



ISSN 2307-4221

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

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТА
ELECTRIFICATION OF TRANSPORT

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 14 / 2017

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

14 / 2017

Індекс 68641



ДНІПРО

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

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 14 / 2017

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Передплатний індекс 68641

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

ДНІПРО

№ 14, 2017

Видання Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

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

Затверджений до друку Вченою радою університету
протокол № 5 від 26.12.2017 р.

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

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

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

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

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

ВІД УКРАЇНИ

Андрієнко П. Д. (Запорізький національний технічний університет);
Афанасов А. М. (Дніпропетровський національний університет залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна); Гетьман Г. К. (Дніпропетровський
національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна);
Денисюк С. П. (Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут»); Танкевич Є. М. (Інститут електродинаміки
Національної академії наук України); Лежнюк П. Д. (Вінницький національний
технічний університет); Костін М. О. (Дніпропетровський національний
університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна); Саєнко Ю. Л.
(Приазовський державний технічний університет), Сокол Є. І. (Національний
технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); Максимчук В. Ф.
(Департамент електропостачання ПАТ «Укрзалізниця»)

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ

Аврамовіч З. (Транспортний інститут, Белградський університет, Сербія);
Бадьор М. П. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська
Федерація); Бочков К. А. (Білоруський державний університет транспорту,
Білорусь); Омарбеков А. К. (Науково-дослідний центр Казахстанеміржоли,
Казахстан); Васяк І. (Лодзинська політехніка, Інститут електроенергетики,
Республіка Польща); Стежецькі Р. (Інститут електротехніки, Варшава, Республіка
Польща); Палечек Й. (Остравський технічний університет, Чеська республіка).

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

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

Видання виходить 2 рази на рік з червня 2011 р.

електропостачання / power supply**Бойко С.М., Шмельов Ю. М., Владов С. І., Черніхова О. С.**

До питання розбудови систем електропостачання підприємств гірничовидобувного комплексу з використанням відновлювальних джерел електроенергії.....7

Бойко С. Н., Шмелев Ю. Н., Владов С. И., Чернихова Е. С.**Boiko S. M., Shmelev Yu. N., Vladov S. I., Chernikhova E. S.**

К вопросу развития систем электроснабжения предприятий горнодобывающего комплекса с использованием возобновляемых источников электроэнергии 7

To the question of alteration of the systems of power supply of enterprises of mineral resource complex with the use of renewable sources of electric power7

Косарев Є. М.

Математична модель керованої розподіленої системи тягового електропостачання постійного струму 15

Косарев Е. Н.**Kosariev Ye. M.**

Математическая модель управляемой распределенной системы тягового электро-снабжения постоянного тока 15

Mathematical model of the controlled distributed DC power supply system..... 15

електрорухомий склад / electric rolling stock**Афанасов А. М., Шаповалов О. С.**

Підвищення енергетичної ефективності випробувань тягових електромашин28

Афанасов А. М., Шаповалов О. С.**Afanasov A. M., Shapovalov O. S.**

Повышение энергетической эффективности испытаний тяговых электромашин..... 28

Energy efficiency increase of traction electrical machines testing28

Балійчук О. Ю., Дубинець Л. В., Маренич О. Л., Лисенко О. О.

Підвищення коефіцієнту потужності електроприводів нестандартного обладнання підприємств з ремонту рухомого складу залізниць31

Балийчук А. Ю., Дубинец Л. В., Маренич О. Л., Лысенко О. О.**Baliichuk O. Yu., Dubynets L. V., Marenych O. L., Lysenko O. O.**

Повышение коэффициента мощности электроприводов нестандартного оборудования предприятий по ремонту подвижного состава железных дорог..... 31

Increasing of the power factor of non-standard equipment of enterprises for repairing the railway rolling-stock.....31

Костін М. О., Шейкіна О. Г., Левицька С. І.

Метод аналізу усталених стохастичних процесів в силових тягових колах електрорухомого складу .37

Костин Н.А., Шейкина О.Г., Левицкая С.И.**Kostin N. A., Sheikina O. H., Levytska S. I.**

Метод анализа установившихся стохастических процессов в силовых тяговых цепях электроподвижного состава 37

Analysis method of steady-state random processes in power carrier chains of electric stock37

Сінчук О. М., Гузов Е. С., Сінчук І. О., Караманич Ф. І., Козакевич І. А., Федотов В. А., Дебелий В. Л.

Малий коментар до тактики створення тягових електромеханічних комплексів рудничних електровозів комбінованого виду42

Синчук О.Н., Гузов Э. С., Синчук И.О., Караманич Ф. И., Козакевич И. А., Федотов В. А., Дебелый В. Л.**Synchuk O. M., Huzov E. S., Synchuk I. O., Karamanyts F. I., Kozakevich I. A., Fedotov V. A., Debelyi V. L.**

Малый комментарий к тактике создания тяговых электромеханических комплексов рудничных электровозов комбинированного вида... 42

Small commentary to the tactics of creating traction electromechanical complexes of mine electronics of combined kind42

Любарський Б. Г., Доманський І. В.

Методика моделювання взаємодії пари струмоприймач – контактний провід.....56

Любарский Б. Г., Доманский И. В. Методика моделирования взаимодействия пары токоприемник – контактный провод . 56	Liubarskyi B. G., Domanskyi I. V. Interaction simulation methodology of pantograph - contact wire.....56
Хворост М. В., Сменова Л. В., Синчук І. О., Касаткіна І. В., Барановська М. Л. Щодо питання ідентифікації і діагностики електричних параметрів тягових асинхронних двигунів шахтних електровозів.....61	
Хворост Н. В., Сменова Л. В., Синчук И. О., Касаткина И. В., Барановская М. Л. К вопросу идентификации и диагностики электрических параметров тяговых асинхронных двигателей шахтных электровозов..... 61	Hvorost M.V., Smenova L.V., Sinchuk I.O., Kasatkina I.V., Baranovska M.L. Identification and diagnostics of electric parameters of traction asynchronous electric motors of mine electric locomotives61
електромагнітна сумісність / electromagnetic compatibility	
Саєнко Ю. Л., Бараненко Т. К., Саєнко І. Ю. Методика вибору фільтрокомпенсуючих пристроїв для мінімізації дискретного спектру інтергармонік72	
Саєнко Ю. Л., Бараненко Т. К., Саєнко И. Ю. Методика выбора фильтрокомпенсирующих устройств для минимизации дискретного спектра 72	Sayenko Yu. L., Baranenko T. K., Sayenko I. Yu. The method of selection filter compensating devices for minimizing the discrete spectrum of interharmonics.....72
автоматизація і діагностика / automation and diagnose	
Матусевич О. О., Карпелянський А. Р. Моніторинг як один із напрямів підвищення ефективності експлуатації елегазових вимикачів 78	
Матусевич О. О., Карпелянский А. Р. Мониторинг как одно из направлений повышения эффективности эксплуатации элегазовых выключателей..... 78	Matusevych O. O., Karpelyans'kiy A. R. Monitoring as one of the directions of improving the efficiency of SF6 circuit breakers operation.....78
енергозбереження / energy saving	
Денисюк С. П., Василенко В. І. Підвищення енергетичної ефективності установ залізничного транспорту на основі техноценологічного підходу86	
Денисюк С. П., Василенко В. И. Повышение энергетической эффективности учреждений железнодорожного транспорта на основе техноценологического подхода..... 86	Denisyuk S. P., Vasilenko V. I. Enhancing energy efficiency installations of railway transport based on technological approach86
Папахов О.Ю., Логвінова Н.О., Матвієнко Х. В. Векторна оптимізація в умовах руху поїздів за графіком в енергооптимальному режимі..91	
Папахов А. Ю., Логвинова Н. А., Матвиенко К. В. Векторная оптимизация в условиях движения поездов по графику в энергооптимальном режиме..... 91	Papakhov O. Yu., Logvinova N. O., Matvienko K. V. Vector optimization in the conditions of motion of trains on chart in energy optimal mode.....91
Сиченко В. Г., Бондар О. І., Міщенко А. В., Кузнецов В.В., Кордін О.П. Оцінка енергоефективності ліній повздовжнього електропостачання залізниць при підвищенні напруги в мережі.....99	
Сыченко В.Г., Бондарь О.И., Мищенко А.В., Кузнецов В.В., Кордин А.П. Оценка энергоэффективности линии продольного электроснабжения железных дорог при повышении напряжения в сети 99	Sychenko V.G., Bondar O.I., Mishchenko A.V., Kuznetsov V.V., Kordin O. P. Estimation of energy efficiency of lines of longitudinal electrical supply of railways with increasing voltage in the network.....99

С. М. БОЙКО (КрНУ), Ю. М. ШМЕЛЬОВ (КЛК НАУ), С. І. ВЛАДОВ (КЛК НАУ),
О. С. ЧЕРНІХОВА (КЛК НАУ)

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Першотравнева, 20,
м. Кременчук, 39600, Україна, ел. пошта: bsn1987@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0001-9778-2202

Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету, вул. Перемоги, 17/6,
м. Кременчук, 39605, Україна, ел. пошта: ref.nv.klknau@gmail.com

ДО ПИТАННЯ РОЗБУДОВИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧОВИДОБУВНОГО КОМПЛЕКСУ З ВИКО- РИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Вступ

Гірничі підприємства, є одними з найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів України. У зв'язку з високою енергоємністю продукції, постійного збільшення цін на енергоносії (природний газ, нафтопродукти, електроенергія та ін.) енергетична складова в собівартості продукції гірничо-збагачувальних підприємств сягає 27-32% [1].

В той же час, не менш важливим, є проблема аварійності електроустаткування і надійності систем електроживлення гірничих підприємств.

Актуальність

Відповідно до ПУЕ [2] в якості другого незалежного джерела живлення електроспоживачів можуть бути використані, у тому числі, спеціальні агрегати безперебійного живлення та акумуляторні батареї. Так як, потужність споживачів електроенергії гірничих підприємств досить велика, то використання акумуляторних батарей не представляється можливим. Тому одним з альтернативних рішень є використання відновлювальних джерел електричної енергії, які розташовані на території підприємства, з метою електропостачання відповідальних електроприймачів у аварійних ситуаціях та у інших псевдоаварійних режимах роботи, з метою зменшення витрат за спожиту електроенергію та підвищення рівня надійності електропостачання.

Одночасно, аналіз розподілу потоків споживання електроенергії свідчить, що велика частка електричної енергії припадає саме на локальні енергетичні об'єкти, що обумовлює в цілому актуальність вирішення питань енергоефективності їх експлуатації [2]. До локальних об'єктів у гірничорудній промисловості відносяться: електротехнічні системи компресорних насосних станцій, вентиляційних та підйомних установок та інші об'єкти.

Мета роботи

Аналіз можливостей та особливостей впровадження відновлювальних джерел електричної енергії в системи електропостачання залізничних підприємств.

Огляд літератури

Для досягнення вищевикладеної мети проаналізована можливість і специфіка роботи розподілених джерел електроенергії (РДЕ) на базі відновлювальних джерел електроенергії (ВДЕЕ) в умовах діючих залізничних підприємств (ЗРП). Як відомо [2, 3], електропостачання підземних гірничих робіт обумовлено рядом специфічних факторів, основними з яких є: прийнята технологія ведення робіт та гірничо-геологічні умови залягання корисних копалин [3].

Основний матеріал

Система електропостачання ЗРП повинна відповідати наступним вимогам:

- забезпечувати безперебійного живлення електроенергією основних електроприймачів 1-ї та 2-ї категорій;
- бути безпечною у відношенні пожеж та ураження людей електричним струмом;
- забезпечувати необхідну якість електроенергії в умовах безперервної зміни технологічних параметрів гірських розробок і відповідних змін структур електричних мереж;
- бути економічно вигідною, при дотриманні вимог, перелічених вище.

У той же час, головні понижувальні підстанції ЗРП живлять різного типу споживачів з різними режимами роботи (наприклад, гірничо-транспортний комплекс, електрифікована залізнична контактна мережа, насосні установки, компресори, освітлювальна мережа та інш.).

У роботі пропонується підхід до побудови систем автоматизованого керування електро-

споживанням промислових підприємств, заснований на базі відновлювальних альтернативних джерел енергії, у вигляді сукупності взаємозалежних структур. Як наслідок, є необхідним та актуальним при використанні новітніх технологій під час комутації електричних мереж, з можливістю прогнозування їх енергетичних параметрів.

Для розв'язання вищевикладеної мети, проаналізована можливість і специфіка роботи РДЕ в умовах діючих ЗРП, розроблена конструкція комплексу, синтезована її структура. Розроблена структура РДЕ на базі ВДЕЕ і система управління нею дозволяють збільшити надійність і якість електропостачання споживачів, а також підтримувати безперебійність електропостачання споживачів електричної енергії [2].

За результатами дослідження зроблено висновки про те, що системи електропостачання на базі ВДЕЕ характеризуються наявністю в них генераторів обмеженої потужності, широким діапазоном зміни параметрів навантаження тощо [3-6]. У зв'язку з цим до їх застосування у складі схем електропостачання локальних енергетичних систем (ЛЕС) висувається ряд вимог, насамперед, надійність, обсяг згенерованої потужності, віддаленість споживачів від джерел живлення електроенергії, наявності зон з забрудненими та агресивними середовищами, вплив самих ЛЕС на якість електричної енергії тощо. Таким чином, РДЕ на базі ВДЕЕ слід наблизити до об'єкту споживання, щоб зменшити кількість мережевих ланок та ступенів проміжної трансформації електроенергії та комутації в системі електропостачання в ЛЕС, що можливо на основі децентралізованої архітектури. Це, з одного боку, зменшує кількість проміжних ланок між ВДЕЕ та електроспоживачами, а також знижує кількість ступенів трансформації в ЛЕС, а з іншого може збільшити кількість факторів негативного впливу на якість електроенергії та негативні перехідні процеси в ЛЕС.

В результаті аналізу можливості впровадження ВДЕЕ у складі локальних енергетичних систем було виявлено, що РДЕ на базі ВДЕЕ, впливають на розподільні мережі в ЛЕС та перетворюють їх на активні елементи. Це передбачає необхідність внесення змін у прийнятті стратегії управління ЛЕС та планування структури і режимів локальних енергетичних систем. При цьому їхній вплив може мати як позитивний, так і негативний характер, тому доцільно заздалегідь ґрунтовно досліджувати та аналізу-

вати питання приєднання РДЕ до ЛЕС в залежності від умов експлуатації та особливостей технологічного процесу електроприймачів ЗРП [7].

До складу запропонованої системи електропостачання входить наступне устаткування: ВЕС, СЕС, ГЕС; батарея акумуляторів, що служить для накопичення електроенергії при роботі ВДЕЕ для живлення системи її управління (або, за необхідності, як резервне джерело живлення); перетворювальна апаратура, у випадку використання генератора змінної напруги, що служить для перетворення електроенергії від ВДЕЕ у постійний струм для живлення інвертора й заряду акумуляторних батарей і перетворення постійного струму від акумуляторів в напругу змінного струму із стандартними параметрами.

При проектуванні ВДЕЕ у складі локальної системи електропостачання (рис. 1), доводиться вирішувати питання, пов'язані із номінальною роботою станції, що виключає перевантаження генератора, за умови надійності в експлуатації. Тому запропоновано підключати мережу до споживача через автоматизований розподільчий пристрій, що призначений для регулювання електроживлення споживача в автоматичному режимі. Таким чином, за умови достатнього електропостачання споживача від ВДЕЕ, енергосистема працює в автономному режимі. У випадку, коли відбувається, за рядом причин, недостатнє генерування електричної енергії ВДЕЕ чи аварійна ситуація, то автоматичний розподільчий пристрій автоматично підключає до системи електропостачання споживача блок акумуляторних батарей, а у разі нагальної необхідності, електромережу, як додаткове джерело електричної енергії. Таким чином мережа є додатковим аварійним джерелом електричної енергії.

За такої системи регулювання підвищується надійність електропостачання споживача та модульність системи вцілому. Оскільки, за необхідністю, відбувається регулювання кількості акумуляторних батарей та ВДЕЕ.

У зв'язку з особливостями електромагнітної сумісності та оптимальним електроживленням споживачів, при плануванні та впровадженні систем локального електроживлення на базі ВДЕЕ, необхідно щоб розташування ВДЕЕ відповідало вимогам забезпечення оптимального енергообміну, покращення якості електроенергії, вимогам до стійкості, надійності та ефективності роботи системи, потужністю, характером і місцем розташування джерел які впли-

вають на параметри електричної енергії, а також умові досягнення оптимальних значень техніко-економічних показників системи в цілому.

Була розроблена і запропонована структурна схема ЛЕС для роботи в умовах залізничних підприємств (рис. 1) [5].

Схема електропостачання-електроспоживання з використанням відновлювальних

джерел електричної енергії дозволяє забезпечити підвищення ефективності роботи системи електропостачання з використанням додаткових джерел електричної енергії, що дозволить підвищити надійність та безперебійність електропостачання підключених до нього споживачів.

Схема наведена нижче на рис. 1.

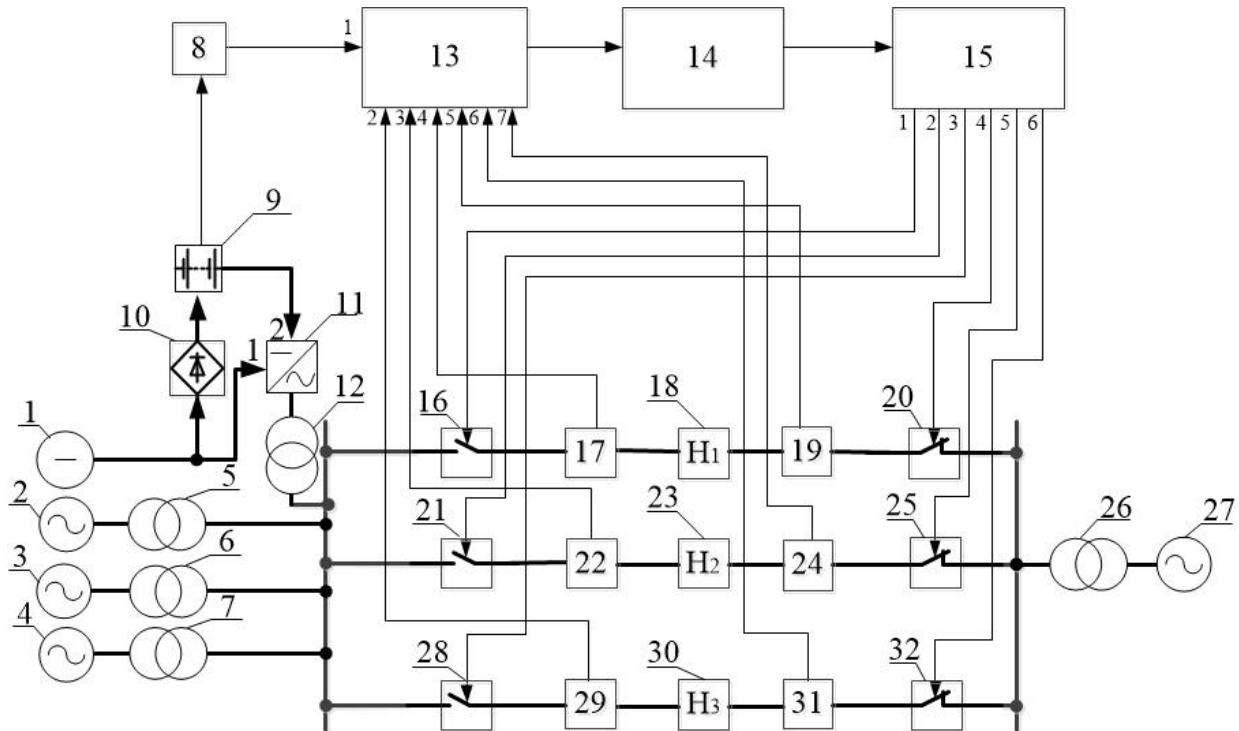


Рис. 1. Схема електропостачання-електроспоживання з використанням відновлювальних джерел електричної енергії: 1 – сонячна електростанція; 2 – вітроенергетична станція; 3 – гідроелектростанція; 4 – гідроакumuлююча електростанція; 5 – перший трансформатор; 6 – другий трансформатор; 7 – третій трансформатор; 8 – система діагностики акумулятора; 9 – блок акумуляторних батарей; 10 – блок заряду акумуляторної батареї; 11 – інвертор; 12 – четвертий трансформатор; 13 – погоджуючий пристрій блоків датчиків; 14 – система керування електропостачання; 15 – погоджуючий пристрій системи керування електропостачання; 16 – перший керуючий комутатор; 17 – перший блок датчиків; 18 – перший активний споживач; 19 – другий блок датчиків; 20 – другий керуючий комутатор; 21 – третій керуючий комутатор; 22 – третій блок датчиків; 23 – другий активний споживач; 24 – четвертий блок датчиків; 25 – четвертий керуючий комутатор; 26 – мережа; 27 – п'ятий керуючий комутатор; 28 – п'ятий блок датчиків; 29 – третій активний споживач; 30 – п'ятий блок датчиків; 31 – шостий керуючий комутатор

Електрична енергія, яка згенерована сонячною електростанцією (1) передається на спільну шину локальної системи електропостачання промислового підприємства через керовані комутатори (16), (21), (27).

Сонячна електростанція (1) під'єднана до першого входу інвертора (11), а також з'єднана через блок заряду акумуляторної батареї (10), який під'єднаний до блоку акумуляторної батареї (9). До блоку акумуляторної батареї (9) під'єднаний блок системи діагностики акумуляторною батареєю (8) який з'єднаний з погоджуючим пристроєм блоків датчиків (13). Вихід блоку акумуляторної батареї (9) з'єднаний з

другим входом інвертора (11), який перетворює електричну енергію із постійного струму на електричну енергію змінного струму. Інвертор (11) з'єднаний з четвертим трансформатором (12) який під'єднаний на спільну шину локальної системи електропостачання промислових підприємств.

Електрична енергія, яка згенерована вітроенергетичною станцією (2) до якої під'єднаний перший трансформатор (5). Перший трансформатор (5) під'єднується на спільну шину локальної системи електропостачання промислового підприємства, який призначений для узгодження рівня напруги, який заданий шиною

локальної системи електропостачання промислового підприємства. Перший трансформатор (5) передає електричну енергію на шину локальної системи електропостачання через керовані комутатори (16), (21), (27).

Згенерована енергія гідроелектростанцією (3) до якої під'єднаний другий трансформатор (6). Другий трансформатор (6) під'єднується на шину локальної системи електропостачання промислового підприємства, який призначений для узгодження рівня напруги, який заданий спільною шиною локальної системи електропостачання промислового підприємства. Другий трансформатор (6) передає електричну енергію на спільну шину локальної системи електропостачання через керовані комутатори (16), (21), (27).

Згенерована енергія гідроакумулюючою електростанцією (4) до якої під'єднаний третій трансформатор (7). Третій трансформатор (7) під'єднується на спільну шину локальної системи електропостачання промислового підприємства, який призначений для узгодження рівня напруги, який заданий спільною шиною локальної системи електропостачання промислового підприємства. Третій трансформатор (7) передає електричну енергію на спільну шину локальної системи електропостачання через керовані комутатори (16), (21), (27).

Електрична енергія із спільної шини локальної системи електропостачання промислових підприємств розподіляється по активним споживачам (18), (23), (29), через керовані комутатори (16), (21), (27).

Блоки датчиків (17), (19), (22), (24), (28), (30), які контролюють параметри струму, напруги та які знаходяться по обидва боки від активного споживача.

Керований сигнал із блоків датчиків (8), (17), (19), (22), (24), (28), (30), передається на погоджувачий пристрій блоків датчиків (13), який перетворює дані з датчиків в сигнал і передає сигнал на систему керування електропостачанням (14).

Керований сигнал із системи керування (14) передається на погоджувачий пристрій системи керування (15), який формує сигнал і передає сигнал на один із керованих комутаторів (16), (20), (21), (25), (27), (31).

Навантаження через керовані комутатори (20), (25), (31) під'єднано до мережі (26) та через керовані комутатори (16), (21), (27), а також під'єднано до шини локальної системи електропостачання промислових підприємств. Мережа (26) під'єднується до активних споживачів

(18), (23), (29), через керовані комутатори (20), (25), (31).

Якщо відбуваються аварійний режим, то блок (14) подає керуючий сигнал на блок погоджувачого пристрою системи керування (15), який відправляє сигнал на комутацію блоку керованого комутатора для підключення мережі (26) і живлення блоків (18), (23), (29), відбувається від блоку (26).

Якщо відбувається дефіцит генерованої потужності то блок (14) подає керований сигнал на блок погоджувачого пристрою системи керування (15) який відсилає сигнал на керовані комутатори (20), (25), (31) та відбувається підключення блоку мережі (26).

Після усунення аварійного режиму, блок (14) подає керований сигнал на блок (15) для підключення блоків (18), (23), (29) до тобто відбувається повернення до нормального режиму роботи.

Система має можливість регулювати роботу джерел електричної енергії, як додаткових джерел живлення, на одну спільну систему електропостачання промислового підприємства, в результаті аварійної ситуації живлення відбувається від магістральної електромережі, система при необхідності може підключати та відключати певну кількість споживачів, з метою регулювання навантаження та ефективної роботи, що зумовлює підвищення надійності електропостачання і підвищує ефективність роботи комплексу.

Таким чином сумарна згенерована потужність РДЕ на базі ВДЕЕ визначається з виразу (рис. 2):

$$S_{\Sigma DES} = \sum_{i=1}^n S_{VES_i} + \sum_{i=1}^n S_{SES_i} + \sum_{i=1}^n S_{GES_i}$$

де S_{VES} – згенерована потужність ВЕС; S_{SES} – згенерована потужність СЕС; S_{GES} – згенерована потужність ГЕС.

Тоді, спожита підприємством потужність за умови використання РДЕ на базі ВДЕЕ в системі електропостачання дорівнює:

$$S_{PP} = S_{PS} + \left(\sum_{i=1}^n S_{VES_i} + \sum_{i=1}^n S_{SES_i} + \sum_{i=1}^n S_{GES_i} \right)$$

де S_{PS} – спожита електрична енергія промислового підприємства з енергосистеми.

А за умови генерування РДЕ більшої потужності від необхідного споживання підприємством потужність спожитої електричної енергії з енергосистеми дорівнює

$$S_{PS} = S_{PP} - \left(\sum_{i=1}^n S_{VES_i} + \sum_{i=1}^n S_{SES_i} + \sum_{i=1}^n S_{GES_i} \right).$$

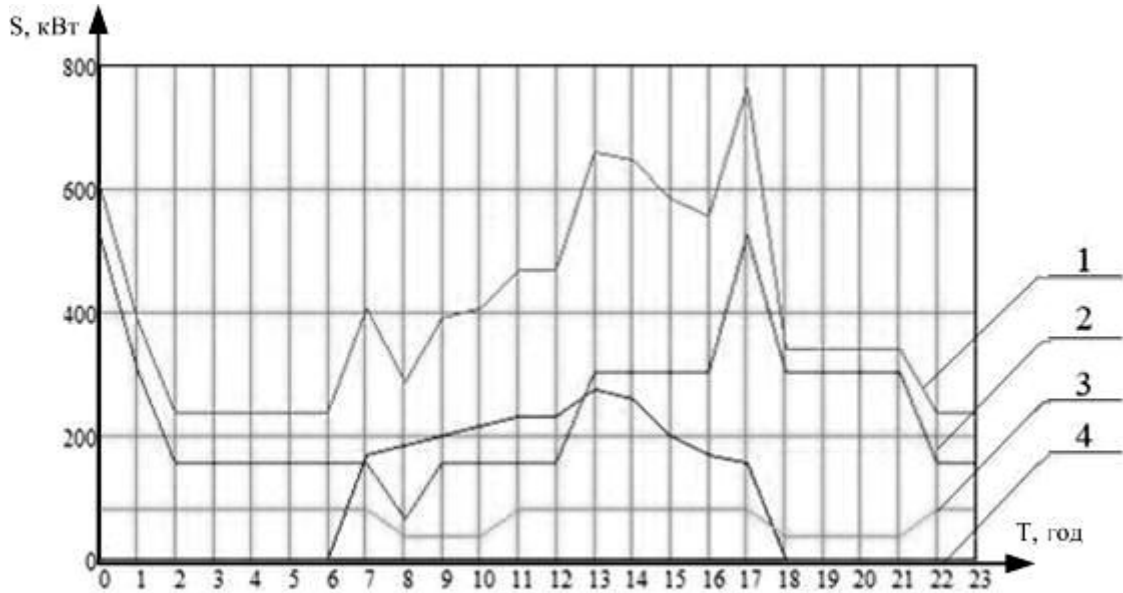


Рис. 2. Типовий графік генерації локальної системи з використанням відновлювальних джерел електричної енергії: 1 – сумарна згенерована електрична енергія локальною системою; 2 – згенерована електрична енергія вітроенергетичною станцією; 3 – згенерована електрична енергія гідроелектростанцією; 4 – згенерована електрична енергія сонячною електростанцією

За умови можливості накопичення надлишку згенерованої електричної енергії ВДЕЕ потужність спожитої електричної енергії з енергосистеми дорівнює:

$$S_{PS} = S_{PP} \pm S_{\Sigma EB} - \left(\sum_{i=1}^n S_{VES_i} + \sum_{i=1}^n S_{SES_i} + \sum_{i=1}^n S_{GES_i} \right)$$

За умови від'ємного значення потужності спожитої електричної енергії з енергосистеми відбувається віддача надлишку згенерованої електричної енергії до мережі.

Оскільки, при впровадженні комбінованого електропостачання велика кількість можливих конфігурацій, то буде актуальним описування цих конфігурацій у вигляді тензора. Тензор електропостачання від ЛЕС з використанням ВДЕЕ представлено у вигляді:

$$B_i^k \sum_{PP} = \sum_{i=1}^{k=4} S_i^k t^i = \begin{pmatrix} S_1^1 t^1 & S_2^1 t^2 & S_3^1 t^3 & S_4^1 t^4 & S_5^1 t^5 \\ S_1^2 t^1 & S_2^2 t^2 & S_3^2 t^3 & S_4^2 t^4 & S_5^2 t^5 \\ S_1^3 t^1 & S_2^3 t^2 & S_3^3 t^3 & S_4^3 t^4 & S_5^3 t^5 \\ S_1^4 t^1 & S_2^4 t^2 & S_3^4 t^3 & S_4^4 t^4 & S_5^4 t^5 \end{pmatrix}$$

де, k – варіанти електропостачання, i – джерела постачання ЕЕ, S_i^k – потужність i -го джерела ЕЕ в k -му варіанті електропостачання, t^i – час електропостачання від i -го джерела ЕЕ, S^k – варіант електропостачання ЕЕ, S_1 – електромережа, S_2 – вітроелектростанція, S_3 – соняч-

на фотоелектростанція, S_4 – мікрогідроелектростанція, S_5 – акумулятори.

Перший рядок відображає сумарне постачання ЕЕ від ЛЕС на базі ВДЕЕ за 1-м варіантом.

Другий рядок відображає сумарне постачання ЕЕ від ЛЕС на базі ВДЕЕ за 2-м варіантом.

Третій рядок відображає сумарне постачання ЕЕ від ЛЕС на базі ВДЕЕ за 3-м варіантом.

Четвертий рядок відображає сумарне постачання ЕЕ від ЛЕС на базі ВДЕЕ за 4-м варіантом.

Згідно правила додавання, знак суми в записі тензора можна опустити і записати його у вигляді:

$$B_i^k \sum_{PP} = S_i^k t^i$$

Враховуючи результати ряду попередніх досліджень, широкого розповсюдження набули асинхронні генератори у складі ГЕС та ВЕС, так, як вони мають ряд переваг: краще захищені від попадання бруду і вологи, більш стійкі до короткого замикання і перевантажень, а вихідна напруга асинхронного електрогенератора відрізняється меншим ступенем нелінійних спотворень. Це дозволяє використовувати асинхронні генератори не тільки для живлення промислових пристроїв, які не критичні до форми вхідної напруги, але й підключати до них електронну техніку. До переваг асинхронного генератора також відносять низький клірфактор (коефіцієнт гармонік), що характеризує кількі-

сну наявність у вихідній напрузі генератора вищих гармонік. Вищі гармоніки викликають нерівномірність обертання і небажаний нагрів електромоторів. У синхронних генераторів можна спостерігати величину клірфактора до 15%, а клірфактор асинхронного електрогенератора не перевищує 2% [7].

Ще однією перевагою асинхронного електрогенератора є те, що в ньому повністю відсутні обертові обмотки і електронні деталі, які чутливі до зовнішніх впливів і досить часто схильні до пошкоджень. Тому асинхронний генератор більш стійкий в роботі і менше схильний до зносу і може служити дуже довго.

Як відомо, якість електричної енергії характеризується сукупністю властивостей електричної енергії, які обумовлюють придатність її для нормальної роботи електроприймачів відповідно до їх призначення при розрахунковій працездатності [7].

Показники якості електричної енергії (ПЯЕ) - поділяються на дві групи: основні і додаткові.

Основні ПЯЕ визначають властивості електричної енергії, які характеризують її якість. Додаткові ПЯЕ представляють собою форми записи основних ПЯЕ, використовувані в нормативно-технічних документах.

До основних ПЯЕ відносяться: відхилення напруги δU , розмах зміни напруги δU_t , доза коливань напруги Ψ , коефіцієнт несинусоїдальності кривої напруги k_{nsU} , коефіцієнт v -ої гармонійної складової $K_{U(v)}$, коефіцієнт зворотної послідовності напруги K_{2U} , коефіцієнт нульової послідовності напруги K_{0U} , відхилення частоти Δf , тривалість провалу напруги Δt_p , імпульсна напруга U_{ipn} [9-11].

До додаткових ПЯЕ відносяться: коефіцієнт амплітудної модуляції K_{mod} , коефіцієнт небалансу міжфазних напруг K_{neb} , коефіцієнт небалансу фазних напруг $K_{neb.f}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Энергоэффективность та відновлювальні джерела енергії / Під заг. ред. А. К. Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007 – 560 с.
2. Азарян А.А., Вілкул Ю.Г. та ін. Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв. – Кривий Ріг: Мінерал, 2006. – 219 с.
3. Денисюк С. П., Базюк Т. М. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на електромережу

Таким чином якість ЕЕ в запропонованій системі електропостачання можна описати за допомогою тензора через суму тензорів:

$$\begin{aligned} \prod_{jiq}^k &= \sum_{k,j=1}^{k,j=4} (a_j^k \delta U^j + b_j^k \delta U_t^j + c_j^k \Psi^j + d_j^k U_{imp}^j) + \\ &\sum_{k,i=1}^{k,i=4} (a_i^k k_{nsU}^i + b_i^k k_{U(v)}^i + c_i^k k_{2U}^i + d_i^k k_{0U}^i) + \\ &\sum_{k,q=1}^{k,q=4} (a_q^k k_{mod}^q + b_q^k k_{neb}^q + c_q^k k_{neb.f}^q + d_q^k \Delta t_p^q) \end{aligned}$$

або в спрощеному вигляді, враховуючи правило додавання, знак суми можна опустити і записати у вигляді:

$$\prod_{jiq}^k = A_j^k + B_i^k + C_q^k$$

Висновки

1. Розробка і реалізація в практику роботи залізничних підприємств ЛЕС, як додаткових автономних джерел живлення у складі системи електропостачання, є актуальною проблемою для забезпечення умови безперебійності та надійності електропостачання електроприймачів, що дозволить зменшити собівартість видобутку корисних копалин.

2. Застосування в системах управління комутацією електричних мереж інтелектуальних систем, є одним із варіантів інтелектуального управління електропостачанням відповідальних об'єктів, що дасть можливість підвищити надійність та якість управління електропостачанням.

3. На підприємствах гірничодобувної галузі актуальним та можливим є впровадження в загальну структуру систем електроживлення локальних систем на базі ВДЕ. Водночас з метою достатньо енергоефективного використання таких мініелектростанцій в структурах систем електроживлення необхідно ґрунтовно аналізувати питання приєднання локальних систем в комплекс вищезгаданих систем.

REFERENCES

1. Energoeffektivnost ta vidnovlyuvalni dzhherela energiyi [Energy efficiency and renewable energy sources] / Pid zag. red. A. K. Shidlovskogo. Kyiv: Ukrayinski entsiklopedichni znannya Publ., 2007. 560 p.
2. Azaryan A.A., Vilkul Yu.G. ta in. Kompleks resurso- i enerhozberihayuchykh heotekhnolohiy vydobutku ta pererobky mineral'noyi syrovyny, tekhnichnykh zasobiv yikh monitorynhu iz systemoyu upravlinnya i optymizatsiyi hirnychorudnykh vyrobnytstv [Complex resource and power keeping geotechnologies of booty and processing of mineral raw

та особливості побудови віртуальних електростанцій // Електрифікація транспорту. – 2012. – № 4. – С. 23–29.

4. Lezhnyuk P. Kulyk V. Functioning optimization of various types of renewable sources of electric energy in electric networks // Papers of the 2012 United Kingdom – Vietnam Clean Energy Conference (UK-VN CECE 2012). – Danang city, Vietnam. – pp. 487–492.

5. Stognii B., Kyrylenko O., Prakhovnyk A., Denysiuk S. The evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – № 5. – pp. 52–67.

6. Sychenko, V. G. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // Archives of Transport. – 2015. – Vol. 35, Iss. 3. – P. 63–70.

7. Buchholz B., Styczynski Z. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer – 2014. – 396 p.

8. Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Мельник О.Є. Відновлювані та альтернативні джерела енергії: навчальний посібник – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2015. – 270с.

9. Сінчук О.М., Сінчук І.О., Гузов Э.С., Яловая А.Н., Бойко С.Н. Энергоэффективность железорудных производств. Оценка, практика повышения. Монография – Изд LAP LAMBERT Academic Publishing is managed by OmniScriptum Management GmbH., 2016. – 346с.

10. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.

11. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць. / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саенко, Д. О. Босий. – Д.: ПФ Стандарт-Сервіс, 2015. – 344 с.

Ключові слова: система електропостачання; відновлювані джерела енергії; електропостачання; надійність електропостачання.

material, hardwares of their monitoring with the control and optimization of mining productions system]. Krivij Rig, Ukraine. 219 p.

3. Denysiuk S. P., Bazjuk T. M. Analiz vplyvu dzherel rozoseredzhenoyi heneratsiyi na elektromerezhu ta osoblyvosti pobudovy virtual'nykh elektrostansiy [Analysis of the impact of distributed generation sources on the grid and the construction of virtual power plants]. Elektryfikatsiya transportu [Electrification of transport]. 2012, no 4, pp 23–29.

4. Lezhnyuk P., Kulyk V. Functioning optimization of various types of renewable sources of electric energy in electric networks. Papers of the 2012 United Kingdom – Vietnam Clean Energy Conference (UK-VN CECE 2012). – Danang city, Vietnam. – Pp. 487–492.

5. Stognii B., Kyrylenko O., Prakhovnyk A., Denysiuk S. The evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine. Tekhnichna elektrodynamika, no 5, Pp. 52–67. (Ukr)

6. Sychenko, V. G. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // Archives of Transport. 2015. Vol. 35, Iss. 3. P. 63–70.

7. Buchholz B., Styczynski. Z. (2014). Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer, 396 p.

8. Sinchuk O. N., Sinchuk I.O., Boiko S.N. Mel'nik O.E. Vidnovlyuvani ta al'ternatyvni dzherela enerhiyi: navchal'nyy posibnyk [Renewable and alternative energy sources: tutorial]. Kremenchug: Publisher CHP Shcherbatykh A.V., 2015. 270 p.

9. Sinchuk O. N., Sinchuk I.O., Guзов E.S., Yalovaya A.N., Boiko S.N. (2016). Energoeffektivnost' zhelezorudnykh proizvodstv. Otsenka, praktika povysheniya. Monografyya [Energy efficiency of iron ore production. Assessment, practice improvement. Monograph]. LAP LAMBERT Academic Publishing is managed by OmniScriptum Management GmbH., 2016. 346 p.

10. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. Kachestkvo elektroenergii na promyshlennyykh predpriyatiyah [Quality of electric power in industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat, 2005. 261 p.

11. Sychenko, V. H. Sayenko Yu. L., Bosyy D. O. Yakist' elektrychnoyi enerhiyi u tyahovykh merezhakh elektryfikovanykh zaliznyts' [Quality of electric energy in traction networks of electrified railways]. Dnipropetrovsk.: Standart-Servis Publ., 2015. 344 P.

Запропоновано впровадження локальних систем в комплекс структур мереж електроживлення підприємств гірничо-добувної галузі на базі відновлювальних джерел електричної енергії. Досліджено можливість використання мікромереж та розподілених джерел електроенергії в задачах покращення якості електропостачання підприємств гірничо-добувної галузі, у тому числі гірничотранспортний комплекс та, електрифіковану залізничну контактну мережу вище зазначених підприємств. Проаналізовано особливості використання мікромереж та обґрунтовано актуальність розробки і реалізації в практику роботи підприємств гірничо-видобувного комплексу відновлювальних джерел електричної енергії, як додаткових джерел живлення у складі системи електропостачання, з метою забезпечення умови безперебійності та надійності електропостачання електроприймачів та зменшення собівартості видобутку корисних копалин. Для реалізації енергоефективності електропостачання, обґрунтована та пропонується для практичної реалізації її структурна схема. У той же час, головні понижувальні підстанції ЗРП живлять різного типу споживачів з різними режимами роботи (наприклад, гірничотранспортний комплекс, електрифікована залізнична контактна мережа, екскаватори, насосні установки, компресори, освітлювальна мережа та ін.).

УДК 621.311

С. М. БОЙКО (КрНУ), Ю. М. ШМЕЛЬОВ (КЛК НАУ), С. І. ВЛАДОВ (КЛК НАУ),
О. С. ЧЕРНІХОВА (КЛК НАУ)

Кременчугський національний університет імені Михайла Остроградського, ул. Первотравна, 20,
м. Кременчуг, 39600, Україна, ел. пошта: bsn1987@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0001-9778-2202

Кременчуцький летний коледж Національного авіаційного університету, ул. Перемоги, 17/6, м. Кременчуг, 39605, Україна (05366) 3-01-48, (097)-633-95-93, ел. пошта: ref.nv.klknau@gmail.com

К ВОПРОСУ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Предложено внедрение локальных систем в комплекс структур сетей электропитания предприятий горно-добывающей отрасли на базе возобновляемых источников электрической энергии. Исследована возможность использования микросети и распределенных источников электроэнергии в задачах улучшения качества электроснабжения предприятий горно-добывающей отрасли, в том числе горнотранспортного комплекса и электрифицированной железнодорожной контактной сети отмеченных предприятий. Проанализированы особенности использования микросети и обоснована актуальность разработки и реализации в практику работы предприятий горнодобывающего комплекса возобновляемых источников электрической энергии, как дополнительных источников питания в составе системы электроснабжения, с целью обеспечения условия бесперебойности и надежности электроснабжения электроприемников и уменьшения себестоимости добычи полезных ископаемых. Для реализации энергоэффективности электроснабжения, обоснована и предлагается для практической реализации ее структурная схема.

Ключові слова: система електропостачання; відновлювані джерела енергії; електропостачання; надійність електропостачання.

УДК 621.311

S. M. BOIKO (KrNU), Yu. N. SHMELEV (KLK NAU), S. I. VLADOV (KLK NAU),
E. S. CHERNIKOVA (KLK NAU)

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, Pershotravneva str., Kremenchuk, 39600, Ukraine, e-mail: bsn1987@i.ua,
ORCID: orcid.org/0000-0001-9778-2202

Kremenchutsky flying college of the National Aviation University, st. Pobedy, 17/6, Kremenchuk, 39605, Ukraine, tel.: (05366) 3-01-48, (097) -633-95-93, e-mail: ref.nv.klknau@gmail.com

TO THE QUESTION OF ALTERATION OF THE SYSTEMS OF POWER SUPPLY OF ENTERPRISES OF MINERAL RESOURCE COMPLEX WITH THE USE OF RENEWABLE SOURCES OF ELECTRIC POWER

Introduction of the in-plants systems is offered in the complex of networks structures of power supply of enterprises of mineral resource industry on the base of renewable electric energy sources. It is investigational possibility of the use of micro power circuit and up-diffused sources of electric power in the tasks of improvement of internals of power supply of the types of plants marked higher. Features are analysed the use of micro power circuit and reasonable actuality of development and realization in practice of work of plants of mineral-extractive complex of renewable electric energy sources, as additional sources of composition the system of power supply, with the purpose of providing of condition of continuity and reliability of power supply of power consumption and diminishing of prime cost mining operations.

Keywords: system of power circuit; renewable electric energy sources; power circuit; reliability of power circuit.

Received 03.10.2017; accepted in revised form 04.12.2017.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КЕРОВАНОЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Задачі розрахунку режимів роботи і визначення навантажувальної здатності систем тягового електропостачання (СТЕ) вкрай актуальні при їх проектуванні та експлуатації. Однак, на відміну від розрахунку систем зі стаціонарними споживачами електричної енергії, розрахунок СТЕ має певні особливості. На режим роботи системи тягового електропостачання впливає багато факторів, які мають детермінований і стохастичний характер. Такими факторами можуть бути число і ваговий склад поїздів, режими їх роботи та розміщення у часі і просторі, пропускна здатність ділянки, метеорологічні умови, план і профіль ділянки та ряд інших факторів, пов'язаних з організацією експлуатації залізниці [1].

Розрахунок керованої розподіленої системи тягового електропостачання є ще більш ускладненим, оскільки математична модель такої СТЕ повинна передбачати розташування на міжпідстанційній зоні декількох підсилюючих пунктів (ПП) з можливістю регулювання їх вихідної потужності в режимі реального часу. Вочевидь, зміна схеми електропостачання призведе до додаткових ускладнень при моделюванні. Такі ускладнення будуть пов'язані з урахуванням впливу сусідніх фідерних зон та раціональним примусовим розподілом потужності паралельно працюючих тягових підстанцій і підсилюючих пунктів для забезпечення мінімуму втрат електричної енергії в тяговій мережі [2]. Априорі концепція розподіленого живлення з керованими (некерованими) тяговими підстанціями та керованими підсилюючими пунктами передбачає збільшення явища впливу вирівнюючих струмів і, як наслідок, ускладнення розрахунку цих струмів через наявність більшої кількості джерел з різною напругою на шинах [3].

Метою даної роботи є розробка математичної моделі для розрахунку системи тягового електропостачання розподіленого типу з можливіс-

тю зміни вихідної потужності окремих підсилюючих пунктів в режимі реального часу.

Аналіз методів розрахунку систем тягового електропостачання

Методи розрахунку системи тягового електропостачання можна розбити на три групи (рис. 1) [4 – 8]: на основі тягових розрахунків, на основі заданих розмірів руху і спільний електричний розрахунок ЕРС і СТЕ.

У методах, що базуються на основі тягових розрахунків навантаження може бути задане у вигляді потужності або струму. До методів, де тягове навантаження задається у вигляді струму, відносяться розрахунки на основі перетину графіка руху поїздів і неперервного дослідження графіка руху. Принципами розрахунку, де тягове навантаження задається у вигляді потужності, є розрахунок чітко визначених ниток графіка руху класичними методами, розрахунок статистично стійких ниток графіка руху класичними методами і розрахунок чітко визначених ниток графіка руху в фазних координатах. До другої групи методів відноситься розрахунок СТЕ на основі законів розподілу числа поїздів на фідерній зоні. До третьої групи належить побудова миттєвих схем додаванням електричних навантажень з урахуванням фактичного рівня напруги на струмоприймачі.

Аналіз наведених методів розрахунку [9] показав, що найбільш досконалими є: розрахунок чітко визначених ниток графіка руху класичними методами, розрахунок статистично стійких ниток графіка руху класичними методами, розрахунок чітко визначених ниток графіка руху в фазних координатах і побудова миттєвих схем з додаванням електричних навантажень з урахуванням фактичного рівня напруги на струмоприймачі ЕРС. Очевидно, що побудова математичної моделі керованої розподіленої СТЕ повинна враховувати ці методи.

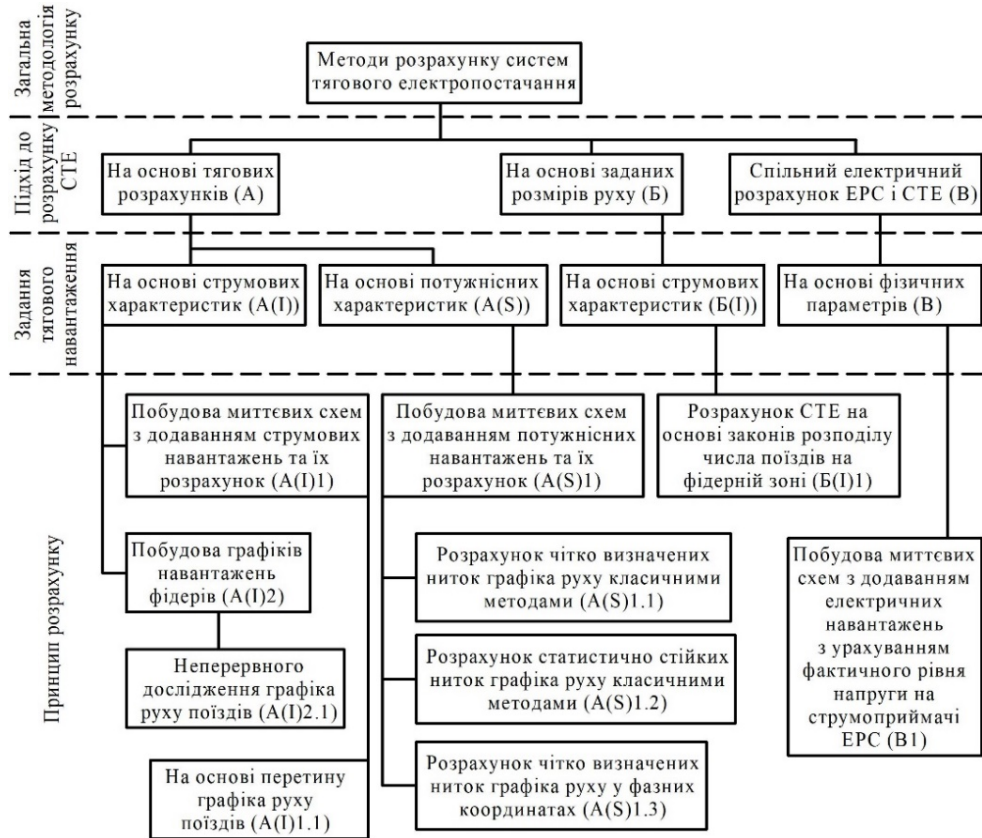


Рис. 1. Методи розрахунку систем тягового електропостачання

Формалізація математичної моделі системи тягового електропостачання постійного струму

Вихідна інформація для розрахунку задається у матричному вигляді. Матриця схеми визначає топологію розрахункової ділянки на координатній сітці, напругу холостого ходу тягових підстанцій та підсилюючих пунктів, їх ву-

трішний опір, вузли підключення живлячих фідерів до контактної мережі та вузли з'єднання контактних підвісок.

