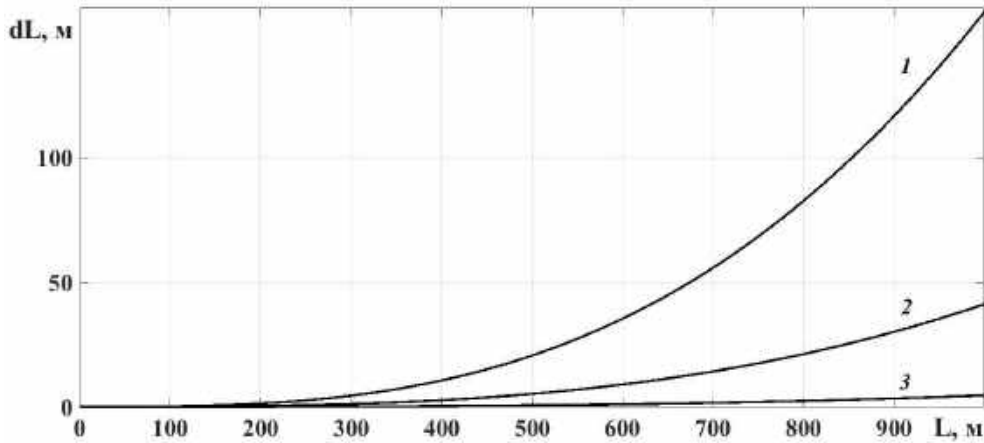


Рис. 3. Залежність похибки від відстані до опорної точки
 1 – радіус кривизни 500 м; 2 – 1000 м; 3 – 3000 м

де $\Delta L_\varphi = \frac{2\pi R_s}{360^\circ}$ – питома відстань на один градус широти; $\Delta L_\lambda = \frac{2\pi R_n}{360^\circ}$ – питома відстань на один градус довготи; $R_n \approx R_s \cdot \cos(\varphi_{cep})$ – радіус паралелі для даної широти; $\varphi_{cep} = (\varphi_A + \varphi_C) / 2$; $(\varphi_A; \lambda_A)$ – широта і довгота точки А; $(\varphi_C; \lambda_C)$ – широта і довгота точки С; R_s – радіус Землі.

За допомогою пакету MATLAB відповідно до виразів (1) – (4) були проведені розрахунки похибки лінійної координати при різних значеннях радіуса кривизни та відстані до найближчої опорної точки. Отримані залежності представлені на рис. 2, 3.

Як показують результати, похибка складає десятки метрів, а в деяких випадках може перевищувати 100 м. Її значення збільшується зі зменшенням радіуса кривизни та збільшенням відстані до опорної точки. Для розрахунку кривої гальмування поїзда така похибка є занадто великою. У зв'язку із цим задача удосконалення методу визначення лінійної координати є актуальною.

Застосування нейронної мережі для визначення лінійної координати

Штучні нейронні мережі дозволяють виконувати різноманітні задачі: розпізнавання та класифікацію, апроксимацію функцій, стиснення даних, організацію асоціативної

пам'яті, оптимізаційні задачі, керування складними процесами, прогнозування та ін. Вони мають такі властивості, як адаптивне навчання, самоорганізацію, узагальнення, обчислення в реальному часі та стійкість до перебоїв [5, 8].

Для підвищення точності визначення лінійної координати поїзда пропонуємо використовувати штучну нейронну мережу для апроксимації залізничних кривих, а також записувати в електронну карту в якості опорних точок не лише кілометрові, але і пікетні стовпчики. Для вирішення задачі апроксимації була обрана нейронна мережа з радіально-базисними функціями, яка має два входи та один вихід (рис. 4). На входи подаються поточні географічні координати (φ_x, λ_x), а на виході формується відповідна лінійна координата L_x .

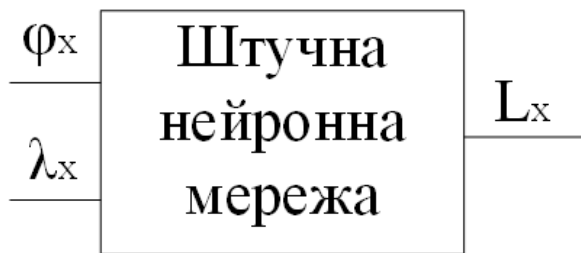


Рис. 4. Нейронна мережа для визначення лінійної координати поїзда

Пропонується наступний алгоритм. За допомогою модуля супутникової навігації визначаються поточні географічні координати поїзда. Далі аналізується кілометрова ділянка, на якій знаходиться поїзд. З електронної карти зчитуються географічні та відповідні лінійні координати десяти опорних точок для даної ділянки. Ці дані застосовуються для навчання нейронної мережі. Таким чином здійснюється апроксимація залізничної ділянки. Після цього на вхід мережі подаються поточні географічні координати поїзда, а на виході формується відповідна лінійна координата.

Результати моделювання

За допомогою пакету MATLAB було проведено моделювання роботи нейронної мережі для різноманітних залізничних ділянок довжиною один кілометр з різним радіусом кривизни та конфігурацією. В роботі використовували додаток Google maps. На рис. 5 в якості прикладу показані дві тестові залізничні ділянки довжиною 1 км. Червоними маркерами позначені опорні точки, географічні та відповідні лінійні координати яких представлені у табл. 1. Ці данні використовували для навчання нейронної мережі.

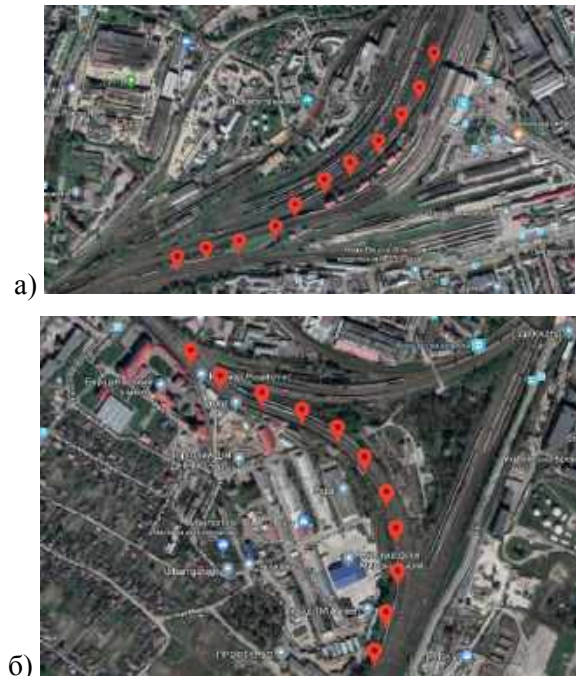


Рис. 5. Розташування опорних точок: а – тестова ділянка 1; б – тестова ділянка 2

На наступному етапі дослідження для кожної ділянки були обрані десять довільних точок, розташованих між опорними точками. Географічні координати цих точок подавались на вхід нейронної мережі. В табл. 2, 3 представлені дійсні лінійні координати тестових точок та результати роботи нейронної мережі. Видно, що похибка не перевищує трьох метрів.

Таблиця 1

Координати опорних точок

Тестова ділянка 1		Тестова ділянка 2	
Лінійні координати, м	Географічні координати	Лінійні координати, м	Географічні координати
0	(49.840649; 23.993171)	0	(50.405076; 30.426555)
100	(49.839744; 23.992558)	100	(50.405943; 30.426964)
200	(49.838990; 23.991809)	200	(50.406810; 30.427325)
300	(49.838311; 23.990918)	300	(50.407709; 30.427316)
400	(49.837762; 23.989828)	400	(50.408571; 30.426940)
500	(49.837278; 23.988667)	500	(50.409338; 30.426226)
600	(49.836702; 23.987612)	600	(50.409966; 30.425231)
700	(49.836082; 23.986625)	700	(50.409966; 30.425231)
800	(49.835722; 23.985222)	800	(50.409966; 30.425231)
900	(49.835489; 23.983892)	900	(50.411078; 30.421412)
1000	(49.835289; 23.982688)	1000	(50.411658; 30.420356)

Таблиця 2

Результати моделювання для тестової ділянки 1

Географічна координата	Дійсна лінійна координата, м	Лінійна координата, визначена нейронною мережею, м
(49.840232; 23.992918)	40	42.8244
(49.839355; 23.992206)	150	148.4228
(49.838706; 23.991475)	240	240.1886
(49.838012; 23.990403)	350	352.4115
(49.837582; 23.989347)	440	440.1267
(49.837187; 23.988428)	520	518.7663
(49.836243; 23.986954)	670	668.9398
(49.835950; 23.986271)	730	727.8274
(49.835585; 23.984420)	860	860.0691
(49.835424; 23.983494)	930	932.4207

Таблиця 3

Результати моделювання для тестової ділянки 2

Географічна координата	Дійсна лінійна координата, м	Лінійна координата, визначена нейронною мережею, м
(50.405335; 30.426700)	30	30.3656
(50.406372; 30.427177)	150	150.5961
(50.407081; 30.427365)	230	227.7181
(50.408320; 30.427088)	370	370.1156
(50.408970; 30.426625)	450	450.7748
(50.409732; 30.425653)	560	560.9745
(50.410066; 30.424997)	620	620.4122
(50.410625; 30.424079)	770	767.3279
(50.410808; 30.422294)	830	828.8092
(50.411538; 30.420554)	980	981.0844

Відомо, що модуль супутникової навігації може давати похибку в межах 5...10 метрів. В результаті моделювання було встановлено, що нейронна мережа давала достатньо точну лінійну координату навіть у разі перпендикулярного відхилення точки від залізничної лінії до десяти метрів, тобто частково компенсувалась похибка супутникової навігації. Таким чином, запропонований метод визначення лінійної координати є достатньо ефективним і може бути використаним для удосконалення алгоритму роботи локомотивних пристроїв забезпечення безпеки руху поїзда.

Висновки

1. В сучасних локомотивних пристроях забезпечення безпеки руху поїзда визначається лінійна залізнична координата поїзда, що дозволяє знайти відстань до перешкоди та розрахувати криву гальмування. Для вирішення таких задач використовується локомотивний модуль супутникової навігації та електронна карта. При цьому не враховується кривизна та профіль колії.

2. Було встановлено, що похибка традиційного метода визначення лінійної координати поїзда складає десятки метрів, а в деяких випадках може перевищувати 100 м. Для розрахунку кривої гальмування поїзда така похибка є занадто великою.

3. Для зменшення похибки запропоновано проводити апроксимацію залізничних кривих за допомогою штучної нейронної мережі, а також записувати в електронну карту в якості опорних точок не лише кілометрові, але і пікетні стовпчики.

4. В результаті моделювання було встановлено, що для різних тестових залізничних ділянок нейронна мережа визначала лінійну координату поїзда з похибкою не більше трьох метрів.

5. Запропонований метод може бути використаним для удосконалення алгоритму

роботи локомотивних пристроїв забезпечення безпеки руху поїзда.

Бібліографічний список

1. Бергер, Р. Координация внедрения системы ETCS на европейской сети [Текст] / Р. Бергер // Железные дороги мира. – 2005. – № 10. – С. 57-61.
2. Брылеев, А. М. Автоматическая локомотивная сигнализация и авторегулировка [Текст] / А. М. Брылеев, О. Поупе, В. С. Дмитриев и др. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с.
3. Гончаров, К. В. Моделювання та дослідження точкового каналу зв'язку «колія-локомотив» [Текст] / К. В. Гончаров, Ю. В. Бурковський // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2015. – № 10. – С. 53-61.
4. Гончаров, К. В. Синтез цифрового локомотивного приемника автоматической локомотивной сигнализации [Текст] / К. В. Гончаров // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2013. – Вип. 1 (43). – С. 30-38.
5. Дьяконов, В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник [Текст] / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
6. Зорин, В. И. Унифицированное комплексное локомотивное устройство безопасности (КЛУБ-У) [Текст] / В. И. Зорин, В. И. Астрахан. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 177 с.
7. Розенберг, Е. Н. Определение железнодорожной координаты в координатной системе интервального регулирования движения поездов [Текст] / Е. Н. Розенберг, В. Г. Новиков // Про-

- блемы железнодорожного транспорта. – М.: Интекст, 2011. – С. 56-61.
8. Ростовцев, В. С. Искусственные нейронные сети [Текст] / В. С. Ростовцев. – СПб.: Лань, 2019. – 216 с.
9. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / Ю. А. Кравцов и др. – М.: Транспорт, 1996. – 400 с.
10. Скалозуб, В. В. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (основы инновационных технологий) [Текст] / В. В. Скалозуб, В. П. Соловьев, И. В. Жуковицкий, К. В. Гончаров. – Д.: ДНУЗТ, 2013. – 200 с.
11. Соловьев, Ю. А. Системы спутниковой навигации [Текст] / Ю. А. Соловьев. – М.: Эко-Трендз, 2000. – 260 с.
12. Theeg, G. Railway Signalling and Interlocking. International Compendium [Text]

/ G. Theeg, S. Vlasenko. – Hamburg: Eurailpress, 2009. – 448 p.

Ключові слова: локомотивна автоматика, лінійна координата поїзда, супутникова навігація, нейронна мережа.

Ключевые слова: локомотивная автоматика, линейная координата поезда, спутниковая навигация, нейронная сеть.

Keywords: locomotive automation, linear coordinate of train, satellite navigation, neural network.

Рецензенти:

проф., д.т.н., А. Б. Бойнік,
проф., д.ф.-м.н., В.І. Гаврилюк.

Надійшла до редколегії 15.10.2019.

Прийнята до друку 28.10.2019.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

УДК 621.317

Гаврилюк, В. І. Моделювання впливу гармонійних завад на приймач тонального рейкового кола [Текст] / В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 11-19.

У роботі досліджено вплив гармонійних завад на приймач тонального рейкового кола на основі розробленої математичної та комп'ютерної моделі, що описує поширення електромагнітних завад у рейках від електрорухомого складу до колійного приймача, а також їх вплив на приймач. Модель враховує тип і конкретні параметри рейкового кола, схему каналізації тягового струму, коефіцієнт асиметрії рейкової лінії, опір ізоляції баласту, координати рухомого складу, спектральний склад зворотного тягового струму.

Вплив гармонійних завад на колійний приймач тонального рейкового кола проілюстровано шляхом знаходження сумарного струму на вході приймача у вигляді суми сигнального струму для нормального, шунтового і контрольного режимів роботи рейкового кола в найбільш несприятливих для цих режимів роботи умовах і максимально допустимому струму завад.

Значення сигнального струму в пропонованій моделі визначається через напругу генератора і коефіцієнт передачі струму, який згідно з відомими формулами знаходиться через матриці чотириполісників загальної еквівалентної схеми рейкового кола. Середнє квадратичне значення сумарного струму завад на вході колійного приймача від усіх одиниць електрорухомого складу в межах фідерної зони моделі визначається за запропонованою методикою з урахуванням коефіцієнта передачі апаратури кінця рейкового кола.

Адекватність розробленої моделі була експериментально перевірена шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними результатами, отриманими при реєстрації струму на вході колійного приймача при подачі на нього сигнального струму від генератора ГПУ та гармонійної завади від керованого генератора.

Для моделювання струму на вході колійного приймача в нормальному режимі граничні значення струмів на його вході взяті з технічної документації, а саме: середньоквадратичне значення сигнального струму на вході приймача взято на рівні 3 мА; середньоквадратичне значення завад взято на рівні 0,55 і 0,7 мА. З аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що завади на вході приймача з частотою в смузі $\pm(0..0,5)$ Гц щодо частоти сигнального струму викликають появу періодичних змін струму нижче рівня його надійного спрацьовування з тривалістю більше 0,6 с, що може призвести до збою в роботі рейкового кола у нормальному режимі.

Для моделювання струму на вході колійного приймача у шунтовому та контрольному режимах граничні значення струму на його вході прийняті такими: залишкове напруга на вході приймача 0,23 В; середньоквадратичне значення гармонійної завади – 0,4 мА. В результаті зроблено висновок, що завади на вході приймача з частотою в смузі $\pm(0..0,5)$ Гц щодо частоти сигнального струму викликають підвищення струму на його вході вище за рівень надійного відпускання приймача з тривалістю більше 0,6 с, що може призвести до збою в роботі ТРК у шунтовому та контрольному режимах.

Лл. – 5, список літ. – 18 назв.

УДК 656.259.1

Тагізаде Ансарі, Х. Вплив електромагнітних завад на тягову мережу: математична модель тягової мережі [Текст] / Х. Тагізаде Ансарі, Т. М. Сердюк, І. Мисів // Електромагніт-

на сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 20-25.

В Україні електрифіковано майже половину залізничних ліній. У мережі залізниць є автоматичні пристрої, за допомогою яких регулюється рух поїздів та безпека на залізниці. Однак у цих автоматичних пристроях є деякі несправності, які можуть поставити під загрозу безпеку пасажирів та залізничної системи. Основними джерелами цих пошкоджень є наявність паразитних струмів, гармонік та електромагнітних перешкод. Для дослідження цих несправностей важливо мати точну модель залізничної мережі. Тож тема дослідження зараз актуальна.

Основна мета даної статті – вивчити поширення гармонік тягового струму у фідерній зоні (ділянці між підстанціями) та визначити вплив кодового струму, що протікає у залізничних лініях. Таким чином необхідно провести математичну модель тягового живлення. Також було проведено наукові роботи з визначення складу спектру тягового струму та найбільш небезпечних гармонік для роботи тягових підстанцій.

У цій статті представлена математична модель залізничної мережі, яка може бути корисною під час аналізу впливу цих несправностей на залізничну мережу. Він вважався 8-полюсним для одноколійної залізничної тяги.

Як згадувалося раніше, одним із основних кроків щодо дослідження впливу електромагнітних перешкод на автоматичні пристрої залізничної системи є створення точної моделі тягової мережі. Пропонована модель може бути використана, коли струм електровоза ділиться на два різні струми, що протікають у тягових магістралях. Крім того, була написана система диференціальних рівнянь щодо запропонованої моделі та введено рішення цієї системи. Всі струми в рейках і зворотний струм можна розрахувати за допомогою наведеного вище рішення. Отже, можна досліджувати вплив електромагнітних перешкод цей струм.

Лл. – 4, список літ. – 12 назв.

УДК 621.311.004.12

Горпинич, О. В. Застосування суперконденсаторів для підвищення якості електроенергії в електричних мережах з розподіленою генерацією [Текст] / О. В. Горпинич, О. С. Голубятник // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 26-38.

Мета. Наведено результати експериментальних досліджень суперконденсаторів як засобів згладжування відхилень та коливань напруги. Розглянуто імітаційні моделі еквівалентних схем заміщення суперконденсатору та експериментальної установки із сонячною панеллю, розроблені у середовищі PSCAD (Канада). **Методика.** Щоби отримати криві заряду та розряду суперконденсаторів, було розроблена та випробувана в реальних умовах експлуатації експериментальна установка із сонячною панеллю. Вона складається з сонячної панелі потужністю 10 Вт, суперконденсаторів з номінальною напругою 2,7 В та ємністю 100 Ф кожний, перетворювачів напруги та навантаження у вигляді лампи розжарювання потужністю 4 Вт напругою 12 В. Для вимірювання і реєстрації напруг в різних точках експериментальної установки були використані цифровий мультиметр Sanwa типу PC 510a та програма PC Link (Японія). Окрім експериментальних досліджень з використанням цифрового мультиметру Sanwa та програми PC Link, було виконано імітаційне моделювання у середовищі PSCAD з метою отримання кривої заряду суперконденсаторів. **Результати.** Продемонстрована експериментальна установка для моніторингу і аналізу електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах із сонячними панелями. Наведені так звана «однодіодна модель» (еквівалентна схема заміщення сонячної панелі) та рівняння, що описує вольт-амперну характеристику реальної фотоелектричної установки,

яка складається з низки з'єднаних комірок. Отримані аналітичні вирази, які дозволяють визначити параметри еквівалентної схеми заміщення сонячної панелі, що, як правило, в паспортних даних виробниками не наводяться. **Наукова новизна.** За допомогою експериментальних досліджень підтверджена ефективність застосування суперконденсаторів як засобів згладжування відхилень та коливань напруги, що виникають під час роботи сонячних панелей. **Практична значимість.** Представлена у роботі експериментальна установка використовується у навчальному процесі ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» під час проведення лабораторних робіт з дисципліни «Альтернативні джерела електроенергії».