Стовпчики матриці визначають координату кожного підключення, а рядки – тип підключення та параметр джерела живлення. Для ділянки рис. 2, матриця схеми матиме вигляд (2).

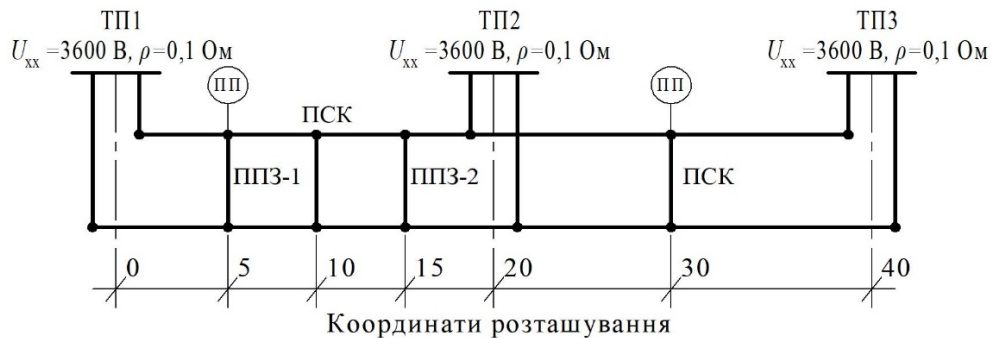


Рис. 2. Схема розрахункової ділянки

$S =$	0	5	10	15	20	30	40	Координата, км
	1	1	0	0	1	1	1	Підключення ТП/ПП до першої колії
	0	0	1	1	0	0	0	Підключення ПСК/ППЗ
	1	1	0	0	1	1	1	Підключення ТП/ПП до другої колії
	$U_{ххТП}$	$U_{ххПП}$	0	0	$U_{ххТП}$	$U_{ххПП}$	$U_{ххТП}$	Напруга холостого ходу ТП/ПП, В
	$\rho_{ТП}$	$\rho_{ПП}$	0	0	$\rho_{ТП}$	$\rho_{ПП}$	$\rho_{ТП}$	Внутрішній опір ТП/ПП, Ом

(1)

Визначення напруги холостого ходу та внутрішнього опору тягових підстанцій і підсилюючих пунктів відбувається відповідно до [4, 10] з урахуванням двонаправленості перетворювальних агрегатів. В подальших розрахунках матриця схеми використовується в якості аргументу різних функцій.

Визначення струмів в системі без наявності електрорухомого складу

Зважаючи на те, що на залізницях України тягові підстанції обладнані некерованими випрямлячами, доцільно розглядати ділянку саме з такими тяговими підстанціями та з підсилюючими пунктами, що обладнані випрямно-інверторними агрегатами. Завдяки двонаправленому перетворювачу підсилюючого пункту останній сприймається системою, як навантаження. У випадку нерівності напруги тягових підстанцій та підсилюючих пунктів ($U_{TP} > U_{ПП}$) починає протікати вирівнювальний струм, який, споживається підсилюючими пунктами для заряду накопичувача. Слід відзначити, що при відсутності навантаження на міжпідстанційній зоні доцільно навмисно занижувати вихідну напругу ПП для додаткового заряду накопичувача. Встановлення зворотної нерівності напруги ($U_{ПП} > U_{TP}$) буде доцільним лише у випадку, коли тягові підстанції обладнані випрямно-інверторними агрегатами, а накопичувачі підсилюючих пунктів повністю заряджені. Тоді енергія, згенерована альтернативним джерелом живлення, перетікаючи від підсилюючих пунктів до тягових підстанцій, далі буде спрямована в систему зовнішнього електропостачання. Таким чином, в даній системі, за умови розміщення на міжпідстанційній зоні підсилюючих пунктів з двонаправленими перетворювачами, можуть протікати вирівнювальні струми без наявності електрорухомого складу на ділянці.

Для розрахунку струмів в СТЕ без навантаження за умови розміщення на міжпідстанційній зоні підсилюючих пунктів з двонаправленими перетворювачами необхідно визначити, які струми протікають від кожної тягової підстанції при заданій конфігурації системи тягового електропостачання та рівня напруги холостого ходу відповідної тягової підстанції. Для вирішення цього завдання скористаємося методом накладання. Суть методу накладання полягає в тому, що струм у будь-якій вітці кола, створений кількома джерелами, які діють у даному колі, дорівнює алгебраїчній сумі струмів, створених кожним з цих джерел окремо.

Для реалізації розрахунку розглянемо схему ділянки, яка зображена на рис. 5. В даній схемі міжпідстанційна зона задається еквівалентним опором тягової мережі, який враховує схему живлення та кількість колій. Розрахункова ділянка може складатись з будь-якої кількості тягових підстанцій, підсилюючих пунктів та міжпідстанційних зон. Для прикладу будемо використовувати еквівалентну схему заміщення електрифікованої ділянки (рис. 2) обмежену $i-2$ та $i+2$ тяговими підстанціями, яка має два підсилюючих пункти $i-1$ та $i+1$ (рис. 3).

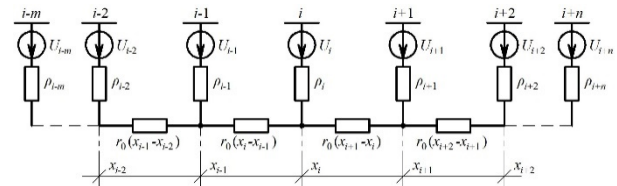


Рис. 3. Еквівалентна схема заміщення електрифікованої ділянки

Для використання методу накладання, на розрахунковій ділянці необхідно вибрати деяку i -ту тягову підстанцію з кількістю m тягових підстанцій та підсилюючих пунктів ліворуч від обраної та з n тяговими підстанціями та підсилюючими пунктами праворуч. Тоді розрахункова схема буде мати вигляд рис. 4.

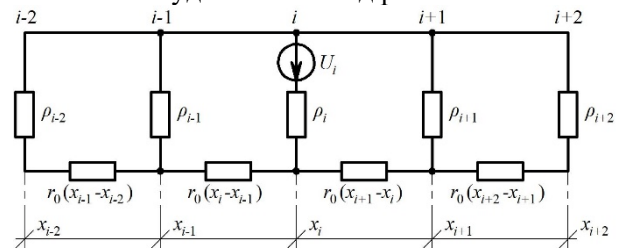


Рис. 4. Розрахункова схема для i -тої тягової підстанції: ρ – внутрішній опір відповідної тягової підстанції / підсилюючого пункту; U – напруга холостого ходу відповідної тягової підстанції / підсилюючого пункту; r_0 – опір 1 км контактної мережі; x – координата відповідної тягової підстанції / підсилюючого пункту

Для визначення струму I_i від i -тої тягової підстанції або підсилюючого пункту за умови відсутності навантаження на дослідній ділянці скористаємося законом Ома:

$$I_i = \frac{U_i}{R_{\text{екв}}}, \quad (2)$$

де $R_{\text{екв}}$ – еквівалентний опір стуму i -тої тягової підстанції, Ом.

Для визначення еквівалентного опору $R_{\text{екв}}$ необхідно ліву та праву частину розрахункової схеми відносно i -тої тягової підстанції звести

до єдиного опору. Запишемо ці величини як R_L та R_R відповідно. В такому випадку розрахункова схема матиме вигляд рис. 5.

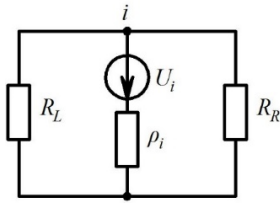


Рис. 5. Розрахункова схема для визначення еквівалентного опору: R_L — еквівалентний опір тягової мережі з урахуванням внутрішнього опору тягових підстанцій та підсилюючих пунктів зліва від i -тої ТП;

R_R — еквівалентний опір тягової мережі з урахуванням внутрішнього опору тягових підстанцій та підсилюючих пунктів справа від i -тої ТП

Розрахунок R_L та R_R проводиться циклічно для послідовних та паралельних з'єднань. Загальна формула для визначення опору зліва та справа від i -тої тягової підстанції при загальній кількості тягових підстанцій та підсилюючих пунктів N має вигляд:

$$R_L(i) = \begin{cases} \emptyset & i = 1 \\ \rho_1 + r_1 & i = 2 \\ \frac{R_L(i-1) \cdot \rho_{i-1}}{R_L(i-1) + \rho_{i-1}} \cdot r_{i-1} & i > 2 \end{cases}, \quad (3)$$

$$R_R(i) = \begin{cases} \emptyset & i = N \\ \rho_N + r_{N-1} & i = N-1 \\ \frac{R_R(N-1) \cdot \rho_{N-1}}{R_R(N-1) + \rho_{N-1}} \cdot r_i & i < N-1 \end{cases}, \quad (4)$$

де i — номер розрахункової тягової підстанції;

ρ — внутрішній опір тягової підстанції;

r — опір ділянки тягової мережі між тяговими підстанціями;

N — загальна кількість тягових підстанцій та підсилюючих пунктів на розрахунковій ділянці.

Тоді опір для визначення складової струму i -тої тягової підстанції:

$$R_{\text{екв}} = \begin{cases} \rho_i + R_R(i), & R_L(i) = \emptyset \\ \rho_i + R_L(i), & R_R(i) = \emptyset \\ \rho_i + \frac{1}{\frac{1}{R_L(i)} + \frac{1}{R_R(i)}} & R_L(i) \neq \emptyset \wedge R_R(i) \neq \emptyset \end{cases} \quad (5)$$

Розрахунок вирівнюючих струмів

При наявності електрорухомого складу на розрахунковій ділянці визначення вирівнюючих струмів проводиться шляхом розділення на ліву та праву складові струму від кожної тягової підстанції або підсилюючого пункту (рис. 6).

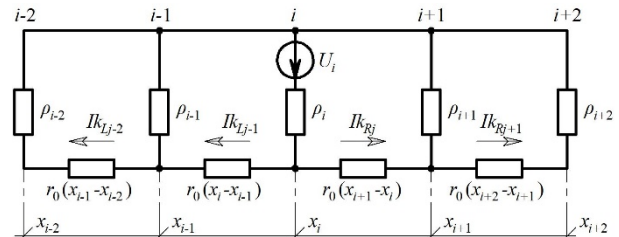


Рис. 6. Розподіл струмів на ділянці від i -тої тягової підстанції

Струми ліворуч визначаються, починаючи з останньої тягової підстанції (підсилюючого пункту), для цього використовується принцип розподілу струмів між декількома паралельними вітками. Якщо розраховується ділянка безпосередньо зліва від тягової підстанції (підсилюючого пункту), що розглядається, то струм визначається за формулою:

$$I_k = I_i \cdot \frac{R_R(i)}{R_R(i) + R_L(i)}. \quad (6)$$

Якщо розглядається ділянка, яка у даних умовах накладання не містить праворуч джерела живлення (тягової підстанції або підсилюючого пункту), то струми на цій ділянці визначаються згідно з розподілом струмів на попередній ділянці:

$$I_k = I_{k-1} \cdot \frac{\rho_{i-1}}{R_L(i-1) + \rho_{i-1}}. \quad (7)$$

Якщо обрано крайню тягову підстанцію, то струм на ділянці повністю рівний складовій $I_k = I_i$.

Для струмів, що протікають праворуч від тягової підстанції, що розглядається, умови розрахунку будуть аналогічними. Відповідно, формули для визначення струмів на ділянках:

$$I_k = I_i \cdot \frac{R_L(i)}{R_R(i) + R_L(i)}, \quad (8)$$

$$I_k = I_{k-1} \cdot \frac{\rho_i}{R_L(i) + \rho_i}, \quad (9)$$

$$I_k = I_i \quad (10)$$

Для зручності, проміжні результати розрахунків лівих (11) та правих (12) частин струмів

записуються у матриці розмірністю $N \times K$, де K – кількість міжпідстанційних зон, $K = N - 1$.

$$I_{k_{Lij}} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ I_{k_{L21}} & 0 & 0 & 0 \\ I_{k_{L31}} & I_{k_{L32}} & 0 & 0 \\ I_{k_{L41}} & I_{k_{L42}} & I_{k_{L43}} & 0 \\ I_{k_{L51}} & I_{k_{L52}} & I_{k_{L53}} & I_{k_{L54}} \end{vmatrix} \quad (11)$$

$$I_{k_{Rij}} = \begin{vmatrix} I_{k_{R11}} & I_{k_{R12}} & I_{k_{R13}} & I_{k_{R14}} \\ 0 & I_{k_{R22}} & I_{k_{R23}} & I_{k_{R24}} \\ 0 & 0 & I_{k_{R33}} & I_{k_{R34}} \\ 0 & 0 & 0 & I_{k_{R44}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (12)$$

Приймаючи правило знаків при протіканні струмів по ділянках: +1 – напрямок протікання струму зліва направо, -1 – напрямок протікання струму справа наліво, та складаючи їх за стовпчиками отримаємо вектор результуючого розподілу струму.

$$I_{k_j} = I_{k_{Rj}} - I_{k_{Lj}} \quad (13)$$

$$I_{k_{Rj}} = \left| \sum_{i=1}^N I_{k_{Ri1}} \quad \sum_{i=1}^N I_{k_{Ri2}} \quad \sum_{i=1}^N I_{k_{Ri3}} \quad \sum_{i=1}^N I_{k_{Ri4}} \right| \quad (14)$$

$$I_{k_{Lj}} = \left| \sum_{i=1}^N I_{k_{Li1}} \quad \sum_{i=1}^N I_{k_{Li2}} \quad \sum_{i=1}^N I_{k_{Li3}} \quad \sum_{i=1}^N I_{k_{Li4}} \right| \quad (15)$$

Розрахунок функції опору $f_R(x)$

Для різних схем живлення контактної мережі закономірність зміни опору тягової мережі відносно рухомого навантаження (функція опору $f_R(x)$) різна, тому доцільно враховувати закон зміни опору не лише для основних схем живлення [11].

Розрахунок функції опору $f_R(x)$ для електрифікованої ділянки з кількістю тягових підстанцій і підсилюючих пунктів N та $N-1$ міжпідстанційних зон повинен виконуватись з урахуванням всіх тягових підстанцій і підсилюючих пунктів, їх внутрішнього опору та опору тягової мережі [12]. У разі розрахунку двокільної ділянки необхідно враховувати схеми роздільного, вузлового, паралельного, а в деяких випадках, неповного паралельного живлення. Для цих випадків визначення функції опору, базуючись на погонних параметрах схеми та графіку руху поїздів, враховує місце розташування електровоза відносно вузлів паралельного з'єднання контактних підвісок. Узагальнена заступна схема для розрахунків зображена на рис. 7.

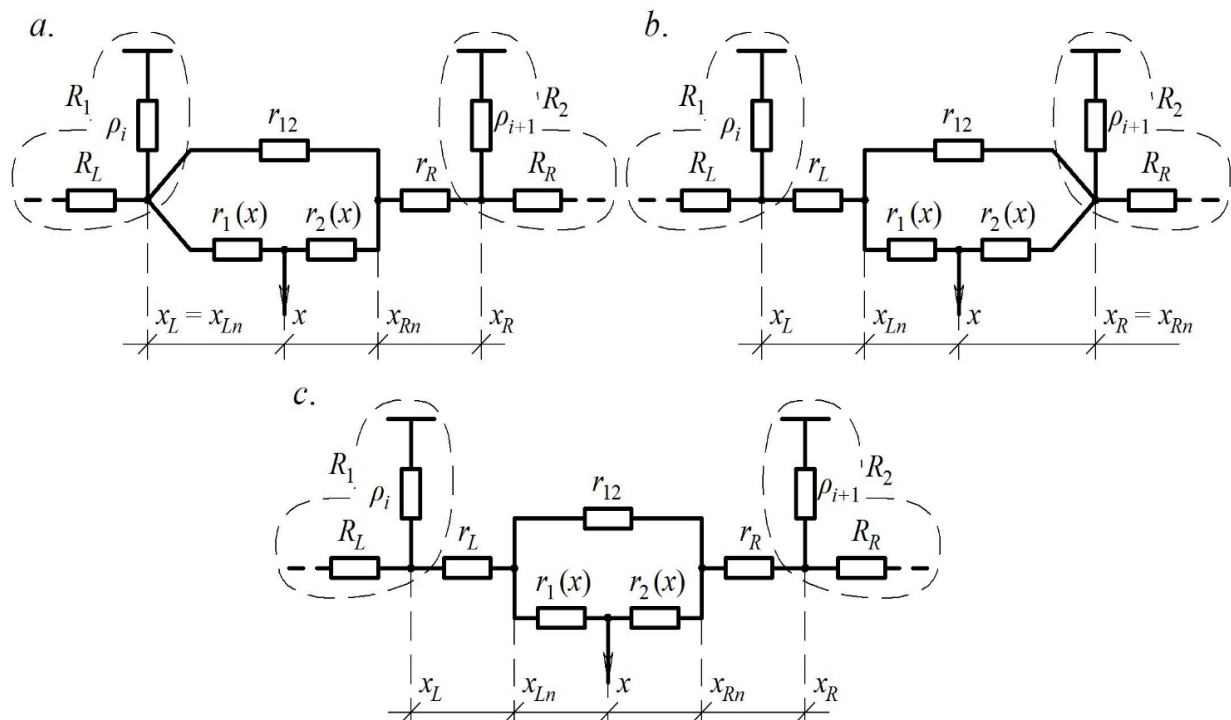


Рис. 7. Узагальнена схема заміщення двокільної ділянки тягової мережі:

- a – при знаходженні ЕРС між i -тою тяговою підстанцією/підсилюючим пунктом та першим ППЗ;
- b – при знаходженні ЕРС між другим ППЗ та $i+1$ тяговою підстанцією/підсилюючим пунктом;
- c – при знаходженні ЕРС між першим ППЗ та ПСК або ПСК та другим ППЗ

Найближчі вузли паралельного з'єднання контактних підвісок x_{Ln} та x_{Rn} і координати тягових підстанцій/підсилюючих пунктів x_L , x_R визначаються за допомогою матриці схеми S . Далі знаходяться складові схеми (рис. 7) за формулами (16 – 22).

Складові, що враховують внутрішній опір відповідної тягової підстанції/підсилюючого пункту та опір ділянки зліва / справа від неї:

$$R_1 = \frac{1}{\frac{1}{R_L(i)} + \frac{1}{\rho_i}} \quad (16)$$

$$R_2 = \frac{1}{\frac{1}{R_R(i+1)} + \frac{1}{\rho_{i+1}}} \quad (17)$$

Опір ділянки між тяговою підстанцією/підсилюючим пунктом та найближчим вузлом паралельного з'єднання контактних підвісок:

$$r_L = \frac{1}{2}(x_{Ln} - x_L) \cdot r_0 \quad (18)$$

$$r_R = \frac{1}{2}(x_R - x_{Rn}) \cdot r_0 \quad (19)$$

Опір ділянки між вузлами паралельного з'єднання контактних підвісок:

$$r_{12} = (x_{Rn} - x_{Ln}) \cdot r_0 \quad (20)$$

Опір ділянки між тяговим навантаженням та найближчим вузлом паралельного з'єднання контактних підвісок:

$$r_1(x) = (x - x_{Ln}) \cdot r_0 \quad (21)$$

$$r_2(x) = (x_{Rn} - x) \cdot r_0 \quad (22)$$

Відповідно до рис.8 опори ділянок $r_1(x)$, $r_2(x)$, r_{12} перетворюються зі схеми з'єднання «трикутник» в схему «зірка» [13] з опорами в променях $r_a(x)$, $r_b(x)$, $r_c(x)$:

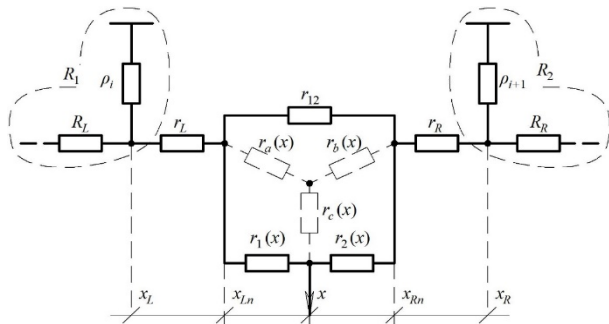


Рис. 8. Розрахункова схема заміщення

В результаті функція опору матиме вигляд:

$$f_R(x) = \begin{cases} r_c(x) + \frac{1}{\frac{1}{r_a(x) + R_1 + r_L} + \frac{1}{r_b(x) + R_2 + r_R}}, & x_{Ln} \neq x_{Rn} \\ \frac{1}{\frac{1}{R_1 + r_L} + \frac{1}{R_2 + r_R}}, & x_{Ln} = x_{Rn} \end{cases} \quad (23)$$

Розрахунок енергетичних показників системи тягового електропостачання

Визначення основних показників системи тягового електропостачання (U_{min} , ΔP , ΔW) базується на функції струмозподілу тягових підстанцій (28). Результатом розрахунку даної функції $\bar{F}(x, S)$ є вектор, який складається з потенціалів у вузлах розрахункової схеми в місцях підключення фідерів тягових підстанцій, точок з'єднання контактних підвісок колій та ЕРС, що знаходиться на міжпідстанційних зонах.

$$\bar{F}(x, S) = |G| \cdot |A(S)|^{-1} \cdot \bar{B} \quad (24)$$

де $|G|$ – діагональна матриця провідностей тягових підстанцій;

$|A(S)|$ – базисна матриця схеми, побудована за допомогою метода вузлових потенціалів;

$\bar{B}$ – вектор задаючих струмів в вузлах.

Розрахунок функції струмозподілу виконується за допомогою методу вузлових потенціалів у матричному вигляді. Слід зауважити, що розмірність матриць залежить від кількості вузлів у розрахунковій схемі. Для розрахункової ділянки зображеної на рис. 9 еквівалентна схема заміщення без врахування навантажень матиме вигляд рис. 10.

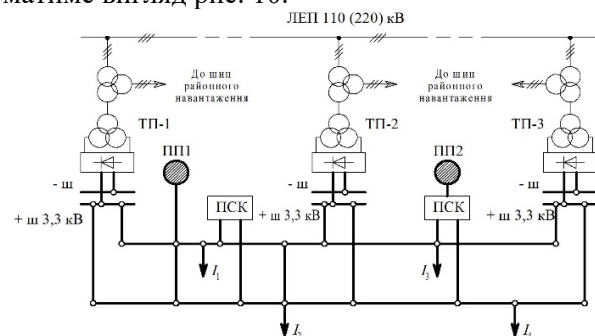


Рис. 9. Схема ділянки для визначення потенціалів у вузлах

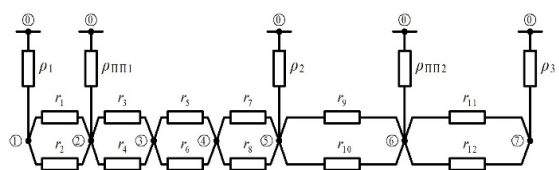


Рис. 10. Схема заміщення дослідної ділянки без навантажень

У випадку, коли на розрахунковій ділянці відсутні навантаження (рис. 10), схема заміщення може бути описана квадратною базисною матрицею $|A(S)|$ (25) по головній діагоналі

$$A(S) = \begin{vmatrix} \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} & -\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} & \frac{1}{\rho_{\text{III1}}} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} & -\frac{1}{r_5} - \frac{1}{r_6} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} & \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6} & -\frac{1}{r_4} - \frac{1}{r_5} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{r_5} - \frac{1}{r_6} & \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6} + \frac{1}{r_7} + \frac{1}{r_8} & -\frac{1}{r_7} - \frac{1}{r_8} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_7} - \frac{1}{r_8} & \frac{1}{\rho_2} + \frac{1}{r_7} + \frac{1}{r_8} + \frac{1}{r_9} + \frac{1}{r_{10}} & -\frac{1}{r_9} - \frac{1}{r_{10}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_9} - \frac{1}{r_{10}} & \frac{1}{\rho_{\text{III2}}} + \frac{1}{r_9} + \frac{1}{r_{10}} + \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} & -\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} & \frac{1}{\rho_3} + \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} \end{vmatrix} \quad (25)$$

Матриця провідностей тягових підстанцій та підсилюючих пунктів $|G|$ також є квадратною по головній діагоналі котрої, відповідно до вузла підключення, записані власні провідності тягових підстанцій/підсилюючих пунктів (26). Для схеми без навантажень вектор задаючих струмів $\bar{B}$ буде заповнений нулями (27).

$$G = \begin{vmatrix} \frac{1}{\rho_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_{\text{III1}}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_{\text{III2}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_3} \end{vmatrix} \quad (26)$$

$$\bar{B}^T = |0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0| \quad (27)$$

У момент часу, коли навантаження на розрахунковій ділянці знаходиться у вузлах (навантаження I_2, I_3 рис. 9) схема заміщення залишається майже незмінною, додатково будуть вказані лише дані навантаження (рис. 11).

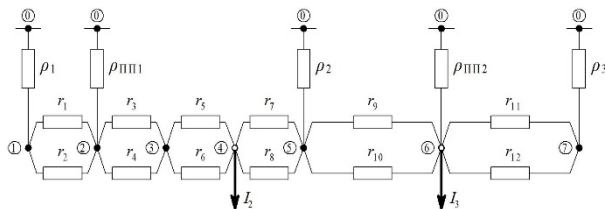


Рис. 11. Схема заміщення з навантаженням у вузлах

Базисна матриця схеми та матриця провідностей залишаться незмінними (25, 26). У векторі задаючих струмів, відповідно до ву-

якої записані власні результуючі провідності віток, решта елементів матриці представляє собою провідності зв'язків між попереднім та наступним вузлом [14, 15].

$$\bar{B}^T = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & I_2 & 0 & I_3 & 0 \end{vmatrix} \quad (28)$$

У момент часу, коли навантаження на розрахунковій ділянці знаходиться між вузлами (наприклад навантаження I_4 рис. 9) схема заміщення набуває наступного вигляду (рис. 12).

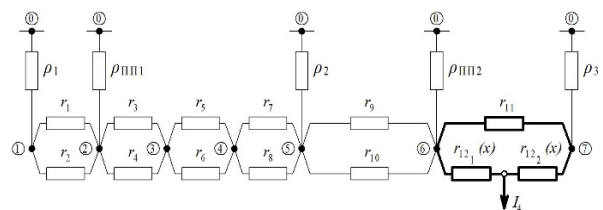


Рис. 12. Схема заміщення з навантаженням між вузлами

При цьому величини опорів $r_{12_1}(x)$, $r_{12_2}(x)$, що з'являються між ЕРС та суміжними вузлами, будуть функціонально залежними від місцезнаходження ЕРС. Додатково відбувається перетворення «трикутник – зірка» опорів r_{11} , $r_{12_1}(x)$, $r_{12_2}(x)$ в результаті чого буде отримано нові опори $r_a(x)$, $r_b(x)$, $r_c(x)$, один додатковий вузол та, як результат, нову схему заміщення (рис. 13).

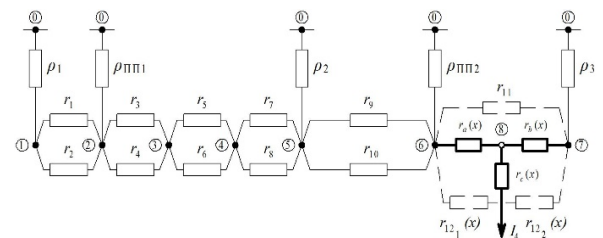


Рис. 13. Схема заміщення з перетворенням
«трикутник – зірка»

У такому випадку, побудова базисної матриці схеми передбачає розрив існуючих зв'язків між 6 і 7 вузлом (рис. 10), (25) та їх заміну на нові, з урахуванням додаткового вузла та нових опорів, отриманих в результаті перетворення. Таким чином базисна матриця схеми

$$A(S) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} & -\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} & \frac{1}{\rho_{ПП1}} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} & -\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} & \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6} & -\frac{1}{r_5} - \frac{1}{r_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{r_5} - \frac{1}{r_6} & \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6} + \frac{1}{r_7} + \frac{1}{r_8} & -\frac{1}{r_7} - \frac{1}{r_8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_7} - \frac{1}{r_8} & \frac{1}{r_7} + \frac{1}{r_8} + \frac{1}{r_9} + \frac{1}{r_{10}} & -\frac{1}{r_9} - \frac{1}{r_{10}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_9} - \frac{1}{r_{10}} & \frac{1}{\rho_{ПП2}} + \frac{1}{r_9} + \frac{1}{r_{10}} + \frac{1}{r_a(x)} & 0 & 0 & -\frac{1}{r_a(x)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_9} - \frac{1}{r_{10}} & \frac{1}{\rho_{ПП2}} + \frac{1}{r_9} + \frac{1}{r_{10}} + \frac{1}{r_a(x)} & 0 & -\frac{1}{r_b(x)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_3} + \frac{1}{r_b(x)} & -\frac{1}{r_b(x)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_a(x)} & \frac{1}{r_b(x)} & \frac{1}{r_a(x)} + \frac{1}{r_b(x)} \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$G = \begin{pmatrix} \frac{1}{\rho_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_{ПП1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_{ПП2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\rho_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$\bar{B}^T = |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ I_4| \quad (31)$$

Для заданої миттєвої схеми (рис. 9) схема заміщення з урахуванням перетворень матиме вигляд (рис. 14), базисна матриця схеми матиме розмірність $|A(S)| 9 \times 9$, матриця провідностей – $|G| 9 \times 9$, вектор задаючих струмів – $\bar{B} 1 \times 9$.

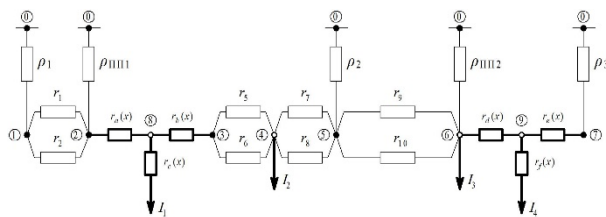


Рис. 14. Схема заміщення до рис. 9

Таким чином, описані матриці $|A(S)|$, $|G|$ та $\bar{B}$ є динамічними та змінюють свій розмір в залежності від поїзної ситуації на розрахунковій ділянці та місцеположення окремого навантаження.

$|A(S)|$ змінить свою розмірність з 7×7 (25) на 8×8 (29). Відповідно також збільшиться матриця провідностей тягових підстанцій та підсилюючих пунктів $|G|$ (30) та вектор задаючих струмів $\bar{B}$ (31).

На рис. 15 зображено графічне представлення функцій струморозподілу тягових підстанцій та підсилюючих пунктів відповідно до рис. 9 отриманих за допомогою описаного методу при русі першого навантаження розрахунковою ділянкою.

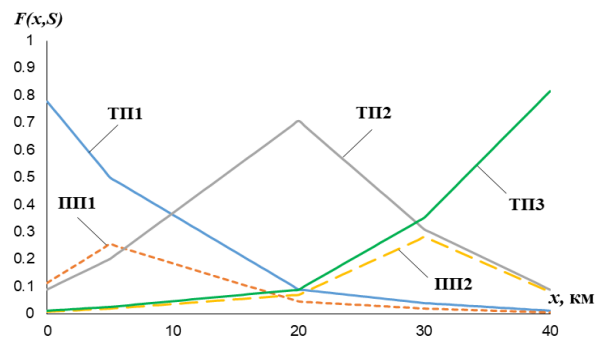


Рис. 15. Функції струморозподілу тягових підстанцій та підсилюючих пунктів

За допомогою отриманих потенціалів у вузлах схеми, опорів віток між ними та графіка руху поїздів визначається розподіл струмів в контактній мережі. Для цього спочатку визначається струморозподіл у заданій схемі живлення від одного навантаження, наприклад для ділянки між першим та другим вузлом (рис. 14) струм, що протікає в контактній мережі першої колії буде визначатись:

$$i_{K1} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{r_1}, \quad (32)$$

де ϕ_1 , ϕ_2 – потенціали відповідно першого та другого вузла, В;

r_1 – величина опору вітки між першим та другим вузлом, Ом.

Далі за допомогою принципу суперпозиції визначається розподіл струмів в контактній мережі від усіх поїздів та з урахуванням вирівнювальних струмів. Наприклад, для контактної мережі першої колії вузлової схеми живлення:

$$I_{K1}(x) = \sum_{i=1}^{n_1} I_{K1}(2i-1, x) + \sum_{i=1}^{n_2} I_{K1}(2i, x) + I_{\text{вир}} \quad (32)$$

де $2i-1$, $2i$ – визначають номери непарного та парного поїзду;

n_1, n_2 – кількість поїздів відповідно на першій та другій колії.

Функція розподілу струмів в контактній мережі в місці розташування ЕРС (рис. 16) має розрив першого роду $\lim_{x \rightarrow x_{\text{II}}-0} I_K(x) \neq \lim_{x \rightarrow x_{\text{II}}+0} I_K(x)$

[12] та в точці x_{II} набуває значення $\lim_{x \rightarrow x_{\text{II}}-0} I_K(x) = A$ і $\lim_{x \rightarrow x_{\text{II}}+0} I_K(x) = B$. Дане обумовлено тим, що навантаження отримує живлення з двох сторін, тобто струми в тяговій мережі можуть мати різні напрями протікання.

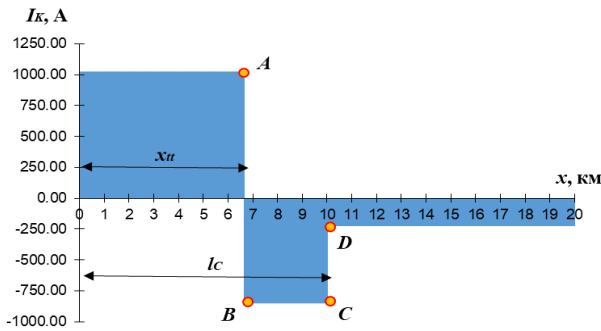


Рис. 16. Розподіл струму в контактній мережі

Визначення функції розподілу втрат напруги передбачає використання функції розподілу струмів в контактній мережі з накопичуючим домноженням на відповідну відстань та питомий опір мережі. При накопиченні використовується рекурсивний підхід, тобто визначення розподілу втрат напруги наступного інтервалу використовує втрату напруги попереднього рис. 17. Оскільки функція розподілу струму має розрив першого роду, а падіння напруги розраховується з лівої частини схеми, в подальших розрахунках втрат напруги використовується лівий ліміт.

Формалізований запис функції розподілу втрат напруги в контактній мережі першої колії матиме вигляд:

$$\Delta u_{K1}(n, x) = \Delta u_i(n, x) + r_0 \lambda(n, x) i_{K1}(n, x), \quad (33)$$

де $\Delta u_i(n, x)$ – значення втрати напруги у вузлі лівіше від навантаження, яке для $i > 0$ визначається як:

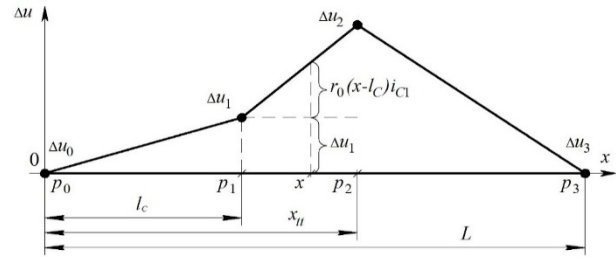


Рис. 17. Розподіл втрат напруги вздовж міжпідстанційної зони $p_0 - p_3$ – точки перегину кривої втрат напруги; l_c – відстань від тягової підстанції до ПСК; x_{II} – відстань від тягової підстанції до місця розташування ЕРС; L – довжина міжпідстанційної зони

$$\Delta u_i(n, x) = r_0 \sum_{j=0}^i (\bar{p}(n)_j - \bar{p}(n)_{j-1}) \lim_{x \rightarrow p(n)_j-0} i_{K1}(n, x) \quad (34)$$

де i – кількість перегинів функції розподілу втрат напруги, починаючи від 0.

У випадку коли $i = 0$ втрати напруги $\Delta u_i(n, x) = 0$.

У формулі (33) індекс i може бути обраним відповідно до умов:

$$i = \begin{cases} 0, p_0 \leq x < p_1; \\ 1, p_1 \leq x < p_2; \\ 2, p_2 \leq x < p_3; \\ \dots \end{cases} \quad (35)$$

$\bar{p}(n)$ – відсортований вектор координат, що складається з вузлів з'єднання контактних підвісок першої та другої колії ліворуч і праворуч від навантаження, позиції навантаження $x_{\text{II}}(n)$ та точок початку (0) та кінця розрахункової ділянки (L). Для вузлової схеми цей вектор може бути записаний як

$$\bar{p}(n) = \begin{cases} \{0; l_c; L\}, x_{\text{II}}(n) = 0 \vee x_{\text{II}}(n) = l_c \vee x_{\text{II}}(n) = L; \\ \{0; x_{\text{II}}(n); l_c; L\}, 0 < x_{\text{II}}(n) < l_c; \\ \{0; l_c; x_{\text{II}}(n); L\}, l_c < x_{\text{II}}(n) < L; \\ \{0; l_c; L\}, 0 < x_{\text{II}}(n) < L, n = 2i. \end{cases}, n = 2i-1; \quad (36)$$

За аналогією з функцією розподілу струмів в контактній мережі визначається розподіл втрат напруги в контактній мережі від усіх поїздів та з урахуванням впливу вирівнювальних струмів, а саме:

$$\Delta U_{K1}(x) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta U_{K1}(2i-1, x) + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta U_{K1}(2i, x) + I_{\text{вир}} \cdot r_0 \cdot x \quad (37)$$

Величина напруги на струмоприймачі електровоза з урахуванням взаємного впливу кожного навантаження на парній та, залежно від схеми живлення, непарній коліях визначається:

$$U_j(x) = U_{\text{ш}} - I_j(x) \cdot f_R(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n_1} \Delta U'_k(x, x_k) - \sum_{k=n_1}^{n_1+n_2} \Delta U''_k(x, x_k) \quad (38)$$

де k – номер навантаження на відповідній колії; n_1, n_2 – кількість навантажень на 1-й та 2-й коліях; $\Delta U'_k(x, x_k)$ – функція розподілу спаду напруги від k -го навантаження на попутній колії, В; $\Delta U''_k(x, x_k)$ – те ж на суміжній колії, В.

Різниця потужності, що згенерована тяговими підстанціями та пунктами підсилення і потужності, яку споживає ЕРС в кожній точці схеми визначає розподіл втрат потужності вздовж дослідної ділянки. Інтегрування втрат потужності за часом визначає втрати електроенергії при русі ЕРС дослідною ділянкою.

Розрахунок на математичній моделі напруги на струмоприймачі електрорухомого складу

Для дослідження розробленої математичної моделі проводились розрахунки ділянки НД Вузол – П'ятихатки Придніпровської залізниці. Вихідні дані для проведення розрахунків були отримані експериментальним шляхом. Часові залежності споживаного струму та напруги на струмоприймачі поїзду масою 4532 т протягом руху дослідною ділянкою зображено на рис. 18, 19.

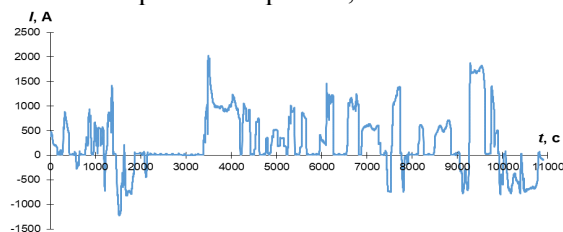


Рис. 18. Споживаний струм ЕРС

Результати розрахунку та дослідних вимірювань напруги на струмоприймачі ЕРС зображені на рис. 19.

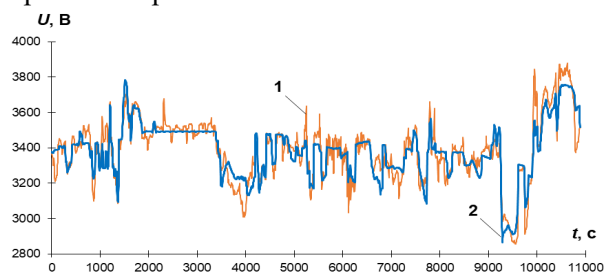


Рис. 19. Напруга на струмоприймачі ЕРС: 1 – експеримент; 2 – розрахунок на моделі

Також на створеній математичній моделі отримано розподіл втрат потужності в тяговій мережі при русі ЕРС дослідною ділянкою, що зображено на рис. 20. При цьому втрати електроенергії складають 904,3 кВт·год.

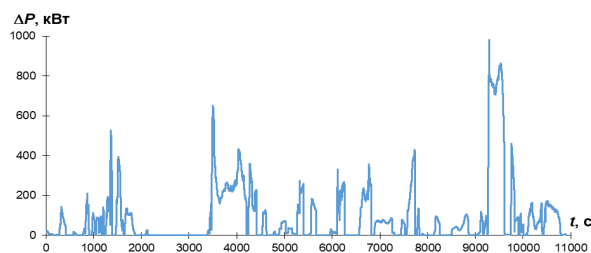


Рис. 20. Втрати потужності в тяговій мережі

В ході дослідження математичної моделі, середнє значення абсолютної та відносної похибки по відношенню до експериментальних даних склало 1,58 % та -0,075 %, що становить 53,07 та -4,18 В відповідно, 95 % значень абсолютної та відносної похибки на кумулятивній кривій імовірності знаходяться в межах до 4,5 та 3,78 % (рис. 21).

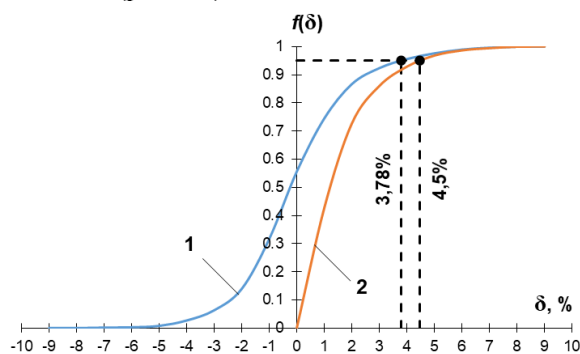


Рис. 21. Статистична функція розподілу похибок: 1 – відносна похибка, 2 – абсолютна похибка

В цілому точність розрахунків на математичній моделі відповідає умові $\delta \leq 5\%$ [16]. Значний діапазон похибки -141,37 ... 133 В обумовлений величиною стандартного відхилення ($\sigma = 69,99$ В).

На рис. 22 - 23 показано використання розробленої математичної моделі на тій же ділянці НД Вузол – П'ятихатки для оптимізації її режимів роботи. При цьому враховувався реальний графік руху поїзда масою 6098 т, параметри його струмоспоживання в залежності від профілю ділянки, внутрішні опори тягових підстанцій та напруги холостого ходу. Розглянута ділянка має вісім мжпідстанційних зон, на кожній з яких розташовано підсилюючий пункт.

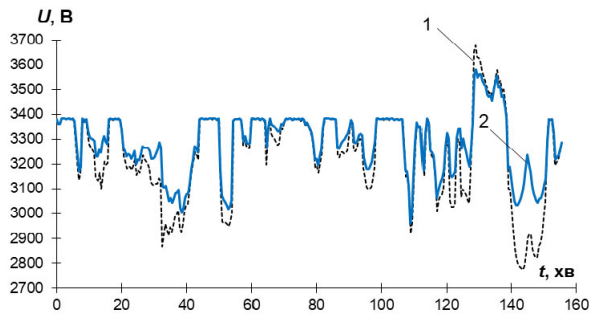


Рис. 22. Напруга на струмоприймачах ЕРС:
1 – базовий розрахунок; 2 – підсилення СТЕ підсилюючими пунктами

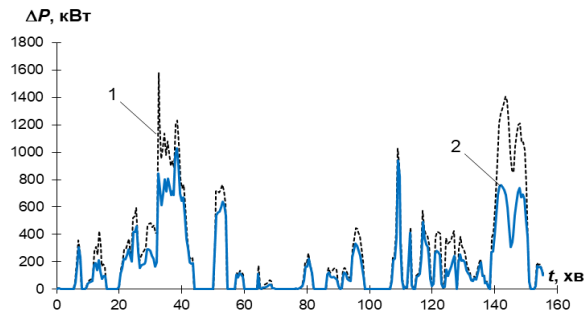


Рис. 23. Втрати потужності в тяговій мережі:
1 – базовий розрахунок; 2 – підсилення СТЕ підсилюючими пунктами

В результаті виконання поставлених розрахунків на дослідній ділянці втрати електроенергії при проході одного поїзда склали 2,6 МВт·год. За допомогою розподіленого елек-

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sychenko, V. G. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // Archives of Transport. — 2015. — Vol. 35, Iss. 3. — P. 63—70.
2. Dmitry Bosiy. Modeling of the controlled traction power supply system in the space-time coordinates / Dmitry Bosiy, Yevhen Kosarev // Transport Problems: an International Scientific Journal. — 2017. — № 3. — P. 5 – 19.
3. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / Б. А. Аржанников. — Екатеринбург: УрГУПС. 2010. — 176 с.
4. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. — М.: Транспорт, 1982. — 528 с.
5. Закарюкин, В. П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока / под. ред. А.В. Крюкова. Иркутск: ИрГУПС, 2010. — 160 с.
6. Андреев, В. В. Развитие методологии расчета систем тягового электроснабжения / В. В. Андреев, В. А. Гречишников, Ю. Н. Король, М. В. Шевлюгин // Ж.д. трансп. 2014. №8. С. 32.
7. Герман, Л.А. Матричные методы расчета си-

строснабжения возможно снизить эти втраты до значения 1,56 МВт·год. Крім того, при децентралізованому електропостачанні підвищується напруга в мережі, що позитивно впливає на безпеку руху та експлуатацію електрорухомого складу.

Висновки

Запропонований метод розрахунку миттєвих схем дозволяє виконати електричні розрахунки системи тягового електропостачання при споживанні електрорухомим складом заданої потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачеві. Даний метод розрахунку системи тягового електропостачання полягає в описі закономірності зміни опору тягової мережі з N тяговими підстанціями та $N-1$ міжпідстанційними зонами аналітичними функціями, які в сукупності з функціями струмозподілу та розподілу потенціалів у вузлах системи, дозволяють формалізувати електротехнічні розрахунки електротягових систем та перейти від дискретного до неперервного уявлення.

Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

REFERENCES

1. Sychenko, V. G. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // Archives of Transport. — 2015. — Vol. 35, Iss. 3. — P. 63—70.
2. Dmitry Bosiy. Modeling of the controlled traction power supply system in the space-time coordinates / Dmitry Bosiy, Yevhen Kosarev // Transport Problems: an International Scientific Journal. — 2017. — № 3. — P. 5 – 19.
3. Arzhannikov B. A. Sistema upravlyаемого elektrosnabzheniya elektryfytirovannykh zheleznykh doroh postoyannoho toka [The system of controlled power supply on the electrified DC railways]. Yekaterinburg: USURT Publ. 2010. 176 p.
4. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh doroh [Electricity electric-infected railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
5. Zakaryukyn V. P., Kryukov A. V. Metody sovmeshnoho modelirovaniya system tyahovoho y vneshneho elektrosnabzheniya zheleznykh doroh peremennoho toka [Methods for joint modeling of traction and external power supply systems for AC railroads] Yrkut-sk: YSURT, 2010. 160 p.
6. Andreev, V. V. Razvitye metodolohyy rascheta si-

системи тягового електропостачання / Л.А. Герман. – М.: РОСГУПС, 1998. – 36 с.

8. Тер-Оганов, Э. В. Применение имитационного моделирования для расчета и анализа работы системы электропостачання / Э. В. Тер-Оганов. – Екатеринбург: УЭМИИТ, 1993. – 56 с.

9. Блинкова С. А. Совершенствование методики расчета энергообеспеченности скоростных пассажирских перевозок на железных дорогах постоянного тока. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.07. – Самарский государственный университет путей сообщения. – Самара, 2015. – 120 с.

10. Гельман М. В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М. В. Гельман, М. М. Дудкин, К. А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

11. Босий, Д. О. Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності // Електрифікація транспорту. — 2014. — № 8. — С. 15—25.

12. Bosiy, D. Calculation of the Traction Power Supply Systems Using the Functions of Resistance / D. Bosiy, E. Kosarev // Problemy Kolejnictwa. — 2015. — Issue 168. — P. 7—14.

13. Rojek A. Traction power supply in 3 kV DC system. / A. Rojek // Warszawa: KOW media&marketing Sp. Z o.o., 2012. – 250 p.

14. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.

15. Основы теории цепей. Учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: «Энергия», 1975. – 752 с.

16. Почаевец Э. С. Обобщенные методы анализа режимов системы тягового электропостачання: учебн. пособие для вузов / Э. С. Почаевец. – Днепропетровск, 1981. – 55 с.

system tyahovoho elektrosnabzheniya [Development of methodology for calculating traction power supply systems] / V. V. Andreev, V. A. Hrechyshnykov, Yu. N. Korol', M. V. Shevlyuhyn // Railway transp. 2014. №8. p. 32.

7. Herman, L. A. Matrychnye metody rascheta systemy tyahovoho elektrosnabzheniya [Matrix methods for calculating the traction power supply system]. Moscow.: RUSSURT, 1998. – 36 p.

8. Ter-Ohanov E. V. Prymenenye ymytatsyonnoho modelyrovaniya dlya rascheta y analiza raboty systemy elektrosnabzheniya [The using of simulation for calculating and analyzing the operation of the power supply system]. Ekaterynburh: UEMMET, 1993. – 56 p.

9. Blynkova S. A. Sovershenstvovaniye metodyk rascheta enerhoobespechennosti skorostnykh passazhyrskiykh perevozok na zheleznykh dorozhakh postoyannogo toka [Perfection of the methodology for calculating the energy supply of high-speed passenger transportations on the railways of direct current]. Thesis for the PhD degree: 05.22.07. – Samara, 2015. – 120 p.

10. Hel'man M. V. Preobrazovatel'naya tekhnika: uchebnoe posobie [Conversion technology: a tutorial] / M. V. Hel'man, M. M. Dudkyn, K. A. Preobrazhenskyy. – Chelyabinsk: YuUrHU Publ., 2009. – 425 p.

11. Bosyy, D. O. Metodyka rozrakhunku myt-tyevykh skhem systemy tyahovoho elektropostachannya dlya spozhyvannya postynoyi potuzhnosti [The method of calculation schemes instant traction system power consumption constant power]. Elektrifikatsiya transport - Electrification of transport, 2014, no. 8, pp. 15-25.

12. Bosiy, D. Calculation of the Traction Power Supply Systems Using the Functions of Resistance / D. Bosiy, E. Kosarev // Problemy Kolejnictwa. — 2015. — Issue 168. — P. 7—14.

13. Rojek A. Traction power supply in 3 kV DC system. / A. Rojek // Warszawa: KOW media&marketing Sp. Z o.o., 2012. – 250 s.

14. Bessonov L. A. Teoretycheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektricheskiye tsepy [Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Electrical circuits]. Moscow, Gardariki Publ., 2006. 701 p.

15. Osnovy teoryi tsepey. Uchebnyk dlya vuzov [Fundamentals of circuit theory. Textbook for high schools] / H. V. Zeveke, P. A. Yonkyn, A. V. Netushyl, S. V. Strakhov. – Moscow: Enerhiya Publ., 1975. – 752 p.

16. Pochaevets E. S. Obobshchennyye metody analiza rezhymov systemy tyahovoho elektrosnabzheniya: uchebn. posobie dlya vuzov [Generalized methods for analyzing the regimes of the traction power supply system: Textbook manual for high schools]. – Dnepropetrovsk, 1981. – 55 p.

В статті розглянуто питання виконання розрахунків розподіленої системи тягового електропостачання постійного струму. Математична модель такої системи передбачає розташування на міжпідстанційній зоні ряду підсилюючих пунктів з можливістю регулювання їх вихідної потужності в режимі реального часу. При моделюванні враховано вплив сусідніх фідерних зон, перерозподіл потоків потужності за рахунок паралельної роботи тягових підстанцій і підсилюючих пунктів та основну концепцію розподіленого живлення: збільшення явища впливу вирівнюючих струмів через наявність більшої кількості джерел з різною напругою

на шинах. Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин дозволяє значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

Ключові слова: математична модель; метод розрахунку; постійний струм; розподілена система; підсилюючий пункт; функція опору; втрати напруги.

УДК 621.331.3

Е. Н. КОСАРЕВ (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна 49010, Днепр, ул. Лазаряна, 2, тел. +38(056) 373-15-25, e-mail: kosarev@e.diiit.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3574-7414, ResearcherID: D-3107-2016, Scopus Author ID: 57188751578

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В статье рассмотрены вопросы выполнения расчетов распределенной системы тягового электроснабжения постоянного тока. Математическая модель такой системы предусматривает расположение на межподстанционной зоне ряда усиливающих пунктов с возможностью регулирования их выходной мощности в режиме реального времени. При моделировании учтено влияние соседних фидерных зон, перераспределение потоков мощности за счет параллельной работы тяговых подстанций и усиливающих пунктов, а также основную концепцию распределенного питания: увеличение явления влияния уравнивающих токов из-за наличия большего количества источников с разным напряжением на шинах. Возможность применения прямого расчета электрических величин позволяет значительно упростить дальнейшие оптимизационные расчеты режимов работы систем тягового электроснабжения.

Ключевые слова: математическая модель; метод расчета; постоянный ток; распределенная система; усиливающий пункт; функция сопротивления; потери напряжения.

UDC 621.331.3

YE. M. KOSARIEV (DNURT)

Dnipropetrovsk national University of railway transport named after acad. V. Lazaryan, 49010, Dnipro, 2 Lazaryana str., tel. +38(056)373-15-25, e-mail: kosarev@e.diiit.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3574-7414, ResearcherID: D-3107-2016, Scopus Author ID: 57188751578

MATHEMATICAL MODEL OF THE CONTROLLED DISTRIBUTED DC POWER SUPPLY SYSTEM

The article contains issues of performing the calculations for a distributed DC traction power supply system. The mathematical model of such system provides a number of boost points on intersubstation zone with the possibility of regulating their output power in real time. During the modeling was taken into account the influence of adjacent feeder zones, the redistribution of power flows due to the parallel operation of traction substations and boost points, as well as the basic concept of distributed power supply: increasing the phenomenon effect of equalizing currents due to a larger number of sources with different voltages on the buses. The possibility of applying a direct calculation of electrical quantities makes it possible significantly simplify further optimization calculations of the operation modes of traction power supply systems.

Keywords: mathematical model; calculation method; direct current; distributed system; boost point; resistance function; voltage drops.

Received 13.10.2017; accepted in revised form 11.12.2017.

А. М. АФАНАСОВ, О. С. ШАПОВАЛОВ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010,
тел. +38 (056) 373 15 41, ORCID: orcid.org/0000-0003-4609-2361

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИПРОБУВАНЬ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМАШИН

Вступ

Відповідно до ГОСТ 2582-81 [1] електричні машини тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту випробовують при прийнятно-здавальних випробуваннях протягом однієї години під струмом навантаження, що дає перевищення температури обмоток, відповідне перевищенню температури в номінальному режимі. Фактично це значення струму відповідає часовому режиму.

Правила ремонту тягових електромашин [2] допускають проведення випробувань на нагрівання при еквівалентному струмі, що дає перевищення температури, що відповідає перевищенню температури в номінальному режимі. Загальний якісний аналіз теплових процесів, що протікають під час випробувань на нагрів, показує, що енергія тепловіддачі за час нагрівання до заданого перевищення температури обмоток електромашини з ростом струму зменшується [3]. Отже, чим більше значення струму навантаження випробуваної електромашини, тим, за інших рівних умов, витрата електроенергії на її нагрівання менше.

Методика

Коефіцієнт енергетичної ефективності нагрівання обмоток електромашини, представлений у вигляді відношення енергії, витраченої на підвищення температури обмотки якоря, до загальної теплової енергії, що виділилася в частинах випробуваної електромашини за час випробування, може бути знайдений як [3].

$$k_{\text{еф}} = \frac{T_{\text{е}} \cdot \tau_1}{\tau_{\infty}(t_1 + \alpha(\tau_{\infty}t_1 - \tau_1T_{\text{е}}))} \quad (1)$$

де $T_{\text{е}}$ – еквівалентна постійна часу нагрівання;

t_1 – час випробування;

τ_1 – перевищення температури на момент часу;

τ_{∞} – стале значення перевищення температури;

α – температурний коефіцієнт опору.

Величина $1/k_{\text{еф}}$ показує у скільки разів повна енергія втрат в якорі тягового електродвигуна при його випробуванні на нагрівання більше енергії, витраченої на нагрівання обмотки якоря.

При відомому значенні τ_1 час випробування t_1 може бути знайдено у вигляді [4].

$$t_1 = T_{\text{е}} \cdot \ln \frac{\tau_{\infty}}{\tau_{\infty} - \tau_1} \quad (1)$$

Результати теоретичних досліджень

У табл. 1 для прикладу наведені результати розрахунку залежностей $t_1 = f(I)$, $k_{\text{еф}} = f(I)$ і $1/k_{\text{еф}} = f(I)$, отримані для тягового електродвигуна НБ-406Б магістрального вантажного електровоза ВЛ8 з використанням теплових характеристик його обмотки якоря ($\tau_1 = 120^{\circ}\text{C}$).

Таблиця 1

Результат розрахунку залежностей $t_1 = f(I)$ і $k_{\text{еф}} = f(I)$ для тягового електродвигуна НБ-406Б

I, A	340	380	440	485	530	600
$t_1, \text{хв.}$	∞	56,5	28,9	20,4	14,9	10,4
$k_{\text{еф}}$	0	0,43	0,57	0,63	0,67	0,7
$1/k_{\text{еф}}$	∞	2,32	1,75	1,59	1,5	1,42

Графічні залежності $t_1 = f(I)$, $k_{\text{еф}} = f(I)$ і $1/k_{\text{еф}} = f(I)$, отримані для тягового двигуна НБ-406Б (табл. 1), зображені на рис. 1, а для тягового двигуна ДТ-9Н (табл. 2) – на рис. 2.

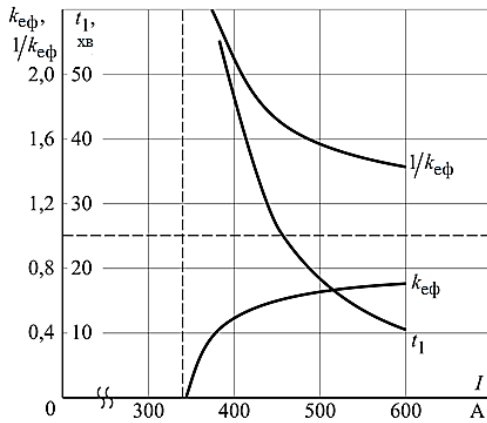


Рис. 1. Залежності $t_1 = f(I)$, $k_{\text{еф}} = f(I)$ і $1/k_{\text{еф}} = f(I)$ для тягового двигуна НБ-406

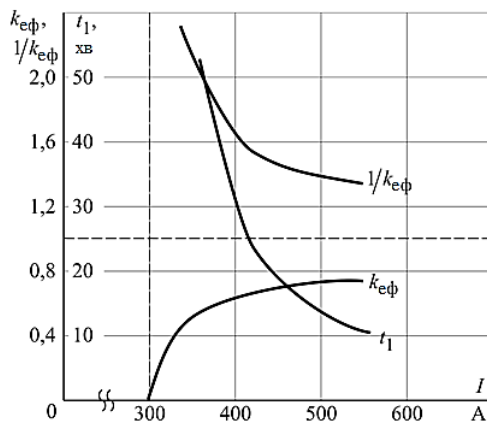


Рис. 2. Залежності $t_1 = f(I)$, $k_{\text{еф}} = f(I)$ і $1/k_{\text{еф}} = f(I)$ для тягового двигуна ДТ-9Н

Ступінь зниження витрат електроенергії для проведення випробувань на нагрівання з підвищеним струмом навантаження може бути визначена у вигляді відношення коефіцієнтів енергетичної ефективності в порівнюваних режимах.

З даних табл. 1 і графіків на рис. 1 видно, що при випробуваннях на нагрів тягового двигуна НБ-406Б під струмом навантаження, близьким до пускового значення (485 А), сумарні втрати енергії в якорі майже в півтора рази нижче, ніж при годинному режимі (380 А). При цьому час випробувань на нагрівання зменшується майже в три рази.

З даних табл. 2 і графіків на рис. 2 видно, що при випробуваннях на нагрівання тягового дви-

гуна ДТ-9Н під струмом навантаження, близьким до значення п'ятнадцяти хвилинного режиму (480 А), сумарні втрати енергії в якорі більш ніж в півтора рази нижче, ніж при годинному режимі (335 А). При цьому час випробувань на нагрівання зменшується в чотири рази. Необхідно відзначити, що сумарні електричні втрати енергії в інших обмотках випробовуваної електромашини при збільшенні випробувального значення сили струму знижуються не в меншій мірі, ніж втрати в лімітуючій обмотці (обмотці якоря). Дані висновки будуть справедливими і для інших типів тягових електродвигунів тягового рухомого складу магістрального та промислового транспорту.

Висновки

В результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

- енергетична ефективність випробування на нагрівання може бути представлена як комплексний параметр, що залежить як від енергетичної ефективності системи взаємного навантаження так енергетичної ефективності нагрівання обмоток випробовуваних електромашин;
- енергетична ефективність нагрівання обмоток випробовуваної тягової електромашини залежить як від теплових характеристик електромашини, так і від струму навантаження, зі збільшенням якого коефіцієнт енергетичної ефективності нагрівання підвищується, а час проведення випробування зменшується;
- найбільш раціональними для випробування на нагрівання тягових двигунів електрорухомого складу магістрального та промислового транспорту є часовий струм і струм п'ятнадцяти хвилинного режиму відповідно;
- використання пускового і п'ятнадцяти хвилинного струмів навантаження дозволяє зменшити витрату електроенергії на випробування тягових електромашин на нагрів не менше ніж на 30% (в порівнянні з годинним режимом), а також зменшує час випробувань на нагрівання в три-чотири рази.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 34 с.
2. Правила ремонту електричних машин електровозів і електропоїздів. ЦТ-0063 [Текст]. – К.: Видawnичий дім «САМ», 2003. – 286 с.
3. Афанасов, А.М. Энергетическая эффектив-

REFERENCES

1. GOST 2582-81. Mashiny ehlektricheskie vrashchayushchiesya tyagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. – Vved. 1983-01-01. – M.: Izd-vo standartov, 1981. – 34 s.
2. Pravyla remontu elektrychnykh mashyn elektrovoziv i elektropoyizdiv. TsT-0063 [Tekst]. – K.: Vydavnichyy dim «SAM», 2003. – 286 s.

ность нагревания обмоток тяговых электромашин при приёмо-сдаточных испытаниях [Текст] / А. М. Афанасов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/8(59). – С. 6-9.

4. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины : учеб. пособие для вузов / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. – М. : Транспорт, 1991. – 343 с.

3. Afanasov, A.M. EHnergeticheskaya ehffektivnost' nagrevaniya obmotok tyagovykh ehlektromashin pri priyomo-sdatochnykh ispytaniyakh [Tekst] / A. M. Afanasov // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij. – 2012. – № 5/8(59). – S. 6-9.

4. Zaharchenko, D. D. Tyagovye ehlektricheskie mashiny : ucheb. posobie dlya vuzov / D. D. Zaharchenko, N. A. Rotanov. – M. : Transport, 1991. – 343 s.

На даний час існуючі стенди для випробування тягових електричних машин не відрізняються високою енергоефективністю, що призводить до значних витрат електроенергії під час випробувань. В статті наведено результати аналізу впливу струму навантаження тягових електромашин при їх випробуванні на нагрівання на загальні витрати електроенергії на випробування. На прикладі електродвигунів НБ-406 і ДТ-9Н отримані аналітичні і графічні залежності коефіцієнта енергетичної ефективності і часу проведення випробування від струму навантаження. Показано, що збільшення струму навантаження при випробуванні на нагрівання дозволяє суттєво знизити витрати електроенергії, а також зменшити час випробування без зниження його якості. Результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень можуть бути використані для зменшення витрат електроенергії і часу під час проведення випробувань тягових електричних машин рухомого складу.

Ключові слова: тягова електромашина; випробування на нагрівання; енергетична ефективність; струм навантаження; витрата електроенергії.

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ, О. С. ШАПОВАЛОВ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 41, ORCID: orcid.org/0000-0003-4609-2361

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН

В настоящее время существующие стенды для испытания тяговых электрических машин не отличаются высокой энергоэффективностью, что приводит к значительным затратам электроэнергии во время испытаний. В статье приведены результаты анализа влияния тока нагрузки тяговых электромашин при их испытании на нагрев на общие расходы электроэнергии на испытания. На примере электродвигателей НБ-406 и ДТ-9Н получены аналитические и графические зависимости коэффициента энергетической эффективности и времени проведения испытания от тока нагрузки. Показано, что увеличение тока нагрузки при испытании на нагрев позволяет существенно снизить расходы электроэнергии, а также уменьшить время испытания без снижения его качества. Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы для уменьшения расхода электроэнергии и времени во время проведения испытаний тяговых электрических машин подвижного состава.

Ключевые слова: тяговая електромашина; испытания на нагрев; энергетическая эффективность; ток нагрузки; расход электроэнергии.

UDC 629.423.31-048.24

A. M. AFANASOV, O. S. SHAPOVALOV (DNURT)

Department Electric rolling stock of railways, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 373 15 41, ORCID: orcid.org/0000-0003-4609-2361

ENERGY EFFICIENCY INCREASE OF TRACTION ELECTRICAL MACHINES TESTING

At present, existing stands for testing traction electric machines do not differ in their high energy efficiency, which results in significant electricity consumption during testing. The article presents the results of the analysis of the influence of load current of traction electric machines during their testing on heating on total electric energy consumption for testing. On the example of electric motors NB-406 and DT-9N analytical and graphical dependences of the energy efficiency coefficient and time of the test on the load current are obtained. It is shown that increasing the load current when tested for heating allows to significantly reduce the cost of electricity, as well as reduce the test time without reducing its quality. The results of the theoretical and experimental studies can be used to reduce the cost of electricity and time during the testing of traction electric vehicles rolling stock.

Keywords: traction electric machine; mutual loading; electric power magnetic; electric driving force; the regulation.

Received 11.10.2017; accepted in revised form 12.12.2017.

© Афанасов А. М., Шаповалов О. С., 2017

О. Ю. БАЛІЙЧУК, Л. В. ДУБИНЕЦЬ, О. Л. МАРЕНИЧ, О. О. ЛИСЕНКО

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта: lejbaliychuk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0119-1446>, <https://orcid.org/0000-0003-0319-4544>, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5851>

ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НЕСТАНДАРТНОГО ОБЛАДНАННЯ ПІДПРИЄМСТВ З РЕМОНТУ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

Вступ

Енергія, і зокрема електрична, є одним з найважливіших продуктів у сучасному розвиненому суспільстві. Як і всі природні ресурси, енергетичні ресурси можуть виснажитися, тому важливо заощаджувати якомога більшу кількість енергії.

Енергозбереження як діяльність (організаційна, наукова, практична, інформаційна), спрямована на раціональне використання енергії і природних енергетичних ресурсів – державна проблема.

Серед споживачів електричної енергії значну частку складають електродвигуни різного призначення, що споживають суттєву частку виробленої енергії. Загальна встановлена потужність асинхронних двигунів (АД) в Україні складає близько 40...50 млн. кВт [1].

Постановка задачі

Значна кількість електроприводів встановлена на устаткуванні, яке використовується на підприємствах з ремонту залізничної техніки (локомотивні та вагонні депо, заводи з ремонту рухомого складу залізниць та ін.). Тому розробка рекомендацій з вибору раціональних режимів роботи електроприводів технологічних установок на вказаних підприємствах з точки зору їх енергетичних показників, до яких належать втрати потужності та енергії, коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$), є безумовно актуальним питанням.

В даній роботі досліджується доцільність підвищення коефіцієнта потужності при зменшенні коефіцієнта завантаження електродвигуна привода $k_3 = \frac{P_r}{P_{\text{ном}}}$, де P_r реальна фактична потужність, яку

розвиває електродвигун, а $P_{\text{ном}}$ номінальна потужність електродвигуна [2].

В технологічних установках вказаних підприємств у теперішній час досить широко застосовується низьковольтний (380 В) асинхронний електропривод. При цьому обмотки статора з'єднані в «трикутник». В роботі досліджується раціональний метод підвищення коефіцієнту потужності електроприводів нестандартного обладнання (конвеєри для ремонту букс, підшипників, мийні машини для миття різного обладнання та ін.), в якому використовуються асинхронні трифазні короткозамкнені двигуни потужністю до 90 кВт [3, 4].

При існуючих технологіях ремонту коефіцієнт k_3 може змінюватись від одиниці до декілька десятих долей одиниці. Відомо, що із зменшенням k_3 значення коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ зменшується, що приводить до збільшення реактивного навантаження мережі живлення (при зменшенні активної потужності електродвигуна). Реактивне навантаження зумовлює значні втрати енергії в мережі. Для підвищення економічності електропостачання підприємства, покращення якості напруги і підвищення продуктивності електрифікованого обладнання потрібно зменшувати ці (реактивні) навантаження. Кількісно зменшення коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ можна визначити з табл. 1 [2].

За табл. 1 видно, що при $0,6 \leq k_3 \leq 1$ значення $\cos(\varphi)_\Delta$ при нормальній схемі з'єднання обмоток статора (тобто по схемі «трикутник» при 380 В мережі) відрізняється від $\cos(\varphi)_{\text{ном}}$ в межах до 10% і задачу його корекції можна не ставити. При $k_3 \leq 0,5$ значення $\cos(\varphi)$ при схемі «трикутник» суттєво зменшується.

Орієнтовні значення $\cos(\varphi)_\Delta / \cos(\varphi)_{\text{ном}}$ асинхронних двигунів залежно від навантаження

k_3 , відн.од.	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\cos(\varphi)_\Delta / \cos(\varphi)_{\text{ном}}$, відн. од.	0,34	0,56	0,7	0,79	0,87	0,93	0,97	1,0	1,0	1,0

$\cos(\varphi)_\Delta$ - значення коефіцієнта потужності при з'єднанні обмоток статора у « Δ ».

Якісно оцінити значення $\cos(\varphi)$ можна за табл.2 [5].

Таблиця 2

Якісна оцінка значення $\cos(\varphi)$

Оцінка значення $\cos(\varphi)$	Високе	Добре	Задовільне	Низьке	Незадовільне
cos	0,95...1	0,8...0,95	0,65...0,8	0,5...0,65	0...0,5

На думку авторів найбільш раціональним способом підвищення $\cos(\varphi)$ нерегульованих асинхронних приводів нестандартних технологічних установок на підприємствах по ремонту рухомого складу залізниць є перемикання обмоток статора з «трикутника» на «зірку».

Цей спосіб простий по виконанню, не потребує встановлення додаткового компенсуючого обладнання. Важливо й те, що легко здійснюється й зворотнє переключення обмоток статора з «зірки» на «трикутник». У теперішній час промисловість випускає асинхронні двигуни на 380 В, в яких передбачено з'єднання обмоток статора тільки в «трикутник», тобто при напрузі в мережі 380 В з'єднання в «зірку» не можливо. Але цілий ряд підприємств заявили про готовність виготовлювати електродвигуни з параметрами, які встановлені замовником.

Враховуючи тенденцію постійного суттєвого зростання вартості електроенергії, виготовлення спеціальних асинхронних трифазних двигунів для електропривода технологічного нестандартного обладнання підприємств з ремонту рухомого складу залізниць може бути ефективним.

Метою даної роботи є дослідження ефективності збільшення (шляхом перемикання обмоток статора з «трикутника» на «зірку») коефіцієнта потужності електродвигунів вказаного обладнання при $0,5 \leq k_3$ з точки зору оцінки якості $\cos(\varphi)$ та зменшення повної потужності.

Переключення обмоток статора з «зірки» на «трикутник» можливо при виконанні наступних умов:

У двигуна виведені всі шість кінців обмоток статора;

Обмотки статора нормально (у нашому випадку при 380 В у мережі живлення депо) ввімкнені у «трикутник»;

В конструкції передбачені приєднувальні отвори.

Для досягнення поставленої мети пропонується наступна методика:

При обраному значенні k_3 по рис.1 визначаємо коефіцієнт $K_\eta = \eta_r / \eta_{\text{ном}}$, де η_r ККД електродвигуна при обраному значенні k_3 , $\eta_{\text{ном}}$ номінальне значення ККД електродвигуна.

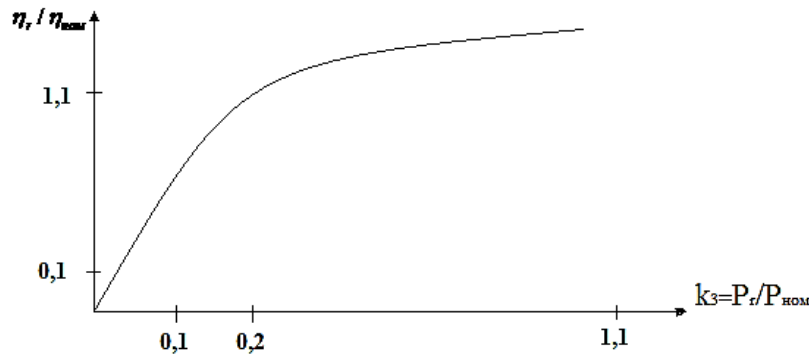


Рис.1. Усереднена залежність ККД електродвигуна від коефіцієнта завантаження [2]

Визначити:

$$\eta_r = \eta_{\text{ном}} k_\eta$$

1.1. Реальну практичну потужність
 $P_r = (P_{\text{ном}} k_3)$ кВт

1.2. Повну активну потужність, яка споживається з мережі електродвигуном

$$P_M = \frac{P_r}{\eta_r} \text{ кВт}$$

1.3. $K_{\cos \varphi_\Delta} = \frac{\cos \varphi_\Delta}{\cos \varphi_{\text{ном}}}$ (табл. 1) при обраному

k_3 , де $\cos \varphi_\Delta$ коефіцієнт потужності

електродвигуна при даному k_3 і з'єднанні обмоток статора в «трикутник».

$$1.4. \cos \varphi_\Delta = K \cos \varphi_\Delta \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}$$

1.5. Повну потужність, яку споживає електродвигун із мережі при з'єднанні обмоток статора у «трикутник» $S_\Delta = \frac{P_M}{\cos \varphi_\Delta}$ кВА

$$1.6. \cos \varphi_r = \frac{\cos \varphi_r}{\cos \varphi_\Delta}$$

Таблиця 3

Залежність зміни номінального коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{\text{ном}}$ електродвигуна під час перемикання обмоток статора з «трикутника» на «зірку»

$\cos \varphi_{\text{ном}}$	Відношення $\frac{\cos \varphi_r}{\cos \varphi_\Delta}$ за коефіцієнтів завантаження k_3				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,78	1,94	1,8	1,64	1,49	1,35
0,8	1,85	1,73	1,58	1,43	1,3
0,82	1,78	1,67	1,52	1,37	1,26
0,84	1,72	1,61	1,46	1,32	1,22
0,86	1,66	1,55	1,41	1,27	1,18
0,88	1,6	1,49	1,35	1,22	1,14
0,9	1,57	1,43	1,29	1,17	1,1
0,92	1,5	1,36	1,29	1,11	1,06

1.7. Повну потужність, яка споживається електродвигуном при з'єднанні обмоток

статора в «зірку» $S_r = \frac{P_M}{\cos \varphi_r}$ кВА

$$1.8. \Delta S = (S_\Delta - S_r) \text{ кВА}$$

1.9. Ефективність перемикання обмоток статора з «трикутника» на «зірку».

$$\frac{S_\Delta - S_r}{S_\Delta} \cdot 100\%$$

$$1.10. \left| \frac{\cos \varphi_\Delta - \cos \varphi_r}{\cos \varphi_\Delta} \cdot 100\% \right|$$

1.11. Якісну оцінку значення коефіцієнтів $\cos \varphi_r$ та $\cos \varphi_\Delta$ згідно табл. 2.

Для прикладу приймаємо електродвигун типу ЕД5АМ250М4, який має номінальну потужність 90кВт, що достатньо для електропривода мийної машини тягових двигунів [3,4].

Технічні характеристики ЕД5АМ250М4:

$\cos \varphi_{\text{ном}} = 0.89$, $P_{\text{ном}} = 90$ кВт, $\eta_{\text{ном}} = 0.94$,
 $n_c = 1500$ об/хв.

Згідно запропонованої вище методики при
 $k_3 = 0.5$ маємо:

1. $K_\eta = 1.01$

2. $\eta_r = 0.94 \cdot 1.01 = 0.949$

3. $P_r = 90 \cdot 0.5 = 45$ кВт

4. $P_M = \frac{45}{0.949} = 47.42$ кВт

5. $K_{\cos \varphi_\Delta} = 0.87$

6. $\cos \varphi_\Delta = 0.87 \cdot 0.94 = 0.818$

7. $S_\Delta = \frac{47.42}{0.818} = 57.97$ кВА

8. $\cos \varphi_r = 0.818 \cdot 1.12 = 0.916$

$K \cos \varphi_r = 1.12$

9. $S_r = \frac{47.42}{0.916} = 51.77$ кВА

10. $\Delta S = 57.97 - 51.77 = 6.2$ кВА

11. $\frac{57.97 - 51.77}{57.97} \cdot 100\% = 10.7\%$

12. $\left| \frac{0.818 - 0.916}{0.818} \right| \cdot 100\% = 10.7\%$

13. Оцінка якості $\cos \varphi_r$ - «добре», $\cos \varphi_\Delta$ - «добре».

Аналогічні розрахунки виконані для
 $k_3 = 0.4; 0.3; 0.2; 0.1$.

Результати зведені в табл.4.

Таблиця 4

Кінцеві результати розрахунків

k_3	$\cos \varphi_\Delta$	S_Δ кВА	$\cos \varphi_r$	S_r кВА	ΔS кВА	$\frac{\Delta S}{S_\Delta} \%$	$\frac{\cos \varphi_\Delta - \cos \varphi_r}{\cos \varphi_\Delta} \%$	Оцінка якості	
								$\cos \varphi_r$	$\cos \varphi_\Delta$
0,5	0,818	57,97	0,916	51,77	6,2	10,7	12	Добре	Добре
0,4	0,73	55,66	0,864	46,36	9,3	16,7	20	Добре	задовільне
0,3	0,623	50,69	0,822	38,42	12,27	36	31,9	Добре	низьке
0,2	0,498	50,62	0,727	34,68	15,94	31,49	46	задовільне	незадовільне
0,1	0,3	66,67	0,475	42,1	24,57	36,85	58,3	незадовільне	незадовільне

Дані табл. 4 можуть бути орієнтиром при розробці технології ремонту рухомого складу з раціональним використанням нестандартного обладнання (в даному випадку мийної машини тягових двигунів) і забезпечення оцінки значення $\cos \varphi$ не нижче «добре» (тобто забезпечити значення $\cos \varphi$ не менше 0,8 – див. табл. 2). Звернемо увагу, що вже при $k_3 = 0.4$ маємо $\cos \varphi_\Delta = 0.73$, що не відповідає оцінці «добре». Знайдемо мінімальне значення k_3 , при якому $\cos \varphi_r = 0.8$. Для цього по даним табл.4 побудуємо $\cos \varphi_r = f(k_3)$ (рис.2).

Із рис.2 видно, що для забезпечення значення $\cos \varphi$ не менше 0,8 мийну машину для тягових двигунів можна завантажити іншими деталями вага яких забезпечує $0.28 \leq k_3 \leq 0.5$. Таке рішення зменшує кількість технологічних установок (відпадає необхідність в мийних машинах для деталей, яку по габаритам можна розмістити в даній машині) і досягається суттєва економія електроенергії за рахунок «доброго» $\cos \varphi_r$.

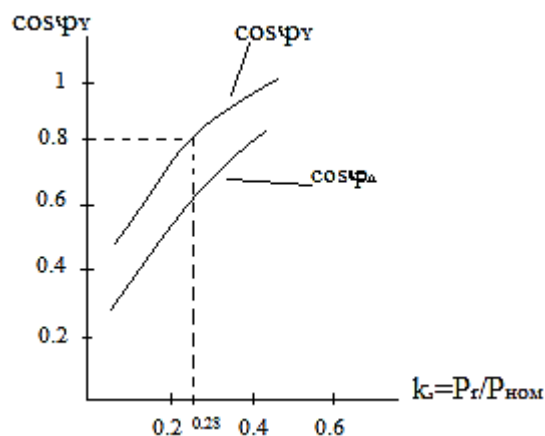


Рис.2. Значення $\cos \varphi$ при з'єднанні обмоток статора в «трикутник» та «зірку»

Враховуючи, що на підприємствах по ремонту рухомого складу залізниць використовується значна кількість нестандартного обладнання і в майбутньому при механізації і автоматизації праці кількість цього обладнання буде зростати, підвищення $\cos \varphi$ електроприводів технологічного обладнання до рівня не менше, ніж «добре», може дати суттєву економію електроенергії.

Висновки

1. На підприємствах з ремонту рухомого складу залізниць використовується велика кількість нестандартного технологічного обладнання з потужністю асинхронного нерегульованого трифазного електропривода, що значну кількість часу працює при коефіцієнті завантаження менше 0,5 до 90кВт. Забезпечення експлуатації цього обладнання з коефіцієнтом потужності не менше, ніж $\cos\varphi = 0,8$, може дати значну економію електроенергії.

2. Доведено, що раціональним способом підвищення $\cos\varphi$ вказаного електропривода є перемикання обмоток статора з «трикутника» на «зірку», який є простий по виконанню, не

потребує встановлення додаткового компенсуючого обладнання.

3. Запропоновано методику по визначенню мінімального коефіцієнта завантаження електропривода технологічної установки, при якому коефіцієнт потужності не менше 0,8, якщо обмотки статора з'єднані за схемою «зірка».

4. Для двигуна типу ЕД5АМ250М4 потужністю 90 кВт проведено аналіз оцінки якості $\cos\varphi$. Встановлено, що $\cos\varphi$ двигуна матиме оцінку «добре» при з'єднанні «зірка» при $k_3 = 0,5 \dots 0,3$, а при «трикутнику» - лише при $k_3 = 0,5$, чим доведено доцільність перемикання обмоток статора на схему «зірка» при малих завантаженнях двигуна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закладний, О. М. Энергоббереження засобами промислового електропривода: навчальний посібник [текст] / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей, - К: Кондар, 2005. – 408 с.
2. ДСТУ 3886 – 99. Энергоббереження. Системи електроприводу. Метод аналізу та вибору [текст]. – Надано чинності 2000-07-01. – Київ: Держстандарт України, 2000. – 54 с.
3. Поточные линии ремонта локомотивов в депо [текст] / Н. И. Фильков, Е. А. Дубинский, М. М. Майзель, И. Б. Стерлин. – М.: Транспорт, 1983. – 302 с.
4. Нестандартное технологическое оборудование для ремонта локомотивов, вагонов и моторвагонного подвижного состава. ООО «Транс-Атом» [електронний ресурс]. Режим доступу: <https://trans-atom.com/page/about.html>
5. Коэффициент мощности Типовые оценки качества электропотребления [електронний ресурс]. Режим доступу: http://energetika.vipsekret.ru/a_energetika&koeffitsient-moshnosti&l.htm

REFERENCES

1. Zakladnyy, O. M. Enerhozberezhennya zasobamy promyslovoho elektropyvoda: navchal'nyy posibnyk [tekst] / O. M. Zakladnyy, A. V. Prakhovnyk, O. I. Solovey, - K: Kondar, 2005. – 408 s.
2. DSTU 3886 – 99. Enerhozberezhennya. Systemy elektropyvodu. Metod analizu ta vyboru [tekst]. – Nadano chynnosti 2000-07-01. – Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 2000. – 54 s.
3. Potochnye linii remonta lokomotivov v depo [tekst] / N. I. Fil'kov, E. A. Dubinskij, M. M. Majzel', I. B. Sterlin. – M.:Transport, 1983. – 302 s.
4. Nestandardnoe tekhnologicheskoe oborudovanie dlya remonta lokomotivov, vagonov i motor-vagonnogo podvizhnogo sostava. ООО «Trans-Atom» [elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: <https://trans-atom.com/page/about.html>
5. Koeffficient moshchnosti Tipovye ocenki kachestva ehlektropotrebleniya [elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: http://energetika.vipsekret.ru/a_energetika&koeffitsient-moshnosti&l.htm

Електрична енергія є одним з найважливіших продуктів у сучасному розвиненому суспільстві. Серед споживачів електричної енергії значну частку складають електродвигуни різного призначення. Розробка рекомендацій з вибору раціональних режимів роботи електроприводів технологічних установок з точки зору їх енергетичних показників, до яких належать втрати потужності та енергії, коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$), є безумовно актуальним питанням.

В даній роботі досліджується доцільність підвищення коефіцієнта потужності при зменшенні коефіцієнта завантаження електродвигуна привода.

Проаналізовано широкий спектр технологічних процесів по ремонту рухомого складу залізниць, в ході чого встановлено, що більша частина обладнання тривалий час працює із коефіцієнтом завантаження меншим за 0,5. Доведено, що раціональним способом підвищення вказаних електроприводів є перемикання обмоток статора з «трикутника» на «зірку».

Запропоновано методику із визначення мінімального коефіцієнта завантаження електропривода технологічної установки, при якому коефіцієнт потужності лежить в межах оцінки якості «добре» і «відмінно».

Ключові слова: коефіцієнт потужності; енергозбереження; ремонт рухомого складу залізниць; коефіцієнт завантаження; зірка; трикутник.

УДК 621.3.018.14:629.4.083

А. Ю. БАЛИЙЧУК, Л. В. ДУБИНЕЦ, О. Л. МАРЕНИЧ, О. О. ЛЫСЕНКО

Кафедра «Электротехника и электромеханика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, эл. почта: lejikbaliychuk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0119-1446>, <https://orcid.org/0000-0003-0319-4544>, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5851>

Электрическая энергия является одним из важнейших продуктов в современном развитом обществе. Среди потребителей электрической энергии значительную долю составляют электродвигатели различного назначения. Разработка рекомендаций по выбору рациональных режимов работы электроприводов технологических установок с точки зрения их энергетических показателей, к которым относятся потери мощности и энергии, коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент мощности, является безусловно актуальным вопросом.

В данной работе исследуется целесообразность повышения коэффициента мощности при уменьшении коэффициента загрузки электродвигателя привода.

Проанализирован широкий спектр технологических процессов по ремонту подвижного состава, в ходе чего установлено, что большая часть оборудования длительное время работает с коэффициентом загрузки меньше 0,5. Доказано, что рациональным способом повышения указанных электроприводов является переключение обмоток статора с «треугольника» на «звезду».

Предложена методика по определению минимального коэффициента загрузки электропривода технологической установки, при котором коэффициент мощности лежит в пределах оценки качества «хорошо» и «отлично».

Ключевые слова: коэффициент мощности; энергосбережение; ремонт подвижного состава; коэффициент загрузки; звезда; треугольник.

УДК 621.3.018.14:629.4.083

О. Yu. BALIICHUK, L. V. DUBYNETS, O. L. MARENYCH, O. O. LYSENKO

Department of Electric Engineering and Electromechanics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail: lejikbaliychuk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0119-1446>, <https://orcid.org/0000-0003-0319-4544>, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5851>

Electric energy is one of the most important products in a modern developed society. Electric motors of various purposes are considerable proportion among electric power consumers. The development of recommendations for the selection of rational operating modes for electric drives of process units in terms of their energy parameters, which include power and energy losses, efficiency factor, power factor, is certainly a topical issue.

In the article, the feasibility of increasing the power factor with a decrease in the load factor of the drive motor is investigated.

Wide range of technological processes for the repair of rolling stock was analyzed, during which was established that most of the equipment works with a load factor of less than 0.5 for a long time. It is proved that a rational way to increase of these electric drives is to switch the stator windings from the "triangle" to the "star".

Method for determining the minimum load factor for the electric drive of a process equipment, at which the power factor lies within the limits of the quality assessment "good" and "excellent" is proposed.

Keywords: power factor; energy saving; rolling stock repair; load factor; star; triangle.

Received 07.09.2017; accepted in revised form 11.12.2017.

М. О. КОСТІН, О. Г. ШЕЙКІНА (ДНУЗТ), С. І. ЛЕВИЦЬКА (ПДАБА)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна, 49010, тел. (056) 3731537, e-mail: nkostin@ukr.net, sheikina.diit73@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-0856-6397, orcid.org/0000-0002-5367-2674.

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, м. Дніпро, Україна, 49600, тел. (056) 756-33-56, e-mail: svetik23com@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6725-0280.

МЕТОД АНАЛІЗУ УСТАЛЕНИХ СТОХАСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СИЛОВИХ ТЯГОВИХ КОЛАХ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

Вступ

Як зазначено в попередніх публікаціях [1, 2], системи електричного транспорту постійного струму такими реально не являються, бо в них діють різкозмінні в часі випадкові напруги і струми, обумовлені технологічними та іншими факторами режимів експлуатації. В результаті будь-яка одиниця електрорухомого складу (ЕРС), електровоз, трамвай, електропоїзд тощо, представляє собою систему, на вході якої діє стохастичний процес прикладеної до ЕРС напруги, а вихідним процесом (реакцією) є також випадковий процес, процес струму (рис. 1). Імовірнісний характер зміни зазначених напруги і струму вимагає розробки методів їх аналізу, оскільки теоретична електротехніка володіє методами аналізу електричних кіл лише з детермінованими (невипадковими) електричними величинами. Тому задача розрахунку усталених процесів в імовірнісній трактовці полягає у визначенні математичного очікування, кореляційної функції та дисперсії досліджуваної величини.

Мета роботи

Розробка та обґрунтування методу розрахунку усталених стохастичних процесів в системах електричного транспорту постійного струму.

Теоретичні передумови

Як відомо [3], реакція будь-якої пасивної лінійної стаціонарної системи на вмикання, при нульових початкових умовах, до неї в момент часу детермінованої дії визначається за формулою інтегралу Дюамеля:

$$y(t) = \int_{-0}^t x(\tau)h'(t-\tau)d\tau = \int_{-0}^t x(t-\tau)h'(\tau)d\tau \quad (1)$$

де $h(t)$ – перехідна функція (оператор) досліджуваної системи.

В цій роботі досліджуваними системами є певні одиниці ЕРС: електровоз, трамвай, електропоїзд тощо, вхідним процесом до кожного з яких є

напруга на струмоприймачі $U(t)$, а вихідним процесом – струм $I(t)$ цього ж ЕРС. Як зазначалось, і напруга $U(t)$, і струм $I(t)$ являються стохастичними процесами і тому, за аналогією з (1), для усталеного режиму можна записати:

$$I(t) = \int_{-0}^{\infty} U(\tau)h'(t-\tau)d\tau = \int_{-0}^{\infty} U(t-\tau)h'(\tau)d\tau \quad (2)$$

Враховуючи (2), поставлена задача з аналізу усталених процесів повинна розв'язуватись з визначенням імовірнісних характеристик струму при заданих аналогічних характеристиках напруги, до яких відносять: математичне очікування, кореляційна функція, дисперсія та середньоквадратичне відхилення. Складність оцінки цих характеристик для усталеного струму $I(t)$ залежить від типу вхідного випадкового процесу $U(t)$, стаціонарний чи нестаціонарний.

Для визначення математичного очікування усталеного струму $m_I(t)$ застосуємо операцію математичного очікування до обох частин виразу (2):

$$M[I(t)] = m_I(t) = M\left[\int_{-0}^{\infty} U(t-\tau)h'(\tau)d\tau\right] \quad (3)$$

Оскільки операції математичного очікування та інтегрування перестановочні [4], тоді маємо:

$$\begin{aligned} m_I(t) &= \int_{-0}^{\infty} M[U(t-\tau)]h'(\tau)d\tau = \\ &= \int_{-0}^{\infty} m_U(t-\tau)h'(\tau)d\tau, \end{aligned} \quad (4)$$

де $M[U(t)] = m_U(t)$ – математичне очікування процесу напруги.

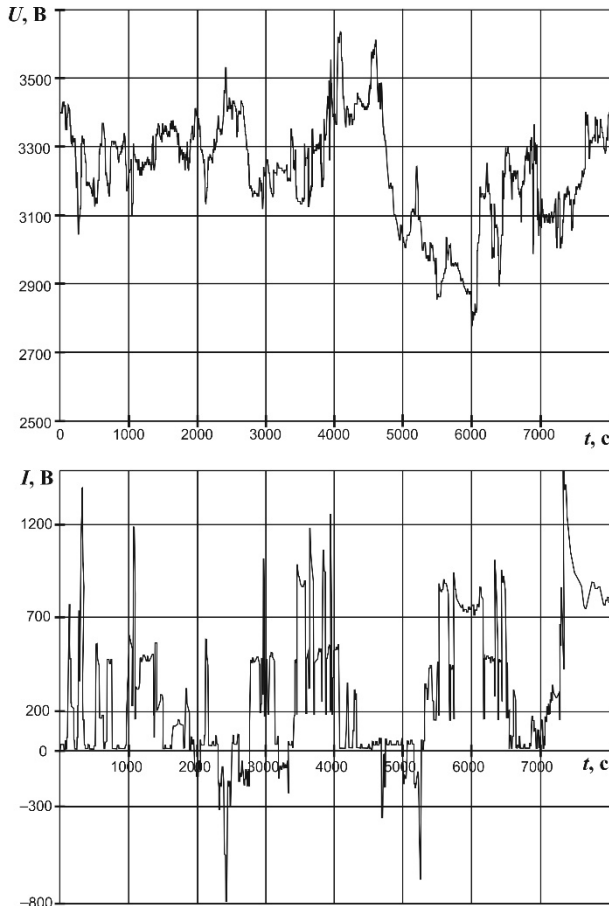


Рис. 1. Реєстрограми напруги та струму на струмоприймачі електровоза ВЛ8 на ділянці Нижньодніпровськ-Вузол При-дніпровської залізниці

У випадку, коли стохастичний процес $U(t)$ являється стаціонарним, тоді $m_U(t) = \text{const} = m_U$ і вираз (4) спрощується

$$m_I(t) = m_U \int_{-0}^{\infty} h'(\tau) d\tau \quad (5)$$

Кореляційна функція усталеного струму визначається як не випадкова функція двох аргументів t_1 і t_2 , що дорівнює кореляційному моменту випадкових величин $I(t_1)$ і $I(t_2)$, тобто являє собою математичне очікування добутку двох центрованих величин у відповідних t_1 , t_2 перерізу процесу $I(t)$ [5, 6]:

$$\begin{aligned} K_I(t_1, t_2) &= M[I(t_1)I(t_2)] = \\ &= M\{[I(t_1) - m_I(t_1)][I(t_2) - m_I(t_2)]\} \end{aligned} \quad (6)$$

Згідно з (2) запишемо вирази струму для моментів t_1 і t_2 .

$$I(t_1) = \int_{-0}^{\infty} U(t_1 - \tau_1) h'(\tau_1) d\tau_1 \quad (7)$$

$$I(t_2) = \int_{-0}^{\infty} U(t_2 - \tau_2) h'(\tau_2) d\tau_2 \quad (8)$$

Віднімаємо від обох частин виразу (7) математичне очікування струму $m_I(t_1)$, а у (8) аналогічно – $m_I(t_2)$.

$$\begin{aligned} I(t_1) - m_I(t_1) &= \\ &= \int_{-0}^{\infty} U(t_1 - \tau_1) h'(\tau_1) d\tau_1 - m_I(t_1), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I(t_2) - m_I(t_2) &= \\ &= \int_{-0}^{\infty} U(t_2 - \tau_2) h'(\tau_2) d\tau_2 - m_I(t_2). \end{aligned} \quad (10)$$

Замінивши $m_I(t_1)$ в правій частині (9) і аналогічно $m_I(t_2)$ в (10), згідно з співвідношенням (5), після простих перетворень отримаємо:

$$I(t_1) - m_I(t_1) = \int_{-0}^{\infty} h'(\tau_1) [U(t_1 - \tau_1) - m_U] d\tau_1 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I(t_2) - m_I(t_2) &= \\ &= \int_{-0}^{\infty} h'(\tau_2) [U(t_2 - \tau_2) - m_U] d\tau_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Перемножимо між собою ліві і праві частини виразів (11) та (12) і здійснимо математичну операцію математичного очікування від обох частин отриманого співвідношення:

$$\begin{aligned} M\{[I(t_1) - m_I(t_1)][I(t_2) - m_I(t_2)]\} &= \\ &= M\left\{\int_{-0}^{\infty} h'(\tau_1) \left\{\int_{-0}^{\infty} h'(\tau_2) [U(t_1 - \tau_1) - m_U] \right. \right. \\ &\quad \left. \left. [U(t_2 - \tau_2) - m_U] d\tau_2\right\} d\tau_1\right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Згідно з визначенням й тим самим з виразом (6), ліва частина рівності (13) являє собою вираз шуканої кореляційної функції усталеного струму $I(t)$. Одночасно, здійснивши у правій частині (13) закономірну операцію перестановки операції математичного очікування та інтегрування, отримаємо (під знаком інтегралу) ви-

раз кореляційної функції напруги $K_U(t_1, t_2)$ з часовим зсувом $(t_1 - \tau_1) - (t_2 - \tau_2)$:

$$M\{[U(t_1 - \tau_1) - m_U][U(t_2 - \tau_2) - m_U]\} = K_U(t_2 - t_1 + \tau_1 - \tau_2). \quad (14)$$

Отже, згідно з співвідношеннями (6), (13) і (14), кінцевий вираз кореляційної функції усталеного струму, у випадку, коли стохастичний процес $U(t)$ являється стаціонарним, має вигляд:

$$K_I(t_1, t_2) = \int_{-0}^{\infty} h'(\tau_1) \cdot \int_{-0}^{\infty} h'(\tau_2) K_U(t_2 - t_1 + \tau_1 - \tau_2) d\tau_2 d\tau_1. \quad (15)$$

Із цього виразу (15) випливає, що $K_I(t_1, t_2)$ залежить не від моментів часу t_1 і t_2 окремо, а від різниці цих моментів часу: $t_2 - t_1 = \tau$. Тому позначимо кореляційну функцію стаціонарного випадкового процесу струму через $K_I(\tau) = K_I(t_2 - t_1)$. З урахуванням цього позначення і згідно (15), маємо

$$K_I(\tau) = \int_{-0}^{\infty} h'(\tau_1) \left[\int_{-0}^{\infty} h'(\tau_2) K_U(\tau + \tau_1 - \tau_2) d\tau_2 \right] d\tau_1. \quad (16)$$

Часто для практичного розв'язання поставлених задач буває достатньо знати дисперсію чи середньоквадратичне відхилення досліджуваного процесу. Дисперсія струму $D_I(t) = \sigma_I^2(t)$ визначається за формулою (1) кореляційної функції струму при рівності її двох аргументів t_1 і t_2 , тобто $t_2 - t_1 = \tau = 0$:

$$D_I = \sigma_I^2 = K_I(\tau = 0) = \int_{-0}^{\infty} h'(\tau_1) \left[\int_{-0}^{\infty} h'(\tau_2) K_U(\tau_1 - \tau_2) d\tau_2 \right] d\tau_1. \quad (17)$$

У випадку, коли вхідна до ЕРС стохастична напруга буде являти собою нестаціонарний процес, тоді математичне очікування струму $m_I(t)$ визначається за загальною формулою (4), а процедура виведення формули кореляційної функції струму та ж сама, що й для стаціонарного процесу $U(t)$, лише з тією різницею,

що математичне очікування напруги буде функцією часу з відповідним зсувом часу, а саме: $m_U(t_1 - \tau_1)$ чи $m_U(t_2 - \tau_2)$. В результаті отримаємо вираз функції у вигляді:

$$K_I(t_1, t_2) = \int_{-0}^{\infty} h'(\tau_1) x \left[\int_{-0}^{\infty} h'(\tau_2) K_U(t_1 - \tau_1, t_2 - \tau_2) d\tau_2 \right] d\tau_1.$$

Застосування отриманих вище розрахункових формул імовірнісних характеристик струму базується на знанні перехідної функції $h(t)$ електрорухомого складу. Методи її визначення приведені в роботі [5].