Лл. – 17, табл. – 5, список літ. – 15 назв.

УДК 621.331

Білухін, Д. С. Збереження угруповань тягових двигунів при імпульсному регулюванні напруги [Текст] / Д. С. Білухін // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 39-45.

Мета. Однією з проблем при впровадженні імпульсного регулювання на електрорухомому складі є втрати енергії в елементах перетворювача і пульсація струму в колі тягових двигунів. В роботі запропонований варіант модернізації електровозів постійного струму, заснований на застосуванні імпульсного регулювання напруги на тягових двигунах. **Методика.** Виконано аналіз втрат енергії для кіл електровозів ЧС2 і ВЛ8 в режимі пуску. Розрахунки втрат робилися для двох можливих режимів. Перший режим – через кола існуючих реостатів. Другий режим – від імпульсного перетворювача напруги, розрахованого за типовими методиками. Розглянуто варіанти пуску електровоза від перетворювача з використанням з'єднань тягових двигунів і при живленні всіх груп двигунів паралельно. **Результати.** Аналіз втрат показав, що при розгоні пасажирського поїзда на розрахунковій ділянці втрати в реостатах для електровоза ЧС2 становлять до 76 кВт год. При розгоні на паралельному з'єднанні втрати в елементах перетворювача до 1,4 кВт г, при розгоні з використанням перегруповань до 1 кВт год. Для електровоза ВЛ8 з поїздом вагою 3400 т і розгоні в тому ж напрямку відповідні втрати розподілилися: 126, 2,4 та 2 кВт-год. Т. т. плавне регулювання з наявністю угруповань тягових двигунів дає деяку перевагу в порівнянні з розгоном на паралельному з'єднанні. Збереження угруповань тягових двигунів при впровадженні імпульсного регулювання дозволяє отримати проміжні рівні швидкостей, характерних угрупованням (послідовна, послідовно-паралельна) з відключеним регуляторної-тором, додатково знизити втрати і нагрів перетворювача. Для 6-вісних електровозів знизити до 11% пульсації струму або знизити габарити реакторів. **Практична значимість.** Результати розрахунків, запропоновані в роботі, можуть бути використані при дослідженні шляхів з модернізації електрорухомого складу.

Лл. – 5, табл. – 1, список літ. – 11 назв.

УДК 621.321

Шаповалов, О. С. Випробування асинхронних трифазних двигунів [Текст] / О. С. Шаповалов, О. П. Карасьов // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 46-50.

Проведено огляд методів післяремонтної перевірки трифазних асинхронних двигунів в умовах ремонтних цехів локомотивних депо підкреслює необхідність впровадження спеціалізованих стендів для проведення післяремонтних випробувань з метою підвищення якості проведення ремонту, зменшення кількості відмов в роботі допоміжного обладнання, і за рахунок цього підвищення безпеки руху залізничного транспорту в цілому.

Проаналізовано сучасний стан розвитку напівпровідникової та мікропроцесорної техніки, який дозволяє реалізувати живлення випробовуваного асинхронного двигуна в широкому діапазоні живлячих частот, що в свою чергу дозволяє побудувати універсальні стенди для випробування трифазних асинхронних двигунів. Вартість перетворювачів частоти знаходиться на економічно прийнятному рівні.

Виконаний аналітичний огляд можливих схем взаємного навантаження при випробуванні трифазних асинхронних двигунів. Схеми можуть бути побудовані як з використанням статичного перетворювача частоти, так і без нього. Подано коротку характеристику кожної моделі, із зазначенням як переваг так і недоліків кожної окремої схеми. Як видно з характеристики, схеми з використанням статичних перетворювачів частоти вирізняються вищою енергоефективністю, дозволяють проводити випробування в широкому діапазоні живлячих частот, в свою чергу вартість стенду з використанням статичного перетворювача буде вищою. Схеми без перетворювача частоти вирізняються низькою вартістю, але й низькою енергоефективністю, можливістю проводити випробування лише на частоті живлення мережі та високим рівнем споживання реактивної потужності.

Пропонується прийняти до уваги викладений матеріал при проектуванні стендів взаємного навантаження трифазних асинхронних електродвигунів з подальшим техніко-економічним обґрунтуванням вибраної схеми.

Лл. – 7, список літ. – 4 назв.

УДК 621.321

Кедря, М. М. Лінеаризування математичної моделі тягового електроприводу постійного струму [Текст] / М. М. Кедря, Т. М. Сердюк, М. Л. Кумпан, К. М. Сердюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 51-58.

В статті розглядається електровоз постійного струму з індивідуальним тяговим приводом послідовного збудження. Такий привід можна представити у вигляді одновимірної електромеханічної системи, в якій керованою величиною є дотична сила тяги на ободі колісної пари. Керуючим впливом на привід буде напруга живлення двигуна. Режим управління приводом залежить від швидкості руху електровоза і струму двигуна. Оскільки зараз намітилася тенденція до підвищення швидкостей руху та впровадження нових типів рухомого складу з новою системою керування, дослідження роботи двигунів постійного струму є актуальною задачею.

Метою наукової роботи є розробка математичної моделі тягового електроприводу електровозу постійного струму для дослідження впливу зміни напруги в контактній мережі на тяговий електропривод.

Для досягнення поставленої мети виконано:

- визначені та лінеаризовані основні рівняння та залежності, що описують процес роботи електропривода – тягового двигуна електровоза ДЕ1;
- розроблена та проаналізована динамічна структура за системою лінеаризованих рівнянь;
- побудовані частотні характеристики роботи тягового електропривода;
- проведено моделювання перехідних процесів в електроприводі при раптовій зміні напруги та буксуванні колісної пари.

Основні результати полягають у наступному:

- створено математичну модель тягового електропривода електровоза ДЕ-1, яка дозволяє досліджувати динамічні режими роботи, обумовлені допущеннями моделі;

- математична модель складається з трьох форм: перша форма – лінеаризовані диференціальні рівняння; друга – структурні схеми та передаточні функції; третя – частотні характеристики.

Запропонована математична модель може бути використана для будь-якого виду тягового електроприводу постійного струму з урахуванням його особливостей.

Лл. – 7, список літ. – 13 назв.

УДК 656.259.1

Ботнарєвская, Р. В. Аналіз роботи систем залізничного зв'язку [Текст] / Р. В. Ботнарєвская, Т. М. Сердюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 59-64.

Актуальність. Технічний прогрес, який стрімко увірвався в наше життя, диктує свої правила. Необхідно модернізувати залізничну інфраструктуру, яка у своєму нинішньому оснащенні, збудованому у 70-80 роках минулого століття, морально та технічно застаріла. Враховуючи величезні обсяги майбутніх робіт, приходимо до розуміння, що провести таку модернізацію за короткий термін, як з фінансової, так і з технічної точки зору, неможливо. Протягом тривалого часу доведеться проводити вимірювання з одночасною роботою як нового, так і старого обладнання та забезпечувати їхнє безперебійне функціонування. Нове електронне обладнання, яке впроваджується у різні області, вимагає ретельного тестування на електромагнітну сумісність. Від цього залежить забезпечення безпеки під час перевезення пасажирів та вантажів. Отже, наукова робота, присвячена аналізу роботи систем залізничного сполучення, є актуальною.

Об'єктом дослідження є канали систем залізничного зв'язку.

Основною метою є оцінка якості різних видів залізничного зв'язку та причин виникнення шумів та перешкод у цих системах.

У статті було зроблено наступне:

- проаналізовано причини появи перешкод у каналах телекомунікації (радіо та провідний зв'язок);
- оцінено основні несправності повітряних ліній зв'язку та їх вплив на якість зв'язку;
- досліджено електромагнітні перешкоди в лініях зв'язку та їх частотний діапазон;
- описано подальші шляхи дослідження та моделювання впливу тягових та нетягових систем електропостачання на канали зв'язку.

Наукова новизна полягає у пропозиції використовувати CST-моделювання для дослідження електромагнітного впливу систем тягового та нетягового електропостачання на канали зв'язку за допомогою 8-полюсного математичного моделювання. Дослідження також проводитимуться методом прямих вимірювань на діючому обладнанні та із збиранням статистичних даних. Наприкінці наукового дослідження будуть зроблені висновки про електромагнітну сумісність старого та нового обладнання систем зв'язку, і можна сказати, що питання не втрачає своєї актуальності у зв'язку із запровадженням нових типів рухомого складу, модернізацією тягових підстанцій.

Список літ. – 15 назв.

БЕЗПЕКА НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

УДК 656.259.2

Гололобова, О. О. Аналіз статистики відмов та збоїв у роботі автоматичної локомотивної сигналізації [Текст] / О. О. Гололобова, С. Ю. Буряк, В. І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 66-74.

Мета. Безпека на залізничному транспорті та його безперебійна робота значно залежить від надійності роботи засобів залізничної автоматики та зв'язку. При цьому особлива роль у забезпеченні безперервності перевізного процесу залізниць належить системам інтервального регулювання руху поїздів, а також автоматичній локомотивній сигналізації у поєднанні з системами контролю пильності машиніста та автостопом. Тому необхідно постійно досліджувати та робити детальний аналіз надійності роботи даних систем, щоб мати змогу на базі отриманої інформації корегувати методики обслуговування та вдосконалювати експлуатаційну роботу персоналу. **Методика.** Для попереджування збоїв та відмов у роботі пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації проаналізовано статистику відмов всіх пристроїв залізничної автоматики, які можуть призвести до порушень у її роботі. Визначено найбільш відповідальні пристрої, контроль яких значно вплине на працездатність системи та підвищить надійність роботи в цілому. **Результати.** Аналіз статистичних даних показав що, основними об'єктами, що призводять до порушень дії системи автоматичної локомотивної сигналізації, є несправність дешифраторів, підсилювачів і локомотивних фільтрів, а основною причиною, що обумовлює несправності, залишається зношеність апаратури. **Наукова новизна.** Результати розробок, що направлені на підвищення ефективності та надійності роботи залізничних пристроїв, постійно впроваджуються в експлуатаційну роботу, автоматизуючи велику кількість технологічних процесів та підвищуючи ймовірність безвідмовної роботи апаратури. Проте, незважаючи на це, аналіз роботи залізничних пристроїв за дослідні 2013-2017 роки показав, що людський фактор, а саме порушення технології виконання робіт, недотримання вимог технологічних карт та керівництв з експлуатації, неякісний ремонт та перевірка приладів в ремонтно-технологічних ділянках, залишається суттєво високим в надійності роботи залізничної апаратури в цілому і в системах локомотивної сигналізації зокрема. **Практична значимість.** Проведений аналіз показав, що актуальним залишається питання вдосконалення як безпосередньо самих систем та пристроїв залізничної автоматики, так і методів їх перевірки, експлуатації та обслуговування, що підвищить рівень безпеки та надійності перевезень.