Результати чисельних розрахунків та їх аналіз

Користуючись отриманими вище співвідношеннями, виконаємо розрахунки усталених імовірнісних характеристик ($m_I(t)$, $D_I(t)$ та $\sigma_I(t)$) для електровоза ВЛ8 при його експлуатації з вантажними поїздами на електрифікованих ділянках Придніпровської залізниці. При цьому зауважимо, що умови використання інтегралу Дюамеля виконуються у повній мірі: у тяговому режимі електровоз являється пасивною (виходячи із класифікації електричних кіл) системою; його вмикання на напругу здійснюється при нульових початкових умовах (в момент часу $t = 0$ після зупинок, вибігів, на початку відновлення напруги після її втрати тощо). Напруга на струмоприймачі ВЛ8 являється стохастичним стаціонарним процесом [2] з математичним очікуванням $m_U = 3312$ В і кореляційною функцією $K_U(\tau) = 2,1 \cdot 10^4 e^{-0,003t}$ В². Крім цього, розрахунки показують, що перехідна функція електровоза являє собою вираз: $h(t) = 0,205[1 - \exp(-0,17t)]$ См·с.

Тоді, згідно (5), математичне очікування усталеного струму буде:

$$m_I(t) = 3312 \int_{-0}^{\infty} \left[\frac{d}{dt} \{ 0,205(1 - e^{-0,17t}) \} \right] dt = 679 \text{ А}. \quad (18)$$

Дисперсію струму було визначено за формулою (17), вона склала 88270 А², а середнє квадратичне відхилення – 297 А. Ці значення достатньо близькі до значень, отриманих дослідним шляхом [2].

Висновки

1. Стохастичний характер зміни напруг і струмів в електричних тягових колах електро-рухомого складу обумовлює необхідність розробки спеціальних методів аналізу режимів роботи систем електричного транспорту.

2. Найбільш доцільним методом розрахунку усталеного тягового струму у колах електро-рухомого складу є метод інтеграла Дюамеля, адаптованого до теорії стохастичних процесів.

3. Задача аналізу усталених процесів в імовірнісній трактовці має бути розв'язана шляхом

визначення імовірнісних характеристик тягового струму (математичного очікування, кореляційної функції та дисперсії) при заданих аналогічних характеристиках випадкового процесу напруги на струмоприймачі електро-рухомого складу.

4. Значення математичного очікування та дисперсії усталеного струму досліджуваного електро-возу, що отримані розрахунками за розробленим методом, достатньо близькі до значень, отриманих за результатами експериментальних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kostin Mykolay. Statistics and Probability Analysis of Voltage on the Pantograph of DC Electric Locomotive in the Recuperation Mode/ Mykolay Kostin, Anatoliy Nikitenko // *Przegląd Elektrotechniczny*. – Warsaw, 2013. – №2a. – pp. 273-275.

2. Костин Н. А. Неканоническое спектральное разложение случайных функций тяговых напряжений и тока в системах электрического транспорта / Н. А. Костин, О. Г. Шейкина // *Электротехника і Електромеханіка*. – 2015. – № 1. – С. 68-71.

3. Костін М. О. Теоретичні основи електротехніки. Том 2: підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна // - Дн-вськ: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – 276 с.

4. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 1960. – 883 с.

5. Лившиц Н. А., Пугачев В. С. Вероятностный анализ систем автоматического управления. В 2-х томах/ Н. А. Лившиц, В. С. Пугачев. – М.: Советское радио, 1963. – Т. 1 – 482 с., Т. 2 – 895 с.

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

Ключові слова: імовірнісний метод; перехідна функція; напруга; стохастичний процес; струм; електро-рухомий склад.

REFERENCES

1. Kostin Mykolay. Statistics and Probability Analysis of Voltage on the Pantograph of DC Electric Locomotive in the Recuperation Mode/ Mykolay Kostin, Anatoliy Nikitenko// *Przegląd Elektrotechniczny*. – Warsaw, 2013. – №2a. – pp. 273-275.

2. Kostin N. A. *Nekanonicheskoye spektralnoye razlozheniye sluchaynykh funktsiy tyagovykh napryazheniya i toka v sistemakh elektricheskogo transporta* [Non-canonical spectral decomposition of random functions of traction voltage and current in electric transport systems]/ N. A. Kostin. O. G. Sheykina // *Elektrotehnika i Elektromekhanika* – Electrical engineering and electromechanics, 2015. – No. 1. – pp. 68-71.

3. Kostin M. O. *Teoretychni osnovy elektrotehniki. Tom 2* [Theoretical basis of electrical engineering. Volume 2] / M. O. Kostin, O. H. Sheykina // - Dn-vsk: Vyd-vo DNUZT, 2007. – 276 p.

4. Pugachev V. S. *Teoriya sluchaynykh funktsiy i yeye primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [The theory of random functions and its application to problems of automatic control.] / V. S. Pugachev. – Moskva: Fizmatgiz. 1960. – 883 p.

5. Livshits N. A. Pugachev V. S. *Veroyatnostnyy analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya*. [Probabilistic analysis of automatic control systems. In two volumes] / N. A. Livshits. V. S. Pugachev. – Moskva: Sovetskoye radio. 1963. – T. 1 – 482 s., T. 2 – 895 p.

6. Sveshnikov A. A. *Prikladnyye metody teorii sluchaynykh funktsiy* [Applied methods of the theory of random functions]/ A. A. Sveshnikov. – Moskva: Nauka. 1968. – 463 p.

Половина магістрального і приміського, весь кар'єрний та шахтний, а також міський електричний транспорт експлуатуються на постійному струмі. Теоретично вважається, що електро-вози, електро-поїзди, мотор-вагони метрополітенів, трамваї і тролейбуси живляться постійною напругою з номінальними значеннями від 500 до 3000 В. Однак, практично цього не відбувається, оскільки не враховуються реально існуючі неперервні, часто значні, до того ж стохастичні, зміни напруги живлення і тягового струму. Тобто, системи електричного транспорту (за назвою) постійного струму по суті є системами змінного струму, що вимагає відповідного аналізу їх процесів. В той же час, теоретична електротехніка не володіє методами аналізу електричних кіл зі стохастичними напругами і струмами, необхідна розробка спеціальних методів аналізу електромагнітних процесів в імовірнісній трактовці. В роботі на основі адаптування до теорії випадкових процесів інтеграла Дюамеля розроблено і чисельними розрахунками обґрунтовано метод аналізу усталених стохастичних процесів в силових тягових колах електро-рухомого складу (ЕРС). В якості оператора ЕРС, як досліджуваної системи, вибрана перехідна функція. Метод базується на кореляційній теорії випадкових процесів й тим самим передбачає визначення імовірнісних характеристик досліджуваного процесу. В роботі виконано розрахунки математичного очікування, кореляційної функції, дисперсії і середньоквадратичного відхилення тягового струму електро-воза ВЛ8 при його експлуатації з вантажними поїздами на ділянках Придніпровської залізниці.

УДК 629.423:621.3:519.2

Н. А. КОСТИН, О. Г. ШЕЙКИНА (ДНУЖТ), С. И. ЛЕВИЦКАЯ (ПГАСА)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепр, Украина, 49010, тел. (056) 3731537, e-mail: nkostin@ukr.net, sheikina.diit73@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-0856-6397, orcid.org/0000-0002-5367-2674.
 Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, г. Днепр, Украина, 49600, тел. (056) 756-33-56, e-mail: svetik23com@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6725-0280

МЕТОД АНАЛИЗА УСТАНОВИВШИХСЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ТЯГОВЫХ ЦЕПЯХ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Половина магистрального и пригородного, весь карьерный и шахтный, а также городской электрический транспорт эксплуатируются на постоянном токе. Теоретически считается, что электровазы, электропоезда, мотор-вагоны метрополитенов, трамваи и троллейбусы питаются постоянным напряжением с номинальными значениями от 500 до 3000 В. Однако, на практике этого не происходит, так как не учитываются реально существующие непрерывные, часто значительные, к тому же стохастические, изменения напряжения питания и тягового тока. То есть, системы электрического транспорта (по названию) постоянного тока по сути являются системами переменного тока, что требует соответствующего анализа их процессов. В то же время, теоретическая электротехника не обладает методами анализа электрических цепей со стохастическими напряжениями и токами, необходима разработка специальных методов анализа электромагнитных процессов в вероятностной трактовке. В работе на основе адаптации к теории случайных процессов интеграла Дюамеля разработан и численными расчетами обоснован метод анализа установившихся стохастических процессов в силовых тяговых цепях электроподвижного состава (ЭПС). В качестве оператора ЭПС, как исследуемой системы, выбрана переходная функция. Метод базируется на корреляционной теории случайных процессов и тем самым предполагает определение вероятностных характеристик исследуемого процесса. В работе выполнены расчеты математического ожидания, корреляционной функции, дисперсии и среднеквадратического отклонения тягового тока электровазы ВЛ8 при его эксплуатации с грузовыми поездами на участках Приднепровской железной дороги.

Ключевые слова: вероятностный метод; переходная функция; напряжение; стохастический процесс; ток; электроподвижной состав.

UDC 629.423:621.3:519.2

N. A. KOSTIN, O. H. SHEIKINA (DNURT), S. I. LEVYTSKA (PSACEA)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, st. Lazaryan, 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. (056) 3731537, e-mail: nkostin@ukr.net, sheikina.diit73@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-0856-6397, orcid.org/0000-0002-5367-2674.
 Prydniprovsk state academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho street, 24a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. (056) 756-33-56, e-mail: svetik23com@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6725-0280.

ANALYSIS METHOD OF STEADY-STATE RANDOM PROCESSES IN POWER CARRIER CHAINS OF ELECTRIC STOCK

The half of main and suburban, all open-cut transport and also urban electric transport use direct current. Theoretically it is considered that locomotives, electric trains, motorized railcars of subways, trams and trolley buses use direct current with nominal value from 500 to 3000 V. Nevertheless, in practice it does not occur, as real-life, continuous and random changes of supply voltage and traction current are not taken into consideration. In other words the systems of electric transport (nominally) of direct current are the systems of alternating current and they need appropriate analysis of their processes. On the other hand theoretical electric engineering does not have analysis methods of electric circuits with random voltages and currents, so the development of special analysis methods of electromagnetic processes in probability interpretation is necessary. In the paper based on adaptation to the theory of random Duhamel integral processes, the analysis method of steady-state random process in power carrier chains of electric stock (ES) is developed and proved with numerical calculations. In the capacity of operator (ES) as investigating system, transition function is chosen. The method is based on the correlation theory of random processes and so that it is intended the definition of probabilistic characteristics of investigating process. In the paper calculations of mathematical expectations, correlation function, dispersion, mean-square deviation, traction current of locomotive VL8 are done, while its using with goods trains on Prydniprovsk railway.

Keywords: probabilistic method; transition function; voltage; random process; current; electric stock.

Received 14.06.2017; accepted in revised form 06.12.2017.

УДК 621.311.086.5:621.3.001.57

О. Н. СИНЧУК, Э. С. ГУЗОВ, И. О. СИНЧУК (КрНУ), Ф. И. КАРАМАНИЦ (КЗК),
И. А. КОЗАКЕВИЧ, В. А. ФЕДОТОВ, В. Л. ДЕБЕЛЫЙ (КрНУ)

ГБУЗ «Криворожский национальный университет», 50027, г. Кривой Рог, ул. Виталия Матусевича, 11,
ORCID: orcid.org/0000-0002-7621-9979

ПАТ «Криворожский железорудный комбинат», 50029, г. Кривой Рог, ул. Симбирцева, 1А
ООО «Завод Амплитуда», г. Донецк, ул. Ходаковского, 1

МАЛЫЙ КОММЕНТАРИЙ К ТАКТИКЕ СОЗДАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ РУДНИЧНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ КОМБИНИРОВАННОГО ВИДА

Введение

Украина относится к числу стран устойчивого развития природных ресурсов. Более того, около 70% ежегодных валютных запасов страны пополняются за счет экспорта одного из многих полезных ископаемых страны – железорудного сырья (ЖРС), которое поставляется более чем в 50 стран мира [1, 2]. И это при том, что по оценкам прогнозных показателей, спрос на ЖРС в мировой экономике будет расти до 2035 г. со среднегодовым темпом прироста 1,5% [2].

Актуальность направлений исследований

Заметим, что с пятого месяца 2013 г. Украина по объему экспорта ЖРС, за оценками [2], занимает четвертое место в мире, опередив Канаду. При этом, объемы добычи ЖРС в Украине в 2015 году приблизились к рекордно положительному для страны уровню 1990 г. (рис. 1) с акцентом в перспективе при способе добычи подземным (шахта) или комбинированным открыто-подземным (карьер-шахта).

К сожалению, динамика колебаний мировых цен на ЖРС лишена положительной тенденции.

Так, по сравнению с 2011 г. в 2015 г. цены на ЖРС на мировом рынке сырья снизились на 60% [2]. Горнорудным предприятиям Украины в борьбе за рынки сбыта ЖРС приходится прикладывать больше усилий с целью сохранения и расширения объемов как внутренних, так и экспортных поставок. И это в условиях, когда себестоимость добываемого ЖРС по всем без исключения отечественным горнорудным предприятиям из года в год растет, а стоимость его реализации, о чем отмечено выше, лишена такой динамики роста [2].

Наибольшим постоянством изменений в долевом участии в формировании комплекса показателей себестоимости добычи ЖРС претерпело и претерпевают сегменты затрат на транспортировку (доставку) ЖРС, а также энергозатраты. Так за последние два десятилетия первый из вышеотмеченных показателей в общей себестоимости добываемого ЖРС увеличилась более чем в 4 раза (рис. 2) при увеличении почти на 20% расхода электрической энергии на доставку сырья [2].

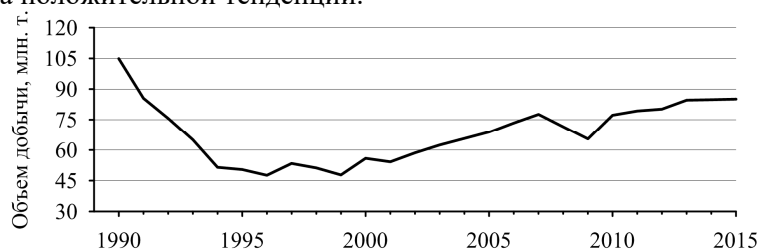


Рис. 1. Динамические изменения объемов добычи железорудного сырья в Украине за период 1990-2015 годов

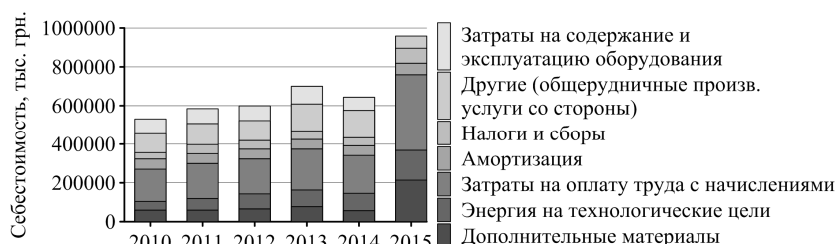


Рис. 2. Основные составляющие себестоимости железорудного сырья по ПАО «Криворожский железорудный комбинат»

© Сінчук О. М. та ін., 2017

Основные направления повышения эффективности добычи, в т. ч. на отечественных подземных горных предприятиях с подземным способом, ЖРС, куда органически входит и комплекс доставки, в перспективе, должны быть дополнены соответствующей эффективной схемой транспортировки внутришахтным транспортом (ВШТ) [3-6]. Однако, в настоящем и в ближайшие 35-40 лет, реальной конкуренции существующему способу транспортировки ЖРС по подземным выработкам железорудных шахт не следует ожидать.

Акцент вышеизложенной фразы «ВШТ железорудных шахт» сделан не случайно. Связано это с тем, что структура ВШТ угольных и рудных шахт отличается. В угольных шахтах доставка угля осуществляется, как правило, поточно-циклическим способом, когда с добычного забоя уголь сначала транспортируется транспортными конвейерами, в соответствующие накопительные емкости, а затем с них загружаются электровозосоставы, доставляющие этот вид ПИ к месту подъема на дневную поверхность. При этом важным отличительным моментом этих шахт является то, что в них эксплуатируются в основе своей аккумуляторные виды электровозов. В рудных же шахтах (в т. ч. железорудных), где технология откатки циклична, эксплуатируются исключительно контактные виды электровозов. При этом и режимы функционирования электровозов в рудных шахтах, что немаловажно для разработки тяговых электромеханических комплексов (ТЭМК), в силу технологии добычи ЖРС, значительно отличаются от своих угольных прототипов [3-6].

Меж тем, затраты на транспортировку ЖРС в себестоимости добываемого ЖРС в связи с увеличением длин транспортировки по факту понижения глубин добычи, будут и в дальнейшем иметь тенденцию к росту, ибо на отечественных подземных горнорудных предприятиях глубины стволов, т. е. глубины ведения горных работ, приближаются к запроектным показателям 1700-2500 м и более (рис. 3).

Одновременно с неутешительными показателями функционирования ВШТ железорудных шахт настораживает также факт наличия значительного количества электротравм горнорабочих в результате несанкционированных касаний ими контактного провода (КП) и, к сожалению, как правило с 100% летальным исходом (рис. 4), т. е. по сути формулируется двуединая задача: повышение эффективности и безопасности функционирования ВШТ железорудных шахт.

Для анализа показателей уровня эффективности ВШТ и поиска путей улучшения параметров его функционирования необходимо проведение исследований вышеотмеченного процесса и, прежде всего, с учетом технологии доставки ЖРС в подземных горных выработках анализируемых видов предприятий. Это вызвано тем, что последние исследования (кроме исследований авторов) относятся к 70-м годам прошлого столетия [7-10] и, естественно, утратили свой уровень реальности по ряду объективных причин [5]. Вместе с тем, проблемы ВШТ остались прежними, хотя возможности их устранения изменились, как изменились и требования к функционированию ВШТ [4, 5, 11, 12].

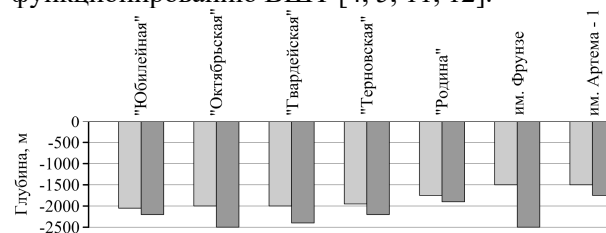


Рис. 3. Существующие и прогнозируемые глубины ведения горных работ на железорудных предприятиях Украины с подземным способом добычи ЖРС

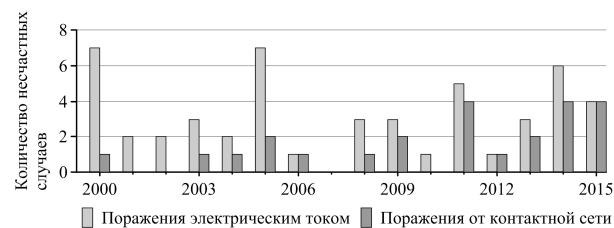


Рис. 4. Количество поражений горнорабочих электрическим током в подземных железорудных предприятиях Украины

В числе основных показателей функционирования ВШТ, которые необходимо и возможно улучшить следующие:

- безопасность эксплуатации;
- производительность;
- энергоэффективность;
- безотказность и надежность работы;
- приближение реального срока службы слагаемых ВШТ к регламентируемому заводом-изготовителем.

Очевидно, что решение многих технических и технологических проблем ВШТ, в т. ч. приведенных выше, в плоскости практической реализации, достижимо путем создания автоматизированных систем управления – АСУ ВШТ [9, 13].

Анализ известных исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы

Проблема поиска путей создания АСУ ВШТ в разные временные периоды была предметом

исследований ряда ученых [5, 9, 13]. Особенно активно эти работы велись в 60-70-х годах прошлого столетия. При этом взгляды как зарубежных, так и отечественных изыскателей в поиске путей достижения цели не всегда были синхронными и однозначными.

Достаточной эффективностью своих разработок в этом направлении, на категоричный взгляд авторов данной статьи, отвечало оборудование АСУ ВШТ ряда зарубежных фирм, в т. ч. изготовленное и внедренное на ряде рудников еще в 70-80-х годах прошлого столетия фирмами ASEA, DATASAB – SCANIA (Швеция) [13]. Успехи выше отмеченных фирм явились следствием правильного и взвешенного подхода к тактике строения АСУ ВШТ именно для специфических технологических условий подземных железорудных предприятий.

Отставание отечественных разработчиков АСУ ВШТ от зарубежных стало результатом не совсем корректного подхода наших предшественников-изыскателей именно к тактике создания и строения АСУ, а точнее выборе примата-базы – вида рудничного электровоза для строения на ее основе структуры комплекса ВШТ.

Цель исследований

Обоснование и разработка предложений по перспективному для железорудных шахт виду рудничного электровоза и тягового электромеханического комплекса для него.

Материал исследований

В подземных горных выработках отечественных шахт эксплуатируется более 3-х тысяч 20-ти типов электровозов, которые, как правило, выпускаются в двухосевом исполнении и классифицируются, как рудничные виды [6]. В свою очередь, по виду источников питания их тяговых электромеханических комплексов, рудничные электровозы подразделяются на контактные – получающие питание от тяговой контактной сети: контактный провод (КП) – рельсы, и аккумуляторные, питающиеся от автономных источников электрической энергии [5, 6]. В мировой практике используются также комбинированные виды рудничных электровозов, в частности, контактно-аккумуляторные контактно-кабельные и т. п. виды [11, 13-15]. В отечественных рудных шахтах используются исключительно контактные виды рудничных электровозов [5].

Эксплуатируемые контактные виды электровозов, как впрочем и их аккумуляторные

сородичи, выпускаемые отечественными предприятиями, давно морально и физически устарели [4-6]. И, если конструкция их механической части в известной степени удовлетворяет требованиям служб эксплуатации ВШТ, то их тяговые электромеханические комплексы не выдерживают никакой критики по всему комплексу показателей, которые объединяются в понятие эффективности [12, 16]. Т. е. остро назрела необходимость проведения комплекса реинжиниринга рудничных видов электровозов.

При этом основными направлениями на ближайшую перспективу могут быть следующие:

- замена лишь силовых контакторных контроллеров в существующей структуре СУ ТЭМК на бесконтактные (тиристорно-транзисторно-диодные);
- замена всего контакторно-резисторного комплекса СУ ТЭМК на бесконтактный с сохранением тяговых электрических двигателей постоянного тока;
- изменение тактики формирования структуры ТЭМК, на основе асинхронных, или вентильных реактивных, или синхронных двигателей [4-6, 15, 16].

Первое из вышеизложенных направлений исследовалось и практически реализовывалось в разные периоды времени и реализовывается в настоящее время [3, 8, 17].

Одним из интересных современных решений такого направления является разработка завода «Амплитуда» (г. Донецк) (рис. 5).

Второе из вышеизложенных направлений наиболее полно было реализовано в практике создания шахтных видов электровозов фирмой ASEA (Швеция), хотя и в Украине были попытки аналогичных работ [13].

Меж тем, современная элементная база электроники позволяет и не без оснований, несколько по иному взглянуть на тактику реконфигурации структур ТЭМК для шахтных электровозов. Это касается 3-го из изложенных направлений, которое, в свою очередь подразделяется на ряд поднаправлений, где первым на данное время выступает структура типа: ПЧ-ТАД (рис. 6). Исследования в этом направлении, в т. ч. авторами данной статьи, дали положительные результаты и ждут своей практической реализации [16].

Тяговые электромеханические комплексы на основе вентильных реактивных электрических двигателей.

В последнее десятилетие вентильные реактивные двигатели (ВРД) все активнее и активнее занимают достойное место в практике создания различных видов электромеханических систем и комплексов [2, 5, 8, 10]. При этом технологичность, массогабаритные показатели, простая конструкция, низкая себестоимость при серийном изготовлении, отсутствие обмоток или постоянных магнитов на роторе, высокая надежность, ремонтпригодность и высокий коэффициент полезного действия при регулировании угловой частоты вращения в большом диапазоне позволяют сделать вывод о том, что перспективным направлением широкого использования вентильных реактивных двигателей, наряду с другими отраслями, являются тяговые электромеханические комплексы широкого спектра электрифицированных видов транспортных средств.

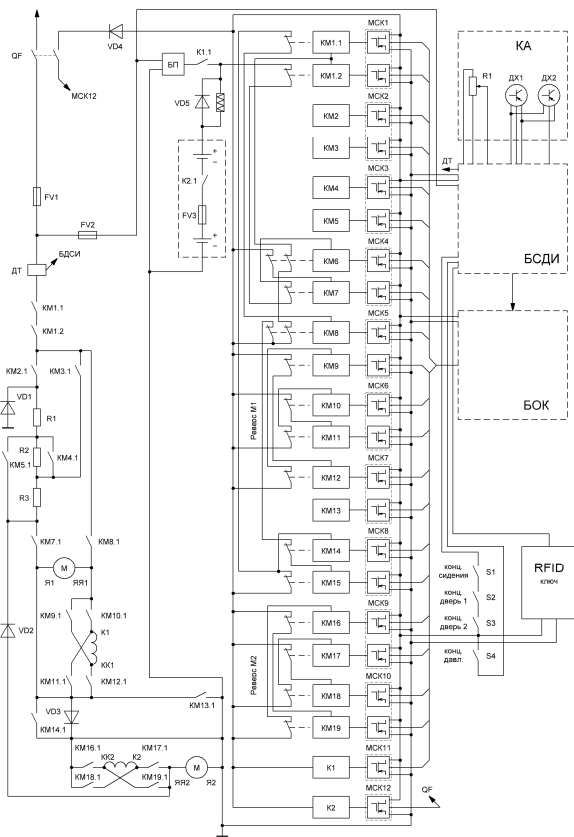


Рис. 5. Структурная схема бесконтактного микропроцессорного контроллера производства ООО «Амплитуда» (г. Донецк) для рудничных электровозов

Относительно шахтных электровозов, то этот вид транспорта, где, как в никаком другом, важное значение имеет критерий простоты конструкции и отсутствия дополнительных контактных устройств, в т.ч. датчиков, необходимых для функционирования системы, полностью соответствует, как объект внедрения в его

структуру ТЭМК на основе вентильных реактивных электроприводов.

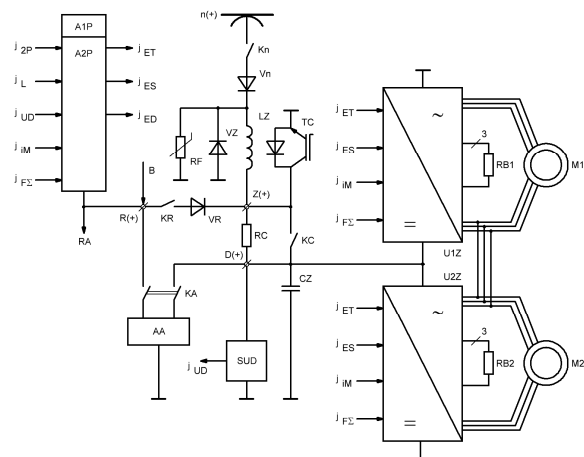


Рис. 6. Структурная схема тягового электрического комплекса типа ПЧ-ТАД для рудничного вида контактно-аккумуляторного электровоза

Меж тем, одним из известных недостатков использования данного типа двигателей в тяговых электромеханических системах является необходимость измерения положения ротора [12-26] для осуществления токового управления, что приводит к необходимости дополнительной установки датчика на валу двигателя. В то же время, как известно [18, 20], за последние годы приобрели популярность бездатчиковые методы управления, которые позволяют выполнять идентификацию положения ротора по измеряемым электрическим сигналам, что, в свою очередь, создает условия для исключения механического датчика из состава структуры электромеханической системы. Однако, существующие методы бездатчикового управления, в том числе и те, которые были разработаны авторами ранее [20], ориентированные на традиционные электрические машины переменного тока, а не на ВРД. В свою очередь, существующие подходы к такому управлению для ВРД предусматривают необходимость заблаговременного определения электрических параметров обмоток двигателя и кривой намагничивания стали машины в зависимости от тока и угла поворота ротора [23], что затрудняет настройку системы, приводит к снижению точности управления угловой частотой вращения при изменении параметров объекта регулирования, а в определенных случаях и к потере устойчивости системы.

На рис. 7, «а» представлена линейная аппроксимация изменения индуктивности обмотки ВРД. При этом принято допущение о постоянстве величины индуктивности обмоток ВРД

$L_{\min}$ при отклонении от невыровненного положения ротора не более чем на $t_2/2$, а также устойчивости величины максимальной индуктивности этой обмотки $L_{\max}$ при отклонении от выровненного положения не более чем на $t_1/2$. Между этими двумя состояниями индуктивность изменяется по линейному закону с постоянным наклоном, то есть $dL/d\theta_e = \text{const}$, где θ_e – положения ротора ВРД в электрических градусах.

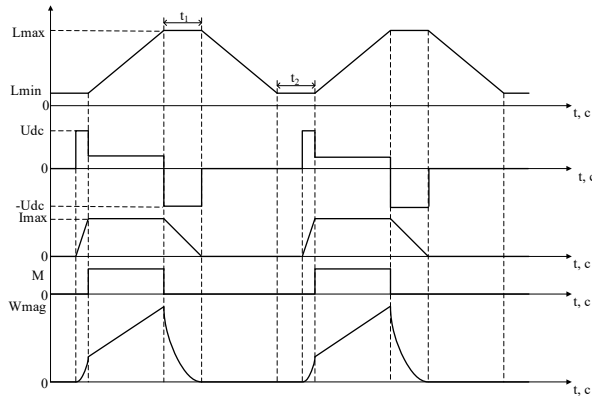


Рис. 7. Диаграммы демонстрирующие принцип токового управления вентильных реактивных двигателей: а – изменение величины индуктивности; б – изменение величины приложенного напряжения к обмотке при токовом управлении ВРД; в – аппроксимированная кривая изменения тока ВРД; г – крутящий момент, создаваемый данной фазой ВРД; д – энергия магнитного поля катушки

Из рис. 7 следует, что крутящий момент ВРД может быть создан только при условии подачи тока в момент изменения индуктивности. Поэтому при работе на угловой частоте вращения, ниже базовой, одной из задач токового управления является максимальное использование активной фазы с точки зрения возбуждения соответствующей обмотки непосредственно перед началом процесса роста индуктивности. При этом, данное первоначальное намагничивание выполняется с малой постоянной времени, поскольку индуктивность низкая, поэтому, приложив к обмотке полное напряжение звена постоянного тока (U_{dc}), можно достичь быстрого роста тока до максимального значения $I_{\max}$. В момент, когда обмотка ВРД будет возбуждена током и индуктивность начнет возрастать, возникнут условия для создания крутящего момента M . В этот период времени выходное напряжение (рис. 7, б) преобразователя ВРД меняется для обеспечения

постоянной величины тока, а потокосцепление обмотки линейно возрастает, пропорционально количеству энергии W_{mag} , которая накапливается в магнитном поле обмотки.

Когда период роста индуктивности обмотки ВРД заканчивается, система управления переключается в режим размагничивания катушки путем подключения ее к отрицательному напряжению звена постоянного тока ($-U_{dc}$). Поскольку в это время индуктивность обмотки ВРД является большей, чем в невыровненном положении ротора, то процесс размагничивания занимает больше времени, чем процесс намагничивания. Благодаря этим процессам получается импульс крутящего момента M , причем крутящий момент является нулевым при постоянной индуктивности обмотки даже при наличии ее частичного возбуждения, что является свидетельством того, что механическая мощность на валу двигателя в данный момент равна нулю, а вся потребляемая мощность приводом, расходуется на намагничивание. Т. е. крутящий момент в общем случае можно изображать, как прямоугольный импульс.

Поскольку ток в обмотку подается до начала роста индуктивности, то данное явление можно использовать для бездатчиковой оценки положения ротора. На рис. 8 представлена форма тока в обмотке ВРД при токовом управлении с помощью широтно-импульсной модуляции. Из него видно, что в момент начала роста индуктивности обмотки возникает отрицательная производная тока в обмотке, что позволяет сформировать сигнал положения ротора. В дальнейшем сигналы каждой фазы, полученные описанным способом, поступают в подсистему косвенной идентификации положения, где осуществляется усреднение частоты следования импульсов и расчет средней частоты вращения ротора, а путем интегрирования – получение оценки угла поворота ротора.

Пренебрегая взаимным электрическим и магнитным воздействием фаз ВРД, уравнение электрического равновесия его обмоток можно записать так:

$$u - iR - d\psi/dt = 0$$

$$\psi = \int (u - iR) dt,$$

где u – напряжение, подводимое к обмотке ВРД, i – ток, протекающий по обмотке, R – активное сопротивление, ψ – потокосцепление обмотки.

Потокосцепления можно рассмотреть как функцию тока и индуктивности $L(i, \theta)$, что в свою очередь также является функцией угла поворота ротора ВРД и тока:

$$\psi(i, \theta) = L(i, \theta)i.$$

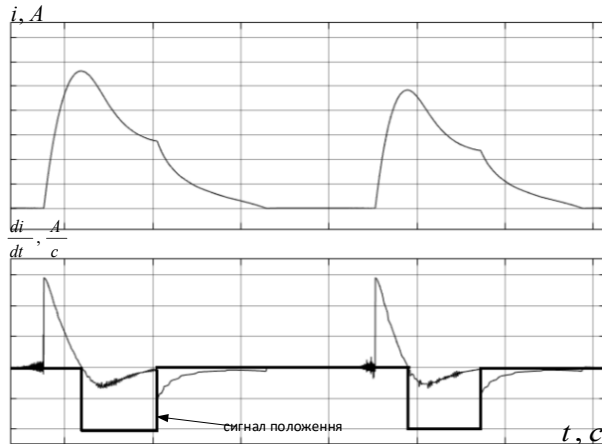


Рис. 8. Получение сигнала положения ротора вентильного реактивного двигателя

Таким образом, для бездатчиковой идентификации положения ротора необходимо подать группу импульсов напряжения при соответствующем управлении ключами инвертора питания ВРД перед подачей тока в обмотку [6]. При этом индуктивность может быть оценена с учетом предыдущее зависимостей следующим образом:

$$L(i, \theta) = U_{dc} \left[\frac{di_{on}}{dt} - \frac{di_{off}}{dt} \right]^{-1},$$

где di_{on}/dt , di_{off}/dt – измеренные значения производной тока при включении и выключении инвертора.

С измеренных значений индуктивности обмоток ВРД путем дифференцирования их значений возможно оценка величины крутящего момента двигателя:

$$M = \frac{i^2}{2} \frac{dL(i, \theta)}{d\theta}$$

За счет оценки изменения индуктивности выполняется определение величин максимальной L_{max} и минимальной индуктивности L_{min} , что в соответствии с рис. 7 позволяет определять как положение ротора, так и моменты подачи тока в обмотки.

Поскольку положения ротора в данных условиях является величиной известной, то

дальнейшее определение величины угловой частоты вращения для использования в качестве сигнала обратной связи выполняется с использованием расчета механического положения ротора θ_m , которое исчисляется из сигнала положения ротора в электрических градусах, с учетом количества полюсов машины:

$$\omega = \Delta\theta_m / \Delta t.$$

Для проверки вышеизложенных авторских суждений была разработана математическая модель электромеханической системы с ВРД в среде Matlab/Simulink, структуру которой приведено на рис. 9. Данная модель состоит из блока библиотеки SimPowerSystem, моделирующий работу ВРД мощностью 60 кВт, который получает питание от силового преобразователя, представляющего подсистемой Power Converter, имитирующий работу несимметричного мостового IGBT-инвертора. В подсистеме токового управления Current Reg используются сигналы, получаемые от наблюдателя состояния Observer, выполненный в виде S-файла, который реализует предложенный в работе подход к идентификации неизмеряемых переменных состояния ВРД. Результаты моделирования в виде графиков изменения во времени угловой частоты вращения (сигнал задания – ω^* , реальное значение угловой частоты вращения ротора – ω , значение частоты, полученное путем оценки с помощью наблюдателя состояния – $\hat{\omega}$) и тока обмотки ВРД показано на рис. 10.

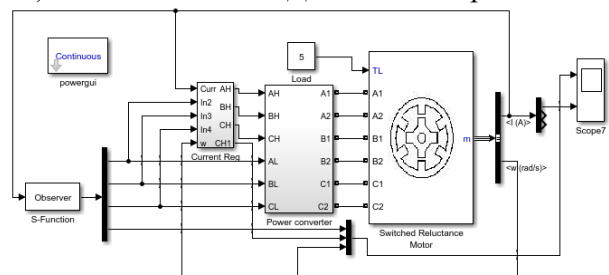


Рис. 9. Структура математической модели электромеханической системы с вентильным реактивным двигателем

Из них видно, что, несмотря на наличие небольшой погрешности ($\approx 0,6\%$) в оценке угловой скорости вращения, предложенная бездатчиковая система управления обеспечивает необходимые для тяговых электроприводов показатели качества управления с точки зрения точности и быстродействия.

Приведенный комплекс математического моделирования подтверждает, что точность системы управления на основе предложенного

подхода идентификации неизмеряемых переменных состояния, является достаточным для обеспечения необходимого функционирования тягового электропривода, поскольку существующая в динамических режимах погрешность определения углового положения не приводит к возникновению неустойчивых режимов.

Таким образом, бездатчиковая оценка угловой частоты вращения и положения ротора ВРД на основе измерения индуктивности обмоток при возбуждении их кратковременными импульсами напряжения, когда индуктивность рассматривают как функцию тока и угла поворота ротора при известных значений ее максимальной и минимальной величины, дает возможность оценивать механические переменные состояния тягового электропривода без установления датчика на валу двигателя, что является существенным в контексте повышения надежности тяговых электромеханических систем в целом.

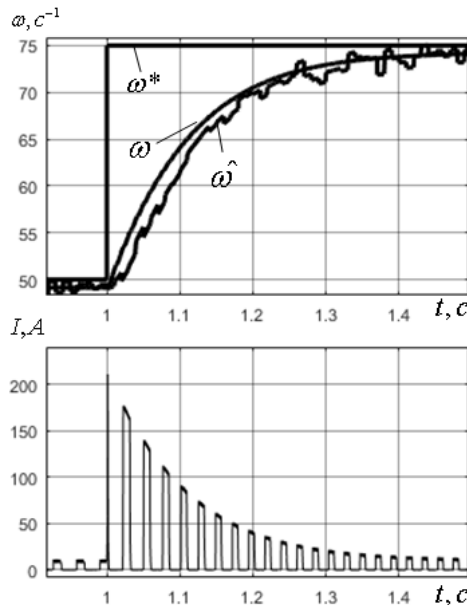


Рис. 10. Результаты моделирования предложенной системы управления

Меж тем замена существующих типов ТЭМК на современные, являясь прогрессивным и ожидаемым производственными-горняками решением, и будучи обязательным первоочередным шагом для повышения эффективности функционирования ВШТ, все же не может решить проблему электробезопасности контактных видов откатки в силу наличия контактного провода на доступном для несанкционированного касания горнорабочих месте. Что, к сожалению, в практике эксплуатации контактных электровозов приводит к трагическому факту – поражения людей электрическим током, что,

как правило, 100% из которых заканчиваются летальным исходом. Одним из реальных направлений устранения этой проблемы есть применение комбинированных по способу питания тяговых электрических двигателей (ТЭД) электровозов. Такое направление активно используется некоторыми зарубежными фирмами-производителями рудничных типов электровозов, в том числе A.L.Lee Corporation (США), ASEA (Швеция), Shandong China Coal Group (Китай) и ряда других фирм [13]. В данном варианте типажа электровозов происходит следующая картина питания ТЭД: в магистральных выработках, где КП расположен на довольно недоступной высоте для несанкционированного касания его горняками, электровоз получает питание от контактной тяговой (КТС), а при функционировании в особо опасных для горняков местах – погрузочных выработках, питается от автономных источников. Таким образом, исключается источник повышенной опасности поражения людей электрическим током – контактный провод (КП).

При такой структуре ТЭМК весьма щекотливым моментом и во многом определяющим перспективу данных электровозов является выбор вида автономного источника электрической энергии и его рабочих параметров.

Выбор типа автономного источника электрической энергии.

В качестве автономного источника электрической энергии (АИЭЭ) для питания ТЭМК шахтных электровозов могут быть применены различные виды накопителей энергии: аккумуляторы, суперконденсаторы и т. п. [5-8].

При этом отметим, что тактика подхода к созданию комбинированных по виду питания ТЭМК электровозов может иметь два направления. Первый, это когда напряжение автономного источника энергии должно быть равно напряжению тяговой сети, и второй вариант – напряжение АИЭЭ меньше напряжения контактной сети, и его энергетического уровня достаточно только для кратковременного передвижения электровоза на низкой скорости при перестановке вагонеток при погрузочно-разгрузочных операциях. Для этого важно правильно выбрать энергетические параметры тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ).

Выбор типов и емкости тяговых аккумуляторных батарей.

Превентивные исследования авторов для условий железорудных шахт показали, что размещение ТАБ с уровнем напряжения питания тяговых двигателей напряжением 250 В (как и в

случае питания от тяговой контактной сети) нереально в существующих габаритах отечественных рудничных видов контактных электровозов, а увеличение их габаритов невозможно из-за ограничений размеров горных выработок. В соответствии с этим возникает задача выбора ТАБ – минимально необходимой емкости и минимально возможных габаритов.

В ходе исследований установлено, что для условий железорудных шахт при использовании электровоза типа К14У необходима ёмкость аккумуляторной батареи для одного рейса при длине нагрузочного выработки в среднем около 200 м может составить 27,8 А·ч, при движении по погрузочной выработке - 16,7 А·ч. Для питания компрессора двигателя необходима емкость ТАБ может составить 3 А·ч, а для цепей освещения пути электровоза – 1,5 А·ч. С учетом КПД и дополнительных расходов емкости ТАБ течение рейса электровоза будет необходима общая емкость батареи около 70 А·ч.

Приведенная методика расчетов является немного приближенной и должна быть уточнены в ходе дополнительных исследований с учетом фактических значений параметров рейсовой работы электровозов в условиях конкретных шахт (предприятий). Так емкость может быть еще и уменьшена до 60 А·ч путем увеличения продолжительности заряда за счет времени пересменок – заряд не только во время рейса, но и в интервалах между сменами. Если учесть снижение емкости ТАБ в процессе ее эксплуатации, то ее номинальная емкость для выполнения 6-7 рейсов за одну смену может составлять 400 А·ч.

Выбор параметров ТАБ предлагается осуществлять исходя из требований по выполнению технологических операций электровозной откатки: перестановки вагонеток под пунктами погрузки (люками), движения по погрузочной выработке, питания двигателя мотор-компрессора и освещения. Общий расход емкости ТАБ за период нагрузка составит:

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4,$$

где Q_1 – емкость ТАБ, расходуемая на выполнение перестановок вагонеток под люками;

Q_2 – емкость ТАБ, расходуемая на проезд подвижного состава по погрузочной выработке;

Q_3 – емкость батареи, расходуемая на питание двигателя компрессора электровоза;

Q_4 – емкость батарей, расходуемая на работу осветительных приборов электровоза.

При работе электровоза можно осуществлять подзарядку ТАБ, продолжительность ко-

торой может составить в среднем 0,8 часа за один рейс. Тогда ток подзарядки будет определяться:

$$I_3 = \frac{Q_{\Sigma}}{t_3} = \frac{75}{0,8} = 94$$

Напряжение подзаряда для никель-металлической батареи при $U_e = 1,6$ В на одном элементе и их количества $n = 60$ будет равна:

$$U_3 = n \cdot U_e = 60 \cdot 1,6 = 96 \text{ В}$$

Важным фактором для формирования ТАБ в комплексе с тяговым электрооборудованием шахтного электровоза является правильный выбор типа аккумуляторов [11]. Широко используются для шахтных электровозов никель-железные аккумуляторы, параметры которых приведены в таблице 1. Никель-железные аккумуляторы (Ni-Fe) дешевле никель - кадмиевые аккумуляторы (Ni-Cd), не содержат токсичный кадмий, имеют долгий срок службы и высокую механическую прочность. Однако они характеризуются высоким саморазрядом, низкой отдачей по энергии, практически неработоспособны при температуре ниже -10°C .

Существуют также три основных вида никель-кадмиевых аккумуляторов: негерметичные с ламельными (ламельные аккумуляторы) и спеченными электродами (безламельные аккумуляторы) и герметичные.

Таблица 1

Типы аккумуляторов	FL350(ТНЖ350 V5)	FL500(ТНЖ500)V5
Номинальная емкость, А·ч	350	500
Габаритные размеры, мм	165x167x538	165x167x538
Масса с электролитом, кг	20,6	24,0
Масса без электролита, кг	16,8	20,2
Ток заряда, А	70	100
Время заряда, ч	8,0	8,0
Конечное напряжение, В	1,6	1,6

Наиболее оптимальными по стоимости являются ламельные никель-кадмиевые аккумуляторы характеризуются плоской разрядной кривой, высокими ресурсом и прочностью, но повышенной удельной энергией. Удельная энергия, скорость разряда Ni-Cd аккумуляторов с спеченными электродами выше, они работоспособны при

низких температурах, но дороже, характеризуются эффектом памяти и способностью к тепловому разгону. Герметичные Ni-Cd аккумуляторы характеризуются горизонтальной разрядной кривой, высокими скоростями разряда и способностью действовать при низких температурах, но они дороже герметизированных свинцовых аккумуляторов и характеризуются эффектом памяти. Недостатком никель-кадмиевых аккумуляторов является применение токсичного кадмия.

Использование свинцово-кислотных аккумуляторов для контактно-аккумуляторных электровозов имеет свои преимущества и недостатки. Так среднее разрядное напряжение свинцово-кислотных аккумуляторов составляет – 2,1 В на один элемент, тогда как щелочных – 1,1 В. Энергия разряда кислотных аккумуляторов, по некоторым оценкам, может в 1,4-2,1 раза превышать энергию щелочных аккумуляторов. Но стоит указать, что во время зарядки свинцово-аккумуляторных батарей в контактно-аккумуляторных электровозах (торможение с электрической рекуперацией энергии, подзаряд батарей во время движения электровоза) протекающие химические реакции, могут быть опасными, особенно в случае высокой интенсивности зарядки. В свинцово-кислотных батареях может происходить выделение водорода и кислорода в результате гидролиза воды, повышают риск возникновения провокации взрыва в горных выработках. Для этого случая система подзарядки должна эффективно контролировать процесс заряда батарей и не допускать выделения водорода и кислорода.

В литий-ионных аккумуляторах для отрицательного электрода применяют углеродный материал, в который вмонтированы ионы лития. Активным материалом положительного электрода служит оксид кобальта, в который также вмонтированы ионы лития. Электролитом является раствор соли лития в неводной растворителе. Аккумуляторы имеют высокую удельную энергию, высокий ресурс и способны работать при низких температурах. Благодаря высокой удельной энергии их производство в последние годы резко увеличилось. В литиевых аккумуляторах есть только два существенных недостатка – высокая цена и необходимость иметь специальную (обычно встроенную) систему контроля заряда/разряда, предотвращающую склонность литиевых аккумуляторов к самовозгоранию и даже взрыву при нарушении условий эксплуатации.

По удельному энергии после литий-ионных аккумуляторов на второе место выходят натрий никель-хлоридные аккумуляторы, которые боль-

ше приспособлены к работе в тяжелых условиях эксплуатации. Также у этого вида аккумуляторных батарей есть свои преимущества и недостатки. К достоинствам можно отнести: высокую удельную емкость, сравнимую с литий-ионными аккумуляторами, низкую стоимость и широкую доступность основных материалов аккумулятора, большое время жизни аккумулятора – более 1000 полных циклов заряда/разряда и более 7 лет активной эксплуатации, устойчивость к выходу из строя отдельных аккумуляторных элементов в батарее через очень низкое сопротивление вышедших из строя элементов (до 5% потерь), высокая экологическая безопасность (основные компоненты натрий никель-хлоридных аккумуляторов мало экологически опасные).

К недостаткам натрий никель-хлоридных аккумуляторов можно отнести: необходимость наличия интеллектуальной системы управления батареей, необходимость поддержания высокой рабочей температуры внутри батареи (на уровне 300° С и около 100 Вт мощности для поддержания этой температуры), для разогрева холодной батареи и приведения ее в рабочее состояние необходимо не менее суток.

Длительный срок эксплуатации и высокие показатели циклирования ставят натрий никель-хлоридные аккумуляторы на одно из первых мест среди существующих аккумуляторов. На данный момент единственной существенной помехой является значительная стоимость ТАБ сформированных на базе этих видов элементов. Как только произойдет снижение цены одного киловатт-часа емкости батареи до уровня 300USD, что реально может быть достигнуто (себестоимость производства составляет менее 150 USD за 1 кВт·ч), то использование их в электротранспорте, в том числе и в рудничных электровозах, станет реальностью.

Основные технические и экономические показатели аккумуляторов различных электрохимических систем приведены в таблице 3.

Как было изложено в тексте предварительно, при проектировании контактно-аккумуляторных видов электровозов приходится решать вопрос выбора типа аккумулятора с учетом массогабаритных показателей и энергоресурса. Проведенный анализ в этом направлении показал, что в ближайшей перспективе наиболее целесообразным будет применение литий-ионных и натрий никель-хлоридных видов аккумуляторов, в которых удельный весовая энергия будет составлять более 200 Вт·ч/кг при ресурсе 3000 циклов (против 1000 циклов на сегодняшний день) и стоимости 0,12 \$/Вт·ч.