Лл. – 6, табл. – 1, список літ. – 12 назв.

УДК 629.4.066

Гончаров, К. В. Комплексна система автоматичної ідентифікації рухомого складу [Текст] / К. В. Гончаров, Р. В. Рибалка // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 75-82.

Впровадження систем автоматичної ідентифікації рухомого складу дозволяє підвищити достовірність і оперативність звітності про стан вагонних і локомотивних парків, зменшити штат співробітників, підвищити рівень інформаційного сервісу у внутрішніх і транзитних міжнародних перевезеннях. Системи радіочастотної ідентифікації забезпечують високу достовірність даних. Проте технологія RFID потребує розміщення на кожному вагоні додаткового пристрою – кодового бортового датчика, що вимагає значних матеріальних та часових ресурсів. Головним недоліком оптичних систем є залежність від погодних умов, забруднень і вібрації поверхні вагона. В роботі розглядається комплексна система автоматичної ідентифікації рухомого складу, в якій поєднуються технології радіочастотної та оптичної ідентифікації. Запропонована структура та загальні принципи побудови такої системи. Запропоновано також алгоритм оптичного розпізнавання номерів вагонів із застосуванням штучної нейронної мережі, працездатність якого підтверджується результатами імітаційного моделювання.

Лл. – 9, список літ. – 15 назв.

УДК 621.336

Устименко, Д. В. Сучасні підходи до діагностики струмоприймачів електрорухомого складу [Текст] / Мохаммад Аль Саїд Ахмад, Д. В. Устименко // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 83-88.

У статті наведено результати аналізу сучасних підходів до діагностики вузла струмознімання електрорухомого складу. Для вирішення завдання підтримки вузла струмознімання в робочому стані важливим є контроль і діагностика його стану в процесі експлуатації. Висунуто припущення, що системи діагностики технічного стану струмоприймача, засновані на принципі аналізу візуальних даних, здатні забезпечити виконання всіх вимог і є перспективним напрямком для вирішення таких завдань.

Л. – 5, список літ. – 13 назв.

УДК 629.4.083

Лагута, В. В. Визначення періодів відновлення корпусної ізоляції ТЕД ЕД-118А за спостереженнями зворотної напруги [Текст] / В. В. Лагута, Ю. Г. Козік // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 89-96.

Мета. Визначення найкращого ресурсу корпусної ізоляції і відповідних моментів її відновлення для тягового електродвигуна (ТЕД) ЕД-118А. Критерієм в задачі служить мінімум питомих витрат на виконання ПР-3 і КР-1 протягом циклу експлуатації КР2 - КР2. *Методика.* Моделювання ресурсу ізоляції, періоду відновлення ПР-3 і періоду відновлення КР-1 засноване на даних спостереження про зворотну напругу. Процедура оптимізації враховує ступінь відновлення корпусної ізоляції, обмеження по величині зворотної напруги при виконанні ПР-3 і виконанні КР-1. Як показник стану ізоляції взято інтегральне оцінювання кривої зворотної напруги. Дослідження проводилися на основі процедури оптимізації з обмеженнями із застосуванням методів теорії відновлення. *Результати.* В ході дослідження проведено оптимізацію витрат на відновлення корпусної ізоляції з урахуванням ступеня відновлення при виконанні ПР-3 і КР-1. Для корпусної ізоляції визначено період відновлення для проведення ПР-3 і період відновлення для проведення КР1, визначено відповідні моменти відновлення. *Новизна.* Запропоновано метод прогнозування ресурсу (пробіг) корпусної ізоляції з визначенням відповідних моментів її відновлення з урахуванням коефіцієнта відновлення при виконанні ПР-3 і виконанні КР-1 за даними спостережень за зворотною напругою. *Практична значимість.* Дослідження проводилися відповідно до «Державної програми стратегічного розвитку залізниць України», що підготовлена Державним науково-дослідним центром залізничного транспорту України спільно з фахівцями «Укрзалізниця» та Програмою оновлення залізничного рухомого складу на період до 2020 року, де зазначено на необхідність створення сучасних систем технічного обслуговування і ремонту тягового рухомого складу нового покоління і розробку відповідних нормативних документів. Запропонована методика дає можливість локомотивному депо вибирати технологію відновлення корпусної ізоляції ТЕД.

Л. – 4, табл. – 3, список літ. – 11 назв.

УДК 656.259.2

Гончаров, К. В. Застосування штучних нейронних мереж для визначення лінійної координати поїзда [Текст] / К. В. Гончаров, Н. А. Нагорна // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. Дніпро: ДНУЗТ. – 2019. – Ном. 18. - С. 97-103.

В сучасних локомотивних пристроях безпеки визначається лінійна залізнична координата поїзда, що дозволяє знайти відстань до перешкоди та розрахувати криву гальмування. Для вирішення таких задач використовується локомотивний модуль супутникової на-

вігації та електронна карта, до якої записуються географічні та відповідні лінійні координати опорних точок, в якості яких, як правило, використовуються кілометрові стовпчики. За допомогою модуля супутникової навігації визначаються поточні географічні координати поїзда (довгота та широта), далі виконується пошук двох найближчих опорних точок в електронній карті та виконується розрахунок поточної лінійної координати поїзда. При цьому не враховується кривизна та профіль колії. Було встановлено, що похибка такого метода визначення лінійної координати поїзда складає десятки метрів, а в деяких випадках може перевищувати 100 метрів. Для зменшення похибки запропоновано проводити апроксимацію залізничних кривих за допомогою штучної нейронної мережі, а також записувати в електронну карту в якості опорних точок не лише кілометрові, але і пікетні стовпчики. В результаті моделювання було встановлено, що для різних тестових залізничних ділянок нейронна мережа визначала лінійну координату поїзда з похибкою не більше трьох метрів. Таким чином, запропонований метод є достатньо ефективним і може бути використаним для удосконалення алгоритму роботи локомотивних пристроїв безпеки.

Іл. – 5, табл. – 3, список літ. – 12 назв.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 621.317

Гаврилюк, В. И. Моделирование воздействия гармонических помех на приемник тональных рельсовых цепей [Текст] / В. И. Гаврилюк // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепро: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 11-19.

В работе исследовано влияние влияния гармонических помех на приемник тональной рельсовой цепи на основе разработанной математической и компьютерной модели, описывающей распространение электромагнитных помех в рельсах от электроподвижного состава до путевого приемника, а также их влияния на приемник рельсовой цепи. Модель учитывает тип и конкретные параметры рельсовой цепи, схему канализации тягового тока, коэффициент асимметрии рельсовой линии, сопротивление изоляции балласта, координаты подвижного состава, спектральный состав обратного тягового тока.

Воздействие гармонических помех на путевого приемник тональной рельсовой цепи проиллюстрировано путем нахождения суммарного тока на входе приемника в виде суммы сигнального тока для нормального, шунтового и контрольного режимов работы рельсовой цепи в наиболее неблагоприятных для этих режимов работы условиях и максимально допустимом токе помех.

Значение сигнального тока в предлагаемой модели определяется через напряжение генератора и коэффициент передачи тока, который в соответствии с известными формулами находится через матрицы четырехполосников общей эквивалентной схемы рельсовой цепи. Среднее квадратическое значение суммарного тока помех на входе путевого приемника от всех единиц электроподвижного состава в пределах фидерной зоны в модели определяется по предложенной методике с учетом коэффициента передачи аппаратуры конца рельсовой цепи.

Адекватность разработанной модели была экспериментально проверена путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными результатами, полученными при регистрации тока на входе путевого приемника при подаче на него сигнального тока от генератора ГПУ и гармонической помехи от управляемого от генератора.

Для моделирования тока на входе путевого приемника в нормальном режиме предельные значения токов на его входе взяты из технической документации, а именно: среднеквадратичное значение сигнального тока на входе приемника взято на уровне 3 мА; среднеквадратичное значение помех взято на уровне 0,55 и 0,7 мА. Из анализа полученных результатов можно заключить, что помехи на входе приемника с частотой в полосе $\pm(0...0,5)$ Гц относительно частоты сигнального тока вызывают появление периодических уменьшений тока ниже уровня его надежного срабатывания с длительностью более 0,6 с, что может привести к сбою в работе тональной рельсовой цепи в нормальном режиме.

Для моделирования тока на входе путевого приемника тональной рельсовой цепи в шунтовом и контрольном режимах предельные значения тока на его входе приняты такими: остаточное напряжение на входе приемника 0,23 В; среднеквадратичное значение гармонической помехи – 0,4 мА. В результате сделан вывод, что помехи на входе приемника с частотой в полосе $\pm(0...0,5)$ Гц относительно частоты сигнального тока вызывают повышение тока на его входе выше уровня надежного отпуса путевого приемника с длительностью более 0,6 с, что может привести к сбою в работе тональной рельсовой цепи в шунтовом и контрольном режимах.

Ил. – 5, список лит. – 18 наим.

УДК 656.259.1

Тагизаде Ансари, Х. Влияние электромагнитных помех на тяговую сеть: математическая модель тяговой сети [Текст] / Х. Тагизаде Ансари, Т. Н. Сердюк, И. Мысив // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 20-25.