Электрохимическая система аккумулятора	Диапазон рабочих температур аккумуляторов, °C	Удельная энергия аккумулятора, Вт·г/кг	Относительная стоимость единицы энергии, грн/Вт·г	Потеря емкости при хранении в заряженном состоянии, %/месяц	Срок службы в режиме постоянного подзаряда, год
Свинцово-кислотная, герметичная	-20 ÷ +40	20-50	0,8-1,8	10-15	3-10
Никель-кадмиевая, герметичная	-40 ÷ +45	20-55	1,5-2	до 10	до 20
Литий-ионная	-10 ÷ +50	100-260	2,5-4	5-25	до 5
Никель-хлоридная	-20 ÷ +40	40-100	1,6-2,4	15-25	до 5

Кроме проанализированных видов есть и другие перспективные разработки аккумуляторов в таких странах, как США, Япония, Швеция и ряде других.

Поиски и разработки, направленные на снижение стоимости ТАБ, безусловно, продолжаются и будут продолжаться в дальнейшем. Снижение уровня цен в т. ч. на литий-ионные, натрий-никель-хлоридные аккумуляторы в сочетании с решениями по производству новых их видов, позволяющими предложить более безопасные с большими по уровню емкостями ТАБ на основе в т. ч. графитовых аккумуляторов, создадут в ближайшей перспективе еще более привлекательные условия для расширения объемов их применения в качестве тяговых для энергоэффективных электрохимических систем.

Между тем, при этом не следует отклонять результаты научных поисков по разработке автономных источников питания для ТЭМК на базе, например, суперконденсаторов или других видов и типов элементов накопления электрической энергии, в т. ч. на основе нанотехнологий.

Суперконденсаторы как возможный источник электрической энергии для автономного питания тяговых электрических двигателей.

Ещё один вид накопителей электроэнергии, на который возлагались большие надежды – ионисторы (суперконденсаторы). По оценкам этот вид накопителей электрической энергии может выдерживать большие зарядные и разрядные токи, имея срок службы значительно больше, чем у существующих типов и видах аккумуляторов.

Так энергия, запасённая конденсатором:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2 \cdot 3600} \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

где C – ёмкость конденсатора, F; U – напряжение на конденсаторе, В.

При ёмкости 3000 F и напряжении на конденсаторе 2,7 В запасённая энергия $W = 3,04 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$.

При цене такого конденсатора $C_1 = 135 \text{ \$}$, т. е. относительная цена составит:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2 \cdot 3600} \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

В тоже время, даже если учесть более продолжительный срок службы ионисторов, всё равно относительная цена ионисторов превышает относительную цену свинцово-кислотных аккумуляторов примерно в 100 раз, а литий-ионных – в несколько десятков раз.

Именно по факту столь высоких относительных ценовых показателей накопители энергии на ионисторах получили ограниченное применение. Хотя это может быть охарактеризовано и, как «пока», а сейчас ионисторные накопители энергии могут использоваться как дополнение к аккумуляторам для поглощения пиковых нагрузок или для случаев в необходимости небольшого количества накапливаемой энергии.

К примеру в работе [14] приведен разработанный блок питания с использованием ионисторов, подключаемых параллельно аккумуляторной батарее, для снятия пиковых нагрузок с аккумулятора в ТАБ рудничного электровоза. При этом энергетическая ёмкость блока ионисторов составляет менее 1% энергетической ёмкости аккумуляторной батареи. Т. е. в энер-

гетическом плане ёмкостной накопитель не играет заметно положительной роли, но в тоже время существенно увеличивает затраты. Но это предмет отдельного исследования.

Выводы и направление дальнейших исследований

1. Существующие и эксплуатируемые в отечественных железорудных шахтах контактные виды рудничных электровозов не соответствуют современным требованиям к ним со стороны производств прежде всего по низким показателям энергоэффективности и повышенной опасности поражения электрическим током горнорабочих при эксплуатации этих электровозов, а так же по невозможности на их основе структурировать АСУ ВШТ.

2. Достаточно эффективным по устранению вышеизложенных недостатков контактных видов электровозов для условий рудных шахт представляются комбинированные виды, в т. ч. контактно-аккумуляторные, которые в процессах погрузки-разгрузки железорудного сырья будут функционировать при питании их ТЭМК от автономного источника электрической энергии (тяговых аккумуляторов, суперконденсаторов и т. п.), а при движении по магистральным подземным выработкам (квершлагам), питаются от тяговой контактной сети, с одновременным процессом зарядки, к примеру, аккумуляторов в ходе этого сегмента циклодвижения.

3. Предложенная методика сравнительной оценки различных видов накопителей энергии для условий шахтных видов электровозов позволила установить самый затратный на данном

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шидловський А. К., Півняк Г. Г., Рогоза М. В., Випанасенко С. Л. Геоэкономика та геополітика України.: Дніпропетровськ – Національний гірничий університет, 2007. – 282 с.
2. Дослідження техніко-економічних показників гірничодобувних підприємств України та ефективності їх роботи в умовах змінної кон'юнктури світового ринку залізорудної сировини: Монографія / Є. С. Бабець, І. Є. Мельникова, С. Я. Гребенюк, С. П. Лобов; за ред. Є. С. Бабець; НДГРІ ДВНЗ «КНУ». – Кривий Ріг: вид. Р. А. Козлов, 2015. – 391 с.
3. Синчук О. Н. и др. Системы управления шахтным электровозным транспортом / О. Н. Синчук, Э. С. Гузов, Н. И. Шулин, П. К. Саворский – К.: Техніка, 1985. – 198 с.
4. Лебодкін С. В. Вугільна промисловість і перспективні напрямки розвитку тягових електроприводів рудникових електровозів (Проблеми і перспективи) / С. В. Лебодкін, А. Ф. Сінолиций, О. В. Пасько // Вісник Криворізького технічного універ-

тапе технічного розвитку вид накопитель – ёмкостной, и рекомендовать к применению свинцово-кислотные аккумуляторы, имеющие наиболее низкую относительную стоимость. Более того, отмечена нецелесообразность применения ёмкостных накопителей энергии на рудничных электровозах, даже в качестве дополняющих аккумуляторные батареи устройств тяговых энергетических комплексов.

4. Приведенный пример расчетов электрических параметров автономных источников электрической энергии для шахтных комбинированных видов электровозов ориентирован для условий железорудных шахт. Приведенные расчеты напряжения и емкости для данных источников являются несколько приближенными и должны быть уточнены в ходе дополнительных исследований с учетом фактических значений параметров рейсовой работы электровозов конкретной шахты.

Для шахтных контактно-аккумуляторных видов электровозов рекомендуется в перспективе применять наиболее энергоэффективных графеновые аккумуляторы, допускающие большие разрядные токи, характерные для режимов тяговых электромеханических комплексов именно данных видов электровозов.

5. Для повышения эффективности, улучшения режимов работы и повышения энергоэффективности автономных источников электрической энергии всех видов рекомендуется применение на шахтных электровозах современных структур тяговых электромеханических комплексов.

REFERENCES

1. Shidlovskij A. K., Pivnjak G. G., Rogoza M. V., Vipanashenko S. L. Geoeconomika ta geopoligika Ukraini.: Dnipropetrovsk – Nacional'nij girnichij universitet, 2007. – 282 s.
2. Doslidzhennja tehniko-ekonomichnih pokaznikov girnichodobuvnih pidpriymstv Ukraini ta efektyvnosti ih roboti v umovah zminnoji kon'junkturi svitovogo rinku zalizorudnoi sirovini: Monografija / Є. С. Babec', І. Є. Mel'nikova, S. Ja. Grebenjuk, S. P. Lobov; za red.. Є. С. Babecja; NDGRI DVNZ «KNU». – Krivij Rig: vid. R. A. Kozlov, 2015. – 391 s.
3. Sinchuk O. N. i dr. Sistemy upravlenija shahtnym jelektrovoznym transportom / O. N. Sinchuk, Je. S. Guзов, N. I. Shulin, P. K. Savorskij – K.: Tehnika, 1985. – 198 s.
4. Leb'odkin S. V. Vugil'na promislovist' i perspektivni naprijamki rozvitku tjavovih elektroprivodiv rudnikovih elektrovoziv (Problemi i perspektivi) / S. V. Leb'odkin, A. F. Sinolicij, O. V. Pas'ko // Visnik Krivoriz'kogo tehnicznego universitetu. Zbirnik naukovih

ситету. Збірник наукових праць. – 2004. № 4. – С. 12 – 15.

5. Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование : учебник / И. О. Синчук, Э. С. Гузов, В. Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. доктора технических наук, профессора О. Н. Синчука. – Кривой Рог – Донецк: ЧП Щербатых А. В., 2015 – 428 с.

6. Волотковский С. А. Рудничная электровозная тяга / Волотковский С. А. – М.: Недра, 1981. – 389 с.

7. Оат Г. П. Промышленные испытания аппаратуры автоматического вождения шахтных поездов / Г. П. Оат, Н. И. Литун, В. Н. Дардалан // Уголь.-1980.-№11.-с.38-39.

8. Волотковский С. А. Опыт эксплуатации рудничных контактных электровозов с импульсной системой управления / С. А. Волотковский, Ю. С. Ремха, В. Х. Пирожено и др. // Горный журнал. – 1976. – №7. – С. 51 – 53.

9. Астафьев Ю. П. Опыт применения АСУ электровозным транспортом с использованием компьютеров / Ю. П. Астафьев, О. Н. Синчук, Э. С. Гузов // Горный журнал. – №11, 1980. – С.55 – 58.

10. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / [Г. Г. Пивняк, И. П. Ремизов, С. А. Саратикянц и др.] ; Под ред. Г. Г. Пивняка. – М.: Недра, 1990. – 244 с.

11. Степаненко В. П. Повышение энергоэффективности и ресурсосбережения рудничного электровозного транспорта // Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. – 2016. № 42. – С. 20 – 25.

12. Синчук О. Н. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов. Научное издание / О. Н. Синчук, И. О. Синчук, Н. Н. Юрченко, А. А. Чернышов, О. А. Удовенко, О. В. Пасько, Э. С. Гузов – К.: ІЕД НАН України 2006. – 252 с.

13. Материалы сайта www.asea.com.

14. Степаненко В. П., Венцлафф В., Дайнека Р., Василенко В. И. Разработка и испытание контактно-аккумуляторных электровозов V-860 // Уголь. – 1986. – №12. – С. 32–33.

15. Синчук О. Н., Шокарев Д. А., Скапа Е. И., Гузов Э. С., Караманиц Ф. И. Синергетический тяговый асинхронный электротехнический привод для контактно-аккумуляторного двухосного электровоза // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2011.-Вип. 4 (16). –С.65-68.

16. Жеребкин Б. В. Система векторного управления электроприводом рудничных электровозов с использованием аппарата нечёткой логики. Автореферат диссертационной работы на соискание учёной степени к.т.н. Санкт–Петербург. – 2005. – 19 с.

17. Материалы сайта www.amplituda.com.ua

18. Козакевич І.А. Система бездатчикового векторного керування з використанням релейних регуляторів / В зб. «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика». – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 80-82.

19. Садовой О.В., Сохіна Ю.В., Польовий Є.В.

prac'. – 2004. № 4. – С. 12 – 15.

5. Shahtnyj jelektrovoznyj transport. Teorija, konstrukcii, jelektrooborudovanie : uchebnik / I. O. Sinchuk, Je. S. Guзов, V. L. Debelyj, L.L. Debelyj; pod red. doktora tehniceskikh nauk, professora O. N. Sinchuka. – Krivoj Rog – Doneck: ChP Shherbatyh A. V., 2015 – 428 s.

6. Volotkovskij S. A. Rudnichnaja jelektrovoznaja tjaga / Volotkovskij S. A. – M.: Nedra, 1981. – 389 s.

7. Oat G. P. Promyshlennye ispytaniya apparatury avtomaticheskogo vozhdenija shahtnih poezdov/ G. P. Oat, N. I. Litun, V. N. Dardalan // Ugol'.-1980.-№11.-s.38-39.

8. Volotkovskij S. A. Opyt jekspluatacii rudnichnih kontaktnyh jelektrovozov s impul'snoj sistemoj upravlenija / S. A. Volotkovskij, Ju. S. Remha, V. H. Pirozhenko i dr. // Gornyj zhurnal. – 1976. – №7. – S. 51 – 53.

9. Astaf'ev Ju. P. Opyt primenenija ASU jelektrovoznym transportom s ispol'zovaniem komp'juterov / Ju. P. Astaf'ev, O. N. Sinchuk, Je. S. Guзов // Gornyj zhurnal. – №11, 1980. – S.55 – 58.

10. Transport s induktivnoj peredachej jenerгии dlja ugol'nyh shaht / [G. G. Pivnjak, I. P. Remizov, S. A. Saratikjanc i dr.] ; Pod red. G. G. Pivnjaka. – M.: Nedra, 1990. – 244 c.

11. Stepanenko V. P. Povyshenie jenergojeffektivnosti i resursosberezhenija rudnichnogo jelektrovoznogo transporta // Visnik Krivoriz'kogo tehnicnogo universitetu. Zbirnik naukovih prac'. – 2016. № 42. – S. 20 – 25.

12. Sinchuk O. N. Kombinatorika preobrazovatelej naprjazhenija sovremennyh tjagovyh jelektroprivodov rudnichnyh jelektrovozov. Nauchnoe izdanie / O. N. Sinchuk, I. O. Sinchuk, N. N. Jurchenko, A. A. Chernyshov, O. A. Udovenko, O. V. Pas'ko, Je. S. Guзов – K.: IED NAN Ukraїni 2006. – 252 s.

13. Materialy sajta www.asea.com.

14. Stepanenko V. P., Vencloff V., Dajneka R., Vasilenko V. I. Razrabotka i ispytanie kontaktno-akkumuljatornyh jelektrovozov V-860 // Ugol'. – 1986. – №12. – S. 32–33.

15. Sinchuk O. N., Shokarev D. A., Skapa E. I., Guзов Je. S., Karamanic F. I. Sinergeticheskij tjagovyj asinhronnyj jelektrotehniceskij privod dlja kontaktno-akkumuljatornogo dvuhosnogo jelektrovoza // Elektromehanichni ta energozberigajuchi sistemi. -2011.-Vip. 4 (16). –S.65-68.

16. Zherebkin B. V. Sistema vektornogo upravlenija jelektroprivodom rudnichnyh jelektrovozov s ispol'zovaniem apparata nechjotkoj logiki. Avtoreferat dissertacionnoj raboty na soiskanie uchjonoj stepeni k.t.n. Sankt–Peterburg. – 2005. – 19 s.

17. Materialy sajta www.amplituda.com.ua.

18. Kozakevich I.A. Sistema bezdatchikovogo vektornogo keruvannja z vikoristannjam relejnih reguljatoriv / V zb. «Problemi energoresursozberezhennja v elektrotehnicnih sistemah. Nauka, osvita i praktika». – Kremenjuk: KrNU, 2015. – S. 80-82.

19. Sadovoj O.V., Sohina Ju.V., Pol'ovij Є.V. Ventil'nij reaktivnij elektroprivod z vikoristannjam

Вентильний реактивний електропривод з використанням позитивних зворотних зв'язків // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3. – С. 82-84.

20. Синчук О.Н., Осадчук Ю.Г., Козакевич И.А. Бездатчиковое векторное управление на основе анизотропных свойств машины // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 15(91). – С. 45-47.

21. Donker R.D., Pulle D.W.J., Veltman A. Advanced Electrical Drives. Analysis, modeling, control. – Springer Science + Business Media, 2011. – 447 p.

22. Nakazawa Y., Ohya K., Fujii H., Uehara H., Hyakutake Y. Phase voltage estimation for position sensorless control of switched reluctance motor // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems. Chiba, Japan – 2016. – Pp. 1 – 4.

23. Peng F., Jin Ye, Ali Emadi. Position sensorless control of switched reluctance motor based on numerical method // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Milwaukee, USA – 2016. – Pp. 1 – 8.

24. Rongguang H., Deng, J. Cai, Wang C. Sensorless control of switched reluctance motors based on high frequency signal injection // 17th International conference on Electrical machines and systems. Hangzhou, China – 2014. – Pp. 3558-3563.

25. Sinchuk O., Kozakevich I., Kalmus D., Siyanko R. Examining energy-efficient recuperative braking modes of traction asynchronous frequency-controlled electric drives // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems. – 2017. – No 1/1. – Pp. 50-56.

26. Yousefi-Talouki A., Pellegrino G. Sensorless direct flux vector control of synchronous reluctance motor drives in a wide speed range including standstill // 2016 XXII International conference on electrical machines. Lausanne, Switzerland – 2016. – Pp. 1167-1173.

pozitivnih zvorotnih zv'jazkiv // Elektrotehnicni ta komp'juterni sistemi. – 2011. – № 3. – S. 82-84.

20. Sinchuk O.N., Osadchuk Ju.G., Kozakevich I.A. Bezdatchikove vektornoe upravlenie na osnove anizotropnyh svojstv mashiny // Jeletrotehnichekie i komp'juternye sistemy. – 2014. – № 15(91). – S. 45-47.

21. Donker R.D., Pulle D.W.J., Veltman A. Advanced Electrical Drives. Analysis, modeling, control. – Springer Science + Business Media, 2011. – 447 p.

22. Nakazawa Y., Ohya K., Fujii H., Uehara H., Hyakutake Y. Phase voltage estimation for position sensorless control of switched reluctance motor // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems. Chiba, Japan – 2016. – Pp. 1 – 4.

23. Peng F., Jin Ye, Ali Emadi. Position sensorless control of switched reluctance motor based on numerical method // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Milwaukee, USA – 2016. – Pp. 1 – 8.

24. Rongguang H., Deng, J. Cai, Wang C. Sensorless control of switched reluctance motors based on high frequency signal injection // 17th International conference on Electrical machines and systems. Hangzhou, China – 2014. – Pp. 3558-3563.

25. Sinchuk O., Kozakevich I., Kalmus D., Siyanko R. Examining energy-efficient recuperative braking modes of traction asynchronous frequency-controlled electric drives // Eastern European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems. – 2017. – No 1/1. – Pp. 50-56.

26. Yousefi-Talouki A., Pellegrino G. Sensorless direct flux vector control of synchronous reluctance motor drives in a wide speed range including standstill // 2016 XXII International conference on electrical machines. Lausanne, Switzerland – 2016. – Pp. 1167-1173.

В статье изложены результаты исследований по анализу состояния и определению основных направлений поиска путей решения проблемы повышения показателей функционирования внутришахтного транспорта отечественных подземных железорудных предприятий. Отмечено, что основным видом транспорта по доставке железорудного сырья, материалов и горнорабочих в подземных горных выработках данных видов шахт, в отличие от угольных, есть и будет в ближайшие 35-50 лет оставаться электровозный. Акцентируется, что эксплуатируемые в отечественных рудных шахтах контактные виды электровозов в силу опасности поражения электрическим током горнорабочих при несанкционированном, но реально возможном из-за ограниченности габаритов горных выработок по факту доступности, касании ими контактного провода целесообразно заменить на новые более безопасные. На основании анализа результатов изысканий в анализируемой проблеме оценен потенциал и определена тактика достижения поставленной цели путем решения двуединой задачи – повышения эффективности и безопасности функционирования электровозосоставов путем создания для отечественных подземных железорудных производств базовых – комбинированных видов электровозов и синергетических структур энергоэффективных тяговых электромеханических комплексов для них.

Ключевые слова: рудничный электровоз; тяговые электромеханические системы.

УДК 621.311.086.5:621.3.001.57

О. Н. СІНЧУК, Е. С. ГУЗОВ, И. О. СІНЧУК, Ф. І. КАРАМАНИЦ, І. А. КОЗАКЕВИЧ,
В. А. ФЕДОТОВ, В. Л. ДЕБЕЛИЙ (КрНУ)ДВНЗ «Криворізький національний університет», 50027, м. Кривий Ріг, вул. Віталія Матусевича, 11,
ORCID: orcid.org/0000-0002-7621-9979

ПАТ «Криворізький залізорудний комбінат», 50029, м. Кривий Ріг, вул. Симбірцева, 1А,

ТОВ «Завод Амплітуда», м. Донецьк, вул. Ходаковського, 1

**МАЛИЙ КОМЕНТАР ДО ТАКТИКИ СТВОРЕННЯ ТЯГОВИХ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ РУДНИЧНИХ
ЕЛЕКТРОВОЗІВ КОМБІНОВАНОГО ВИДУ**

У статті викладені результати досліджень з аналізу стану і визначенню основних напрямків пошуку шляхів вирішення проблеми підвищення показників функціонування внутрішньошахтного транспорту вітчизняних підземних залізорудних підприємств. Відзначено, що основним видом транспорту по доставці залізорудної сировини, матеріалів і гірників в підземних гірничих виробках даних видів шахт, на відміну від вугільних, є і буде в найближчі 35-50 років залишатися електровозна. Акцентовано, що експлуатовані в вітчизняних рудних шахтах контактні види електровозів в силу небезпеки ураження електричним струмом гірників при несанкціонованому, але реально можливому через обмеженість габаритів гірських виробок за фактом доступності, торканні ними контактного проводу доцільно замінити на нові більш безпечні. На підставі аналізу результатів досліджень в аналізованій проблемі оцінений потенціал і визначена тактика досягнення поставленої мети шляхом вирішення двоєдиного завдання - підвищення ефективності та безпеки функціонування електровозопотягів шляхом створення для вітчизняних підземних залізорудних виробництв базових - комбінованих видів електровозів і синергетичних структур енергоефективних тягових електро механічних комплексів для них.

Ключові слова: рудничний електровоз; тягові електро механічні системи.

UDC 621.311.086.5:621.3.001.57

O. N. SYNCHUK, E. S. HUZOV, Y. O. SYNCHUK, F. Y. KARAMANYTS,
Y. A. KOZAKEVYCH, V. A. FEDOTOV, V. L. DEBELIY (KrNU)State institution of higher education «Kryvyi Rih National University», 50027, Kryvyi Rih, Vitaliy Matusevych str., 11,
ORCID: orcid.org/0000-0002-7621-9979

Public association «Krivorizkiy zalizorudny kombinat», 50029, Kryvyi Rih, Symbircev str. 1A

Limited liability company «Amplitude Factory», Donetsk, Hodakovsky str. 1

**SMALL COMMENTARY TO THE TACTICS OF CREATING TRACTION
ELECTROMECHANICAL COMPLEXES OF MINE ELECTRONICS OF
COMBINED KIND**

The article presents the results of studies on the analysis of the state and the determination of the main directions of the search for ways to solve the problem of increasing the indicators of the functioning of intran-service transport of domestic underground iron ore enterprises. It is noted that the main mode of transport for the delivery of iron ore raw materials, materials and miners in underground mine workings of these types of mines, in contrast to coal mines, is and will remain in the next 35-50 years electric locomotive. It is emphasized that the contact types of electric locomotives operated in domestic ore mines, because of the danger of electric shock to miners in the case of unauthorized, but actually possible, because of the limited dimensions of mine workings due to availability, touching them with a contact wire should be replaced with new ones that are safer. Based on the analysis of the survey results, the potential problem is assessed and the tactic of achieving the set goal is determined by solving the two-fold problem of improving the efficiency and safety of the electric locomotives by creating basic - combined electric locomotives and synergetic structures for energy-efficient traction electromechanical systems for domestic iron ore production facilities.

Keywords: mine electric locomotive; traction electromechanical systems.

Received 05.09.2017; accepted in revised form 07.12.2017.

Б. Г. ЛЮБАРСЬКИЙ¹ (НТУ «ХП»), І. В. ДОМАНСЬКИЙ² (ТОВ «ДАК-Енергетика»)

¹Кафедра електричного транспорту та тепловозобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, Харків, Україна, 61002, тел.: (057) 707-63-67, ел. пошта: boris19111972@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2985-7345>

²ТОВ «ДАК-Енергетика», вул. Степова, 2, Новомосковський р-н, с. Піщанка, Дніпропетровська обл., 51283, +38 (056) 736-24-80

МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ПАРИ СТРУМОПРИЙМАЧ – КОНТАКТНИЙ ПРОВІД

Вступ та постановка проблеми

Розроблені сучасні типи моделей розрахунку динамічної взаємодії контактної лінії та струмоприймачів можна розділити на аналітичні і імітаційні [1]. До аналітичних моделей відносять моделі з зосередженими та з розподіленими параметрами. Перші не задовольняють збільшену потребу в точності розрахунку динамічної взаємодії пари струмоприймач-контактний провід. Ця проблема їх використання можливо відокремити лише інженерними розрахунками. Другі, моделі з урахуванням розподілених параметрів, дозволяють отримувати на виході усю низьку інформації про процес струмознімання таку як: контактне натискання, точки і часи відриву струмоприймача, амплітуду коливань, координати точки контакту струмоприймач – контактний провід. Недоліком цих моделей є високий порядок системи отриманої системи рівнянь. Як вказується в [1] бажано, щоб модель взаємодії струмоприймачів з контактним проводом мала єдину структуру для як для статичних так і динамічних розрахунків

Літературний огляд

Найкращі результати при моделюванні складних електродинамічних систем досягнуто в моделях які створено на підставі методу кінцевих елементів [2]. Однак такі моделі мають велику розмірність і вимагають великих ресурсів сучасних обчислювальних технік для оцінки стану контактної лінії в процесі її експлуатації. В роботі [3] розглянуто застосування моделі, заснованої на методі кінцевих елементів. Контактний провід, згідно обраного методу, поділяється на елементи, які взаємопов'язані сполучними механізмами, що описуються математичними виразами. За результатами попередніх перетворень формується система диференціальних рівнянь, яка дозволяє моделювати контакт струмоприймач - контактний провід із точністю, що обумовлена кількістю кінцевих елементів.

Для створення моделі динаміки процесів струмоприймач - контактний провід в роботі [4] контактний провід між струн не розбивати на окремі елементи, а приймається як стержень або нитка. Такий підхід, з одного боку призводить до створення математичної моделі високого порядку, а з іншого не забезпечує моделювання впливів на контактний провід, особливо на великих частотах [1].

Основні положення методу частотно-залежних кінцевих елементів розглянуто в роботах [5, 6] в яких зазначається, що розглянутий метод найбільш ефективний при оцінці стану контактної лінії в процесі експлуатації.

Мета статті

Розробка методики моделювання взаємодії пари струмоприймача – контактний провід за допомогою методу частотно-залежних кінцевих елементів.

Основний матеріал дослідження

Розрахункова схема динамічних процесів коливань в вертикальній площині наведена на рис. 1 у вигляді зосереджених мас та демпферів.

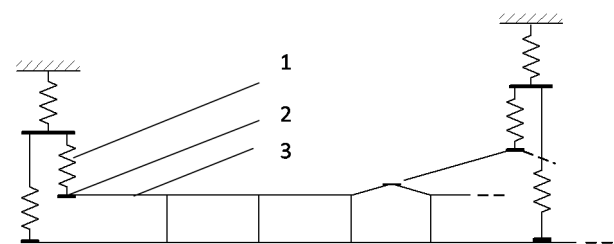


Рис. 1. Розрахункова схема динамічних процесів: 1- демпфер; 2 – маса; 3 – провідник

Згідно розрахункової схеми провідні елементи, які зв'язують точки прикладання мас, описуються питомою масою на одиницю довжини m_1 їх розтягує силою F_0 . Приймаємо припущення про абсолютну жорсткість привідних елементів. Усі інші елементи моделюються з урахуванням жорсткостей та зосередженими масами. Точка прикладання струмо-

приймача може знаходитися в будь-якому елементі уздовж контактної дроти, як на дроти, так і на в місці приєднання струн. Система переміщення проводів в частотних межах описана в [7]. Основне диференціальне рівняння коливань у вертикальній площині має вигляд

$$m_1 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - F_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

де y, x – переміщення у вертикальному та горизонтальних напрямках.

Для рішення рівняння (1) перетворюємо його в частотно-залежне, яке залежить лише від часу рівняння другого порядку

$$F_0 z'' + m_1 \omega^2 z = 0, \quad (2)$$

де z – вертикальна координата переміщення вузла кінцевого елемента.

Рішення рівняння (2) в загальному вигляді має вигляд

$$z(x, \omega) = A \sin \beta x + B \cos \beta x, \quad (3)$$

де A та B – амплітуди гармонік.

З урахуванням $\beta = \omega / \sqrt{F_0 / m_1}$ та граничних умов $z = z_1$ для $x = 0$ і $z = z_2$ для $x = l$ отримаємо

$$z = z_1 (\cos \beta x - \operatorname{ctg} \beta l \sin \beta x) + \frac{z_2 \sin \beta x}{\sin \beta l}. \quad (4)$$

Враховуючи, що сума усіх сил діючих на кінцевий елемент дорівнює

$$F_i = F_i^T + F_i^R, \quad (5)$$

та розділяючи параметри і застосовуючи передавальні функції g_i і g_k отримуємо

$$F_i^T = -\omega^2 \cdot \sum_k m_1 z_k \int_0^1 g_i g_k dx. \quad (6)$$

Для відомих мас заміщення інтегральний вираз перетворюється в дискретно сумарний

$$F_i^T = -\omega^2 \sum_k m_{ik} z_k, \quad (7)$$

де m_{ik} – елементи матриці мас, які визначаються виразом [1]

$$m_{ik} = m_1 \int_0^1 g_i g_k dx.$$

Після аналогічних перетворень для елементів – пружин маємо наступний розрахунковий вираз

$$F_i^R = \sum_k z_k \cdot F_0 \int_0^1 g_i' g_k' dx = \sum_k \bar{c}_{ik} z_k, \quad (8)$$

де $\bar{c}_{ik}$ – коефіцієнти еластичності в сполучних точках.

Загальне матричне рівняння сил має наступний вигляд

$$F = (-\omega^2 M + C) Z = \bar{C}(\omega) Z. \quad (9)$$

Розроблена матричне рівняння (9) дозволяє розгадати різноманітні за структурою контактні підвіски.

Власні вектори системи, відповідні до власних частот мають вид

$$\bar{C}(\omega_n) Z = 0. \quad (10)$$

Зовнішні сили розраховуються згідно дискретного рівняння руху

$$M(\omega_n) \ddot{y}_n(t) + D(\omega_n) \dot{y}_n(t) + C(\omega_n) y_n(t) = F(t). \quad (11)$$

Рівняння (11) проводиться для кожної власної частоти. Рухи на кожній з власних частот складаються для отримання остаточного результуючого впливу.

Для вирішення цього рівняння, рух замінюється модальними вузловими реакціями $y_n(t) = Z_n q_n(t)$ [1,7]. Загальний диференціальний вираз має вигляд

$$\ddot{q}_n + 2\xi \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = r_n(t), \quad (12)$$

де r_n – вектор збудження, що визначається виразом [1]

$$r_n(t) = \frac{1}{m_n} \sum_i P_{oi} W_i. \quad (13)$$

Збуджуючі сили P_{oi} – сила контактної напруги можуть бути визначені експериментально. Так в роботі [8] вона визначена для струмоприймача ТЛ-13Л для швидкості 13 км/год графік якої наведено на рис. 2.

З урахуванням модальної маси $m_n = Z_n^T M(\omega_n) Z_n$ та з вагової функції, що відноситься до точок докладання збуджуючих сил між вузлів i і k отримаємо

$$W_{ik} = z_{ni} (-\operatorname{ctg}(\beta_n l) \sin(\beta_n x) + \cos(\beta_n x)) + z_{nk} \sin(\beta_n x) / \sin(\beta_n l), \quad (14)$$

де $\beta_n = \omega_n / a_p$, a_p – швидкість поширення хвилі відповідних провідників контактної дроти.

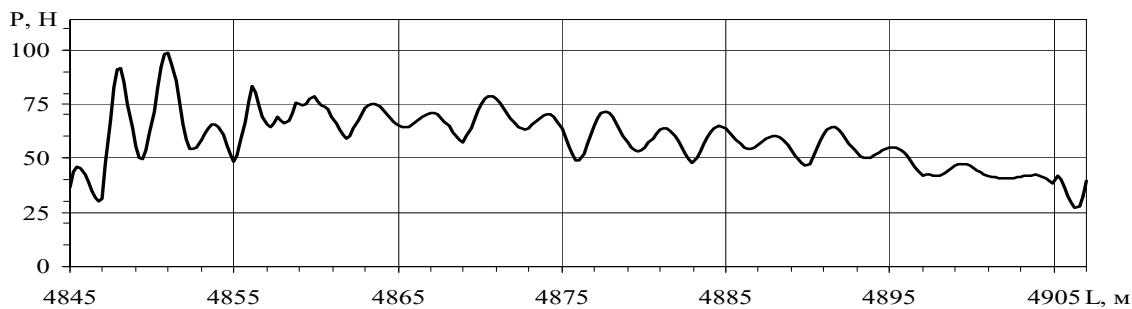


Рис. 2. Крива контактного натискання в прольоті розрахункового анкерного ділянки при русі струмоприймача ТЛ-13Л зі швидкістю 80 км / год

Висновки

1. Розроблена методика дозволяє врахувати одночасні збудження системи в різних точках, що вимагає визначення модального демпфуючого коефіцієнта, який є функцією частоти. Використовуючи збудливу силу як базис, відповідне диференціальне рівняння вирішується для всіх власних частот, а результати для окремих частот накладаються для отримання загальної реакції системи контактної проводу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Доманский, И. В. Моделирование взаимодействия контактной сети и токоприемников с применением частотно-зависимых конечных элементов и учетом взаимосвязи механического и электрического расчета подвесок / И. В. Доманский // *Залізничний транспорт України* : науково-практичний журнал. - 2011. - № 5. - С. 9-14.
2. Любарский Б.Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електрорухомого складу : дис. ... доктора техн. наук : 05.22.09 / Любарський Борис Григорович. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – 368 с.
3. Fischer W. / Eine Methode zur Berechnung des Schwingungsverhaltens von Kettenwerk und Stromabnehmer bei hohen Zuggeschwindigkeiten (A method to calculate the vibration behaviour of overhead contact line and pantograph at high running speeds) / W. Fischer. TH Darmstadt 1975, dissertation thesis.
4. Hobbs A. E. W. / Accurate prediction of overhead line behaviour / A. E. W. Hobbs. In: *Railway Gazette International* (1977)9, pp. 339 - 343.
5. Kiesling F. Contact lines for electric railways planning design implementation. Berlin and Munich. Siemens / Kiesling F., Puschman R., Schmieder A., 2001. – 822 p.
6. Brodkorb A. Simulationsmodell des Systems Stromabnehmer-Oberleitungskettenwerk (Model for the simulation of the interaction between overhead contact line and pantograph) / A. Brodkorb, M. Semrau // In: *Elektrische Bahnen* 91(1993)4, pp. 105 to 113.
7. Link M. Zur Berechnung von Fahrleitungsschwingungen mit Hilfe frequenzabhängiger

2. Для визначення траєкторії рух точок розроблено диференціальне рівняння руху, яке застосовує незалежні від часу системи матриць, та не потребують великого обсягу обчислень для моделювання сили натискання. Таким чином необхідно лише один раз провести обчислення для заданої конфігурації контактної проводу.

REFERENCES

1. Domanskij, I. V. Modelirovanie vzaimodejstvija kontaktnoj seti i tokopriemnikov s pri-meneniem chastotno-zavisimyh konechnyh jelementov i uchetom vzaimosvjazi mehanicheskogo i jelektricheskogo rascheta podvesok / I. V. Domanskij // *Zaliznichnij transport Ukraїni* : naukovopraktichnij zhurnal. - 2011. - № 5. - S. 9-14.
2. Liubarskyi B.H. Teoretychni osnovy dlja vyboru ta otsinky perspektivnykh system elektromekhanichnoho peretvorennia enerhii elektrorukhomoho skladu : dys. ... doktora tekhn. nauk : 05.22.09 / Liubarskyi Borys Hryhorovych. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – 368 s.
3. Fischer W. / Eine Methode zur Berechnung des Schwingungsverhaltens von Kettenwerk und Stromabnehmer bei hohen Zuggeschwindigkeiten (A method to calculate the vibration behaviour of overhead contact line and pantograph at high running speeds) / W. Fischer. TH Darmstadt 1975, dissertation thesis.
4. Hobbs A. E. W. / Accurate prediction of overhead line behaviour / A. E. W. Hobbs. In: *Railway Gazette International* (1977)9, pp. 339 - 343.
5. Kiesling F. Contact lines for electric railways planning design implementation. Berlin and Munich. Siemens / Kiesling F., Puschman R., Schmieder A., 2001. – 822 p.
6. Brodkorb A. Simulationsmodell des Systems Stromabnehmer-Oberleitungskettenwerk (Model for the simulation of the interaction between overhead contact line and pantograph) / A. Brodkorb, M. Semrau // In: *Elektrische Bahnen* 91(1993)4, pp. 105 to 113.
7. Link M. Zur Berechnung von Fahrleitungsschwingungen mit Hilfe frequenzabhängiger finiter Elemente (Calculation of overhead contact line

finiter Elemente (Calculation of overhead contact line vibrations by means of frequency dependent finite elements) / M. Link. Ingenieur-Archiv 51(1981), pp. 45 to 60.

8. Максимчук В.Ф. Результаты моделирования взаимодействия контактной сети и токоприемников на экспериментальном участке скоростного движения на направления Киев - Полтава - Донецк. Оценка статических и динамических параметров / В. Ф. Максимчук, И. В. Доманский // *Залізничний транспорт України : науково-практичний журнал*. - 2012. - № 1. - С. 25-31.

vibrations by means of frequency dependent finite elements) / M. Link. Ingenieur-Archiv 51(1981), pp. 45 to 60.

8. Maksimchuk V.F. Rezultaty modelirovaniya vzaimodejstviya kontaktnoj seti i tokopriemnikov na jeksperimental'nom uchastke skorostnogo dvizhenija napravlennija Kiev - Poltava - Doneck. Ocenka staticheskikh i dinamicheskikh parametrov / V. F. Maksimchuk, I. V. Domanskij // *Zaliznichnij transport Ukraїni : naukovopraktichnij zhurnal*. - 2012. - № 1. - S. 25-31.

Розроблені сучасні типи моделей розрахунку динамічної взаємодії контактної провладу і струмоприймачів можна розділити на аналітичні і імітаційні [1]. До аналітичних моделей відносять на моделі з зосередженими та з розподіленими параметрами. Перші не задовольняють збільшену потребу в точності розрахунку динамічної взаємодії пари струмоприймач-контактний провід. Ця рину їх використання можливо відокремити лише інженерними розрахунками. Другі, моделі з урахуванням розподілених параметрів, дозволяють отримувати на виході усьо низьку інформації про процес струмознімання таку як : контактне натискання, точки і часи відриву струмоприймача, амплітуду коливаний, координати точки контакту струмоприймач – контактний провід. Недоліком цих моделей є високий порядок отриманої системи рівнянь.

Розроблена в роботі методика дозволяє врахувати одночасні збудження системи в різних точках, що вимагає визначення модального демпфуючого коефіцієнта, який є функцією частоти. Використовуючи збудливу силу як базис, відповідне диференціальне рівняння вирішується для всіх власних частот, а результати для окремих частот накладаються для отримання загальної реакції системи контактної провладу.

Для визначення траєкторії руху точок розроблено диференціальне рівняння руху, яке застосовує незалежні від часу системи матриць, та не потребують великого обсягу обчислень для моделювання сили натискання. Таким чином необхідно лише один раз провести обчислення для заданої конфігурації контактної провладу.

Ключові слова: контактна підвіска, струмоприймач, контактний провід, динамічна взаємодія, моделювання.

УДК 621.331:621.311.71

Б. Г. ЛЮБАРСКИЙ¹ (НТУ «ХПИ»), И. В. ДОМАНСКИЙ² (ТОВ «ДАК-Енергетика»)

¹Кафедра электрического транспорта и тепловозостроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, Харьков, Украина, 61002, тел.: (057) 707-63-67, ел. почта: iboris19111972@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2985-7345>

²ООО «ДАК-Енергетика», ул. Степная, 2, Новомосковский р-н, с. Пещанка, Днепропетровская обл., 51283, +38 (056) 736-24-80

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАРЫ ТОКОПРИЕМНИК – КОНТАКТНЫЙ ПРОВОД

Разработаны современные типы моделей расчета динамического взаимодействия контактного провода и токоприемников можно разделить на аналитические и имитационные [1]. К аналитическим моделям относят на модели с сосредоточенными и с распределенными параметрами. Первые не удовлетворяют возросшую потребность в точности расчета динамического взаимодействия пары токоприемник-контактный провол. Сферу их использования возможно отделить только инженерными расчетами. Вторые, модели с учетом распределенных параметров, позволяющих получать на выходе целую совокупность информации о процессе токозема таку как: контактне нажатие, точки и время отрыва токоприемника, амплитуду колебаний, координаты точки контакта токоприемник - контактний провол. Недостатком этих моделей является высокий порядок полученной системы уравнений.

Разработана в работе методика позволяет учесть одновременно возбуждения системы в разных точках, что требует определения модального демпфирующего коэффициента, который является функцией частоты. Используя возбуждающую силу как базис, соответствующее дифференциальное уравнение решается для всех собственных частот, а результаты для отдельных частот накладываются для получения общей реакции системы контактного провладу.

Для определения траектории движения точек разработаны дифференциальное уравнение движения, которое применяет независимые от времени системы матриц, и не требующие большого объема вычислений для моделирования силы нажатия. Таким образом необходимо лишь один раз провести вычисления для заданной конфигурации контактного провладу.

Ключевые слова: контактная подвеска, токоприемник, контактний провол, динамическое взаимодействие, моделирование.

UDC 621.331:621.311.71

B. G. Liubarskyi ¹ (NTU «KhPI»), I. V. Domanskyi ² (OOO «DAK-Energetika»)

¹Department of Electric Transport and Diesel Locomotives, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Frunze st. 21, Kharkov, Ukraine, 61002, tel.: (057) 707-63-67, e-mail: boris19111972@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2985-7345>

²OOO «DAK-Energetika», Stepnaya st. 2, Novomoskovsk district, Peshchanka, Dnepropetrovsk region, 51283, +38 (056) 736-24-80

INTERACTION SIMULATION METHODOLOGY OF PANTOGRAPH - CONTACT WIRE

The modern types of models for calculating the dynamic interaction of a contact wire and current collectors can be divided into analytical and imitation [1]. Analytic models are referred to models with lumped and distributed parameters. The former do not satisfy the increased need for the accuracy of the calculation of the dynamic interaction of the pair, the receiver-contact wire. The sphere of their use can only be separated by engineering calculations. Second, the models taking into account the distributed parameters, allowing to obtain on the output a whole set of information about the current collection process such as: contact pressing, points and time of tearing off the susceptor, the amplitude of the oscillations, the coordinates of the point of contact pantograph - the contact wire. The disadvantage of these models is the high order of the resulting system of equations.

The technique developed in this work allows taking into account excitations of the system at different points simultaneously, which requires the determination of the modal damping coefficient, which is a function of frequency. Using the excitatory force as a basis, the corresponding differential equation is solved for all natural frequencies, and the results for individual frequencies are superimposed to obtain the overall response of the contact wire system.

To determine the trajectory of motion of points, a differential equation of motion is developed that applies time-independent matrix systems, and does not require a large amount of computation to model the force of pressing. Thus, it is only necessary to perform calculations once for the given configuration of the contact wire

Keywords: contact network, pantograph, contact wire, dynamic interaction, modeling.

Received 07.09.2017; accepted in revised form 08.12.2017.

Н. В. ХВОРОСТ (ХНУГХ), Л. В. СМЕНОВА (УГАЖД), И. О. СИНЧУК,
И. В. КАСАТКИНА, М. Л. БАРАНОВСКАЯ (ГВУЗ КНУ)

Кафедра «Автоматизированных электромеханических систем в промышленности и транспорте»
ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, ул. Виталия Матусевича, 11, 50027,
Украина, +380564091730, e-mail: speet@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-2606-8228

К ВОПРОСУ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ШАХТНЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Введение

В шахтах, рудниках и при строительстве различных подземных коммуникаций в Украине эксплуатируется около 3-х тысяч 20-ти типов электровозов, которые в структуре электровозосоставов являются составной частью транспортной системы внутришахтного транспорта (ВШТ) данных видов предприятий [1-3]. К сожалению, практически все эти электровозы оборудованы неэффективными по целому ряду показателей тяговыми электромеханическими комплексами (ТЭМК) на базе электрических двигателей постоянного тока [1]. Такое состояние является основой низких показателей функционирования ВШТ, а, следовательно, и всего горного предприятия в целом.

В последнее время в Украине, после десятилетий забвения, возродились исследования по разработке и практической реализации современных по уровню эффективности тяговых электромеханических комплексов [4-7]. К числу тяговых относятся ТЭМК на основе тяговых асинхронных электрических двигателей (ТАД) – нетрадиционных и новых решений для шахтных видов и типов электровозов. Это в полной мере можно отнести и к оценке аналогичных разработок ряда зарубежных фирм и организаций [8-10]. Однако такая же «близость» в результатах наблюдается не только в положительных, но и в некоторых упущениях в ходе «конструирования» структуры ТЭМК. И это, прежде всего, отсутствие или недостаточное присутствие в известных разработках действенных, отвечающих современным требованиям, систем по трем текущим параметрам функционирования ТЭМК. Меж тем, понятие объективности функций современных структур ТЭМК в нынешней его трактовке включает в себя, как обязательную, такую постоянную слагаемую, как мониторинг параметров функционирования ТЭМК.

Цель

Разработка алгоритма, предусматривающего идентификацию, диагностику и мониторинг электрических параметров тяговых асинхронных двигателей в структурах тяговых электромеханических комплексов в реальном времени их функционирования.

Результаты исследования

Предлагаемая и обоснованная последовательность операций при идентификации электрических параметров и диагностики тяговых асинхронных двигателей в комплексе ТЭМК шахтных электровозов заключается в следующем (рис. 1).

Формируется модель объекта для проведения мониторинга, включающая:

- тип тягового асинхронного двигателя;
- вид и особенности работы частотного преобразователя: симметричные и несимметричные режимы работы с отдельным регулированием напряжения и частоты, возможность формирования постоянного напряжения в заданных цепях нагрузки (фазах асинхронного двигателя);
- возможность задания необходимых режимов работы: пуск, торможение, непрерывное вращение, возбуждение постоянным током;
- условия работы ТЭМК: характер и вероятная величина тяговой нагрузки, приведенный к валу двигателя момент инерции механизма, зависящего от нагрузки шахтного электровоза.

Выбор структуры – последовательности операций идентификации определяется режимом работы, который реализуется тем или иным способом при выполнении команд машиниста электровоза.

При автоматическом управлении электровозом структура модели объекта определяется командами оператора.

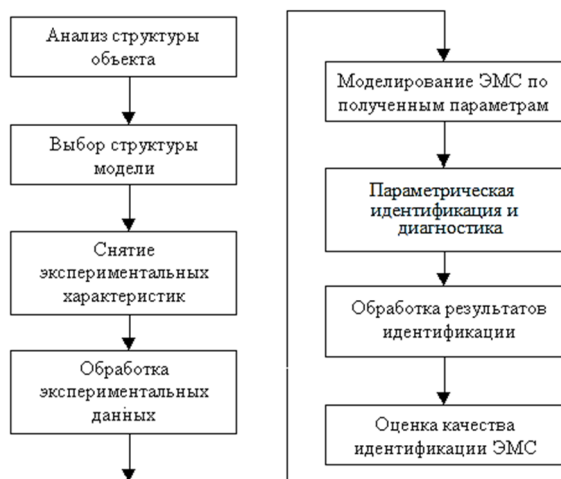


Рис. 1. Последовательность операций при идентификации и диагностике параметров тяговых асинхронных двигателей

В этом варианте отрабатываются необходимые для идентификации следующие режимы работы ТЭМК: поочередное двухфазное включение статора двигателя на постоянное напряжение [10-16], пуск двигателя с заданной амплитудой и частотой напряжения питания. Измеряемые параметры ТАД - значения фазных напряжений, токов и частота вращения. Форматизированные микропроцессорной системой управления ТЭМК данные по соответствующим каналам передаются в бортовую ЭВМ, содержащую необходимое программное обеспечение для идентификации этих параметров и диагностики состояния двигателя.

В оперативную память микропроцессорной системы управления ТЭМК электровоза загружаются требуемые для диагностики и идентификации параметров массивы данных о переходных процессах:

- три массива данных $I_{a1...aN}$, $I_{b1...bN}$, $I_{c1...cN}$ о фазных токах и три массива данных $U_{a1...aN}$, $U_{b1...bN}$, $U_{c1...cN}$ для попарного фазного включения на постоянное напряжение U_{II} ;

- три массива данных $I_{a1...aN}$, $I_{b1...bN}$, $I_{c1...cN}$ о токах в трех фазах и три массива данных $U_{a1...aN}$, $U_{b1...bN}$, $U_{c1...cN}$ о трех фазных напряжениях при пуске или рабочем режиме;

- при наличии датчика частоты вращения формируется соответствующий массив данных ω скорости вращения.

Обработка экспериментальных данных заключается в масштабировании, регуляризации согласования массивов данных с ожидаемыми результатами расчётов на математических моделях идентифицируемого объекта. Выбор масштабов для измеренных значений, представля-

ющих переходный процесс с точностью, необходимой для решения задач идентификации, определяется допустимой ошибкой дальнейших вычислений и является самостоятельной задачей.

На основе анализа переходных процессов в электромагнитном контуре статорной цепи разработан алгоритм идентификации активных сопротивлений, индуктивностей и взаимоиндуктивностей статора и ротора ТАД, предусматривающий проведение процедуры включения ТЭМК, измерение и хранение значений требуемых координат (токов, напряжений, скорости вращения) и расчеты переходных и установившихся процессов в реальном времени.

Обработка результатов идентификации является составной частью диагностики. Алгоритм диагностики состояния параметров ТАД представлен на рис.2.

Сравнивая значения токов в каждой фазе за определенное время, например, время пуска или включения на постоянное напряжение, определяются временные интервалы переходного и установившегося процесса.

Процедуры диагностики проводятся после приема и масштабирования массивов данных о фазных токах и напряжениях статора ТАД (Блок 1) и по результатам отклонения данных измеренных координат и рассчитанных при моделировании.

Расчет активных сопротивлений фаз статора по данным токов режима включения статора на постоянное напряжение (Блок 6 рис. 2 и Блоки 7-14 рис.3) и их сравнение с каталожными (паспортными) данными позволяет сделать вывод о наличии витковых замыканий или обрыве параллельных ветвей в обмотках статора.