В Украине электрифицирована почти половина железнодорожных линий. В сети железных дорог есть автоматические устройства, с помощью которых регулируется движение поездов и безопасность на железной дороге. Однако в этих автоматических устройствах есть некоторые неисправности, которые могут поставить под угрозу безопасность пассажиров и железнодорожной системы. Основными источниками этих повреждений являются наличие паразитных токов, гармоник и электромагнитных помех. Для исследования этих неисправностей жизненно важно иметь точную модель железнодорожной сети. Так что тема исследования сейчас актуальна.

Основная цель данной статьи - изучить распространение гармоник тягового тока в фидерной зоне (участке между подстанциями) и определить влияние кодового тока, протекающего в железнодорожных линиях. Таким образом, необходимо провести математическую модель тягового питания. Также были проведены научные работы по определению состава спектра тягового тока и наиболее опасных гармоник для работы тяговых подстанций.

В этой статье представлена математическая модель железнодорожной сети, которая может быть полезна при анализе влияния этих неисправностей на железнодорожную сеть. Он считался 8-полюсным для одноколейной железнодорожной тяги.

Как упоминалось ранее, одним из основных шагов по исследованию воздействия электромагнитных помех на автоматические устройства железнодорожной системы является создание точной модели тяговой сети. Предлагаемая модель может быть использована, когда ток электровоза делится на два разных тока, протекающих в тяговых магистралях. Кроме того, была написана система дифференциальных уравнений относительно предложенной модели и введено решение этой системы. Все токи в рельсах и обратный ток могут быть рассчитаны с помощью приведенного выше решения. Следовательно, можно исследовать влияние электромагнитных помех на этот ток.

Ил. – 4, список лит. – 12 наим.

УДК 621.311.004.12

Горпинич, А. В. Применение суперконденсаторов для повышения качества электроэнергии в электрических сетях с распределённой генерацией [Текст] / А. В. Горпинич, А. С. Голубятник // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 26-38.

Цель. Представлены результаты экспериментальных исследований суперконденсаторов как средств сглаживания отклонений и колебаний напряжения. Рассмотрены имитационные модели эквивалентных схем замещения суперконденсатора и экспериментальной установки с солнечной панелью, разработанные в среде PSCAD (Канада). **Методика.** Чтобы получить кривые заряда и разряда суперконденсаторов, была разработана и испытана в реальных условиях эксплуатации экспериментальная установка с солнечной панелью. Она состоит из солнечной панели мощностью 10 Вт, суперконденсаторов с номинальным напряжением 2,7 В и ёмкостью 100 Ф каждый, преобразователей напряжения и нагрузки в виде лампы накаливания мощностью 4 Вт напряжением 12 В. Для измерения и регистрации напряжений в разных точках экспериментальной установки были использованы цифровой

мультиметр Sanwa типа PC 510a и программа PC Link (Япония). Помимо экспериментальных исследований с использованием цифрового мультиметра Sanwa и программы PC Link, было выполнено имитационное моделирование в среде PSCAD с целью получения кривой заряда суперконденсаторов. **Результаты.** Продемонстрирована экспериментальная установка для мониторинга и анализа электромагнитных переходных процессов в электрических сетях с солнечными панелями. Приведены так называемая «однодиодная модель» (эквивалентная схема замещения солнечной панели) и уравнение, описывающее вольт-амперную характеристику реальной фотоэлектрической установки, состоящей из ряда соединённых ячеек. Получены аналитические выражения, позволяющие определить параметры эквивалентной схемы замещения солнечной панели, которые, как правило, в паспортных данных производителями не приводятся. **Научная новизна.** С помощью экспериментальных исследований подтверждена эффективность применения суперконденсаторов как средств сглаживания отклонений и колебаний напряжения, возникающих при работе солнечных панелей. **Практическая значимость.** Представленная в работе экспериментальная установка используется в учебном процессе ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» при проведении лабораторных работ по дисциплине «Альтернативные источники электроэнергии».

Ил. – 17, табл. – 5, список лит. – 15 наим.

УДК 621.331

Белухин, Д. С. Сохранение группировок тяговых двигателей при импульсном регулировании напряжения [Текст] / Д. С. Белухин // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 39-45.

Цель. Одними из проблем при внедрении импульсного регулирования на электроподвижном составе являются потери энергии в элементах преобразователя и пульсация тока в цепи тяговых двигателей. В работе предложен вариант модернизации электровозов постоянного тока, основанный на применении импульсного регулирования напряжения на тяговых двигателях. **Методика.** Выполнен анализ потерь энергии для цепей электровозов ЧС2 и ВЛ8 в режиме пуска. Расчеты потерь делались для двух возможных режимов. Первый режим через цепи существующих реостатов. Второй режим – от импульсного преобразователя напряжения, рассчитанного по типовым методикам. Рассмотрены варианты пуска электровоза от преобразователя с использованием соединений тяговых двигателей и при питании всех групп двигателей параллельно. **Результаты.** Анализ потерь показал, что при разгоне пассажирского поезда на расчетном участке потери в реостатах для электровоза ЧС2 составляют до 76 кВт·ч. При разгоне на параллельном соединении потери в элементах преобразователя до 1,4 кВт·ч, при разгоне с использованием перегруппировок до 1 кВт·ч. Для электровоза ВЛ8 с поездом весом 3400 т и разгоне в том же направлении соответствующие потери распределились: 126, 2,4 и 2 кВт·ч. Т. е. плавное регулирование с наличием группировок тяговых двигателей дает некоторое преимущество по сравнению с разгоном на параллельном соединении. Сохранение группировок тяговых двигателей при внедрении импульсного регулирования позволяет получить промежуточные уровни скоростей, характерных группировкам (последовательная, последовательно-параллельная) с отключенным регулятором, дополнительно снизить потери и нагрев преобразователя. Для 6-осных электровозов снизить до 11 % пульсации тока либо снизить габариты реакторов. **Практическая значимость.** Результаты расчетов, предложенные в работе, могут быть использованы при изыскании путей для модернизации электроподвижного состава.

Ил. – 5, табл. – 1, список лит. – 11 наим.

УДК 621.321

Шаповалов, А. С. Испытания асинхронных трехфазных двигателей [Текст] / А. С. Шаповалов, А. П. Карасев // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 46-50.

Проведен обзор методов послеремонтной проверки трехфазных асинхронных двигателей в условиях ремонтных цехов локомотивных депо подчеркивает необходимость внедрения специализированных стендов для проведения послеремонтных испытаний с целью повышения качества проведения ремонта, уменьшение количества отказов в работе вспомогательного оборудования, и за счет этого повышение безопасности движения железнодорожного транспорта в целом.

Проанализировано современное состояние развития полупроводниковой и микропроцессорной техники, которое позволяет реализовать питания испытываемого асинхронного двигателя в широком диапазоне питающих частот, что в свою очередь позволяет построить универсальные стенды для испытания трехфазных асинхронных двигателей. Стоимость преобразователей частоты находится на экономически приемлемом уровне.

Выполнен аналитический обзор возможных схем взаимного нагружения при испытании трехфазных асинхронных двигателей. Схемы могут быть построены как с использованием статического преобразователя частоты, так и без него. Дана краткая характеристика каждой модели, с указанием, как преимуществ так и недостатков каждой отдельной схемы. Как видно из характеристики, схемы с использованием статических преобразователей частоты отличаются высокой энергоэффективностью, позволяют проводить испытания в широком диапазоне питающих частот, в свою очередь стоимость стенда с использованием статического преобразователя будет выше. Схемы без преобразователя частоты отличаются низкой стоимости, но и низкой энергоэффективностью, возможностью проводить испытания только на частоте питающей сети и высоким уровнем потребления реактивной мощности.

Предлагается принять во внимание изложенный материал при проектировании стендов взаимного нагружения трехфазных асинхронных электродвигателей с последующим технико-экономическим обоснованием выбранной схемы.

Ил. – 7, список лит. – 4 наим.

УДК 621.321

Кедря, М. М. Линеаризация математической модели тягового электропривода постоянного тока [Текст] / М. М. Кедря, Т. Н. Сердюк, М. Л. Кумпан, К. Н. Сердюк // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 51-58.

В статье рассматривается электровоз постоянного тока с индивидуальным тяговым приводом последовательного возбуждения. Такой привод можно представить в виде одномерной электромеханической системы, в которой управляемой величиной является касательная сила тяги на колесном ободе. Управляющим воздействием на привод будет напряжение питания двигателя. Режим управления приводом зависит от скорости движения электровоза и тока двигателя. Поскольку сейчас наметилась тенденция к повышению скоростей движения и внедрению новых типов подвижного состава с новой системе управления, исследование работы двигателей постоянного тока является актуальной задачей.

Целью научной работы является разработка математической модели тягового электропривода для исследования влияния изменения напряжения в контактной сети на тяговый электропривод.

Для достижения поставленных целей выполнено:

- определены и линеаризованы основные уравнения и зависимости, описывающие процесс работы электропривода – тягового двигателя электровоза ДЭ1;
- разработана и проанализирована динамическая структура по системе линеаризованных уравнений;
- построены частотные характеристики работы тягового электропривода;
- произведено моделирование переходных процессов в электроприводе при внезапном изменении напряжения и буксовании колесной пары.

Основные результаты заключаются в следующем:

- создана математическая модель тягового электропривода электровоза ДЭ-1, позволяющая исследовать динамические режимы работы, обусловленные допущениями модели;
- математическая модель состоит из трех форм: первая форма – линеаризованные дифференциальные уравнения; вторая – структурные схемы и передаточные функции; третья – частотные характеристики.

Предлагаемая математическая модель может быть использована для любого вида тягового электропривода постоянного тока с учетом его особенностей.

Ил. – 7, список лит. – 13 наим.

УДК 656.259.1

Ботнаревская, Р. В. Анализ работы систем железнодорожной связи [Текст] / Р. В. Ботнаревская, Т. Н. Сердюк // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 59-64.