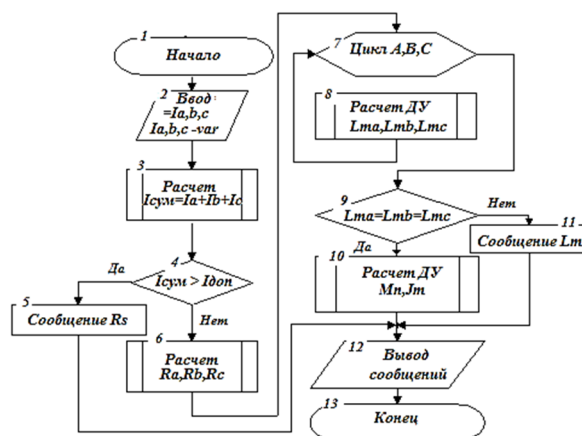


Рис. 2. Алгоритм диагностики состояния электрических параметров тягового асинхронного двигателя

Алгоритм диагностики обрыва стержней короткозамкнутого ротора проводится в случае допустимых значений активных сопротивлений статорной обмотки и заключается в следующем.

На участке установившегося процесса суммируются мгновенные значения фазных токов статора (Блок 3) и их сумма сравнивается с допустимой величиной отклонения (Блок 4), определяемого действующими требованиями к ТАД. Превышение допустимого отклонения свидетельствует о наличии нулевой последовательности и несимметрии в трехфазной системе. Это свидетельствует о повреждении ротора ТАД и выдается соответствующее сообщение (Блок 5).

При допустимой величине тока нулевой последовательности производится расчет активных сопротивлений статора и ротора блоком 6, реализация которого приведена на рис.3.

Циклический расчет по трем фазам значений корней характеристического уравнения электромагнитного контура каждой пары фаз (Блоки 7,8), включенных на постоянное напряжение, и сравнение полученных значений между собой (Блок 9) позволяет оценить состояние магнитной системы асинхронного двигателя по симметрии и проницаемости блоки 11,12).

Определение главной магнитной индуктивности или индуктивного сопротивления контура намагничивания по значениям постоянных времени электромагнитного контура дает возможность прогнозировать основные эксплуатационные параметры ТАД и определить допустимую нагрузку двигателя (блок 12).

Для определения допустимой нагрузки ТАД примем следующие допущения.

В настоящее время для решения разнообразных задач, связанных с частотным и параметрическим управлением, созданием систем автоматического регулирования и оптимального управления, повышения энергетических показателей систем электропривода с ТАД наиболее распространено векторное представление координат электрических машин переменного тока. С учетом того, что в векторном представлении электромагнитный момент машины переменного тока [18]:

$$M_{эм} = \frac{m}{2} p L_{\mu} \text{Im} \left(I_S I_r^* \right) = \frac{m}{2} p L_{\mu} (I_{S1} I_{r2} - I_{S2} I_{r1}), \quad (1)$$

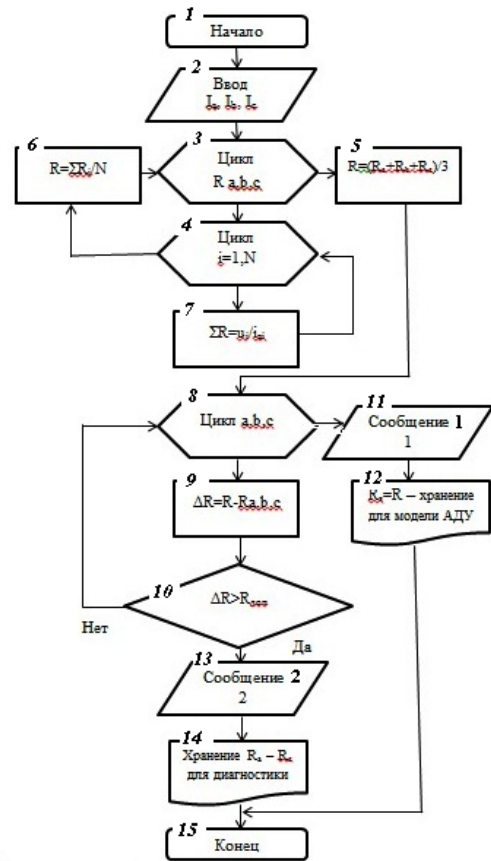


Рис. 3. Алгоритм идентификации активных сопротивлений фаз статора тягового асинхронного двигателя

а токи статора и ротора связаны между собой известными зависимостями будем считать, что электромагнитный момент ТАД пропорционален квадрату тока статора:

$$M_{эм} \approx K_{AD} L_{\mu} I_S^2. \quad (2)$$

Соответственно потери ΔP в ТАД и его нагрев также прямо пропорциональны квадрату тока статора I_S^2 .

Таким образом, допустимый момент нагрузки на валу ТАД:

$$M_{доп} \approx K_{AD} L_{\mu} I_{Sном}^2, \quad (3)$$

что однозначно определяет допустимую загрузженность состава электровоза.

По данным массива, характеризующих установившийся режим и ток в обмотках, определяют активные сопротивления двух последовательно включенных фаз ТАД.

Определяется среднее значение фазного сопротивления за N - измерений при установившемся процессе и анализируется величина отклонения для каждой пары фазных сопротивлений.

Алгоритм расчета активных сопротивлений статора ТАД приведен на рис.3.

При допустимых отклонениях, используя массивы о переходных процессах, производится поиск характерных точек, необходимых для определения взаимной индуктивности статора и ротора L_{μ} . Алгоритм определения характерных точек заключается в следующем. Машинограмма переходного процесса по постоянному току двигателя (рис.4) аппроксимируется двумя линейными графиками L_{n1} и L_{n2} , характеризующих начальный и конечный временные периоды переходного процесса. Точка пересечения графиков определяет характерную точку с временной координатой T_{per} , относительно которой выбираются значения токов для определения взаимной индуктивности статора и ротора.

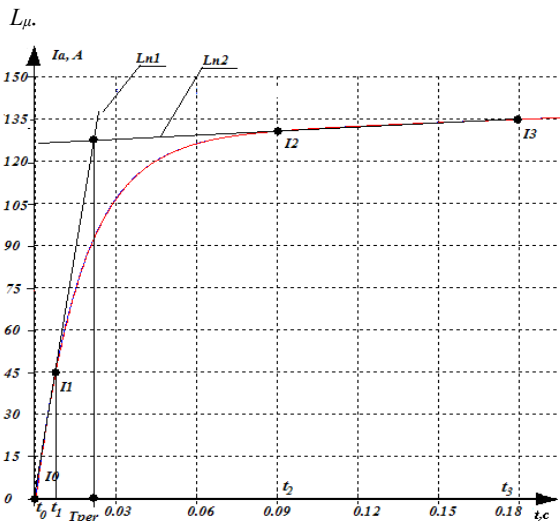


Рис.4. График аппроксимации переходного процесса в тяговом асинхронном двигателе по току

Точка пересечения T_{per} определяется по следующему алгоритму.

По значениям тока определяются коэффициенты уравнений линейных зависимостей изменения тока на линейных участках в начале и конце переходного процесса.

В общем случае уравнение прямой линии L_{n1} имеет вид:

$$I(t) = a + bt$$

Ток I_0 и I_1 в моменты времени соответственно t_0 и t_1 будет равен:

$$\begin{aligned} I_0 &= a_1 + b_1 t_0 \\ I_1 &= a_1 + b_1 t_1 \end{aligned} \quad (4)$$

Решая полученную систему уравнений относительно постоянных коэффициентов a_1 и b_1 получим:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{I_0 t_1 - I_1 t_0}{t_0 - t_1} \\ b_1 &= \frac{I_1 - I_0}{t_1 - t_0} \end{aligned}, \quad (5)$$

тогда уравнение линий L_{n1} и L_{n2} :

$$\begin{aligned} L_{n1}(t) &= \frac{I_0 t_1 - I_1 t_0}{t_0 - t_1} + \frac{I_1 - I_0}{t_1 - t_0} t \\ L_{n2}(t) &= \frac{I_2 t_3 - I_1 t_2}{t_2 - t_3} + \frac{I_3 - I_2}{t_3 - t_2} t \end{aligned}, \quad (6)$$

Точка пересечения T_{per} определяется из условия $L_{n1} = L_{n2}$:

$$T_{per} = \frac{\frac{I_2 t_3 - I_1 t_2}{t_2 - t_3} - \frac{I_0 t_1 - I_1 t_0}{t_0 - t_1}}{\frac{I_1 - I_0}{t_1 - t_0} - \frac{I_3 - I_2}{t_3 - t_2}}, \quad (7)$$

С учетом шага дискретности определяются порядковые номера координат тока Kt_1 и Kt_2 , по которым будут производиться расчеты по определению параметров:

$$\begin{aligned} Kt_1 &= \frac{T_{per}}{\Delta t} - N \\ Kt_2 &= \frac{T_{per}}{\Delta t} + N \end{aligned}, \quad (8)$$

где N – целое число, которое подбирается при отладке программного обеспечения.

Корни характеристического уравнения P_{i1} и P_{i2} статорной цепи описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} P_{i1} &= -\frac{A(R_S L_r + R_r L_S)}{2} - \\ &- \frac{A}{2} \sqrt{(R_S L_r + R_r L_S)^2 + 4 R_S R_r L_{\mu}^2} \\ P_{i2} &= -\frac{A(R_S L_r + R_r L_S)}{2} + \\ &+ \frac{A}{2} \sqrt{(R_S L_r + R_r L_S)^2 + 4 R_S R_r L_{\mu}^2} \end{aligned} \quad (9)$$

и определяются относительно координатной точки $Kt_{per} = T_{per}/\Delta t$.

По значениям токов относительно координаты Kt_2 выбираются N_k значений токов I_{p2} и I_{p2-1} , по которым определяются значения корней

характеристического уравнения P_{i2} и P_{i1} по следующим формулам:

$$dI_{21} = \frac{I_{Ip2} - I_{Ip2-1}}{\Delta t}, \quad (10)$$

$$dI_{22} = \frac{I_{Ip2+10} - I_{Ip2-1+10}}{\Delta t}, \quad (11)$$

$$P_{i2} = \frac{dI_{21} - dI_{22}}{I_{Ip2+10} - I_{Ip2-1+10}}, \quad (12)$$

$$P_{i1} = \frac{1}{I_{p1}} \times \times \text{Log} \frac{I_{ust}(1 - e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t}) + I_{Ip2}e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t}}{I_{Ip2} - I_{Ip2}P_{i2}}, \quad (13)$$

$$D_a = \frac{I_{ust}(1 - e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t}) + I_{Ip2}e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t}}{I_{ust}e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t} - I_{Ip2}e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t}}, \quad (14)$$

На рис.5 приведено графическое приложение к алгоритму определения корней характеристического уравнения P_{i1} и P_{i2} цепи статора асинхронного двигателя.

Применяя формулы первых членов разложения по степенному ряду для уравнений:

$$P_{i2} = \frac{dI_{21} - dI_{22}}{I_{Ip2+10} - I_{Ip2-1+10}}, \quad (15)$$

$$P_{i1} = \frac{1}{I_{p1}} \times \times \text{Log} \frac{I_{ust}(1 - e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t}) + I_{Ip2}e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t}}{I_{Ip2} - I_{Ip2}P_{i2}}, \quad (16)$$

$$D_a = \frac{I_{ust}(1 - e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t}) + I_{Ip2}e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t}}{I_{ust}e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t} - I_{Ip2}e^{P_{i2}K_{t2}\Delta t}}, \quad (17)$$

получим приближенные формулы определения значений корней характеристического уравнения P_{i1} и P_{i2} электромагнитного контура статорной цепи асинхронного двигателя:

$$P_{i2}^1 = \frac{dI_{21} - dI_{22}}{I_{Ip2+10} - I_{Ip2-1+10}}, \quad (18)$$

$$P_{i1}^1 = \frac{1}{I_{p1}} \text{Log} \left[\frac{(I_{ust} + I_{Ip2})P'_{i2}K_{t2}\Delta t}{I_{Ip2} - I_{Ip2}P'_{i2}} \right], \quad (19)$$

$$D_a^1 = \frac{I_{ust}P'_{i2}K_{t2}\Delta t + I_{Ip2}(1 - P'_{i2}K_{t2}\Delta t)}{(I_{ust} - I_{Ip2})(1 - P'_{i2}K_{t2}\Delta t)}. \quad (20)$$

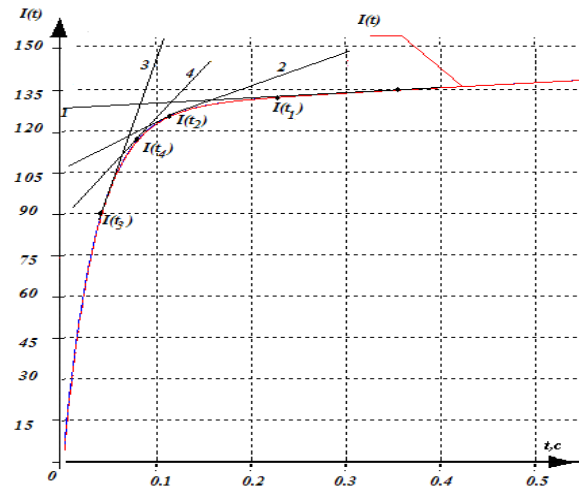


Рис.5. График переходного процесса по току статора тягового асинхронного двигателя

Используем разложение логарифмической функции в степенной ряд и ограничимся первыми 2-мя членами, так как аргумент логарифмической функции имеет порядок $10^{-3} - 10^{-4}$. Таким образом, значение P_{i1} можно определить, используя следующую формулу:

$$P_{i1}^1 = \frac{1}{I_{p1}} \left\{ \left[\frac{(I_{ust} + I_{Ip2})P'_{i2}K_{t2}\Delta t}{I_{Ip2} - I_{Ip2}P'_{i2}} - 1 \right] - \frac{1}{2} \left[\frac{(I_{ust} + I_{Ip2})P'_{i2}K_{t2}\Delta t}{I_{Ip2} - I_{Ip2}P'_{i2}} - 1 \right]^2 \right\} \quad (21)$$

Усреднение значений постоянных времени P_{i1} и P_{i2} достаточно производить по пяти соседним значениям тока в окрестностях точек с координатами I_{p1} и I_{p2} .

Аналитическое выражение разности ΔP корней характеристического уравнения P_{i1} и P_{i2} электромагнитного контура статора ТАД:

$$\Delta P = P_{i2} - P_{i1} = A \sqrt{(R_S L_r + R_r L_s)^2 + 4 R_S R_r L_\mu^2}. \quad (22)$$

Учитывая, что $A = \frac{1}{L_S L_r - L_\mu^2}$, получим равенство:

$$\Delta P (L_S L_r - L_\mu^2) = \sqrt{(R_S L_r + R_r L_s)^2 + 4 R_S R_r L_\mu^2}. \quad (23)$$

С учетом $L_s = K l_s$, L_μ и $L_r = K l_r$, L_μ квадратное уравнение относительно L_μ запишем в виде:

$$L_{\mu}^2 + L_{\mu} \frac{\Delta P}{K_{LS} P_{i1} P_{i2}} + \frac{K_{Lr} R_S^2}{K_{LS} P_{i1} P_{i2} (K_{LS} K_{Lr} - 1)} = 0, \quad (24)$$

Решение полученного уравнения определяет взаимную индуктивность статора и ротора ТАД:

$$L_{\mu 1,2} = -\frac{\Delta P}{2K_{LS} P_{i1} P_{i2}} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{2K_{LS} P_{i1} P_{i2}}\right)^2 - \frac{K_{Lr} R_S^2}{K_{LS} P_{i1} P_{i2} (K_{LS} K_{Lr} - 1)}}, \quad (25)$$

Значение взаимной индуктивности L_{μ} статора и ротора выбираем со знаком «плюс» перед радикалом.

Второй способ определения взаимной индуктивности L_{μ} статора и ротора заключается в следующем.

Графо-аналитическим методом по формулам (18-20) определяются значения корней P_{i1} и P_{i2} характеристического уравнения электромагнитного контура статорной цепи. Определим сумму корней характеристического уравнения P_{i1} и P_{i2} :

$$P_{i1} + P_{i2} = -(R_S L_r + R_r L_S), \quad (26)$$

С учетом $K_{lr} = L_r/L_{\mu}$; $K_{ls} = L_s/L_{\mu}$; $K_{sr} = R_r/R_s$; $K_{sr} = P_{i1} P_{i2} L_{\mu}^2 (K_{ls} K_{lr} - 1)/R_s^2$ окончательно получим формулу для расчета взаимной индукции статора и ротора:

$$L_{\mu} = \frac{R_{SR}((D_a - 1)P_{i1} + P_{i2})}{K_{ls} P_{i1} P_{i2} (1 + D_a)}, \quad (27)$$

При известных индуктивностях рассеяния статора и ротора, определяющих полные индуктивности с учетом взаимной индукции статора и ротора:

$$L_S = L_{\mu} + L_{SK}, \quad (28)$$

$$L_r = L_{\mu} + L_{RK}, \quad (29)$$

получим второй вариант расчета главной индуктивности.

Введем обозначения: $B = R_S + R_S K_{RS}$, $C = R_S (L_{RK} + K_{RS} L_{SK})$

Преобразовав уравнение (14) в уравнение:

$$\Delta P (L_S L_r - L_m^2) = \sqrt{(R_S L_r + R_r L_S)^2 + 4 R_S R_r L_m^2}, \quad (30)$$

получим решение в виде:

$$L_{\mu 1,2} = -\frac{2BC - \Delta P (L_{SK} - L_{RK})}{2(B^2 + C^2 + 4R_S^2 L_{SK} K_{RS})} \pm \sqrt{\frac{(2BC - \Delta P (L_{SK} - L_{RK}))^2}{4(B^2 + C^2 + 4R_S^2 L_{SK} K_{RS})^2} + \frac{4\Delta P L_{SK} L_{RK}}{(B^2 + C^2 + 4R_S^2 L_{SK} K_{RS})^2}} \quad (31)$$

Процедура вычислений определения (уточнения) коэффициента K_{ls} представлена структурной схемой на рис.6, 7.

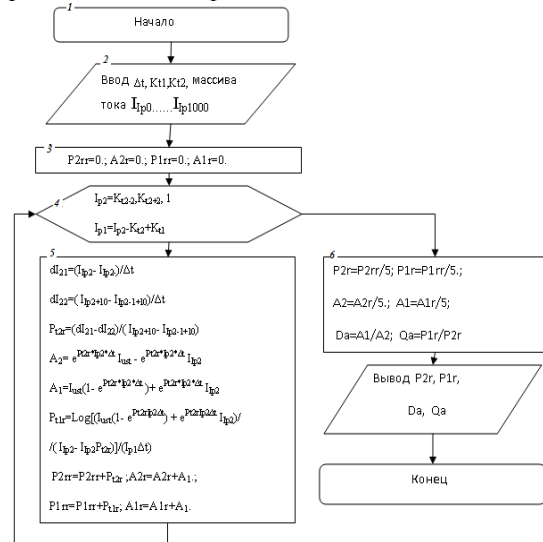


Рис.6. Алгоритм определения значений корней характеристического уравнения P_{i1} и P_{i2} электромагнитного контура статорной цепи статора ТАД с применением трансцендентных функций

Расчет переходных процессов по определению момента M_g на валу двигателя осуществляется с помощью массива данных по току при постоянной скорости вращения. Шаг приближения $\Delta M_g = 9,36$ Нм, начальное приближение $M_g = 9,68$ Нм. Алгоритм определения момента нагрузки и программа его реализации такая же, как и в предыдущем случае (рис.8).

Это позволяет унифицировать алгоритмическое, программное и техническое обеспечение комплекса идентификации и диагностики параметров асинхронного двигателя. Отличие алгоритмов по определению момента нагрузки и момента инерции от представленного на рис.7 заключается в том, что в блоке 4 формируются приближения по моменту нагрузки или по моменту инерции. Первым определяется момент нагрузки и его значение передается с данными для идентификации момента инерции. Это вызвано тем, что на процесс пуска будут влиять момент нагрузки и момент инерции при одинаковом задании питающего напряжения. Момент нагрузки определяется по данным устано-

вившегося режима, то есть при постоянной частоте вращения ротора, когда момент инерции не влияет на переходный процесс по току.

Алгоритм определения суммарного момента инерции приведенного к валу ротора ТАД и механизма приведен на рис 9.

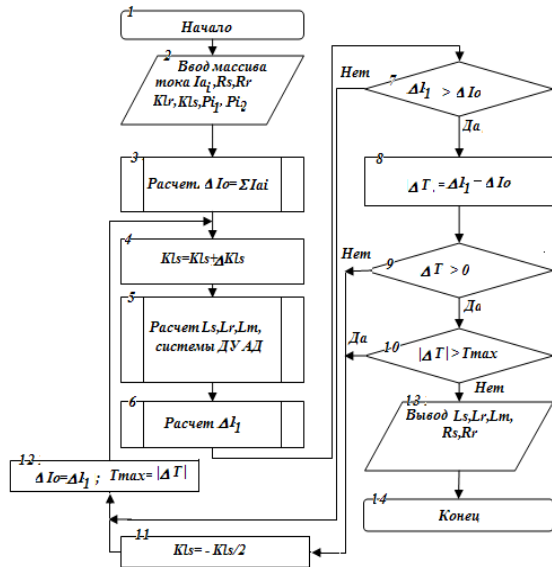


Рис.7. Структурная схема алгоритма вычисления индуктивных сопротивлений асинхронного тягового двигателя

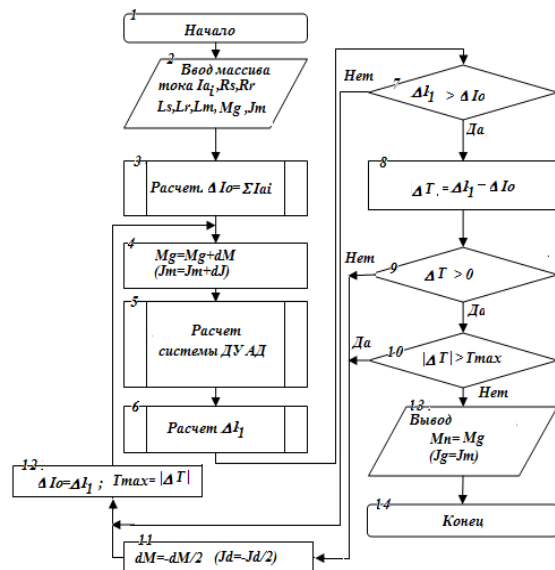


Рис.8. Алгоритм определения момента нагрузки тягового асинхронного двигателя

Определение суммарного момента инерции производится путем сравнения данных переходного процесса по току статора в режиме пуска при известной амплитуде и частоте питающего напряжения. Мгновенные значения пи-

тающего напряжения могут быть заданы расчетным путем или задаваться с помощью данных измеренного напряжения.

При этом ошибка в расхождении измеренных и рассчитанных переходных процессов рассчитывается по значениям фазного тока статора.

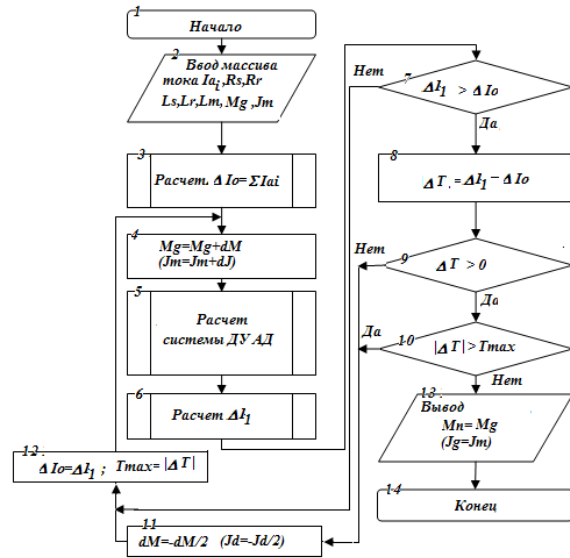


Рис.9. Алгоритм определения момента нагрузки (инерции) тягового асинхронного двигателя

Особенностью определения механических параметров является изменение их в процессе работы, так как момент нагрузки на валу двигателя и момент инерции пропорционально зависят от загрузки электроваза.

Ошибка между реальными значениями момента инерции, момента нагрузки и рассчитанным приближенным моментом нагрузки и моментом инерции определяется шагом приближения и составляет:

$$O_{им} = 100 \frac{|\Delta J_m|}{J_m} = 100 \frac{|48,4 - 44,0|}{44,0} = 10\%$$

$$O_{ин} = 100 \frac{|\Delta M_{gm}|}{M_{gm}} = 10\%$$

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о высокой точности предложенного способа идентификации: максимальная ошибка составляет 6,20%, минимальная ошибка - 0,13%. Разработанный способ идентификации отличается от известных относительной простотой вычислений и отсутствием вычисления сложных функций, может быть реализован с помощью специализированных микро-

процессоров для управления электродвигателями переменного тока, имеющих широкое применение.

Выводы

В работе обоснована, исследована и предложена для практической реализации тактика строения алгоритма, в котором определена последовательность операций при идентификации параметров и диагностика тяговых асинхронных двигателей – слагаемых тяговых электромеханических комплексов шахтных электровозов. Структура объекта и модели определяет: тип тягового асинхронного двигателя; вид и особенности работы частотного преобразователя, возможность формирования постоянного напряжения в заданных цепях нагрузки (фазах асинхронного двигателя); возможность задания необходимых режимов работы (пуск, торможение, непрерывное вращение, двухфазное включение на постоянное напряжение); условия работы тягового электропривода: характер и вероятная величина тяговой нагрузки, приведенный к валу двигателя момент инерции механизма,

зависящего от нагрузки шахтного электровоза. По команде оператора или машиниста электровоза отрабатываются необходимые режимы работы.

В оперативную память бортовой микропроцессорной системы загружаются требуемые для диагностики и идентификации параметров массивы данных о переходных процессах: три массива данных T_1, T_2, T_3 о токах и три массива данных U_1, U_2, U_3 для попарного двухфазного включения на постоянное напряжение U_n ; три массива данных T_1, T_2, T_3 о токах и три массива данных U_1, U_2, U_3 о фазных напряжениях при пуске или рабочем режиме; при наличии датчика скорости вращения формируется массив данных ω скорости вращения.

Обработка экспериментальных данных заключается в масштабировании, регуляризации согласования массивов данных с ожидаемыми результатами расчетов на математических моделях идентифицируемого объекта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шахтный подземный транспорт: справочное издание. / [Бутт Ю.Ф., Грядущий В.Б., Дебелый В.Л. и др.] ; под ред. Б.А.Грядущего: в 2 т. – Донецк: «ВИК», 2009.

Т. 1: Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт. – 2009. — 481 с.

2. Дебелый В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый, С.А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С.30-31.

3. Синчук О.Н. Перспективы развития шахтных (рудничных) электровозов с энергосберегающими видами тяговых электроприводов / О.Н. Синчук, С.В. Лебедкин, И.О. Синчук, О.О. Удовенко, О.В. Пасько // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля. – 2006. – № 8 (102). – С. 83-92.

4. Синчук О.Н. Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте / Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В. – К.: «АДЕФ – Україна», 1998, – 280 с.

5. Шокарев Д. А. Тяговый электропривод рудничного контактно-аккумуляторного электровоза / Д. А. Шокарев. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірка наукових праць «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків. – 2013. – №36. – С. 222–223.

6. Синчук І. О. Тяговий частотно-регульований асинхронний електропривод рудникових контактних електровозів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Синчук І. О. – Харків, 2009.

REFERENCES

1. Shahtnyi podzemnyi transport: spravochne izdanie. / [Butt Yu.F., Gryaduschiy V.B., Debelyiy V.L. i dr.] ; pod red. B.A.Gryaduschego: v 2 t. – Donetsk: «VIK», 2009.

Т. 1: Shahtnyi lokomotivnyi i relsovyiy transport. – 2009. — 481 s.

2. Debelyiy V.L. Osnovnyie napravleniya razvitiya shahtnogo lokomotivnogo transporta / V.L. Debelyiy, L.L. Debelyiy, S.A. Melnikov // Ugol Ukrainyi. – 2006. – #6. – S.30-31.

3. Sinchuk O.N. Perspektiviyi razvitiya shahtnyih (rudnichnyih) elektrovozov s energosberegayuschimi vidami tyagovyih elektroprivodov / O.N. Sinchuk, S.V. Lebedkin, I.O. Sinchuk, O.O. Udovenko, O.V. Pasko // Visnik ShidnoukraYinskogo natsionalnogo unIversitetu ImenI Volodimira Dalya. – Lugansk: SNU Im. V. Dalya. – 2006. – # 8 (102). – S. 83-92.

4. Sinchuk O.N. Impul'snyie sistemyi upravleniya i zaschityi na rudnichnom elektrovoznom transporte / Sinchuk O.N., Chumak V.V., Erzhov O.V. – K.: «ADEF – UkraYina», 1998, – 280 s.

5. Shokarev D. A. Tyagovyyi elektroprivod rudnichnogo kontaktno-akkumulyatornogo elektrovoza / D. A. Shokarev. // Visnik Natsionalnogo tehnlchnogo unIversitetu «HarkIvskiy polItehnIchniy Institut». ZbIrka naukovih prats «Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. TeorIya I praktika». – HarkIv. – 2013. – #36. – S. 222–223.

6. Sinchuk I. O. Tyagoviy chastotno-regulovaniy asinhronniy elektroprivod rudnikovih kontaktnih elektrovozIv: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk / Sinchuk I. O. – HarkIv, 2009.

7. Омельченко А. В. О создании эффективного и безопасного в эксплуатации двухосного электровоза / А. В. Омельченко, Д. А. Шокарьов, Е. И. Скапа. // XXXVI научно-техническая конференция преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского транспорта «Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов»: Тезисы докладов. – Харьков. – 2012. – С. 60–61.

8. Жеребкин Б. В. Синтез структуры системы векторного управления тяговых электромеханических комплексов двухосных электровозов / Б. В. Жеребкин, Д. Ф. Шокарев, Е. И. Скапа. // Научно-технический сборник «Електромеханічні і енергозберігаючі системи». – Кременчуг. – 2011. – №3. – С. 17–22.

9. Коржев А. А. Повышение тяговых свойств рудничных электровозов за счет применения комбинированного привода: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Коржев А. А. – Санкт-Петербург, 2005. – 19 с.

10. <http://www.alstom.com>

11. Павинка В.Ф. Об одном способе экспериментального определения параметров электрических машин переменного тока //Моделир. експерим. исслед. и измер. параметров электр. и электрон. устройств. – Львов. политехн. ин-т. – Львов. – 1985. – С.84-90. – Деп. в УкрНИИТИ 26.11.85. №2621-УК.

12. Ещин Е.К. Определение параметров асинхронных электродвигателей в автоматизированной системе испытаний / Е.К. Ещин, М.А. Тынкевич, В.В. Новоселов // Автоматиз. и электрифик. горн. предприятий в условиях АСУ. – Кемерово. – 1985. – С.62-66.

13. Мартынов В. А. Математическое моделирование переходных процессов электрических машин на основе численного метода расчета электромагнитного поля: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук / Мартынов В. А. – Москва, 1997. – 39 с.

14. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. / Соколовский Г.Г. – 2-е изд. – М.: Академия, 2007. – 265 с.

15. Семенов А.Д. Идентификация объектов управления / А.Д. Семенов, Д.В. Артамонов, А.В. Брюхачев. – Пенза: Издательство Пензенского государственного университета. – 2003. – 211 с.

16. Андреев М.А. Идентификация параметров асинхронного электропривода на интервалах коммутации силовых ключей автономного инвертора / М.А. Андреев // Системы управления и информационные технологии. – 2009. – № 3. – С. 68-71.

7. Omelchenko A. V. O stozdaniy effektivnogo i bezopasnogo v ekspluatatsii dvuhosnogo elektrovoza / A. V. Omelchenko, D. A. Shokarov, E. I. Skapa. // HHHVI nauchno-tehnicheskaya konferentsiya prepodavateley, aspirantov i sotrudnikov Harkovskoy natsionalnoy akademii gorodskogo transporta «Gorodskoy elektrotransport, elektrosnabzhenie i osveschenie gorodov»: Tezisyi dokladov. –Harkov. – 2012. – S. 60–61.

8. Zherebkin B. V. Sintez strukturyi sistemiy vektornogo upravleniya tyagoviyh elektromehanicheskikh kompleksov dvuosnyih elektrovozov / B. V. Zherebkin, D. F. Shokarev, E. I. Skapa. // Nauchno-tehnicheskii sbornik «Elektromehanichni I energozberigayuchi sistemi». – Kremenchug. – 2011. – #3. – S. 17–22.

9. Korzhev A. A. Povyishenie tyagoviyh svoystv rudnichnyih elektrovozov za schet primeneniya kombinirovannogo privoda: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tehn. nauk / Korzhev A. A. – Sankt-Peterburg, 2005. – 19 s.

10. <http://www.alstom.com>

11. Pavinka V.F. Ob odnom sposobe eksperimentalnogo opredeleniya parametrov elektricheskikh mashin peremennogo toka //Modelir. eksperim. issled. i izmer. parametrov elektr. i elektron, ustroystv. – Lvov. politehn. in-t. – Lvov. – 1985. – S.84-90. – Dep. v UkrNIINTI 26.11.85. #2621-UK.

12. Eschin E.K. Opredelenie parametrov asinhronnyih elektrodvigatelay v avtomatizirovannoy sisteme ispytaniy / E.K. Eschin, M.A. Tyinkevich, V.V. Novoselov // Avtomatiz. i elektrifik. gorn, predpriyatiy v usloviyah ASU. – Kemerovo. – 1985. – S.62-66.

13. Martynov V. A. Matematicheskoe modelirovanie perehodnyih protsessov elektricheskikh mashin na osnove chislennogo metoda rascheta elektromagnitnogo polya: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya dokt. tehn. nauk / Martynov V. A. – Moskva, 1997. – 39 s.

14. Sokolovskiy G.G. Elektroprivodyi peremennogo toka s chastotnyim regulirovaniem. / Sokolovskiy G.G. – 2-e izd. – M.: Akademiya, 2007. – 265 s.

15. Semenov A.D. Identifikatsiya ob'ektov upravleniya / A.D. Semenov, D.V. Artamonov, A.V. Bryuhachev. – Penza: Izdatelstvo Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2003. – 211 s.

16. Andreev M.A. Identifikatsiya parametrov asinhronnogo elektroprivoda na intervalah kommutatsii siloviyh klyuchey avtonomnogo invertora / M.A. Andreev // Sistemyi upravleniya i informatsionnyie tehnologii. – 2009. – # 3. – S. 68-71.

В практике ремонта электроподвижного состава внутришахтного транспорта на горнорудных предприятиях Украины доминирует негативная тенденция ремонта не по «факту», а по «плану». Причиной такой «идеологии ремонта» является отсутствие в эксплуатируемых структурах ТЭТК шахтных электровозов систем контроля состояния параметров оборудования и отсутствие информации о реальном техническом состоянии элементов тягового комплекса.

В работе изложен авторский взгляд строения тактики идентификации и диагностики параметров функционирования тяговых асинхронных электрических двигателей в составе тяговых модулей электрифицированных видов транспорта. Предложена последовательность организации данного процесса и методика обработки получаемых экспериментальных данных. Предложена и обоснована последовательность операций при идентификации электрических параметров ТАД в комплексе ТЭТК шахтных электровозов.

Сформирована модель объекта для проведения мониторинга. Выбрана структура последовательности операций идентификации определения режимов работы, который реализуется тем или иным способом при выполнении команд машиниста электровоза.

Разработан алгоритм, который по режиму двухфазного включения обмоток статора на постоянное напряжение позволяет определять активные сопротивления статора и ротора и производит диагностику элементов электропривода. Для практической реализации разработан и предложен алгоритм идентификации одного из коэффициентов соотношений параметров по интегральной ошибке расхождения реальных и расчетных переходных процессов по току статора и скорости асинхронного двигателя.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о достаточно высокой точности предложенного способа идентификации: максимальная ошибка составляет 6,20%, минимальная ошибка составляет 0,13%.

Разработанный способ идентификации отличается от известных относительной простотой вычислений и отсутствием вычислений сложных функций и может быть реализован с помощью специализированных микропроцессоров для управления электродвигателями переменного тока.

Ключевые слова: электромеханические комплексы; тяговый двигатель; диагностика; модель объекта; алгоритмы расчетов.

УДК 62-83:629.423.1

М. В. ХВОРОСТ (ХНУГХ), Л. В. СМЕЛОВА (УГАЖД), І. О. СІНЧУК, І. В. КАСАТКІНА,
М. Л. БАРАНОВСЬКА (ДВНЗ КНУ)

Кафедра «Автоматизованих електромеханічних систем в промисловості і транспорті» ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, вул. Віталія Матусевича, 11, 50027, Україна, +380564091730, e-mail: speet@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0002-2606-8228

ЩОДО ПИТАННЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ І ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ШАХТНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

У практиці ремонту електрорухомого складу внутрішньошахтного транспорту на гірничорудних підприємствах України домінує негативна тенденція ремонту не за «фактом», а за «планом». Причиною такої «ідеології ремонту» є відсутність в експлуатованих структурах ТЕТК шахтних електровозів систем контролю стану параметрів обладнання і відсутність інформації про реальний технічний стан елементів тягового комплексу.

У роботі викладено авторський погляд будови тактики ідентифікації та діагностики параметрів функціонування тягових асинхронних електричних двигунів в складі тягових модулів електрифікованих видів транспорту. Запропоновано послідовність організації даного процесу і методика обробки одержуваних експериментальних даних. Запропоновано та обґрунтовано послідовність операцій при ідентифікації електричних параметрів ТАД в комплексі ТЕТК шахтних електровозів.

Сформована модель об'єкта для проведення моніторингу. Обрана структура послідовності операцій ідентифікації визначення режимів роботи, який реалізується той чи інший спосіб при виконанні команд машиніста електровоза.

Розроблено алгоритм, який по режиму двофазного включення обмоток статора на постійну напругу дозволяє визначати активні опори статора і ротора і проводить діагностику елементів електроприводу. Для практичної реалізації розроблено і запропоновано алгоритм ідентифікації одного з коефіцієнтів співвідношень параметрів за інтегральною помилкою відхилення реальних і розрахункових перехідних процесів по струму статора і швидкості асинхронного двигуна.

Результати проведених досліджень свідчать про досить високу точність запропонованого способу ідентифікації: максимальна помилка становить 6,20%, мінімальна помилка становить 0,13%.

Розроблений спосіб ідентифікації відрізняється від відомих відносною простотою обчислень і відсутністю обчислень складних функцій і може бути реалізований за допомогою спеціалізованих мікропроцесорів для управління електродвигунами змінного струму.

Ключові слова: електромеханічні комплекси; тяговий двигун; діагностика; модель об'єкта; алгоритми розрахунків.

UDC 62-83:629.423.1

M.V. HVOROST (KNUME), L.V. SMENOVA (USART), I. O. SINCHUK, I. V. KASATKINA,
M. L. BARANOVSKA (SHEI KNU)

Department «Automated electromechanical systems in industrial and transport» SHEI «Kryvyi Rih National University», Kryvyi Rih, st. Vitaly Matusevich, 11, 50027, Ukraine, +380564091730, e-mail: speet@ukr.net,
ORCID: orcid.org/0000-0002-2606-8228

IDENTIFICATION AND DIAGNOSTICS OF ELECTRIC PARAMETERS OF TRACTION ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS OF MINE ELECTRIC LO-COMOTIVES

The negative tendency of repair of the electric rolling stock of mining transport at enterprises in Ukraine is preserved and obvious not by "fact", but by "plan". The reason for this "repair ideology" is the lack of systems for monitoring the equipment parameters of mine electric locomotives in the operated structures of traction electrical complexes, as well as the lack of information on the real-time technical condition of the traction complex elements.

The paper deals with the tactics of identification and diagnostics of the effective operation for the traction asynchronous electric motors in the traction modules of electrified transport. The consistency of this process and technique for experimental data processing are proposed. A sequence of operations for identifying the electrical parameters of the traction asynchronous electric motors in the mine electric locomotives is proposed and justified.

An object model for monitoring was provided. The determination structure of the operating modes implemented by the locomotive driver is selected.

An algorithm, based on the two-phase switching-on of the stator windings on a constant volt-age, makes it possible to determine the active resistances of the stator and rotor and to diagnose the elements of the electric drive has been developed. The algorithm for identifying one of the coefficients of the parameters correlation from the integral error of the difference between the real and calculated transient processes with respect to the stator current and the speed of the induction motor is developed.

The available studies indicate a high accuracy of the proposed identification method: the maximum error is 6,2%, the minimum error is 0,13%.

The requirements for digit capacity, speed and functionality of specialized microprocessors for controlling AC motors and data-networking lines of the electric drive operation are defined. The developed identification method differs with the relative simplicity of computations and the absence of complex function calculations. It can be realized through the specialized microprocessors for controlling AC motors.

Keywords: electromechanical complexes; traction motor; diagnostics; object model; calculation algorithms.

Received 02.11.2017; accepted in revised form 06.12.2017.

Ю. Л. САЕНКО (ГВУЗ «ПГТУ»), Т. К. БАРАНЕНКО (ГВУЗ «ПГТУ»),
И. Ю. САЕНКО (ГВУЗ «ПГТУ»)

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», кафедра Электрификации промышленных предприятий, Украина, 87555, г. Мариуполь, ул. Университетская, 7, тел.: (0629) 44-65-88, (0629) 44-65-51, эл. почта: ysayenko@gmail.com, tbaranenko@gmail.com, ivansayenko@gmail.com
ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700, orcid.org/0000-0002-9436-8484, orcid.org/0000-0001-7708-5960

МЕТОДИКА ВЫБОРА ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ДИСКРЕТНОГО СПЕКТРА ИНТЕРГАРМОНИК

Введение

Постоянный рост нелинейных нагрузок, присоединенных к узлам электрических сетей различного уровня напряжения, обуславливает неизменную актуальность задачи минимизации уровней гармонических искажений, создаваемых такой нагрузкой. Кроме этого Украина, став аффилированным членом европейской организации CENELEC (Европейский комитет электротехнической стандартизации), обязана привести стандарты по качеству напряжения в соответствие с европейским международным стандартом EN 50160:2010 «Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks» [1]. Выполнение норм стандарта EN 50160:2010 подразумевает обеспечение снижения гармонических искажений, вызываемых нелинейной нагрузкой. Особенности работы нелинейных нагрузок вызывают в питающих сетях несинусоидальные режимы, в результате которых кривые токов и напряжений содержат различные гармонические составляющие – высшие гармоники (ВГ) и интергармоники (ИГ) [2, 3]. Для минимизации гармонических искажений могут использоваться различные виды фильтров: пассивные, активные и гибридные. В случае дискретного гармонического спектра наибольшее применение получили пассивные резонансные фильтры – фильтрокомпенсирующие устройства.

Постановка задачи

Пассивные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) являются распространенными простейшими устройствами компенсации ВГ, одновременно выполняя функцию компенсации реактивной мощности (КРМ) на основной частоте. Учитывая тот фактор, что ИГ оказывают на электрические сети систем электропитания такое же влияние, что и ВГ, а задача снижения несинусоидальности независимо от ее источника заключается в достижении норм,

установленных стандартом на качество электроэнергии, то в случае дискретного спектра ИГ целесообразно также рассматривать применение пассивных ФКУ [4]. Однако, учитывая, что ИГ распределены, как правило, по всей области частот от нуля до тысяч Гц, то необходимо внести в существующую методику выбора ФКУ ВГ соответствующие коррективы.

Разработка методики выбора ФКУ для минимизации дискретного спектра ИГ

Фильтрокомпенсирующее устройство представляет собой последовательную индуктивно-емкостную резонансную цепь, настраиваемую на частоту гармоники, подлежащую компенсации. В простейшем случае ФКУ состоит из последовательно соединенных батареи конденсаторов (БК) и реактора. Наличие реактора в цепи фильтра изменяет напряжение на зажимах БК, тогда в случае фильтра, применяемого для компенсации ИГ, можно записать:

$$U_{БК} = a_{v_k} U_c, \quad (1)$$

где a_{v_k} – коэффициент изменения напряжения; v_k – относительная частота k -й гармонической составляющей (значение v_k при каком-то k может совпадать с относительной частотой ВГ n); k – номер гармонической составляющей кривых напряжения и тока соответственно; U_c – линейное (фазное) напряжение в сети.

Без учета активного сопротивления цепи фильтра

$$a_{v_k} = \frac{v_k^2}{v_k^2 - 1}. \quad (2)$$

При этом в [5] показано, что погрешность, связанная с не учетом активного сопротивления цепи фильтра, как правило, не превышает 1 %. Кроме этого расчет в соответствии с (2) может приводить к незначительному завышению но-

© Саенко Ю. Л. та ін., 2017

минального напряжения, что предпочтительнее с точки зрения надежной работы БК фильтров при их расстройке.

В зависимости от частоты настройки фильтра ИГ ν_k модуль коэффициента a_{ν_k} может быть как меньше, так и больше 1. Следовательно, напряжение на зажимах БК, определяемое выражением (1), будет или уменьшаться, или увеличиваться по отношению к напряжению сети. Сопротивление реактора фильтра

$$x_p = \frac{x_{БК}}{\nu_k^2}, \quad (3)$$

где x_p , $x_{БК}$ – сопротивления реактора и БК фильтра при промышленной частоте.

В зависимости от значения ν_k сопротивление реактора x_p будет или больше, или меньше $x_{БК}$, т.е. фильтр будет носить или индуктивный или емкостной характер. В первом случае фильтр потребляет реактивную мощность, ухудшая тем самым коэффициент мощности в узле подключения. Во втором случае фильтр отдает реактивную мощность в сеть, обеспечивая КРМ основной частоты. На рис. 1 приведена зависимость коэффициента a_{ν_k} , а на рис. 2 – сопротивления реактора x_p (в долях сопротивления $x_{БК}$) от частоты ν_k .

Анализ рис. 1 показывает, что модуль коэффициента a_{ν_k} существенно зависят от значения частоты настройки фильтра ν_k в диапазоне относительных частот $\nu_k \leq 3$, а сопротивление реактора x_p – в диапазоне $\nu_k < 1$. Следовательно, выбор номинального напряжения БК и номинальной мощности фильтра должен определяться, в первую очередь, значением частоты настройки фильтра (или требуемым частотным диапазоном установки фильтра). В связи с этим было предложено различать три зоны установки фильтров ИГ [6]:

– зона I – зона (область) относительных частот $\nu_{kI} \geq 3,5$;

– зона II – $1,3 \leq \nu_{kII} < 3,5$;

– зона III – $0,3 \leq \nu_{kIII} \leq 0,7$.

При этом в зоне I фильтры ИГ аналогичны ФКУ ВГ. В зоне II реальная частота настройки фильтра, исходя из условия не превышения номинального напряжения на зажимах БК фильтра, не должна быть меньше расчетной.

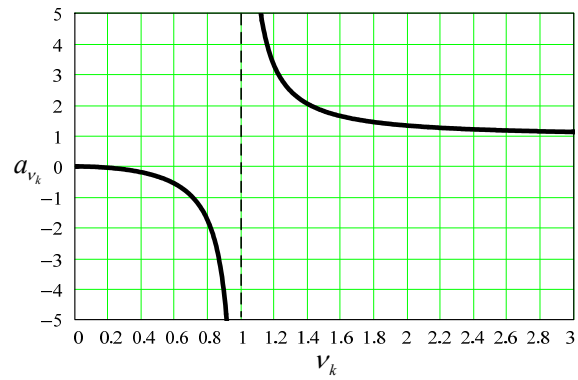


Рис. 1. Зависимость коэффициента изменения напряжения a_{ν_k} от частоты ν_k

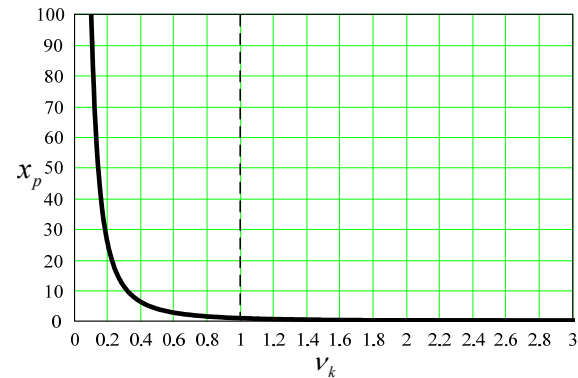


Рис. 2. Зависимости сопротивления реактора x_p (в долях сопротивления $x_{БК}$) от частоты ν_k

В этой зоне компенсирующая способность фильтров ИГ мала (особенно при низких значениях частоты настройки). В зоне III реальная частота настройки фильтра, наоборот, не должна быть больше расчетной, иначе возможно недопустимое повышение напряжения на зажимах БК. При значении $\nu_k = 1/\sqrt{2} \approx 0,707$ $|a_{\nu_k}| = 1$. При $\nu_k < 1/\sqrt{2}$ происходит понижение напряжения на зажимах БК, при $\nu_k > 1/\sqrt{2}$ – увеличение. Таким образом, частота $\nu_k = 1/\sqrt{2}$ является граничной между областями повышения и понижения напряжения на зажимах БК по отношению к U_c . Поэтому недопустимо, чтобы реальная частота настройки фильтра превысила значение $\nu_k = 0,7$, являющееся граничным для зоны III. В третьей зоне фильтр носит индуктивный характер. Следовательно, при установке фильтра ИГ в зоне III необходимо предусматривать увеличение мощности применяемых средств КРМ.

Несмотря на то, что в зоне III фильтр ИГ не выполняет функцию компенсирующего устройства, предлагается сохранить термин

фільтрокомпенсирующее устройство (ФКУ) и для указанной зоны.

Учитывая особенности каждой из зон установки ФКУ ИГ, предлагается следующий алгоритм их выбора.

1. Определяются номинальные напряжения БК фильтров исходя из условий:

- для зоны I: $U_{ном, БК} \geq U_c$;
- для зоны II: $U_{ном, БК} \geq a_{v_k} U_c$;
- для зоны III: $U_{ном, БК} \geq |a_{v_k}| U_c$.

2. Предварительно определяются мощности БК фильтров при условии, что через каждый фильтр протекает только ток гармоники, на которую он настраивается

$$Q_{БК} = \frac{k_{сх} U_{ном, БК} I_{v_k}}{\sqrt{c_i^2 - a_{v_k}^2 k_U^2}}, \quad (4)$$

где $k_{сх}$ – коэффициент, учитывающий схему соединения БК в фильтрах; $k_{сх} = 3$ при соединении конденсаторов в звезду; $k_{сх} = \sqrt{3}$ при соединении в треугольник; I_{v_k} – протекающий через БК линейный ток гармоники, на которую настраивается фильтр; c_i – коэффициент допустимого превышения тока, протекающего через БК, сверх номинальных значений, принимается $c_i = 1,3$; $k_U = \frac{U_c}{U_{ном, БК}}$.

3. Для зон II и III определяются мощности реакторов фильтров

$$Q_p = \frac{Q_{БК}}{v_k^2}. \quad (5)$$

4. Определяются мощности ФКУ

$$Q_\phi = Q_{БК} - Q_p. \quad (6)$$

5. Рассчитываются уровни ИГ в узлах схемы после установки предварительно выбранных фильтров. В процессе расчета необходимо скорректировать значение мощности установленных средств КРМ на величину Q_ϕ .

6. В первом приближении определяются мощности фильтров v_k -ых гармоник с учетом токов всех учитываемых гармоник по выражению (6), в котором Q_p определяется в соответствии с (5), а

$$Q_{БК} = k_{сх} U_{ном, БК} \sqrt{\sum_{k=1}^N I_{v_k}^2} \sqrt{\frac{v_k \neq 1}{c_i^2 - a_{v_k}^2 k_U^2}}, \quad (7)$$

где I_{v_k} – ток v_k -й гармоники, протекающей через БК; N – номер последней учитываемой гармоники.

7. Расчет повторяется с п. 3 по п. 6.

8. После последнего приближения определяются номинальные мощности БК фильтров из условия:

$$Q_{ном, БК} \geq Q_{БК}. \quad (8)$$

9. Определяются номинальные сопротивления БК ФКУ при промышленной частоте

$$x_{ном, БК} = \frac{3U_{ном, БК}^2}{Q_{ном, БК}}. \quad (9)$$

10. По каталожным данным выбираются номинальные параметры реакторов ФКУ, удовлетворяющие условиям:

- номинальное напряжение реактора

$$U_{ном, p} \geq \frac{U_{ном, БК}}{v_k^2}; \quad (10)$$

- номинальный ток реактора

$$I_{ном, p} \geq \frac{Q_{ном, БК}}{3U_{ном, БК}}; \quad (11)$$

- номинальная индуктивность фазы

$$L_{ном, p} \geq \frac{x_{ном, БК}}{\omega v_k^2}. \quad (12)$$

11. Определяются номинальные сопротивления реакторов ФКУ

$$x_{ном, p} = \omega L_{ном, p}. \quad (13)$$

12. Определяется реальная частота настройки фильтра

$$v_k = \sqrt{\frac{x_{ном, БК}}{x_{ном, p}}} = \sqrt{\frac{1}{\omega \sqrt{L_{ном, p} C_{ном, БК}}}}. \quad (14)$$

13. Производятся проверки на отсутствие перегрузок БК фильтров по току и по напряжению с учетом реальной частоты настройки ФКУ соответственно по выражениям [5]:

$$\sqrt{a_{v_k}^2 k_U^2 + \frac{1}{I_{ном,БК}^2} \sum_{\substack{k=1 \\ v_k \neq 1}}^N I_{v_k,БК}^2} \leq c_i = 1,3; \quad (15)$$

$$\sqrt{a_{v_k}^2 k_U^2 + \frac{1}{U_{ном,БК}^2} \sum_{\substack{k=1 \\ v_k \neq 1}}^N U_{v_k,БК}^2} \leq c_u = 1,1. \quad (16)$$

Если указанные условия не выполняются, производится корректировка номинальных сопротивлений БК и (или) реакторов фильтров.

14. Производятся проверки на отсутствие перегрузок реакторов ФКУ по току

$$\sqrt{a_{v_k}^2 k_U^2 + \frac{1}{I_{ном,р}^2} \sum_{\substack{k=1 \\ v_k \neq 1}}^N I_{v_k,БК}^2} \leq k_p, \quad (17)$$

где k_p – нормативный коэффициент перегрузки реактора.

Номинальные сопротивления БК и реакторов ФКУ определяются из номинальных значений индуктивности $L_{ном,р}$ и емкости $C_{ном,БК}$. При выборе ФКУ ИГ необходимо учитывать возможный диапазон отклонений его частоты настройки. Индуктивность реактора L , как правило, имеет отклонение, обусловленное несовершенством технологии его изготовления

$$L = L_{ном,р} + \Delta L = L_{ном,р}(1 + \alpha_L), \quad (18)$$

где α_L – относительное отклонение индуктивности от номинального значения, $\alpha_L = 0 \div 0,15$.

Емкость БК C также может иметь технологическое отклонение и отклонение, вызванное отличием реальной температуры от расчетной

$$\begin{aligned} C &= C_{ном,БК} + \Delta C = \\ &= C_{ном,БК}(1 + \alpha_C)(1 + \alpha_t \cdot \Delta t), \end{aligned} \quad (19)$$

где α_C – относительное отклонение емкости

от номинального значения, $\alpha_C = -0,05 \div 0,1$; α_t – температурный коэффициент емкости; для конденсаторов с пропиткой синтетическими жидкостями $\alpha_t = 8 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$; Δt – отклонение температуры от значения 20°C ; $\Delta t = 0 \div 60^\circ\text{C}$.

Индуктивное и емкостное сопротивления изменяются с изменением частоты питающей сети, которая также имеет отклонение

$$\omega = \omega_{ном} + \Delta\omega = \omega_{ном}(1 + \alpha_\omega), \quad (20)$$

где α_ω – относительное отклонение частоты от номинального значения; $\alpha_\omega = -0,02 \div 0,01$.

Подставляя (18) – (20) в (14), получим диапазон возможного относительного отклонения частоты настройки ФКУ $\Delta v_k = 0,86 \div 1,04$.

На практике конденсаторы и реакторы, используемые для ФКУ, имеют относительные отклонения емкости и индуктивности от номинальных значений, не превышающие 5%. В этом случае диапазон относительного отклонения частоты настройки ФКУ можно сузить до $\Delta v_k = 0,95 \div 1,02$.

Выводы

1. В случае дискретного спектра ИГ возможно применение пассивных ФКУ, настроенных на соответствующие частоты. При этом необходимо учитывать особенности распространения ИГ по оси частот и, соответственно, различать предложенные зоны установки ФКУ ИГ.

2. Алгоритм выбора ФКУ ИГ, настраиваемых на относительные частоты $v_k < 1$, должен обязательно включать расчет напряжения на БК фильтра, расчет мощности фильтра с учетом мощности реактора, расчет реальной частоты настройки фильтра.

3. При расчете ФКУ не всегда можно учесть все необходимые условия. Поэтому, при вводе установки в эксплуатацию должна быть произведена проверка на отсутствие перегрузок и эффективность ее работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жаркин А. Ф. Нормативные и технические аспекты обеспечения стандартных характеристик напряжения в системах электроснабжения Украины / А. Ф. Жаркин, В. А. Новский, С. А. Палачев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 52 (958). – С. 76-83.

REFERENCES

1. Zharkin A. F., Novskij V. A., Palachev S. A. *Normativnye i tehnicheckie aspekty obespechenija standartnyh harakteristik naprjazhenija v sistemah jelektrosnabzhenija Ukrainy* [Normative and technical aspects of providing standard voltage characteristics in power supply systems of Ukraine]. Visnik NTU «KhPI». Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. Kharkiv, NTU «KhPI», 2012, № 52

2. Жежеленко И. В. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко и др.; под ред. И. В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.

3. Raneru Nageswara Rao. Harmonic Analysis of Small Scale Industrial Loads and Harmonic Mitigation Techniques in Industrial Distribution System / Raneru Nageswara Rao // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). – 2013. – Vol. 3. – Issue 4. – P. 1511-1540.

4. Саєнко Ю. Л. Зниження рівнів гармонічних спотворень в електричних мережах з джерелами інтергармонік / Ю. Л. Саєнко, Т. К. Бараненко, Є. В. Бараненко // Електрифікація транспорту. – Днепропетровск: ДИИТ, 2012. – № 3. – С. 78-83.

5. Sayenko Yu. L. Features of selection of capacitor banks in electric networks with interharmonic sources / Yu. L. Sayenko, T. K. Baranenko, D. N. Kalyuzhnyi // Electrical engineering&electromechanics. – 2017. – No. 5. – P. 67-70. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.11.

6. Żeżelenko I. Obniżenie poziomów interharmonicznych w sieciach elektroenergetycznych przedsiębiorstw przemysłowych / I. Żeżelenko, J. Sajenko, T. Baranenko, B. Szewc // Przegląd Elektrotechniczny. – 2004. – № 6. – P. 632-635.

(958), pp. 76-83.

2. Zhezhelenko I. V. Izbrannye voprosy nesinusoidal'nyh rezhimov v jelektricheskikh setjah predpriyatij [Selected problems of non-sinusoidal modes of enterprises electric networks] / Ju. L. Saenko, T. K. Baranenko i dr.; pod red. I. V. Zhezhelenko. Moscow, Jenergoatomizdat, 2007, 296 p.

3. Raneru Nageswara Rao. Harmonic Analysis of Small Scale Industrial Loads and Harmonic Mitigation Techniques in Industrial Distribution System / Raneru Nageswara Rao // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA). 2013, vol. 3, issue 4, pp. 1511-1540.

4. Sajenko Ju. L., Baranenko T. K., Baranenko Je. V. Znyzhennja rivniv garmonichnyh spotvoren' v elektrychnykh merezhah z dzherelamy intergarmonik [Reduction of levels of harmonic distortions in electric networks with sources of interharmonics]. Elektryfikacija transport, Dnepropetrovsk, DIIT, 2012, № 3, pp. 78-83.

5. Sayenko Yu. L. Features of selection of capacitor banks in electric networks with interharmonic sources / Yu. L. Sayenko, T. K. Baranenko, D. N. Kalyuzhnyi // Electrical engineering&electromechanics. 2017, no. 5, pp. 67-70. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.11.

6. Żeżelenko I. Obniżenie poziomów interharmonicznych w sieciach elektroenergetycznych przedsiębiorstw przemysłowych / I. Żeżelenko, J. Sajenko, T. Baranenko, B. Szewc // Przegląd Elektrotechniczny. 2004, № 6, pp. 632-635.

Задача снижения уровней интергармоник в электрических сетях является составной частью задачи улучшения качества электроэнергии и в целом обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных нагрузок, являющихся источниками несинусоидальности, и систем их электроснабжения. Результатом снижения уровней интергармоник должно являться обеспечение требуемых норм качества напряжения, предъявляемых европейским международным стандартом EN 50160:2010. Таким образом, цель настоящей работы – разработка методики выбора фильтрокомпенсирующих устройств, настраиваемых на частоты интергармоник. При решении данной задачи используется традиционный подход к выбору фильтрокомпенсирующих устройств высших гармоник с введением необходимых коррективов, учитывающих особенности возникновения и распределения по оси частот интергармоник. Ввиду влияния на частоту настройки фильтров интергармоник, особенно в области низких частот, большого числа факторов обязательным является проверка на отсутствие перегрузок и эффективность работы фильтрокомпенсирующих устройств интергармоник после ввода их в эксплуатацию.

Ключевые слова: нелинейная нагрузка; высшие гармоники; интергармоники; фильтрокомпенсирующее устройство; частота настройки.

УДК 621.31

Ю. Л. САЄНКО (ДВНЗ «ПДТУ»), Т. К. БАРАНЕНКО (ДВНЗ «ПДТУ»),
І. Ю. САЄНКО (ДВНЗ «ПДТУ»)

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», кафедра Електрифікації промислових підприємств, Україна, 87555, м Маріуполь, вул. Університетська, 7, тел. : (0629) 44-65-88, (0629) 44-65-51, ел. пошта: yurisaenko@gmail.com, tbaranenko@gmail.com, ivansayenko@gmail.com ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700, orcid.org/0000-0002-9436-8484, orcid.org/0000-0001-7708-5960

МЕТОДИКА ВИБОРУ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ДИСКРЕТНОГО СПЕКТРУ ІНТЕРГАРМОНІК

Завдання зниження рівнів інтергармонік в електричних мережах є складовою частиною завдання поліпшення якості електроенергії та в цілому забезпечення електромагнітної сумісності нелінійних навантажень, що є джерелами несинусоїдальності, і систем їх електропостачання. Результатом зниження рівнів інтергармонік має бути забезпечення необхідних норм якості напруги, що пред'являються європейським міжнародним стандартом EN 50160:2010. Таким чином, мета цієї роботи – розробка методики вибору фільтрокомпенсируючих пристроїв.

© Саєнко Ю. Л. та ін., 2017

трокомпенсуючих пристроїв, що настроюються на частоти інтергармонік. При вирішенні даного завдання використовується традиційний підхід до вибору фільтрокомпенсуючих пристроїв вищих гармонік з введенням необхідних корективів, що враховують особливості виникнення і розподілу по осі частот інтергармонік. Зважаючи на вплив на частоту настроювання фільтрів інтергармонік, особливо в області низьких частот, великого числа факторів обов'язковим є перевірка на відсутність перевантажень і ефективність роботи фільтрокомпенсуючих пристроїв інтергармонік після введення їх в експлуатацію.

Ключові слова: нелінійне навантаження; вищі гармоніки; інтергармоніки; фільтрокомпенсуючий пристрій; частота настроювання.

UDC 621.31

Yu. L. SAYENKO (SHEI «PSTU»), T. K. BARANENKO (SHEI «PSTU»),
I. Yu. SAYENKO (SHEI «PSTU»)

SHEI «Pryazovsky State Technical University», Department of Industrial Electrical Power Supply, Ukraine, 87555, Mariupol, ul. Universytets'ka, 7, tel.: (0629) 44-65-88, (0629) 44-65-51, e-mail: yurisayenko@gmail.com, tbaranenko@gmail.com, ivansayenko@gmail.com ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700, orcid.org/0000-0002-9436-8484, orcid.org/0000-0001-7708-5960

THE METHOD OF SELECTION FILTER COMPENSATING DEVICES FOR MINIMIZING THE DISCRETE SPECTRUM OF INTERHARMONICS

The task of decreasing the levels of interharmonics in electrical networks is an integral part of the task of improving the power quality and in general supporting the electromagnetic compatibility of nonlinear loads as sources of nonsinusoidality and their power supply systems. The result of decreasing the levels of interharmonics should be the provision of the required voltage quality standards required by the European international standard EN 50160:2010. Thus, the purpose of this work is the development of a methodology for selecting filter compensating devices that are tunable to interharmonic frequencies. Solving this problem is based on the traditional approach to the selection of filter compensating devices of higher harmonics with the introduction of necessary corrections that take into account the features of the occurrence and distribution along the interharmonic frequency axis. Due to the influence of the large number of factors on the tuning frequency of the interharmonics filters, especially in the low frequency region, are mandatory to check for the absence of overloads and the efficiency of the filtering compensating devices of interharmonics after putting them into operation.

Keywords: nonlinear load; higher harmonics; interharmonics; filter compensating device; tuning frequency.

Received 20.09.2017; accepted in revised form 24.11.2017.

О. О. МАТУСЕВИЧ, А. Р. КАРПЕЛЯНСЬКИЙ (ДНУЗТ)

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна, тел.: +380953815451, e-mail: anatoliy.karpelyanskiy@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-2174-7774

МОНІТОРИНГ ЯК ОДИН ІЗ НАПРЯМІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ

Вступ

Надійність електроенергетичних систем значною мірою залежить від методів і засобів локалізації та ліквідації аварій, відновлення нормального режиму роботи. До таких засобів, поряд з іншими видами обладнання, належать і високовольтні вимикачі, одним із призначень яких є відключення пошкодженого обладнання та локалізація струмів коротких замикань.

Однак, на цей час, в об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України, у тому числі і на електрифікованих залізницях, ще використовуються вимикачі старого покоління, які потребують великі витрати на моніторинг, технічне обслуговування та ремонт при експлуатації.

Вдосконалення системи електропостачання залізниць призводить до все ширшого використання сучасних елегазових вимикачів класу 110 кВ та вище. Це відбувається не миттєво, але поступово всі електроенергетичні об'єкти тягового електропостачання переходять до заміни комутаційного обладнання на сучасне. Впровадження нових вимикачів дає змогу збільшити кількість параметрів моніторингу та поліпшити якість отриманих даних, завдяки розвитку технологій виробництва та широкому використанню мікропроцесорних пристроїв контролю та діагностики нових вимикачів [1].

Моніторинг вимикачів використовується для вирішення двох основних завдань. Перше – контроль нормального режиму роботи, що дозволяє ефективніше використовувати ресурс вимикача та попереджати його аварійний стан своєчасним виведенням в ремонт. Друге – збір інформації про технічний стан та положення вимикача для систем керування та автоматизації електроенергетичного об'єкта. Найбільш ефективним є комплексний моніторинг, який дає змогу інтегрувати рішення зазначених завдань в єдину автоматизовану систему керування технологічними процесами (АСК ТП) [2,3].

Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації елегазових вимикачів при застосуванні сучасних систем моніторингу.

Дослідження підвищення ефективності експлуатації елегазових вимикачів при застосуванні сучасних систем моніторингу.

Використання сучасних систем моніторингу та діагностування надає широкі можливості для збору різних аналогових та дискретних сигналів стану силового обладнання системи електропостачання. Наприклад, для елегазових вимикачів такими сигналами можуть бути: тиск елегазової суміші, температура в середині та зовні бака, струми соленоїдів включення та відключення, хід контактної групи, час відключення, положення вимикача на поточний момент часу тощо [4]. Провідні виробники вимикачів (ABB, Siemens, Areva, Mitsubishi) використовують ці параметри не тільки для збору та використання в різних системах, але й пропонують свої рішення з їхнього моніторингу – OLM у ABB (виробництво Elcon), CBWatch у Areva, CBM у Siemens. На жаль, ці системи працюють лише з вимикачами конкретного виробника. Протягом експлуатації таких систем моніторингу в електричних системах України було виявлено деякі недоліки їхньої роботи [5].

В Україні система моніторингу високовольтних елегазових вимикачів, що не залежить від конкретного їх виробника, реалізована підприємством «АНІГЕР». У цій розробці застосовано комбінований підхід щодо обрання технічних та програмних заходів, використано рішення від ABB та власні розробки [6]. Це дає змогу використовувати перевірені часом засоби від відомих в світі виробників та при цьому не залежати від їх системних рішень. Отримані з кожного вимикача дані можна розділити на дві групи: потокові та буферизовані. Структурна схема такої системи представлена на рисунку 1.

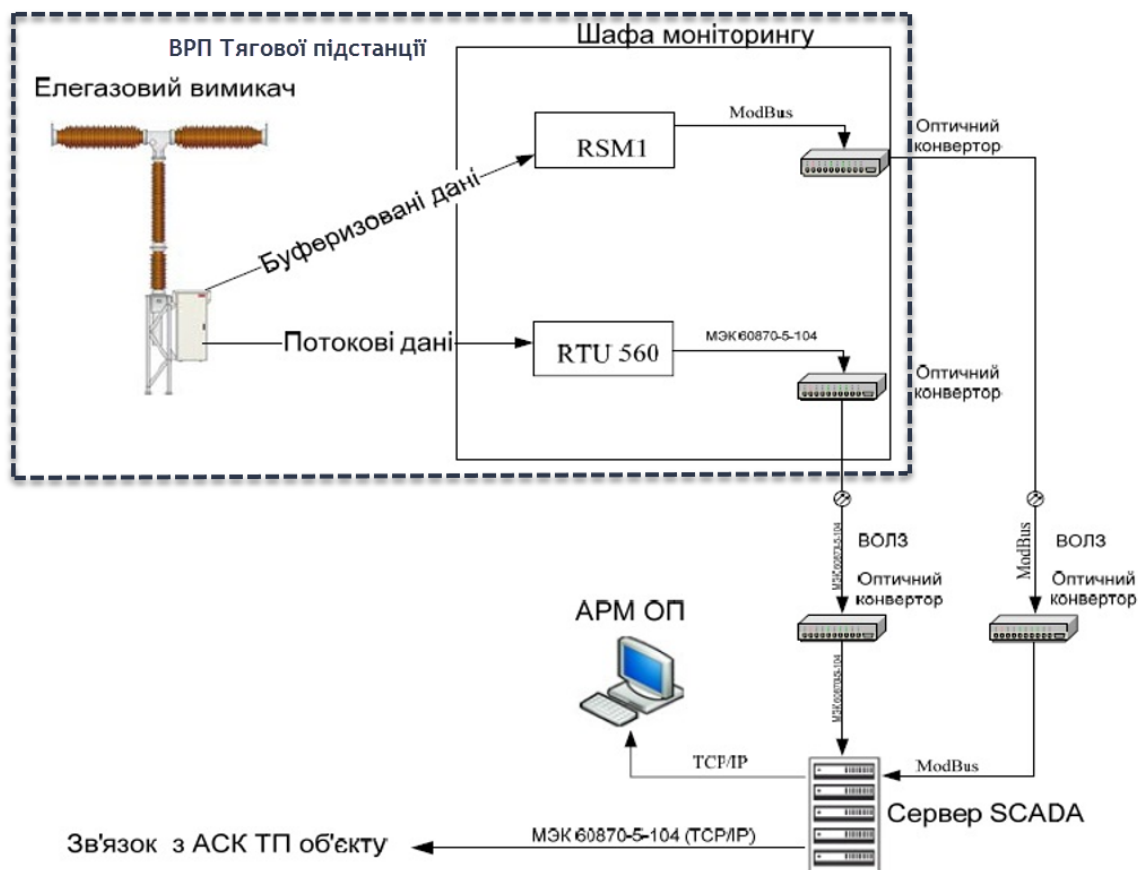


Рис. 1 Структурна схема розподілення буферизованих та поточкових даних

На процес вибору конкретної системи моніторингу комутаційних апаратів впливає багато різних чинників:

- економічні (вартість самої системи, її ремонту та модернізації);
- експлуатаційні (простота експлуатації, інформативність для оперативного персоналу, зручність налаштування);
- системні (можливість інтеграції в інші системи, у тому числі в АСК ТП енергетичного об'єкта, підтримка різних протоколів передачі даних, підтримка обладнання різних виробників, отримання інформації системного рівня та організація роботи з цими даними).

Зазначимо, що пропонуючи поетапне виконання системи моніторингу, виробники вимикачів акцентують увагу, в першу чергу, на світовому визнанні їхньої продукції, підкреслюючи свій досвід роботи у цій сфері та розповсюдженість саме запропонованих ними систем. Інструментарій подібних систем має чітку структуру і не дає змоги змінити чи доповнити оброблювані дані, залишаючи за виробником вибір як самої інформації для аналізу, так і параметрів оброблюваних даних, що досить часто буває недостатнім для замовника. Натомість система моніторингу

елегазових вимикачів, розроблена МПП «АНІГЕР» [7], не залежить від виробника вимикачів, дає змогу використовувати будь-які сигнали, отримані з вимикачів, має свої алгоритми аналізу отриманої інформації, використовує міжнародні телемеханічні протоколи зв'язку IEC 60870-5-104 та Modicon ModBus RTU, файли осцилограм записуються у стандартному форматі COMTRADE. Завдяки цьому інтеграція системи моніторингу в інші системи енергетичних об'єктів, у тому числі АСКТП, не викликає труднощів. Дана система вирішує завдання контролю стану високовольтного обладнання з визначенням поточних параметрів та прогнозного розрахунку основних технологічних величин [4]. З впровадженням системи зростає якість обслуговування елегазових вимикачів системи тягового електропостачання залізниць України, що призведе до більш надійної роботи обладнання. Реалізація функцій прогнозування дозволить вчасно попередити несправності вимикача [8]. Детальний аналіз кожного відключення вимикачем струму короткого замикання, отримання достовірних даних про час роботи вимикача та величину струму короткого замикання, дозволить в

автоматичному режимі розрахувати комутаційний ресурс вимикача. Аналіз порівняння з попередніми відключеннями дозволить прослідкувати динаміку швидкості комутаційної операції та визначитись з необхідністю проведення ремонтних робіт [9].

Моніторинг виконується в режимі реального часу з отриманням даних процесу. Результати вимірів та розрахунків відображаються на комп'ютерах автоматизованих робочих місць у вигляді графіків, таблиць, функціональних схем. Відсутність кіл керування в складі системи моніторингу унеможливорює помилкове оперування вимикачем.

Програмне забезпечення встановлюється тільки на сервері системи і не потребує додаткового програмного забезпечення на комп'ютерах персоналу підстанції. Ліцензійна політика дозволяє підключення необмеженої кількості користувачів системи [1].

В частині моніторингу стану високовольтних елегазових вимикачів виконуються наступні функції:

- контроль комутаційних операцій (контроль положення вимикача; швидкість переміщення головних контактів вимикача, їх демпфірування та повернення до граничних точок; наявність відхилення в механічних характеристиках (тертя, корозія, розрив, втрата елегазу, зношення пружин приводу, пошкодження демпфера, тощо); розрахунок кількості комутаційних операцій в нормальних та аварійних режимах; контроль струму вимкнення з записом осцилограми

переміщення контактної групи, зміни стану блок-контактів, струму вимкнення; наявність відхилення при спрацюванні допоміжних контактів);

- контроль параметрів газової суміші SF₆ та CH₄ (вимірювання тиску та температури газової суміші; розрахунок щільності газової суміші; виявлення зрідженості газової суміші (попередження хибних спрацювань сигналізації в разі зрідження); розрахунок короткострокової та довгострокової тенденції зміни тиску та щільності елегазу);

- контроль параметрів комутаційних операцій вимкнення (струм вимкнення; оцінка електричного зношення, як $\int i^2 dt$; час горіння дуги);

- контроль кіл власних потреб та оперативного струму (контроль правильності роботи соленоїдів; наявність оперативної напруги; контроль роботи системи обігріву);

- контроль роботи приводного механізму (вимірювання часу заведення пружини; контроль часу роботи електричного двигуна заведення пружини, виміри максимального струму роботи двигуна; контроль готовності приводу; виявлення несправностей електричного двигуна заведення пружини приводу [10].

Структурна схема організації системи моніторингу елегазових вимикачів "СМЕВ" зображена на рисунку 2.

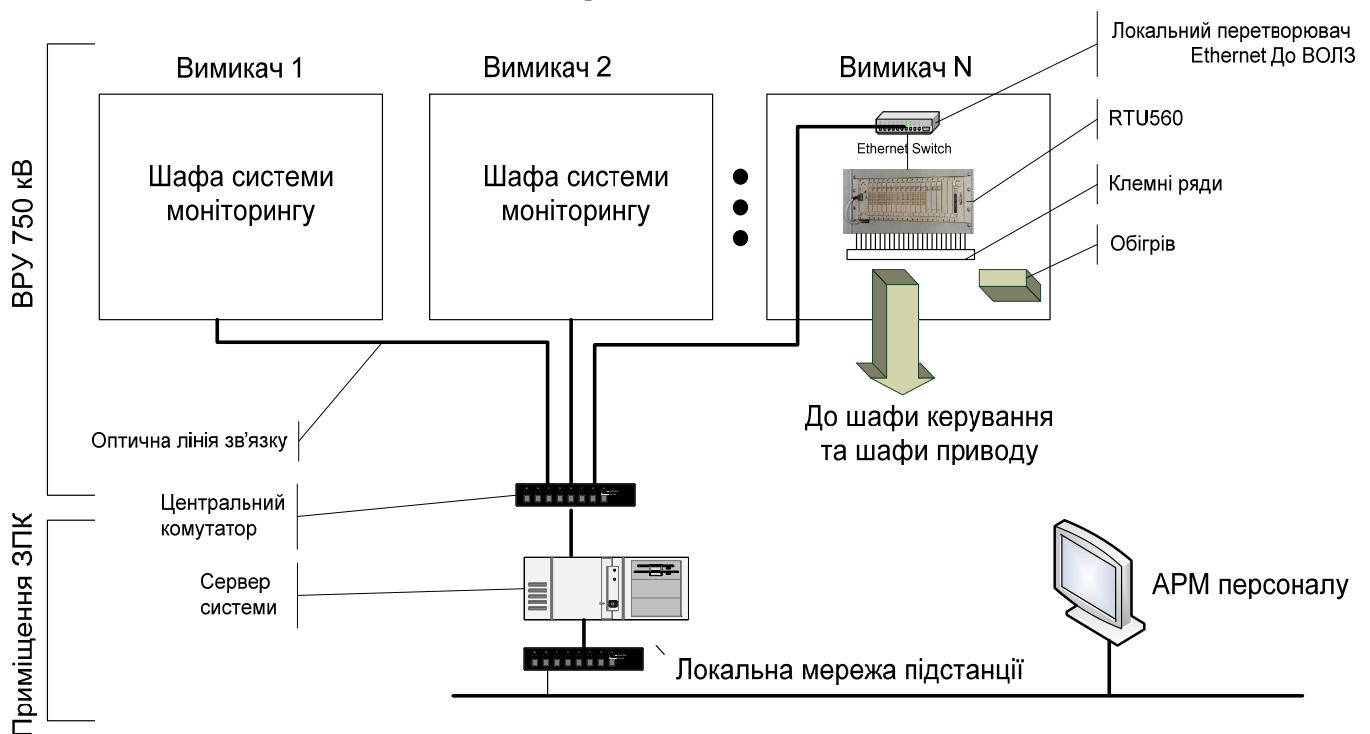


Рис. 2 Структурна схема організації системи моніторингу елегазових вимикачів © Матусевич О.О., Карпелюцький А.Р., 2017

В склад комплексу входить:

Шафа “СМЕВ”, що призначена для передачі телевимірювань (ТВ) и телесигналізації (ТС).

Вузол комунікацій, що призначений для збору та збереження інформації “СМЕВ” отриманої з нижнього рівня.

Автоматичне робоче місце (АРМ) чергового диспетчера призначено для візуального відображення всіх основних параметрів елегазових вимикачів на схемі ПС, перегляду архіву телевимірювань та журналу подій про планові та аварійні переключення та відключення на ПС ЕВ, що зберігаються на сервері “СМЕВ”.

“СМЕВ” виконує збір, обробку та передачу інформації телесигналізації (ТС) та телевимірювань (ТВ).

Отримані з кожного вимикача дані можна розділити на дві групи: поточкові (дані реального часу) та буферизовані. Поточкові дані – це інформація про поточний стан параметрів вимикача: сигнальних контактів (КСА), приводного механізму, газової суміші, температури в шафах [4]. Ці сигнали надходять до мікропроцесорного пристрою телемеханіки RTU 560 виробництва компанії ABB та обробляються ним. Обробка таких сигналів не вимагає великої швидкодії від процесора контролера, натомість ставить високі вимоги до обсягів інформації та розрахункових можливостей. Оброблені сигнали вже в цифровому вигляді відповідно до вимог міжнародного телемеханічного протоколу IEC 60870-5-104 транслиуються до сервера SCADA системи (supervisory control and data acquisition – система диспетчерського управління та збору даних) [11].

Буферизовані дані – це сигнали, стан яких записується під час комутаційної операції. До таких сигналів входять: струм соленоїдів включення та відключення (при комутації через два соленоїди, що характерно для вимикачів 220 кВ та вище – кожного окремо), координати руху контактної групи кожної з фаз [4]. Дані про рух контактної групи зчитуються з джерел кутового переміщення, що перетворює з високою точністю поступовий рух штоку контактів у кутове переміщення. Через те, що власний час комутаційної операції високовольтного вимикача перебуває в межах 20...100 мс, RTU 560 не вистачає швидкодії обробити та записати ці дані з високою дискретністю. Для вирішення цієї задачі розроблено власний модуль RSM-1, що

здійснює неперервний моніторинг вказаних сигналів та при появі переднього фронту напруги на соленоїді починає процес запам'ятовування та буферизації даних. Буфер розраховано на 12 подій по 100 мс з дискретністю 1 мс. Після заповнення буферу дані про найстарішу аварію стираються, замість них зберігаються нові (FIFO). Після закінчення запису даних чергової комутаційної операції буфер передається за міжнародним телемеханічним протоколом Modicon ModBus RTU до сервера SCADA системи. На сервері відбуваються обробка та перевірка отриманої інформації (використовуючи контрольні суми пакетів), формування та запис файлів згідно з вимогами стандарту COMTRADE. Сервер SCADA системи забезпечує візуалізацію отриманих даних, їх архівацію та, за потреби, ретрансляцію на інші рівні (до суміжних систем).

Інформація, що реєструється пристроями які знаходяться в шафі моніторингу, яка розташована на ВРП 220, 150 та 110 кВ безпосередньо біля елегазових вимикачів, передається через комунікаційні пристрої по оптоволоконним каналам зв'язку на сервер, що розташований в ГЩУ, де архівується та зберігається.

Від серверу “СМЕВ” інформація передається по мережі підстанції на АРМ чергового диспетчера ПС.

Комплекс “СМЕВ” забезпечує виконання всіх функцій і зберігає працездатність при зміні напруги живлення в межах $\pm 10\%$ від номінального значення 220В і при зміні частоти живильної мережі від 48 до 52 Гц. Вхідні ланцюги шафи моніторингу розраховані на підключення наступних джерел інформації:

ТВ (струм вимикача) – датчиків з сигналами від 0 до 1 А з точністю $\pm 0,2\%$.

ТС (дискретні сигнали) – одного замикаючого або розмикаючого контакту.

Напруга, що подається на блок контакти від імпульсного блока живлення (24 ± 1) В.

Основною ознакою нормальної роботи є достовірний прийом інформації ТВ-ТС з інтервалом оновлення 1 секунда на АРМ чергового диспетчера ПС.

Другорядною ознакою правильної роботи комплексу є достовірне і своєчасне відображення ТС та ТВ на сервері системи моніторингу (без контролю передачі інформації по каналах зв'язку).

В якості джерел ТВ використовуються:

- електронні вимірювачі електричних параметрів енергії 560CVT10 (АУ, шафа моніторингу) АБВ призначені для вимірювання струмів вимикача - Ia, Ib, Ic;

- електронні вимірювачі параметрів струму електромагнітів (соленоїдів) елегазового вимикача (U2, U3, U4);

- електронні вимірювачі параметрів струму електроприводу взведення пружин елегазового вимикача (U2, U3, U4);

- електронні вимірювачі густини та температури елегазу;

- електронні вимірювачі переміщення контактної групи вимикача під час включення та відключення;

- електронні вимірювачі температури в шафі приводу вимикача та в шафі моніторингу.

В якості джерел ТС використовуються замикаючі та розмикаючі контакти пристроїв, розташованих в шафі приводу елегазового вимикача, та в шафі моніторингу (внутрішня сигналізація).

Апаратне забезпечення АРМ чергового диспетчера ПС включає персональний комп'ютер (ПК), підключений до мережі «ЕНЕРГІЯ» по якій здійснюється підключення до віддаленого робочого столу сервера СМЕВ.

АМН розташоване на головному щиті управління на столі чергового диспетчера підстанції.

АРМ чергового диспетчера ПС представляє собою ПК офісного виконання в складі процесора Intel Core, 4ГБ ОЗУ, НЖМД 500 ГБ, пристрій читання DVD ROM, мережеву плату Ethernet 10/100 Мбіт/с, звукову плату, монітор з діагоналлю 21 дюймів, маніпулятор «миш» і клавіатуру.

Програмне забезпечення (ПО) АРМ чергового диспетчера ПС реалізовано у вигляді комплексу задач, які працюють під управлінням операційної системи Windows7.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети [Текст] / В. И. Идельчик. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.
2. Буткевич О.Ф. Проблемно-орієнтований моніторинг режимів ОЕС України // Техн. електродинаміка. — 2007, № 5. — С. 39—52.
3. Буткевич О.Ф., Кириленко О.В. Першочергові завдання проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів ОЕС України // Вісник Національного Університету "Львівська політехніка". — № 597. — С. 129-135.
4. Кутін, В. М. Визначення діагностичних параметрів оцінки технічного стану високовольтного вимикача [Текст] / Кутін В. М.

Висновки

Система моніторингу елегазових вимикачів в режимі реального часу, дозволяє здійснювати технічне обслуговування програм більш надійним економічно ефективним способом:

- 1) Забезпечує формування програми технічного обслуговування, використовуючи дані, які безперервно збираються в режимі реального часу.

- 2) Своєчасне інформування, сигналізацію в разі виявлення проблем, які пов'язані з неправильним використанням або порушенням нормальної роботи вимикача.

- 3) Надає розрахунки з питань відстрочення планового технічного обслуговування.

З впровадженням системи зростає якість та ефективність обслуговування елегазових вимикачів системи електропостачання залізниць, що призведе до більш надійного електропостачання споживачів. Реалізація функцій прогнозування дозволить вчасно попередити несправності вимикача. Детальний аналіз кожного відключення вимикачем струму короткого замикання, отримання достовірних даних про час роботи вимикача та величину струму короткого замикання, дозволить в автоматичному режимі розрахувати комутаційний ресурс вимикача. Аналіз порівняння з попередніми відключеннями дозволить прослідкувати динаміку швидкості зміни параметрів вимикача при комутаційних операціях та визначитись з необхідністю проведення ремонтних робіт для забезпечення повного використання ресурсу вимикача.

REFERENCES

1. Ydel'chyk, V. Y. «Elektrycheskie systemy i seti» [Tekst] [Electrical systems and networks] / V. Y. Ydel'chyk. — M.: Enerhoatomyzdat, 1989. — 592 s.
2. Butkevych O.F. Problemno-orientovany monitorynh rezhymiv OES Ukrayiny [Problem-oriented monitoring of the UES regimes of Ukraine] // Tekhn. elektrodynamika. — 2007, No. 5. — S. 39—52.
3. Butkevych O.F., Kyrylenko O.V. Pershocherhovi zavdannya problemno-orientovanoyi systemy monitorynhu rezhymiv 2007, № 597. — С. 129—135.

© Матусевич О.О., Карпелянський А.Р., 2017

Рубаненко О.Є., Мисенко С. В. // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – №3. – С. 33-39. ISSN 1813-5420.

5. Михайлюк, Р. І. Досвід та перспективи експлуатації елегазових вимикачів у Південно-Західній енергетичній системі [Текст] / Р. І. Михайлюк, С. В. Мисенко, В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко // Энергетика та електрифікація – 2014. – №3. – С. 34–37.

6. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Тутик В.Л., Панов А.В. Методика контролю параметрів газової суміші в елегазових вимикачах 750 кВ // Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004-2006 рр. Цільова комплексна програма НАН України Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. – Київ, 2006. – С. 269–272.

7. Стогній Б.С., Сопель М.Ф., Дячук С.Я., Сорочинський В.В., Тутик В.Л. Інформаційно-діагностичний комплекс "Регіна" Тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. "Керування режимами роботи об'єктів електричних систем 2000". м. Донецьк 5—7 вересня 2000 р.

8. Тимашова, Л. В. Анализ повреждаемости выключателей 110–750 кВ [Електронний ресурс] / Л. В. Тимашова, И. Л. Шлейфман, И. А. Назаров // Материалы V международной научно-технической конференции «Высоковольтное коммутационное оборудование». Москва. – 2009. – 8 с.

9. Кутін, В. М. Вдосконалення методів діагностування високовольтних вимикачів [Текст] / В. М. Кутін, О. Є. Рубаненко, С. В. Мисенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №1. – С.109–113.

10. Кукеков, Г. А. Выключатели переменного тока высокого напряжения [Текст] / Г. А. Кукеков. // – Л.: Энергия, 1972. – 336 с.

11. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Буткевич О.Ф., Сопель М.Ф. Застосування засобів моніторингу перехідних режимів в ОЕС України для розв'язання задач диспетчерського керування // Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2009, вип. 23. — С. 147—155.

Ключові слова: системи моніторингу елегазових вимикачів; елегазові вимикачі; буферизовані дані; потокові дані; параметри вимикача.

4. Kutin, V. M. Vyznachennya diahnostychnykh parametriv otsinky tekhnichnoho stanu vysokovol'tnoho vymykacha [Determination of diagnostic parameters of the technical condition of the high-voltage circuit breaker] [Tekst] / Kutin V. M., Rubanenko O.Ye., Mysenko S. V. // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. – 2014. – №3. – С. 33-39. ISSN 1813-5420.

5. Mykhaylyuk, R. I. Dosvid ta perspektyvy ekspluatatsiyi elehazovykh vymykachiv u Pivdenno-Zakhidniy enerhetychniy systemi [Experiences and prospects for exploiting SF6 circuit breakers in the Southwest Power System] [Tekst] / R. I. Mykhaylyuk, S. V. Mysenko, V. M. Kutin, O. Ye. Rubanenko // Enerhetyka ta elektryfikatsiya. – 2014. – №3. – С. 34–37.

6. Stohniy B.S., Sopol' M.F., Tutyk V.L., Panov A.V. Metodyka kontrolyu parametriv hazovoyi sumishi v elehazovykh vymykachakh 750 kV [Method of control of parameters of the gas mixture in 750 kV insulating circuit breakers] // Zbirnyk naukovykh statey za rezul'tatamy, otrymanymy v 2004-2006 rr. Tsil'ova kompleksna prohrama NAN Ukrayiny «Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsiyi konstruktiv, sporud ta mashyn». – Kyiv, 2006. – С. 269–272.

7. Stohniy B.S., Sopol' M.F., Dyachuk S.Ya., Sorochyns'kyi V.V., Tutyk V.L. Informatsiyno-diahnostychnyy kompleks "Regina" [Information and diagnostic complex "Regina"] Tezy dop. mizhnar. nauk.-tekh. konf. "Keruvannya rezhymamy roboty ob'yektiv elektrychnykh system 2000". m. Donets'k 5—7 veresnya 2000 r.

8. Tymashova, L. V. Analiz povrezhdaemosti vikliuchateley 110–750 kV [Elektronnyy resurs] [Analysis of the breakdown of 110-750 kV circuit breakers] / L. V. Tymashova, Y. L. Shleyfman, Y. A. Nazarov // Materyaly V mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsyy «Vysokovol'tnoe kommutatsyonnoe oborudovanye». Moskva. – 2009. – 8 s.

9. Kutin, V. M. Vdoskonallennya metodiv diahnostuvannya vysokovol'tnykh vymykachiv [Improvement of methods of diagnostics of high-voltage switches] [Tekst] / V. M. Kutin, O. Ye. Rubanenko, S. V. Mysenko // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. – 2012. – №1. – С.109–113.

10. Kukekov, H. A. Viklyuchately peremennoho toka visokoho napryazheniya [Tekst] [High-voltage alternating current circuit breakers] / H. A. Kukekov. // – L.: Enerhiya, 1972. – 336 s.

11. Stohniy B.S., Kyrylenko O.V., Butkevych O.F., Sopol' M.F. Zastosuvannya zasobiv monitorynhu perekhidnykh rezhymiv v OES Ukrayiny dlya rozv'yazannya zadach dyspetchers'koho keruvannya [Application of means of monitoring of transitional regimes in the UES of Ukraine for solving dispatch control tasks] // Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrayiny, 2009, vyp. 23. — С. 147—155.

Вимикач є одним з найважливіших апаратів, від якого залежить надійна робота не тільки розподільного пристрою, де вони встановлені, але часто і всієї енергосистеми. Найбільш відповідальною операцією для вимикачів можна вважати відключення великих струмів короткого замикання, що досягають декількох десятків кА.

Високовольтні вимикачі схильні до старіння і зносу на протязі їх експлуатації. Тому, щоб збалансувати цей ефект, протягом їх терміну служби здійснюються різні види технічного обслуговування і ремонту. Крім того, термін експлуатації комутаційного обладнання важко визначити заздалегідь, так як це залежить від багатьох факторів, таких як технологія виготовлення, електрична напруга, умови довкілля і механічні навантаження, температурні режими, тощо.

З метою підвищення ефективності експлуатації елегазових вимикачів тягових підстанцій залізниць, пропонується впровадити одну з сучасних систем моніторингу елегазових вимикачів "СМЕВ". Моніторинг вимикачів використовується для вирішення двох основних завдань. Перше – контроль нормального режиму роботи, що дозволяє ефективніше використовувати ресурс вимикача та попереджати його аварійний стан своєчасним виведенням в ремонт. Друге – збір інформації про положення вимикача для систем керування та автоматизації електроенергетичного об'єкта. Система моніторингу параметрів елегазових вимикачів призначена для контролю стану високовольтного обладнання з метою визначення поточних параметрів та прогнозного розрахунку основних технологічних величин. Дана система дозволяє в режимі реального часу, планувати здійснення технічного обслуговування та ремонту обладнання більш надійним економічно ефективним способом.

З впровадженням системи зросте якість та ефективність обслуговування елегазових вимикачів системи електропостачання залізниць, що призведе до більш надійного електропостачання споживачів. Реалізація функцій прогнозування дозволить вчасно попередити несправності вимикача. Детальний аналіз кожного відключення вимикачем струму короткого замикання, отримання достовірних даних про час роботи вимикача та величину струму короткого замикання, дозволить в автоматичному режимі розрахувати комутаційний ресурс вимикача. Аналіз порівняння з попередніми відключеннями дозволить прослідкувати динаміку швидкості зміни параметрів вимикача при комутаційних операціях та визначитись з необхідністю проведення ремонтних робіт для забезпечення повного використання ресурсу вимикача.

УДК 621.311

О. О. МАТУСЕВИЧ, А. Р. КАРПЕЛЯНСКИЙ (ДНУЖТ)

Кафедра «Интеллектуальные системы электроснабжения», Днепрпетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепр, 49010, Украина, тел. : +380953815451, e-mail: anatoliy.karpelyanskiy@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-2174-7774

МОНИТОРИНГ КАК ОДНО ИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕГАЗОВЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Выключатель является одним из важнейших аппаратов, от которого зависит надежная работа не только распределительного устройства, на котором они установлены, но часто и всей энергосистемы. Наиболее ответственной операцией для выключателей можно считать отключение больших токов короткого замыкания, достигающие нескольких десятков кА.

Высоковольтные выключатели подвержены старению и износу в процессе их эксплуатации. Чтобы сбалансировать этот эффект на протяжении срока службы проводятся различные виды технического обслуживания и ремонта. Кроме того, срок эксплуатации коммутационного оборудования сложно спрогнозировать, так как это зависит от многих факторов, таких как технология изготовления, электрическое напряжение, условия окружающей среды и механические нагрузки, температурные режимы, и тому подобное.

С целью повышения эффективности эксплуатации элегазовых выключателей тяговых подстанций железных дорог, предлагается внедрить одну из современных систем мониторинга элегазовых выключателей "СМЕВ". Мониторинг выключателей используется для решения двух основных задач. Первое - контроль нормального режима работы, позволяет эффективнее использовать ресурс выключателя и предупреждать его аварийные состояния своевременным выводом в ремонт. Второе - сбор информации о положении выключателя для систем управления и автоматизации электроэнергетического объекта. Система мониторинга параметров элегазовых выключателей предназначена для контроля состояния высоковольтного оборудования с целью определения текущих параметров и прогнозирования расчета основных технологических параметров. Данная система позволяет в режиме реального времени планировать выполнение технического обслуживания и ремонта оборудования более надежным экономически эффективным способом.

С внедрением системы увеличится качество и эффективность обслуживания элегазовых выключателей системы электроснабжения железных дорог, что приведет к более надежному электроснабжению потребителей. Реализация функций прогнозирования позволит вовремя предупредить неисправности выключателя. Детальный анализ каждого отключения выключателем тока короткого замыкания, получение достоверных данных о времени работы выключателя и величину тока короткого замыкания, позволит в автоматическом режиме рассчитать коммутационный ресурс выключателя. Анализ сравнения с предыдущими отключениями позволит проследить динамику скорости изменения параметров выключателя при коммутационных операциях и определиться с необходимостью проведения ремонтных работ для обеспечения полного использования ресурса выключателя.

Ключевые слова: системы мониторинга элегазовых выключателей; элегазовые выключатели; буферизованные данные; потоковые данные; параметры выключателя.

© Матусевич О.О., Карпелянский А.Р., 2017

UDC 621.311

O. O. MATUSEVYCH, A. R. KARPELYANS'KIY (DNURT)

Department "Intelligent power supply systems", Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, st. Lazaryan, 2, Dnepr, 49010, Ukraine, phone: +380953815451, e-mail: anatoliy.karpelyanskiy@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-2174-7774

MONITORING AS ONE OF THE DIRECTIONS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF SF6 CIRCUIT BREAKERS OPERATION

The circuit breaker is one of the most important devices on which reliable operation of not only the switchgear on which they are installed, but often the entire power system, depends. The most important operation for circuit breakers can be considered the switching off of large short-circuit currents, reaching several tens of kA.

High-voltage circuit breakers of the traction substations of railways are prone to aging and wear during their service. Therefore, in order to balance this effect, different types of maintenance and repair are carried out during their service life. In addition, the life of the circuit breakers equipment is difficult to determine in advance as it depends on many factors, such as manufacturing technology, electrical voltage, environmental conditions and mechanical loads, temperature regimes, etc.

In order to increase the operational efficiency of SF6 circuit breakers, it is proposed to introduce one of the modern monitoring systems for SF6 circuit breakers "SMEV". Monitoring of circuit breakers is used to solve two main tasks. The first is control of the normal operation mode, it allows more efficient use of the circuit breakers resource and prevents its emergency conditions by timely withdrawal for repair. The second is the collection of information on the position of the switch for the control and automation systems of the electric power facility. The system for monitoring the parameters of the SF6 circuit breakers is designed to control the state of high-voltage equipment in order to determine the current parameters and predictive calculation of the main technological quantities. This system allows real-time scheduling of maintenance and repair of equipment in a more reliable and cost-effective way.

With the introduction of the system, the quality and efficiency of servicing the insulated electric circuit breakers of the railway supply system will increase, which will lead to more reliable electricity supply to consumers. Realization of the functions of forecasting will allow the timely warning of the failure of the circuit breaker. Detailed analysis of each switch-off of the short-circuit current circuit, obtaining reliable data on the switch-time and the value of the short-circuit current, will allow in automatic mode to calculate the switching resource of the circuit breaker. Comparison analysis with the previous disconnections will allow to follow the dynamics of the speed of switching the circuit breaker parameters during switching operations and determine the need for repair work to ensure full utilization of the circuit breakers resource.

Keywords: systems of monitoring of SF6 circuit breakers; SF6 circuit breakers; buffered data; flow data; parameters of circuit breakers.