Актуальность. Технический прогресс, стремительно ворвавшийся в нашу жизнь, диктует свои правила. Необходимо модернизировать железнодорожную инфраструктуру, которая в своем нынешнем оснащении, построенном в 70-80 годах прошлого века, морально и технически устарела. Учитывая огромные объемы предстоящих работ, приходим к пониманию, что провести такую модернизацию в короткие сроки, как с финансовой, так и с технической точки зрения, невозможно. В течение длительного времени придется проводить измерения с одновременной работой, как нового, так и старого оборудования и обеспечивать их бесперебойное функционирование. Новое электронное оборудование, внедряемое в различные области, требует тщательного тестирования на электромагнитную совместимость. От этого зависит обеспечение безопасности при перевозке пассажиров и грузов. Итак, научная работа, посвященная анализу работы систем железнодорожного сообщения, является актуальной.

Объектом исследования являются каналы систем железнодорожной связи.

Основной целью является оценка качества различных видов железнодорожной связи и причин возникновения шумов и помех в этих системах.

В статье было сделано следующее:

- проанализированы причины появления помех в каналах телекоммуникаций (радио и проводная связь);
- оценены основные неисправности воздушных линий связи и их влияние на качество связи;
- исследованы электромагнитные помехи в линиях связи и их частотный диапазон;
- описаны дальнейшие пути исследования и моделирования влияния тяговых и не тяговых систем электроснабжения на каналы связи.

Научная новизна заключается в предложении использовать CST-моделирование для исследования электромагнитного воздействия систем тягового и не тягового электроснабжения на каналы связи с помощью 8-полюсного математического моделирования. Исследования также будут проводиться методом прямых измерений на действующем оборудовании и сбора статистических данных.

В конце научного исследования будут сделаны выводы об электромагнитной совместимости старого и нового оборудования систем связи, и можно сказать, что вопрос не теряет своей актуальности в связи с внедрением новых типов подвижного состава, модернизацией тяговых подстанций.

Список лит. – 15 наим.

БЕЗОПАСНОСТЬ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.259.2

Гололобова, О. А. Анализ статистики отказов и сбоев в работе автоматической локомотивной сигнализации [Текст] / О. А. Гололобова, С. Ю. Буряк, В. И. Гаврилюк // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 66-74.

Цель. Безопасность на железнодорожном транспорте и его бесперебойная работа значительно зависит от надежности работы средств железнодорожной автоматики и связи. При этом особая роль в обеспечении эффективной и безопасной работы железных дорог принадлежит системам интервального регулирования движения поездов, а также автоматической локомотивной сигнализации в сочетании с системами контроля бдительности машиниста и автостопом. Поэтому необходимо постоянно исследовать и делать детальный анализ надежности работы данных систем, чтобы иметь возможность на базе полученной информации корректировать методики обслуживания и совершенствовать эксплуатационную работу. Методика. Для предупреждения сбоев и отказов в работе устройств автоматической локомотивной сигнализации проанализирована статистика отказов всех устройств железнодорожной автоматики, которые могут привести к нарушениям в ее работе. Определены наиболее ответственные устройства, контроль которых значительно повлияет на работоспособность системы и повысит надежность работы в целом. Результаты. Анализ статистических данных показал, что основными объектами, которые привели к нарушениям действия системы автоматической локомотивной сигнализации, является неисправность дешифраторов, усилителей и локомотивных фильтров, а основной причиной, обуславливающей неисправности, остается изношенность аппаратуры. Научная новизна. Результаты разработок, которые направлены на повышение эффективности и надежности работы железнодорожных устройств, постоянно внедряются в эксплуатационную работу, автоматизируя большое количество технологических процессов и повышая вероятность безотказной работы аппаратуры. Однако, несмотря на это, анализ работы железнодорожных устройств за исследованные 2013-2017 годы показал, что человеческий фактор, а именно нарушение технологии производства работ, несоблюдение требований технологических карт и руководств по эксплуатации, некачественный ремонт и поверка приборов в РТД, остается существенно высоким в надежности работы железнодорожной аппаратуры в целом и в системах локомотивной сигнализации в частности. Практическая значимость. Проведенный анализ показал, что актуальным остается вопрос совершенствования как непосредственно самих систем и устройств железнодорожной автоматики, так и методов их проверки, эксплуатации и обслуживания, которые повысят уровень безопасности и надежности перевозок.

Ил. – 6, табл. – 1, список лит. – 12 наим.

УДК 629.4.066

Гончаров, К. В. Комплексная система автоматической идентификации подвижного состава [Текст] / К. В. Гончаров, Р. В. Рыбалка // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 75-82.

Внедрение систем автоматической идентификации подвижного состава позволяет повысить достоверность и оперативность отчетности о состоянии вагонных и локомотивных парков, уменьшить штат сотрудников, повысить уровень информационного сервиса во внутренних и транзитных международных перевозках. Системы радиочастотной идентификации обеспечивают высокую достоверность данных. Однако технология RFID предполагает размещение на каждом вагоне дополнительного устройства – кодового бортового датчика, что требует значительных материальных и временных ресурсов. Главным недостатком оптических систем является зависимость от погодных условий, загрязнений и вибрации поверхности вагона. В работе рассматривается комплексная система автоматической идентификации подвижного состава, в которой совмещаются технологии радиочастотной и оптической идентификации. Предложены структура и общие принципы построения такой системы. Предложен также алгоритм оптического распознавания номеров вагонов с применением искусственной нейронной сети, работоспособность которого подтверждается результатами имитационного моделирования.

Ил. – 9, список лит. – 15 наим.

УДК 621.336

Устименко, Д. В. Современные подходы к диагностике токоприемников электроподвижного состава [Текст] / Мохаммад Аль Саид Ахмад, Д. В. Устименко // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 83-88.

В статье приведены результаты анализа современных подходов к диагностике узла токосъема электроподвижного состава. Для решения задачи поддержания узла токосъема в рабочем состоянии важным является контроль и диагностика его состояния в процессе эксплуатации. Выдвинуто предположение, что системы диагностики технического состояния токоприемника, основанные на принципе анализа визуальных данных, способны обеспечить выполнение всех требований и являются перспективным направлением для решения таких задач.

Ил. – 5, список лит. – 13 наим.

УДК 629.4.083

Лагута, В. В. Определение периодов восстановления корпусной изоляции ТЭД ЭД-118А по наблюдениям возвратного напряжения [Текст] / В. В. Лагута, Ю. Г. Козик // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 89-96.

Цель. Определение наилучшего ресурса корпусной изоляции и соответствующих моментов ее восстановления для тягового электродвигателя (ТЭД) ЭД-118А. Критерием в задаче служит минимум удельных затрат на восстановление изоляции с учетом выполнения ТР-3 и КР-1 на протяжении цикла эксплуатации КР-2 – КР-2. *Методика.* Моделирование ресурса изоляции, периода восстановления ТР-3 и периода восстановления КР-1 основано на данных наблюдения о возвратном напряжении. Процедура оптимизации учитывает степень восстановления корпусной изоляции, ограничения по величине возвратного напряжения при выполнении ТР-3 и выполнении КР-1. В качестве показателя состояния изоляции взято интегральное оценивание кривой возвратного напряжения. Исследования проводились на основе процедуры оптимизации с ограничениями с применением методов

теории восстановления. *Результаты.* В ходе исследования проведена оптимизация удельных затрат на восстановление корпусной изоляции с учетом степени восстановления при выполнении ТР-3 и КР-1. Для корпусной изоляции определен период восстановления для проведения ТР-3 и период восстановления для проведения КР-1, Определены моменты восстановления. *Новизна.* Предложен метод прогнозирования максимального ресурса (пробег) корпусной изоляции с определением соответствующих моментов ее восстановления с учетом коэффициента восстановления при выполнении ТР-3 и выполнении КР-1 по данным наблюдений возвратного напряжения. *Практическая значимость.* Исследования проводились в соответствии с «Государственной программой стратегического развития железных дорог Украины», подготовленной Государственным научно-исследовательским центром железнодорожного транспорта Украины совместно со специалистами «Укрзалізниця» и Программой обновления железнодорожного подвижного состава на период до 2020 года, где указано на необходимость создания современных систем технического обслуживания и ремонта тягового подвижного состава нового поколения и разработку соответствующих нормативных документов. Предложенная методика дает возможность локомотивному депо выбирать технологию восстановления корпусной изоляции ТЭД.

Ил. – 4, табл. – 3, список лит. – 11 наим.

УДК 656.259.2

Гончаров, К. В. Применение искусственных нейронных сетей для определения линейной координаты поезда [Текст] / К. В. Гончаров, Н. А. Нагорная // Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте. Днепр: ДНУЖТ. – 2019. – Ном. 18. – С. 97-103.

В современных локомотивных устройствах безопасности определяется линейная железнодорожная координата поезда, что позволяет найти расстояние до препятствия и рассчитать кривую торможения. Для решения таких задач используется локомотивный модуль спутниковой навигации и электронная карта, в которую записываются географические и соответствующие линейные координаты опорных точек, в качестве которых, как правило, используются километровые столбы. С помощью модуля спутниковой навигации определяются текущие географические координаты поезда (долгота и широта), далее выполняется поиск двух ближайших опорных точек в электронной карте и выполняется расчет текущей линейной координаты поезда. При этом не учитывается кривизна и профиль пути. Было установлено, что ошибка такого метода определения линейной координаты поезда составляет десятки метров, а в некоторых случаях может превышать 100 метров. Для уменьшения ошибки предложено проводить аппроксимацию железнодорожных кривых с помощью искусственной нейронной сети, а также записывать в электронную карту в качестве опорных точек не только километровые, но и пикетные столбы. В результате моделирования было установлено, что для разных тестовых железнодорожных участков нейронная сеть определяла линейную координату поезда с ошибкой не более трех метров. Таким образом, предложенный метод является достаточно эффективным и может быть использован для усовершенствования алгоритма работы локомотивных устройств безопасности.

Ил. – 5, табл. – 3, список лит. – 12 наим.

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ON RAILWAY TRANSPORT

UDC 621.317

Havryliuk, V. Simulation of the influence of harmonic interference on the tonal track circuits receiver [Text] / V. Havryliuk // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 11-19.

In the work, the influence of harmonic interference on the tonal track circuit receiver is studied on the basis of the developed mathematical and computer model that describes the propagation of electromagnetic interference in the rails from the electric rolling stock to the track receiver, as well as their influence on the track circuit receiver operation. The model takes into account the type and specific parameters of the track circuit, the asymmetry coefficient of the rail line, the ballast resistance, the coordinates of the rolling stock, and the spectral composition of the return traction current.

The affect of harmonic interference on the tonal track circuit receiver is characterized by the total current at the receiver input that is determined as the sum of the signal current for the normal, shunt and control operation modes in the most unfavorable conditions and for the maximum allowable interference for these operation modes.

The value of the signal current in the proposed model is determined by the voltage of the generator and the current transfer coefficient, which, in accordance with the known formulas, is determined by the matrices of the quadripoles of the equivalent circuit. The root-mean-square value of the total interference current at the input of the track receiver generated by all rolling stock units within the feeder zone is determined, taking into account the transfer coefficient of the track circuit end equipment.

The adequacy of the developed model was verified by comparing the simulation results with the experimental results obtained by recording the current at the track receiver input.

To simulate track circuit in normal operation mode, the limiting values of the currents at its input are taken from the technical documentation, namely: the mean-square value of the signal current at the input of the receiver is taken at the level of 3 mA; RMS value of noise is taken at the level of 0.55 and 0.7 mA. From the analysis of the obtained results, we can conclude that interference at the receiver input with a frequency in the band of $\pm(0..0.5)$ Hz relative to the frequency of the signal current causes the appearance of periodic current decreases below the level of its reliable operation with a duration of more than 0.6 s, which may cause the tonal track circuit failure in normal operation mode.

To simulate track circuit in shunt and control operation modes, the limiting values of the current at its input are taken as follows: residual voltage at the input of the receiver 0.23 V; RMS value of harmonic noise - 0.4 mA. As a result, it was concluded that interference at the input of the receiver with a frequency in the band of $\pm(0..0.5)$ Hz relative to the frequency of the signal current causes an increase in current at its input above the level of reliable turn off voltage of the track receiver with a duration of more than 0.6 s, which can lead to a failure in the operation of the tonal rail circuit in shunt and control operation modes.

Ill. – 5, ref. – 18 names.

UDK 656.259.1

Taghizade Ansari, H. Impact of electromagnetic interferences on traction network: mathematical model of traction network [Text] / H. Taghizade Ansari, T. Serdiuk, I. Mysiv // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 20-25.

In Ukraine, almost half of the railway lines are electrified. In railway network, there are automatic devices by which traffic of trains and safety on the railway are regulated. However, there are some faults in these automatic devices that can put the passengers and the railway system's safety at risk. The main sources of these faults are the presence of the stray currents, harmonics, and the electromagnetic interferences. For investigation of these faults, having an accurate model of the railway network is vital. So the topic of research is actuality now.

The main goal of this paper is to study the propagation of traction current harmonics on feeder zone (section between substations) and to define the interference on code current flowing in rail lines. Thus, it is necessary to carry out a mathematic model of the traction supply net. Also some scientific work was addressed to determine the traction current spectrum composition and the most dangerous harmonics for TC operations.

This paper introduce a mathematical model of the railway network, which can be helpful in analysis of the impact of these faults on the railway network. It was considered as 8-poles for the one-track railway traction.

As mentioned before, one of the main steps to investigate the electromagnetic interferences' impact on automatic devices of the railway system is the accurate model of traction network. The proposed model can be used when the electric locomotive current divides into two different current which flow in traction lines. Moreover, a system of differential equation regarding the proposed model was written and a solution to this system was introduced. All rail currents and the return current can be calculated from the above solution. Therefore, the impact of electromagnetic interferences on these current can be investigated.

Ill. – 4, ref. – 12 names.

UDC 621.311.004.12

Gorpinich, A. Application of supercapacitors to improve power quality in the electrical networks with distributed generation [Text] / A. Gorpinich, A. Golubyatnik // *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 26-38.

Objective. The results of the experimental investigations of supercapacitors as means for smoothing the voltage deviations and fluctuations are presented. PSCAD software (Canada) simulation models for equivalent circuits of the supercapacitor and experimental setup with photovoltaic panel are considered. **Technique.** To obtain the charge and discharge curves of supercapacitors, an experimental setup with photovoltaic panel was developed and tested under actual operating conditions. It includes a 10 W photovoltaic panel, 100 F supercapacitors with 2.7 V rated voltage, voltage converters, and 4 W incandescent lamp with 12 V rated voltage used as a load. To measure and register voltages in different nodes of the experimental setup, a Sanwa PC 510a digital multimeter altogether with PC Link software (Japan) were used. Besides the experimental investigations with Sanwa PC 510a digital multimeter and PC Link software, simulation by using of PSCAD software was executed in order to obtain the charge curve of supercapacitors. **Results.** An experimental setup to monitor and analyze the electromagnetic transients in the electrical networks with photovoltaic panels is demonstrated. So-called "single-diode model" (equivalent circuit for photovoltaic panel) and equation describing a current-voltage characteristic of the practical photovoltaic module with several connected cells are given. Analytical expressions have been derived to obtain the parameters of the equivalent circuit for photovoltaic panel which are not typically available from manufacturer's data. **Scientific novelty.** Efficiency of supercapacitors as means for smoothing the voltage deviations and fluctuations arising from operation of photovoltaic panels was approved by means of experimental investigations. **Practical value.** The presented in paper experimental setup is used in training purposes of the State Higher Education Institution «Pryazovskyi State Technical University» during laboratory works on the subject «Alternative sources of electrical energy».

Ill. – 17, the table – 5, ref. – 15 names.

UDC 621.316.11

Belukhin, D. Preservation of traction motor groups with pulse voltage regulation [Text] / D. Belukhin // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 39-45.

Objective. One of the problems with the introduction of pulse control on an electrically rolling stock is energy loss in the converter elements and current ripple in the traction motor circuit. The paper proposes a variant of modernization of direct current electric locomotives, based on the use of pulse voltage regulation on traction engines. **Technique.** The analysis of energy losses for the circuits of electric locomotives ChS2 and VL8 in start-up mode is performed. Loss calculations were made for two possible modes. The first mode is through the chain of existing rheostats. The second mode is from a pulsed voltage converter, calculated by standard methods. The options for starting an electric locomotive from a converter using the connections of traction motors and when powering all groups of engines in parallel are considered. **Results.** Analysis of losses showed that when a passenger train accelerates in a calculated section, the losses in rheostats for an electric locomotive ChS2 amount to 76 kWh. During acceleration on a parallel connection, losses in the converter elements are up to 1.4 kW h, during acceleration using rearrangements up to 1 kW · h. For the VL8 electric locomotive with a train weighing 3400 tons and accelerating in the same direction, the corresponding losses were distributed: 126, 2.4, 2 kW h. That is, smooth regulation with the presence of groups of traction motors gives some advantage over acceleration on a parallel connection. Preservation of traction motor groupings when introducing pulse control allows you to obtain intermediate levels of speeds characteristic of the groupings (serial, series-parallel) with the controller turned off, and further reduce the loss and heating of the converter. For 6-axis electric locomotives, reduce current ripple to 11% or reduce the dimensions of the reactors. **Practical value.** The calculation results proposed in the work can be used in finding ways to modernize electric rolling stock.

Ill. – 5, the table – 1, ref. – 11 names.

UDC 621.321

Shapovalov, O. Testing of asynchronous three-phase motors [Text] / O. Shapovalov, O. Karasyov // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 46-50.

The review of post-repair testing of three-phase asynchronous motors in the conditions of repair shops of locomotive depots emphasizes the need for the introduction of specialized stands for post-repair tests in order to improve the quality of repairs, reduce the number of failures in the work of auxiliary equipment, and thereby increase the safety of rail transport in general.

The current state of development of semiconductor and microprocessor technology, which allows to realize the power of the test asynchronous engine in a wide range of feeding frequencies is analyzed, which in turn allows us to construct universal stands for testing of three-phase induction motors. The cost of converters is at an economically acceptable level.

An analytical review of possible schemes of mutual load in the testing of three-phase asynchronous motors is carried out. Schemes can be constructed using both a static frequency converter and without it. A brief description of each model is provided, indicating both the advantages and disadvantages of each individual scheme. As can be seen from the specification, circuits using static frequency converters are characterized by higher energy efficiency, allowing testing in a wide range of feed frequencies, in turn, the cost of the stand using a static converter will be higher. Circuits without a frequency converter are low cost, but also low energy efficien-

cy, the ability to test only the power supply frequency of the network and high levels of reactive power consumption.

It is suggested to take into account the material presented when designing the stands of mutual load of three-phase asynchronous electric motors with the further feasibility study of the chosen scheme.

Ill. – 7, ref. – 4 names.

UDC 621.321

Kedria, M. Linearization of the mathematical model of a traction electric motor of direct current [Text] / M. Kedria, T. Serdiuk, M. Kumpan, K. Serdiuk // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 51-58.

The direct current electric locomotive with an individual traction drive of sequential excitation are discussed in the paper. Such a motor can be represented as a one-dimensional electromechanical system, in which the controllable value is the tangential traction force on the wheel rim. The control action on the motor will be the supply voltage to the motor. The drive control mode depends on the speed of the locomotive and the motor current. Since now there is a tendency to increase the speed of movement and the introduction of new types of rolling stock with a new control system, the study of the operation of DC motors is an actuality task.

The aim of the scientific work is to develop a mathematical model of a traction electric drive to study the effect of voltage changes in the contact network on a traction electric motor.

To achieve the set goals, the following has been done:

- the basic equations and dependencies describing the process of operation of the electric drive - traction motor of the DE1 electric locomotive were determined and linearized;
- the dynamic structure according to the system of linearized equations were developed and analyzed;
- the frequency characteristics of the traction electric drive were built;
- the simulation of transient processes in the electric drive at a sudden voltage change and wheelset slipping was carried out.

The main results are as follows:

- a mathematical model of the traction electric drive of the DE-1 electric locomotive has been created, which makes it possible to investigate the dynamic modes of operation due to the assumptions of the model;
- the mathematical model consists of three forms: the first form is linearized differential equations; the second - structural diagrams and transfer functions; the third is frequency characteristics.

The proposed mathematical model can be used for any type of DC traction electric motors, taking into account its features.

Ill. – 7, ref. – 13 names.

UDK 656.259.1

Botnarevscaia, R. Analysis of operation of railway communication systems [Text] / R. Botnarevscaia, T. Serdiuk // Electromagnetic compatibility and safety in railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 59-64.

Actuality. Technological progress, which has rapidly burst into our lives, dictates its own rules. There is a need to modernize the railway infrastructure, which, in its current equipment, built in 70-80 years of the last century, is morally and technically obsolete. Considering the huge volumes of work to be done, we come to the understanding that it is not possible to carry out such modernization in a short time, both from a financial point of view and from a technical point of view. For a long time, you will have to measure with the simultaneous operation of both

new and old equipment and ensure their uninterrupted functioning. New electronic equipment introduced in various fields requires careful testing for electromagnetic compatibility. Ensuring safety in the transport of passengers and goods depends on this. So, the scientific work deals with the analysis of operation of railway communication systems are actuality.

The object of research is railway communication lines.

The main purpose is to evaluate the quality of different kinds of railway communication and the reasons of noise and interference in these systems.

It was carried out the follows in the paper:

- the reasons of appearance noises in the telecommunication channels (radio and wire communications) were analyzed;
- the main faults in the overhead communication lines and their influence on the quality of communication were evaluated;
- the electromagnetic interferences in the communication lines and their frequency diapasons were researched;
- the further ways of investigation and simulation of influence traction and non-traction systems on the communication channels were described.

The scientific novelty is in the proposition of use CST simulation to investigate electromagnetic influence of traction and non-traction power system on the communication channels with the 8-poles mathematic modelling. Research will be carried out by the method of direct measurements on existing equipment and collection of statistical data.

At the end of the research, conclusions will be drawn about the electromagnetic compatibility of the of old and new equipment of communication systems, and we can say that the issue does not lose its relevance due to the introduction of new types of rolling stock, the modernization of traction substations.

Ref. – 15 names.

SAFETY ON RAILWAY TRANSPORT

UDC 656.259.2

Hololobova, O. Analysis of the statistics of malfunctions and failures in the operation of automatic locomotive signaling [Text] / O. Hololobova, S. Buriak, V. Havryliuk // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 66-74.

Objective. Safety on the railway transport and its uninterrupted operation depends considerably on the reliability of the work of the means of railway automation and communication. In this case, special role in ensuring the efficient and safe operation of railways belongs to the systems of interval control of the movement of trains, as well as automatic locomotive signaling in conjunction with the systems of monitoring the driver's vigilance and hitchhiking. Therefore, it is necessary to continuously investigate and perform a detailed analysis of the reliability of these systems' operations, in order to be able, based on the information received, to correct service techniques and improve operational work. Technique. To prevent halting and failures in the operation of automatic locomotive signaling devices, it was analyzed the statistics of failures of all devices of railway automatics, which can lead to disturbances in its work. It was identified the most responsible devices, whose control will greatly affect the system performance and increase the reliability of the work as a whole. Results. Analysis of statistical data showed that the main objects that led to violations of the automatic locomotive signaling system is the failure of decoders, amplifiers and locomotive filters, and the main reason causing the malfunction remains the wear of the equipment. Scientific novelty. The results of the work aimed at increasing the efficiency and reliability of the operation of the railway equipment are continuously implement-

ed in the operational work, automating a large number of technological processes and increasing the probability of failure-free operation of the equipment. However, despite this, the analysis of the work of the railway equipment with the research for 2013-2017 has shown that the human factor, namely, the violation of the technology of production work, non-compliance with the requirements of technological cards and manuals, poor quality repair and verification of instruments in the repair and technological sites, remains significantly high the reliability of the operation of the railway equipment in general and in the systems of locomotive signaling in particular. Practical value. The analysis showed that the issue of improving both the systems themselves and the devices of railway automatics, as well as methods of their inspection, operation and maintenance, will increase the level of safety and reliability of transportations.

Ill. – 6, the table – 1, ref. – 12 names.

UDC 629.4.066

Honcharov, K. Integrated system for automatic identification of rolling stock [Text] / K. Honcharov, R. Rybalka // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 75-82.

Implementation the systems for automatic identification of rolling stock makes it possible to increase the data reliability and efficiency of reporting about the state of wagon and locomotive fleets, reduce the staff, increase the level of information service in national and transit international transportation. RFID systems provide high data reliability. However, RFID technology involves the placement of additional device on each car - on-board code sensor that requires significant material and time resources. The main disadvantage of optical systems is the dependence from weather conditions, impurity and vibration of the car surface. The paper considers the integrated system for automatic identification of rolling stock, which combines radio frequency and optical identification technologies. The structure and general principles of operating such system have been proposed. Algorithm for optical recognition of car numbers using an artificial neural network has been also proposed. Efficiency of proposed algorithms is confirmed by the results of simulation modeling.

Ill. – 9, ref. – 15 names.

UDC 621.336

Ustymenko, D. Modern approaches to the diagnosis of current collectors of electric rolling stock [Text] / Mohammad Al Said Ahmad, D. Ustymenko // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 83-88.

The article presents the results of the analysis of modern approaches to the diagnosis of the current collection unit of electric rolling stock. To solve the problem of maintaining the current collection unit in working condition, it is important to monitor and diagnose its state during operation. It has been suggested that diagnostic systems for the technical condition of the current collector, based on the principle of analyzing visual data, are able to ensure that all requirements are met and are a promising area for solving such problems.

Ill. – 5, ref. – 13 names.

UDC 629.4.083

Laguta, V. Determination of recovery periods for frame insulation of a TM ED-118A from observations of return voltage [Text] / V. Laguta, Yu. Kozik // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 89-96.

Purpose. It is to improve the maintenance system of a traction motor (TM) ED 118A by predicting the life of frame insulation and determining rational recovery moments while ensuring the lowest unit costs with performing major repairs of volume 1 (MjR-1) and permanent repair of

volume 3 (PR-3), taking into account the degree of recovery, using data on the insulation state by the return voltage method operation. *Methodology.* Modeling of the insulation resource, the recovery period PR-3 and the recovery period MjR-1 is based on observation data on the return voltage. The optimization procedure takes into account the degree of restoration of case insulation when performing PR-3 and performing KR1, restrictions on the magnitude of the return voltage. An integral assessment of the return voltage curve is taken as an indicator of the state of insulation. The studies were carried out on the basis of the optimization procedure with restrictions using the methods of recovery theory. *Findings.* In the course of the study, the optimization of unit costs for the restoration of enclosure insulation was carried out taking into account the degree of recovery when performing PR-3 and KR-1. For frame insulation, recovery periods are recommended. *Originality.* A method is proposed for predicting the life of frame insulation and determining the rational moments of its recovery, taking into account the recovery factor when performing PR-3 and performing MjR-1 and data on observations of the return voltage. *Practical value.* Researches were carried out in accordance with the “State Program for the Strategic Development of Ukrainian Railways”, prepared by the State Research Center for Railway Transport of Ukraine in conjunction with «Ukrzaliznytsya» specialists and the Program for the renewal of railway rolling stock for the period up to 2020, where indicated by need for creation of modern systems maintenance and repair of traction rolling stock of a new generation and the development of appropriate regulatory documents. The proposed methodology enables the locomotive depot to select the technology for restoring the hull insulation of the TM.

Ill. – 4, the tables – 3, ref. – 11 names.

UDC 656.259.2

Honcharov K. Application of artificial neural networks to determine the linear coordinate of a train [Text] / K. Honcharov, N. Nahorna // Electromagnetic compatibility and safety on railway transport. Dnipro: DNURT. – 2019. – Iss. 18. – P. 97-103.

In modern locomotive safety devices, the linear railway coordinate of the train is determined. This allows finding the distance to the obstacle and calculating the braking curve. To solve such tasks, electronic map and locomotive satellite navigation module are used. The geographical and corresponding linear coordinates of control points (kilometer posts) are recorded into electronic map. With the help of the satellite navigation module, the current geographic coordinates of the train (longitude and latitude) are determined, then the two nearest control points are searched in the electronic map and the current linear coordinate of train is calculated. This does not take into account the curvature and profile of the railway track. It was found that the error of this method for determining the linear coordinate of train is tens of meters and in some cases may exceed 100 meters. To reduce the error, it was proposed to approximate railway curves using an artificial neural network, as well as to write into electronic map as reference points not only kilometer, but also picket poles. As a result of modeling, it was found that for different test railway sections, the neural network determined the linear coordinate of the train with an error of no more than three meters. Thus, the proposed method is quite effective and can be used to improve the algorithm for the operation of locomotive safety devices.

Ill. – 5, the tables – 3, ref. – 12 names.

Д л я н о т а т о к

Наукове видання

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ТА
БЕЗПЕКА НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ.
НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ**

№ 18, 2019

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – Т. М. Сердюк
Комп'ютерне верстання – В. І. Профатилів

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 14,6. Тираж 300 пр. Зам. № ____.

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua

Адреса дільниці оперативної поліграфії:

вул. Лазаряна, 2, кім. 1201, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 47-19-66, *факс:* +38 (056) 47-19-83



Научное издание

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ И
БЕЗОПАСНОСТЬ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ.
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

№ 18, 2019

(на украинском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – Т. Н. Сердюк
Компьютерная верстка – В. И. Профатилів

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 14,6. Тираж 300 экз. Зак. № ____.

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна**

Адрес редакции, издателя:

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Днепр, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua

Адрес участка оперативной полиграфии:

ул. Лазаряна, 2, ком. 1201, г. Днепр, 49010, Украина

Тел.: +38 (056) 47-19-66, *факс:* +38 (056) 47-19-83



Scientific Edition

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

№ 18, 2019

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – Т. Serdiuk
Computer makeup – V. Profatylov

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 14,6. Circulation 300. Order no. ____.

**Dnipro National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan**

Address of editor and editorial office:

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua

Address of small offset printing office:

Lazaryan St., 2, r. 1201, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 47-19-66, *Fax:* +38 (056) 47-19-83