Received 17.10.2017; accepted in revised form 14.12.2017.

С. П. ДЕНИСЮК, В. І. ВАСИЛЕНКО (КПІ)

Кафедра «Електропостачання», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115/3, корпус 22, +38(044) 204-85-14
e-mail: ep@iee.kpi.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680, orcid.org/0000-0001-7282-6459

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЦЕНОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ

Вступ

Сучасний залізничний транспорт – це високотехнологічний механізм із значним споживанням енергоресурсів для забезпечення своєї господарської діяльності. Щорічно залізницями України споживається значна кількість дизпалива, електроенергії, газу, вугілля, мазуту топкового та інших видів ПЕР. Близько 60 % з усіх видів енергоресурсів припадає на електроенергію. У зв'язку із значним щорічним зростанням тарифів на електроенергію збільшуються і витрати коштів на її оплату [1].

У теперішній час Україна відноситься до енергодефіцитних країн, яка задовольняє свої потреби в енергетичних ресурсах за рахунок власного виробництва менше ніж на 50 %. Поряд із цим ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів в економіці країни низька, енергоємність валового внутрішнього продукту в два рази вища за енергоємність промислово розвинених країн світу. Тому дуже важливо застосування енергозберігаючих технологій та заходів у діяльності кожного підприємства, а особливо на залізниці [2].

Економія на транспорті може бути досягнута за рахунок [3]:

- 1) використання нових ресурсозберігаючих технологій;
- 2) утримання у робочому стані рухомого складу, транспортних шляхів;
- 3) удосконалення системи транспортних потоків, у тому числі вантажоперевезень;
- 4) удосконалення системи енергопостачання (СЕП);
- 5) утримання у належному стані елементів СЕП;
- 6) нормування витрат палива, електроенергії та контроль за їх використанням;
- 7) організаційних заходів з енергозбереження.

Постановка задач досліджень

Оснoву енергозбереження в енергетиці становить планомірна реалізація комплексу технічних і технологічних заходів, яким повинна

передувати оптимізація енергоспоживання інфраструктури на системному рівні. Її метою є впорядкування споживання енергоресурсів об'єктами інфраструктури, економія спрямованих на оплату за спожиту електроенергію коштів, отримана за рахунок організаційних заходів, а також створення науково обґрунтованих передумов для проведення цілеспрямованих енергетичних обстежень з подальшою реалізацією технічних і технологічних заходів з енергозбереження [4].

Разом із сформованими системними дослідженнями технічних систем доцільно їх вивчення як спільнот виробів – техноценозів, що передбачає застосування ряду понять, які використовуються об'єктивною закономірністю, що має загальний характер [5].

Термін «техноценоз» і ценологічний підхід до дослідження складних технічних систем запропонований професором Б.І. Кудріним, де техноценоз визначається як штучна система, спільнота виробів зі слабкими зв'язками і єдиними цілями, обмежена в часі і просторі. Універсальність ценологічного підходу і сформульованого на його основі закону оптимальної побудови техноценозу дозволяє застосовувати їх для установ залізничного транспорту [6 – 8].

Дослідження техноценозу – це дослідження цілого, конкретного об'єкта, що має інтегративні властивості, дослідження, що припускає рух від цілого до частин при вивченні дуже складних імовірнісних технічних систем [4, 8].

Для оптимального управління енергоспоживанням техноценозу використовується ранговий аналіз. Він включає процедури інтервального оцінювання, параметричного нормування, прогнозування та нормування споживання ресурсів. Поглиблене вивчення рангових параметричних розподілів дає можливість значно підвищити ефективність рангового аналізу. Він здійснюється в таких процедурах як: дифлекс-аналіз (виконується на етапі інтервального оцінювання), GZ-аналіз (виконується на етапі прогнозування) і ASR-аналіз (проводиться на етапі нормування).

© Денисюк С. П., Василенко В. І., 2017

Поглиблений варіант GZ-аналізу уможливорює ще до початку процедури прогнозування вибрати вибір G- методології або Z-методології, це в свою чергу суттєво прискорює розрахунки і підвищує їх точність (позитивний ефект від використання даного аналізу пропорційний розмірам досліджуваної бази даних) [9, 10].

Для прогнозування електроспоживання об'єктів G-методами в основному використовуються моделі авторегресійного змінного середнього, декомпозиції часового ряду, а також різні варіанти методів на основі аналізу сингулярного спектру траєкторної матриці часового ряду. В процесі прогнозування електроспоживання техноценоз Z-методами повинні враховуватися техноценологічні властивості, які зводяться до поняття стійкості гіперболічних рангових параметричних розподілів [9 – 11].

Критеріальний варіант GZ-аналізу дозволяє ще до початку власне процедури прогнозування здійснити вибір G- або Z- методу, що істотно прискорює розрахунки і підвищує їх точність (позитивний ефект пропорційний розмірам бази даних). Як впливає з закону оптимальної побудови техноценозів, як критерій вибору методу слід розглядати співвідношення обсягів системного і гаусового ресурсів кластерів техноценозу [11, 12].

Як показано в роботах [10 – 12], похибка прогнозування електроспоживання із застосуванням процедур критеріального GZ-аналізу для окремих об'єктів може скласти 4 – 10%. При цьому похибка прогнозу для техноценозу в цілому, як правило, не перевищує 1,5 – 2% [13].

Основна частина

Для проведення оптимізації техноценозу необхідно визначити оптимальний розподіл. Багаторічний досвід дослідження техноценозів в різних областях людської діяльності показує, що, оптимальною є така конфігурація системи, яка аналітично описується двопараметричним апроксимуючим виразом рангового розподілу. Енергоспоживання об'єкта $W(x)$ у якості основи для побудови рангового параметричного Н-розподілу визначається, як:

$$W(x) = \frac{W_1}{r^\beta}, \quad (1)$$

де r – ранг об'єкту; β – показник, який визначає ступінь крутизни кривої розподілу; $W_1 = W_{\max}(1)$ – константа, за яку приймається максимальне значення електроспоживання найбільш крупного споживача.

$$\beta = \log_r \frac{W_1}{W(x)}. \quad (1)$$

Найкращим вважається такий стан техноценозу, при якому параметр знаходиться в межах $0,5 \leq \beta \leq 1,5$. Відповідно до зазначеного виразу можна визначити деякий діапазон оптимальних станів системи і графічно відобразити його у вигляді якоїсь смуги на графіку рангового розподілу [14].

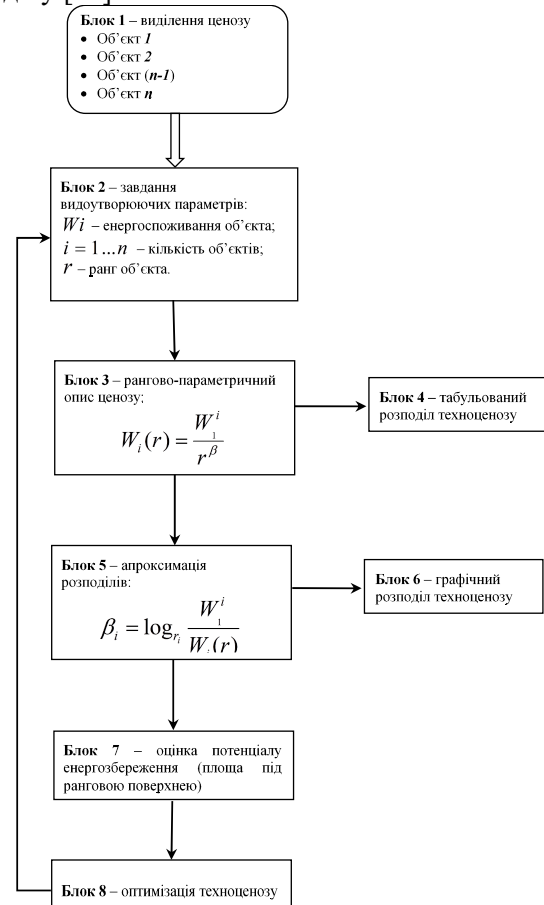


Рис. 1. Блок-схема алгоритму проведення рангового аналізу для оптимізації техноценозу

Алгоритм проведення рангового аналізу для оптимізації техноценозу включає наступні етапи:

1. Виділення ценозу.

Виділення техноценозу супроводжується його описом. Для цього задають спеціальну базу даних, що включає систематизовану і стандартизовану, досить повну і в той же час без зайвих подробиць інформацію по видах і особинах техноценозу.

2. Завдання видоутворюючих параметрів.

Елементи техноценозу виділяються на основі бази даних. Для кожного елемента повинна бути певна документація в базі даних. Якщо розглядати випадок з бюджетними організаціями та установами, то в базі даних повинні зна-

ходиться даними про щомісячне споживання енергоресурсів.

3. Рангово – параметричний опис ценозу.

Перший ранг присвоюється об'єкту з найбільшим споживання енергетичних ресурсів, далі за зменшенням енергоспоживання.

4. Побудова табульованого рангового розподілу та графічного рангового параметричного розподілу існуючого техноценозу.

5. Розрахунок ступеня крутизни кривої гіперболічного H -розподілу. Апроксимація розподілів.

6. Оптимізація ценозу.

Після проведення даного аналізу можна приступати до прогнозування енергоспоживання на основі техноценологічного підходу. Блок-схема алгоритму проведення рангового аналізу для оптимізації техноценозу представлена на рисунку 1.

Практична реалізація

У даній роботі пропонується в якості особин представлений техноценоз, який має своє значення електроспоживання. Даний ценоз обмежений в просторі – загальна кількість включає в себе багато функціонально відокремлених особин, не пов'язаних один з одним сильними зв'язками. Також існує єдина інфраструктура, що включає в себе систему електропостачання, а також систему контролю експлуатації та забезпечення функціонування. Рангово-параметричний розподіл техноценозу представлений на рисунку 2. Енергоспоживання аналітично описується двопараметричним апроксимуючим виразом рангового розподілу:

$$W(x) = \frac{W_1}{r^\beta} = \frac{200994}{r^{0,725}} \Rightarrow \beta = 0,725$$

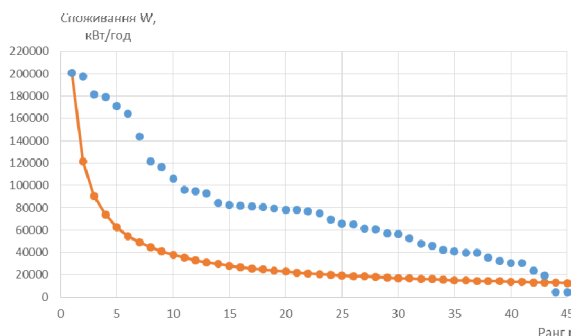


Рис. 2. Рангово-параметричний розподіл техноценозу

Найкращим вважається такий стан техноценозу, при якому параметр знаходиться в межах $0,5 \leq \beta \leq 1,5$. З рисунку 2 видно, що споживання електричної енергії досить не оптимальне і

потребує значного покращення. Параметр H -розподілу β входить в діапазон $0,5 \leq \beta \leq 1,5$, однак крива споживання електричної енергії значно віддалена від оптимальної апроксимальної кривої, що свідчить про недостатню ефективність роботи системи в цілому. При наявності відхилення необхідна додаткова робота з техноценозом: номенклатурна оптимізація; цілеспрямоване видалення аномальних особин; параметрична оптимізація; покращення параметрів аномальних особин тощо.

Процедура оптимізації будь-якого ценозу спрямована на усунення аномальних відхилень на ранговому розподілі. Після виявлення аномалій на графічному розподілі по табульованому розподілу визначаються особини, «відповідальні» за аномалії, і намічаються першочергові заходи щодо їх усунення.

Висновки

Існуючі методи прогнозування електричних навантажень формалізують розрахунки на основі класичних уявлень електротехніки та методах математичної статистики. Але розрахунок електричних навантажень, що спирається тільки на класичний апарат, не може забезпечити достатню точність при прогнозуванні процесів в сучасних умовах в великих електроенергетичних системах, тому визначення потенціалу енергозбереження однакових за складом і працюючих в різних умовах об'єктів призводить до різних оцінок, що враховує їх специфіку, але не дозволяє коректно оцінити цю величину в цілому.

Перевагою даного методу є оптимальне відображення процесу функціонування об'єктів техноценозу в майбутньому з урахуванням можливих змін технології, інфраструктури, а також використання ресурсів. Недоліком слід зазначити, що метод, який заснований на статистичній моделі з високою точністю розраховують значення короткострокового прогнозування (згідно з дослідженнями точний прогноз можна отримати на 1 – 2 роки, після цього помилка різко зростає). Другим недоліком є неможливість реалізації критеріїв, які засновані на порівнянні варіантів управління енергоспоживання. Ці недоліки можливо усунути. Для цього необхідне створення динамічної адаптивної моделі, що відбиває процес електроспоживання на глибину від 5 до 7 років і більше.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

REFERENCES

1. Малишко І. В. Основні напрямки енергозбереження на залізничному транспорті України / І. В. Малишко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 13. – С. 36 – 38. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuzt_2006_13_10
2. Кисіль С. В. Аналіз використання паливно-енергетичних ресурсів окремим структурним підрозділом залізниці / С. В. Кисіль // Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 3. – С. 11 – 15. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ess_2012_3_4
3. Гордієнко О. С. Енергозбереження транспортних підприємств / О. С. Гордієнко // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. – Вып. 1 (7). – Том 5. – С. 13-14. – Режим доступу: <http://journals.uran.ua/tarp/article/viewFile/4791/4442>
4. В. И. Гнатюк, А.А. Шейнин. Нормирование электропотребление регионального электротехнического комплекса. Издательство ИНИП Москва – 2012. – 102 с.
5. Б. И. Кудрин. Исследование технических систем как сообществ изделий-техноценозов. / Б. И. Кудрин // Системные исследования. – 1981. – С. 236 – 254.
6. Гнатюк В. И. Закон оптимального построения техноценозов. Ценологические исследования. Вып. 29-М.; Томский гос. ун-т: Центр системных исследований, 2005. – 384 с.
7. Кудрин Б. И. Введение в технетику. – Томск: Изд-во ТГУ, 1993. – 552 с.
8. Гнатюк В.И. Оптимальное построение техноценозов. Теория и практика // Вып. 9. «Ценологические исследования». – М.: Центр системных исследований. – 1999. – 272 с.
9. Гнатюк, В.И. Закон оптимального построения техноценозов [Монография] / В.И. Гнатюк. – 2-е изд., перераб. и доп. – Электронные текстовые данные. – Калининград: [Изд-во КИЦ «Техноценоз»], [2014]. – Режим доступа: <http://gnatukvi.ru/ind.html>
10. Гнатюк В.И. Тонкие процедуры рангового анализа по электропотреблению. Электрика. – № 12. – 2007.
11. Гнатюк В.И., Луценко Д.В. Прогнозирование электропотребления регионального электротехнического комплекса на инерционном этапе развития. – М.: Изд-во ИНИП РАН, 2009 – 92 с.
12. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Интернет инжиниринг, 2005. – 672 с.
13. Гнатюк В.И. Прогнозирование электропотребления на основе GZ-анализа / Гнатюк В.И. // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. – 2009. – № 1(25). – С. 21– 28. – Режим доступу: http://www.endf.ru/25_1.php. Источник: http://stroyrnogo.com/science/economy/classification_of_forecasts/

1. Maly'shko I. V. Osnovni napryamky` energozberezhennya na zalizny`chnomu transporti Ukrainy`. [Main directions of energy saving on the railway transport of Ukraine] Visny`k Dnipropetrovs`kogo nacional`nogo univertsy`tetu zalizny`chnogo transportu imeni akademika V. Lazaryana, [Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2006, issue 13, pp. 36 – 38.
2. Ky'sil` S. V. Analiz vy`kory`stannya paly`vno-energety`chny`x resursiv okremy`m strukturny`m pidrozdilom zalizny`ci. [Analysis of the use of fuel and energy resources by a separate structural unit of the railway]. Enerhosberezhennye. Enerhetyka. Enerhoaudit [Energy saving. Power engineering. Energy audit], 2012, issue 3, pp. 11 – 15.
3. Hordiienko O. S. Enerhozberzhennia transportnykh pidpriemst. [Energy saving of transport enterprises]. Tekhnolohycheskyi audyt y rezervi proyzvodstva [Technological audit and production reserves], 2012, issue 1 (7), Tom 5, pp. 13-14.
4. Gnatyuk V. I. Sheynyn A. A. Normyrovanye elektropotreblenye rehyonalnoho elektrotekhnicheskoho kompleksa. [Standardization of electric power consumption of the regional electrotechnical complex], Moskva, 2012. 102 p.
5. B. I. Kudrin. Issledovanie tekhnicheskikh sistem kak soobshchestv izdeliy-tekhnotsenozov. [Investigation of technical systems as a community of products-technoceneses]. Sistemnye issledovaniya [System studies], 1981, pp. 236 – 254.
6. Gnatyuk V. I. Zakon optimal'nogo postroeniya tekhnotsenozov. Tsenologicheskie issledovaniya. [The law of optimal construction of technoceneses. Centological studies] Tomsk, 2005. 384 p.
7. Kudrin B. I. Vvedenie v tekhnietiku. [Introduction to the technetium]. Tomsk, 1993. 552 p.
8. Gnatyuk V.I. Optimal'noe postroenie tekhnotsenozov. [Optimal construction of technoceneses]. Moscow, 1999. 272 p.
9. Gnatyuk V.I. Zakon optymalnoho postroeniya tekhnotsenozov. Monohrafiya. [The Law of Optimal Construction of Technoceneses. Monograph]. 2014.
10. Gnatyuk V.I. Tonkye protseduru ranhovoho analiza po elektropotrebleniyu. [Thin ranked analysis procedures for power consumption. Electricity], issue 12, 2007.
11. Gnatyuk V.I., Lutsenko D.V. Prohnozyrovanye elektropotreblenya rehyonalnoho elektrotekhnicheskoho kompleksa na ynersyonnom etape razvytyia [Forecasting of electric power consumption of the regional electrotechnical complex at the inertial stage of development], Moskva, 2009 92 p.
12. Kudrin B. I. Elektrosnabzhenye promishlennikh predpriyatiy: uchebnyk dlia studentov visshykh uchebnykh zavedenyi [Power supply for industrial enterprises: a textbook for students of higher educational institutions.], Moskva, 2005. 672 p.
13. Gnatyuk V.I. Prohnozyrovanye elektropotreblenya na osnove GZ-analyza [Projection of power

14. Абельдаев А. Р. Оптимизация региональных электрогенерирующих мощностей при помощи ценологического подхода (на примере Астраханской области). / Абельдаев А. Р. // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2008. – № 6. – С. 42 – 47.

Ключові слова: енергозбереження; прогнозування; техноценоз; ранговий аналіз.

consumption based on GZ-analysis], Enerhoesursosberezhenye y enerhoeffktyvnost [Energy Saving and Energy Efficiency], 2009, issue (25), pp. 21 – 28.

14. Abel'daev A. R. Optimizatsiya regional'nykh elektrogeneriruyushchikh moshchnostey pri pomoshchi tsenologicheskogo podkhoda (na primere Astrakhanskoy oblasti). [Optimization of regional power generating capacities with the help of the cenological approach (on the example of the Astrakhan region)]. Vesnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Astrakhan State Technical University], 2008, issue 6, pp. 42 – 47.

В статті розглянуто проблеми ефективного використання енергетичних ресурсів та визначено основні шляхи енергозбереження в установах залізничного транспорту. Розглянуто питання застосування техноценологічного підходу для оптимального управління енергоспоживанням з використанням рангового аналізу, який включає процедури інтервального оцінювання, параметричного нормування, прогнозування та нормування споживання ресурсів.

В роботі представлено алгоритм проведення рангового аналізу для прогнозування електроспоживання та оптимізації техноценозу. Наведено практичний приклад оптимізації техноценозу та зображено рангово-параметричний розподіл техноценозу по параметру електроспоживання.

УДК 621.31

С. П. ДЕНИСЮК, В. И. ВАСИЛЕНКО (КПИ)

Кафедра «Электроснабжения», Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» 03056, г. Киев, ул. Борщаговская, 115/3, корпус 22, +38 (044) 204-85-14 e-mail: ep@iee.kpi.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680, orcid.org/0000-0001-7282-6459

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЧРЕЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ТЕХНОЦЕНОЛОГИЧНОГО ПОДХОДА

В статье рассмотрены проблемы эффективного использования энергетических ресурсов и определены основные пути энергосбережения в учреждениях железнодорожного транспорта. Рассмотрены вопросы применения техноценологического подхода для оптимального управления энергопотреблением с использованием рангового анализа, который включает процедуры интервального оценивания, параметрического нормирования, прогнозирования и нормирования потребления ресурсов.

В работе представлен алгоритм проведения рангового анализа для прогнозирования электропотребления и оптимизации техноценоза. Приведен практический пример оптимизации техноценоза и изображено рангово-параметрическое распределение техноценоза по параметру электропотребления.

Ключевые слова: энергосбережение; прогнозирования; техноценоз; ранговый анализ.

UDC 621.31

S. P. DENISYUK, V. I. VASILENKO (KPI)

Department of Electro-Supply, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» 03056, Kyiv, Borschagovsky street, 115/3, building 22, +38 (044) 204-85-14 e-mail: ep@iee.kpi.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-6299-3680, orcid.org/0000-0001-7282-6459

ENHANCING ENERGY EFFICIENCY INSTALLATIONS OF RAILWAY TRANSPORT BASED ON TECHNOLOGICAL APPROACH

The article considers the problems of efficient use of energy resources and outlines the main ways of energy saving in railway transport institutions. The question of application of the technocenological approach for optimal management of power consumption with the use of rank analysis, which includes procedures of interval estimation, parametric rationing, forecasting and standardization of consumption of resources is considered.

The paper presents an algorithm for conducting rank analysis for predicting power consumption and optimizing technocenoses. The practical example of technocenose optimization is presented and the rank-parametric distribution of technocenoses is shown on the parameter of electric consumption.

Keywords: energy conservation; forecasting; technocenosis; rank analysis.

Received 20.09.2017; accepted in revised form 30.11.2017.

© Денисюк С. П., Василенко В. И., 2017

А. Ю. ПАПАХОВ¹, Н. А. ЛОГВИНОВА², К. В. МАТВИЕНКО³ (ДНУЖТ)

Кафедра «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепро, Украина

¹тел. + 38-067-524-43-22, e-mail: papahova0362@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2357-8158>

²тел. + 38-067-524-43-22, e-mail: logvinovanata1987@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9350-881X>

³тел. + 38-095-792-11-75, e-mail: dissertaciaz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9054-7824>

ВЕКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В УСЛОВИЯХ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ ПО ГРАФИКУ В ЭНЕРГООПТИМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Постановка проблемы

Главным документом, регламентирующим работу железных дорог есть график движения поездов.

При разработке графика движения поездов закладывается унифицированная масса поезда, которая определяется по тяговым расчетам в зависимости от продольного профиля железнодорожного направления. Кроме этого на основании массы поезда и тяговых характеристик локомотива строится график движения поезда по перегонам.

На железнодорожных направлениях с значительными размерами пассажирского движения грузовые поезда попадают под обгон пассажирскими, которые движутся с большей скоростью, что приводит к дополнительной остановке и троганию поезда с места, что в свою очередь ведет к значительным затратам электроэнергии на электрифицированных железнодорожных направлениях.

Перегонное время хода поезда зависит от технической скорости при существующем продольном профиле пути, массы поезда и требуемых затрат электроэнергии, которые зависят от массы поезда и скорости его движения.

При существующих программах разработки графика движения поездов перегонное время хода принимается при условии максимального использования мощности локомотивов. Увеличение ходовой скорости движения поездов при постоянной массе приводит к увеличению затрат электроэнергии на тягу поездов.

В существующих условиях необходимо решить задачу определения оптимальной массы грузовых поездов и скорости их движения с минимальными затратами электроэнергии, необходимой для их перемещения по участку.

Анализ последних исследований

Исследованием проблемы увеличения скорости движения поездов посвящены много работ отечественных и зарубежных ученых. Эти

исследования условно можно разделить на две группы:

- к первой группе можно отнести исследования, направленные на экономико-математическое моделирование, которое минимизирует затраты железных дорог на движение поездов по графику [1, 2, 3];

- к второй группе можно отнести исследования массы и скорости движения грузовых поездов с точки зрения максимального использования пропускной способности железнодорожного направления [4, 5].

Проблема массы и скорости движения поездов исследовалась зарубежными учеными [6, 7, 8]. В этих работах поставленная проблема решалась лишь для пассажирского движения.

Для расчетов и построения энергооптимального графика движения поездов учитываются только два параметра: масса поезда и скорость его движения без учета затрат электроэнергии на его продвижение. Вместе с тем известно [9, 10], что при увеличении массы поезда - уменьшаются удельные расходы на 1 тонну массы поезда брутто. В свою очередь повышение массы поезда ведет к снижению его технической скорости, что в свою очередь приводит к снижению пропускной способности железнодорожных направлений.

Целью данной работы является обоснование и разработка нового теоретического подхода к решению задачи организации движения поездов по энергооптимальному графику с учетом нескольких противоречащих друг другу факторов и разработка алгоритма ее решения в современных условиях.

Основной задачей исследования есть организация движения поездов по энергооптимальному графику с учетом количества поездов на фидерной зоне, продольного профиля пути и массы состава поезда, а также технической скорости следования.

Объектом исследования выступает движение поездов по графику с учетом продольного профиля.

Изложение основного материала

Нормативный график движения поездов включает в себя режим движения поезда по перегонам, промежуточным раздельным пунктам между техническими станциями. Время нахождения поездов на участках зависит от большого количества факторов: продольного профиля пути, мощности поездных локомотивов, длины блок-участков и фидерных зон, расположения на участке станций и числа путей на них, длины станционных приемоотправочных путей, средств связи движения поездов, максимальной допустимой скорости, ограничения скорости и типа графика движения поездов. Ни одно аналитическое выражение не в состоянии учесть совместно все эти факторы. Поэтому для определения энергооптимального режима движения грузовых поездов по графику в исследованиях используем метод векторной оптимизации по трем основным параметрам:

- затратам электроэнергии, необходимой для движения поездов ($F_1(x)$);
- массы поезда ($F_2(x)$);
- скорости движения поезда по графику ($F_3(x)$).

По результатам проведенных исследований выделены основные технико-технологические параметры, влияющие на движение грузового поезда по графику на рассматриваемом направлении. К параметрам первого порядка относятся параметры, определяющие технологию пропуска поездов по участкам: длина перегонов (S); ходовая скорость (V_x); техническое оснащение линии (M); количество главных путей на направлении (однопутная или двухпутная линия); средства СЦБ и связи (C) (полуавтоблокировка, автоблокировка, диспетчерская централизация).

Длина участка и ходовая скорость поезда дифференцированной массы определяют его время хода по перегонам. Время хода поездов дифференцированной массы по перегонам принимается по тяговым расчетам. При неизменных значениях параметров первого порядка скорость и время нахождения поезда дифференцированной массы на фидерном участке может значительно отличаться друг от друга.

В работе [10] указано, что с ростом плотности потока поездов интенсивность их движения, а, следовательно, и количество на фидерной зоне увеличивается до максимального значения. Дальнейшее увеличение плотности по-

тока поездов приводит к снижению скорости движения.

Дальнейшее увеличение плотности поездопотока приводит к снижению участковой скорости и интенсивности. Таким образом, при определении времени нахождения поездов на участках необходимо учитывать влияние параметра второго порядка – коэффициента заполнения пропускной способности ($K_{\text{зап}}^{\text{пр}}$), который характеризуется соотношением фактических размеров движения грузовых поездов к максимальному числу грузовых поездов, установленной массы и длины.

В качестве параметров третьего порядка выделены:

- тип графика (R);
- количества пассажирских поездов ($N_{\text{пас}}$), которые обращаются по участкам.

Прогнозное время движения поездов различной массы на железнодорожном направлении в энергооптимальном режиме зависит от следующих факторов:

$$\sum_{k=1}^n t_{D_k}^{\text{прог}} = f(S; V_x; M; C; K_{\text{зап}}^{\text{пр}}; R; N_{\text{пас}}) \rightarrow \min \quad (1)$$

Рассматриваются три основные функции $F_1(x)$, $F_2(x)$ и $F_3(x)$, определенные на множестве $X \subseteq E_1$.

Относительно функции $F_i(x)$, $i = \overline{1,3}$ предполагаем, что они выпуклые, т.е. их надграфик выпуклое множество. Качественный характер этих функций представлен на рис.1.

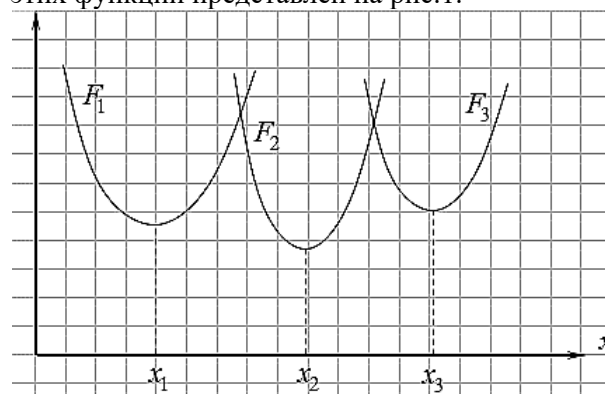


Рис. 1. Качественный характер функций F_1, F_2, F_3

Не ограничивая общности рассмотрения считаем, что точки, в которых они достигают минимальное значение удовлетворяют условию:

$$0 < x_1 < x_2 < x_3$$

Область определения X представляет собой:

$$X = \{x : x \geq 0\}$$

Наложим еще одно ограничение на функцию $F_i(x), i=1,3$. Считаем, что они дифференцируемы и при каждом $x \in X$ их производные ограничены, т.е.:

$$\frac{dF_i(x)}{dx} < \infty$$

При сделанных предположениях формальная запись задачи векторной оптимизации представляет собой:

$$\begin{pmatrix} F_1(x) \\ F_2(x) \\ F_3(x) \end{pmatrix} \rightarrow \min$$

при условии $x \in X$.

Определение 1. Множество $X_* \subseteq X$ будем называть решением задачи (1) если это множество обладает следующими свойствами:

- а) $\forall x \in X_*$ является эффективным;
- б) $\forall x, y \in X_*$ между собой несравнимы.

Определение 2. $x \in X$ является эффективным, если найдутся такие функции $F_i(x)$ и $F_j(x)$, что любое изменение x приводит к увеличению одной из этих функций и уменьшение другой.

Определение 3. Два значения x и y из X будем называть несравнимыми, если найдутся две функции $F_i(x)$ и $F_j(x)$ такие, что имеет место

$$\begin{pmatrix} F_i(x) \leq F_j(x) \\ F_i(y) \geq F_j(y) \end{pmatrix} \text{ или } \begin{pmatrix} F_i(x) \geq F_j(x) \\ F_i(y) \leq F_j(y) \end{pmatrix}$$

причем хотя бы одно из неравенств является строгим.

Введенные определения поясним на примере, когда

$$F_1(x) = (x-1)^2; F_2(x) = (x-2)^2;$$

$$F_3(x) = (x-3)^2.$$

Для данного примера $x_1 = 1; x_2 = 2; x_3 = 3$.

Возьмем $x=1,2$, тогда увеличивая x получим, что $F_1(x)$ возрастает, а $F_2(x)$ убывает. Если x уменьшаем, то $F_1(x)$ уменьшается, а $F_2(x)$ возрастает, таким образом $x=1,2$ является эффективным.

Естественно возникает вопрос о нахождении эффективных точек.

Лемма 1. Если x является эффективным для $F_i(x)$ и $F_j(x)$, то с необходимостью имеет место:

$$\frac{dF_i}{dx} + t \frac{dF_j}{dx} = 0, t \geq 0. \quad (2)$$

Доказательство. Пусть x эффективное значение, тогда производные $\frac{dF_i}{dx}$ и $\frac{dF_j}{dx}$ разного знака тогда существует некоторое $t \geq 0$, что имеет место (2).

Для рассматриваемого примера

$$\frac{dF_1}{dx} = 2(x-1); \frac{dF_2}{dx} = 2(x-2),$$

а соотношение (2) принимает вид:

$$2(x-1) + t \cdot 2(x-2) = 0$$

откуда:

$$x = \frac{1+2t}{1+t}. \quad (3)$$

Положив $t=0$ имеем $x=1$, а при возрастании t возрастает и x вычисляемое по (3) и при $t \rightarrow \infty$ получаем $x \rightarrow 2$. То что $x(t)$ возрастает с ростом t следует из того, что производная от $x(t)$ по t равна

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{(1+t)^2}$$

Следовательно, множеств $X_{12} = \{x : 1 \leq x \leq 2\}$ является эффективным.

Легко проверить, что множества $X_{23} = \{x : 2 \leq x \leq 3\}$ и множество $X_{13} = \{x : 1 \leq x \leq 3\}$ являются эффективными.

Объединяя все эти множества

$$X = X_{12} \cup X_{23} \cup X_{13} = \{x : 1 \leq x \leq 3\},$$

получаем, что X является множеством эффективных значений.

Заметим, что лемма 1 может быть усилена, когда функции $F_k(x), k=1,3$ являются выпуклыми.

Покажем, что соотношение (2) является достаточным для выпуклых функций.

Так как функции выпуклые, то они дифференцируемы по Ф. Кларку [11].

Пусть при некотором $t \geq 0$ имеет место (2), где производные вычислены по Ф. Кларку так как функции выпуклые.

Следовательно, $\frac{dF_i}{dx}$ и $\frac{dF_j}{dx}$ имеют разный знак.

Представим F_i и F_j при $x + \Delta x$ в виде

$$F_i(x + \Delta x) = F_i(x) + \frac{dF_i}{dx} \cdot \Delta x + o(\Delta x);$$

$$F_j(x + \Delta x) = F_j(x) + \frac{dF_j}{dx} \cdot \Delta x + o(\Delta x).$$

Выбирая Δx так, чтобы

$$\text{sign}\left(\frac{dF_i}{dx} \Delta x + o(\Delta x)\right) = \text{sign}\left(\frac{dF_i}{dx} \Delta x\right);$$

$$\text{sign}\left(\frac{dF_j}{dx} \Delta x + o(\Delta x)\right) = \text{sign}\left(\frac{dF_j}{dx} \Delta x\right);$$

и учитывая, что

$$\text{sign}\left(\frac{dF_i}{dx} \Delta x\right) = -\text{sign}\left(\frac{dF_j}{dx} \Delta x\right);$$

получаем, что при любом Δx как положительном, так и отрицательном, одна из функций возрастает, а другая убывает. Что и доказывает достаточность (2) для определения эффективных значений x для выпуклых функций.

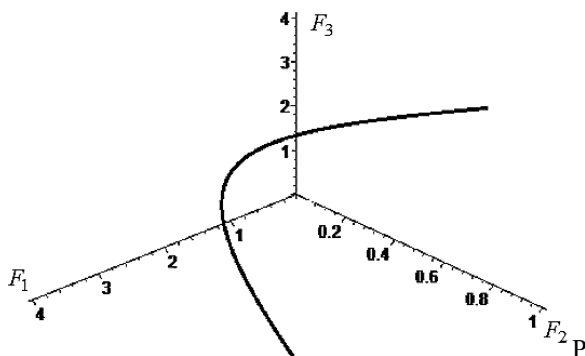
Определение 4. Два значения x и y принадлежащие X будем называть несравнимыми если F_i и F_j такие что имеет место:

$$\left(\begin{matrix} F_i(x) \leq F_i(y) \\ F_j(x) \geq F_j(y) \end{matrix} \right) \text{ или } \left(\begin{matrix} F_i(x) \geq F_i(y) \\ F_j(x) \leq F_j(y) \end{matrix} \right) \quad (4)$$

Причем среди неравенств имеет хотя бы одно строгое. В рассмотренном примере, а на этом же множестве только убывает.

Следовательно, множество состоит из эффективных точек и между собой несравнимых, поэтому множество является решением задачи векторной оптимизации по трем показателям для рассмотренного примера.

В пространстве функционалов множество представлено на рис. 2.



ис. 2. Решение задачи векторной оптимизации в пространстве функционалов

Затраты на механическую работу по перевозке груза в прямом и обратном направлениях составляют [12]:

$$C_k = 0,365LN_k \left[\begin{matrix} P(w'_0 + i_k^{\text{ЭК}}) + \\ + Q_k(w''_k + i_k^{\text{ЭК}}) \end{matrix} \right] C''_{\text{ткм}} \quad (5)$$

где $k=1$ – в прямом и $k=2$ – в обратном направлении;

L – длина звена, км;

Q_k – масса груженого поезда брутто, т;

P – масса локомотива, т;

N_k – количество грузовых поездов данного направления;

w'_0 – сопротивление движению локомотива, Н/м;

w''_k – сопротивление движению груженого вагона, Н/м;

$i_k^{\text{ЭК}}$ – эквивалентный уклон, ‰;

$C''_{\text{ткм}}$ – затраты электроэнергии на 1 ткм работы локомотива по преодолению основного сопротивления.

Затраты на механическую работу по перевозке порожних вагонов определяются аналогично:

$$C_{\text{пор}} = 0,365LC''_{\text{ткм}} \left[\begin{matrix} P(w'_0 + i_k^{\text{ЭК}}) + \\ + Q_{\text{пор}}(w''_{\text{пор}} + i_k^{\text{ЭК}}) \end{matrix} \right] (N_1 - N_2) \quad (6)$$

где $Q_{\text{пор}}$ – масса порожнего поезда, т;

$w''_{\text{пор}}$ – сопротивление движению порожнего вагона, Н/м.

Энергоэффективность графика движения грузовых поездов определяется затратами электроэнергии на движение поездов по графику установленной массы, затратами на остановки грузовых поездов под обгонами пассажирскими, собственные нужды локомотивов [13].

Затраты электроэнергии на движение поездов зависят от скорости их движения и массы [14].

Средняя масса поезда рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{бр}} = \frac{n_{\text{м.ср.}} \cdot m(q_{\text{т}} + p_{\text{нав}}^{\text{дин}}(1 - \alpha_{\text{пор}}))}{n_{\text{пог}} + n_{\text{дис}}} \quad (7)$$

где $n_{\text{м.ср.}}$, $n_{\text{пог}}$, $n_{\text{дис}}$ – соответственно среднее количество поездов на участке, количество грузовых поездов на графике и диспетчерских ло-

комотивов в зависимости от парности поездо-
потока.

m – количество вагонов в составе поезда,
ваг;

q_T – средняя масса тары вагона, m ;

$p_{нав}^{дин}$ – динамическая нагрузка груженного
вагона, m ;

$\alpha_{пор}$ – коэффициент порожнего пробега.

Суммарные затраты электроэнергии на
участке рассчитываются по формуле:

$$A_{эл} = 2 \cdot 10^{-4} L_{нав} n_{м.ср.} m (q_T + p_{нав}^{дин} (1 - \alpha_{пор})) \cdot (e_{п} + e_{зуп} + e_{сл}) \lambda + N_{рез} L_{нав} e_{сл.рез.} \quad (8)$$

где $L_{нав}$ – длина направления перевозки, $км$;

$e_{п}$, $e_{зуп}$, $e_{сл}$ – удельные (на 1000 тонно-км
брутто) затраты электроэнергии соответственно
на перемещение поездов, разгон поездов после
остановки и на собственные нужды электрово-
зов, $кВт-час$;

λ – коэффициент учета «условных» затрат
электроэнергии в контактной сети и на тяговых
подстанциях;

$e_{сл.рез.}$ – удельные (на 1 км одиночного про-
бега) затраты электроэнергии на перемещение
локомотивов резервом, $кВт-час$.

Общие удельные (на 10000 тонно-км брутто)
затрат электроэнергии рассчитываются по
формуле:

$$a_{эл} = \frac{10000 A_{эл}}{2 L_{нав} n_{м.ср.} m (q_T + p_{нав}^{дин} (1 - \alpha_{пор}))} \quad (9)$$

Практически все удельные расходы
($e_{п}$, $e_{зуп}$, $e_{сл}$) в той или иной мере увеличива-
ются с уменьшением $Q_{бр}$.

Экономико-математическая модель оптими-
зации скорости движения грузовых поездов по
критерию минимизации затрат на тягу поездов
и затрат на собственные нужды локомотивов
составляют:

$$C = C_{эл} + C_{лок} \Rightarrow \min \quad (10)$$

где $C_{эл}$ – затраты, связанные с использованием
электроэнергии на тягу поездов по железнодо-
рожному направлению без остановок, $грн$;

$C_{лок}$ – эксплуатационные затраты, отнесен-
ные к использованию электроэнергии на соб-
ственные нужды электровоза, отнесенные на
все время нахождения грузового поезда на
направлении движения поездов, $грн$.

Затраты, связанные с использованием элек-
троэнергии при пропуске грузовых поездов по
направлению рассчитываются по формуле:

$$C_{эл} = W \cdot e_{эл} = (W_{эл} + W_{вл} + W_{зуп}) \cdot e_{эл}, \quad (11)$$

где $e_{эл}$ – стоимость $кВт$ электроэнергии, $грн$;

$W_{эл}$ – затраты электроэнергии на перемеще-
ние грузового поезда в случае его движения по
железнодорожному участку без остановок, ко-
торые определяются с помощью программы
«ГАС Railway», $кВт$;

$W_{вл}$ – затраты электроэнергии на собствен-
ные нужды электровоза за все время нахожде-
ния электровоза на железнодорожном направ-
лении, $кВт$;

$W_{зуп}$ – дополнительные затраты, связанные с
остановками грузового поезда под обгонами
пассажирскими, $кВт$.

Затраты электроэнергии на собственные
нужды электровоза за время все время нахож-
дения на железнодорожном направлении опре-
деляются по формуле:

$$W_{вл} = \frac{(t_{ход}^{ван} + t_{ход1}^{ван})}{60} w_{вл}, \quad (12)$$

где $t_{ход}^{ван}$ – время движения грузового поезда по
железнодорожному направлению, без учета
первого перегона, $мин$;

$t_{ход1}^{ван}$ – время движения грузового поезда по
первому перегону направления, $мин$;

$w_{вл}$ – удельные затраты электроэнергии на
собственные нужды локомотива, $кВт-час$.

Дополнительные затраты электроэнергии,
связанные с остановками грузовых поездов под
обгонами их пассажирскими определяют по
формуле:

$$W_{зуп} = n_{обг} \cdot w_{зуп}, \quad (13)$$

где $n_{обг}$ – количество обгонов пассажирскими
поездами грузовых на всем железнодорожном
направлении, определяется в соответствии с
[15];

$w_{зуп}$ – усредненные дополнительные затраты
электроэнергии, $кВт$.

Проведенными исследованиями установле-
но, что затраты электроэнергии на тягу поездов
зависят от характеристик продольного профиля
пути и количества локомотивов задействован-
ных в тяге поезда.

При критической массе поезда для одного локомотива расходы, связанные с тягой поездов, которые приходится на 1 тонну массы поезда уменьшаются при одновременном уменьшении скорости его движения, что в свою очередь приводит к опозданию поездов в соответствии с графиком движения.

В тоже время, уменьшение массы поезда в сравнении с нормативной, которая заложена в графике движения, расходы на 1 тонну массы поезда незначительно увеличиваются с одновременным увеличением скорости его движения.

Из приведенного выше следует, что решение задачи программой в среде Maple позволяет найти оптимальное решение затрат между затратами электроэнергии, необходимой для движения поездов, массой поезда брутто и скоростью его движения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бакланов, А. А. Принципы выбора энергооптимальных скоростей движения и режима работы электровоза [Текст] / Доклады четвертой Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электроподвижного состава». – Новочеркасск: ОмГУПС, 2003. – С. 118 – 120.
2. Бакланов, А.А. Энергетический баланс движения для решения задач снижения расхода электроэнергии на тягу поездов [Текст] / А.А. Бакланов // Транспорт: наука, техника, управление / ВИНТИ. – 2005. – №6. – С. 32 – 35.
3. Полянин, Г.Е. Рекомендации по выбору оптимальных скоростей движения и весовых норм грузовых поездов на участке железной дороги [Текст] / Г.Е. Полянин // Повышение тягово-энергетической эффективности магистральных электровозов: Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Омск: ОМИИТ. – 1989. – С. 28 – 34.
4. Малькевич, Н.А., Шкурин, М.И., Зеньчук, Н.Ф. Ресурсосберегающие технологии в поездной работе [Текст] / Н.А. Малькевич, М.И. Шкурин, Н.Ф. Зеньчук // Самарский ин-т инж. ж.-д. транспорта: Межвузовский сб. науч. Трудов. – 2001. – №21. – С. 340 – 344.
5. Кузнецов, В.Г, Калашников К.О. Розробка наукових принципів зменшення витрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом регулювання транспортного потоку [Текст] / В.Г. Кузнецов, К.О. Калашников // Електрифікація транспорту: науковий журнал. – Д: ДНУЗТ.- 2014.- №8.-С.104 – 109.
6. Вебер, П.Ю. К вопросу определения скорости движения на железных дорогах Европы [Текст] /

Выводы

Авторами разработан новый теоретический подход к решению задачи организации движения поездов по энергооптимальному графику. В процессе моделирования движения поездов по участку установлено, что энергооптимальный график движения поездов может быть использован на участках, на которых заполнение пропускной способности составляет не более 70-75 %, что позволяет снизить техническую скорость заложенную в график движения поездов на 3-5 % с одновременным снижением массы поезда на 6-10 %. При определении количества поездов, которое одновременно может находиться на фидерной зоне, зависит от размеров движения поездов в грузовом и обратном направлениях.

Предложен новый метод решения может быть использован при разработке энергооптимального графика движения поездов на полигоне сети железных дорог.

REFERENCES

1. Baklanov, A. Guidelines on choosing energy-optimal speeds and modes of operation of electric [Text] / Report of the Fourth International Scientific Conference "Status and prospects of development of electric rolling stock." - Novocherkassk: OmGUPS, 2003. - pp. 118 – 120.
2. Baklanov, A. The energy balance of the movement to address the problem of reducing energy consumption for traction [Text] / A. Baklanov // Transport: science, technology, management / VINITI. - 2005. – No 6. - pp. 32 – 35.
3. Polyanin, G. Guidelines for selecting the optimum speeds and weight standards of freight trains on the railway [Text] / G. Polyanin // Improving the energy efficiency of the trailer electric locomotives: Interuniversity thematic collection of scientific papers. - Omsk: OMIIT. - 1989. - p. 28 – 34.
4. Malkevich, N, Shkurin, M, Zenchuk, N Resource-saving technologies in the train [Text] / N. Malkevich, M. Shkurin, N. Zenchuk // Samara Inst Ing. railroad Transportation: Intercollegiate Scientific. Proceedings. - 2001. – No 21. - pp. 340 – 344.
5. Kuznetsov, V, Kalashnikov K. Rozrobka NAUKOVO printsiyv zmenshennya vitrat elektroenergiï in tyagoviy MEREZH postynogo Strouma Shlyakhov reguluvannya traffic flows [Text] / V. Kuznetsov, K. Kalashnikov // Elektrifikatsiya Transport Naukova magazine. - D: DNUZT.- 2014.-No 8.-pp.104 - 109.
6. Weber, P. On the question of determining the speed of railways in Europe [Text] / P. Weber // Railways mira.-1983.- No 5.- pp. 2-5.
7. The optimal from an economic point of view, the maximum speed on the Australian Federal Rail-

© Папахов О. Ю. та ін., 2017

П.Ю. Вебер // Железные дороги мира.-1983.- №5.- С. 2-5.

7. Оптимальные с экономической точки зрения максимальные скорости на Австралийских федеральных железных дорогах [Текст]// Железнодорожный транспорт за рубежом: ЭИ/ ЦНИИТЭИ МПС.- 1995.- Сер. 1.- Вып. 5.- С. 5 – 19.

8. Оценка существующих нормативов ограничения скорости движения поездов (США) [Текст]// Управление, логистика и информатика на транспорте: ЭИ/ВИНИТИ.- 1999.- №15.

9. Кужель, А. Л. Роль графика движения поездов в рыночных условиях [Текст]/ А. Л. Кужель, И. Н. Шапкин, Е. М. Кожанов // Железнодорожный транспорт, – 2007. – № 7. – С. 33-36.

10. Папахов О. Ю. Обґрунтування руху поїздів на напрямках за погодженими розкладами [Текст] / О. Ю. Папахов, Н. О. Логвінова // Електрифікація транспорту. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2014. – Вип. 8. – С. 110-116.

11. Босов, А. А. Функции множества и их применение [Текст] / А.А. Босов – Днепродзержинск, Изд. дом «Андрей», 2007. – 182 с.

12. Хачиян, Д.Г. Сложность задач линейного программирования. [Текст] / Д.Г. Хачиян – М: Знание, 1987, 32 с.

13. Некрасевич В.И. Каким быть графику грузового движения [Текст] / В.И. Некрасевич, А.Ф. Бородин// Железнодорожный транспорт – 1992. – № 12. – С. 2–8.

14. Папахов, А. Ю. Использование метода функции множества при рациональной организации вагонопотоков [Текст] /А. Ю. Папахов // Транспортные системы и технологии перевозок. Сборник научных трудов Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. – 2016. – 12. – С. 69 – 74.

15. Вернигора Р.В. Аналітичний розрахунок коефіцієнтів зйому вантажних поїздів пасажирськими в умовах швидкісного руху [Текст]/ Р.В. Вернигора, О.Ю. Папахов, Н.О. Логвінова//Східно-Європейський журнал передових технологій –2013. № 2/3 (62) - С. 51-55.

ways [Text] // Rail abroad: EI / TSNIITEI MPS.- 1995.- Ser. 1.- No. 5.- pp. 5 – 19.

8. Assessment of existing regulations limit the speed of trains (USA) [Text] // management, logistics and informatics in transport: EI / VINI-TI.- 1999.- №15.

9. Kuzhel, A. Role of train table in market conditions [Text]/ Kuzhel A, Shapkin, A, Ko-zhanov, E // /The Railway transport, – 2007. – № 7. – p. 33-36.

10. Papakhov, O. The ground of motion of trains on directions on the concerted time-table [Text] / Papakhov, O, Lohvinova, N. // The electrification of transport. – Dnipropetrovsk : DNURT, 2014. – № 8. – p. 110-116.

11. Bosov A. Set Functions and Their Applications [Text] / A. Bosov - Dnieper-Dzerzhinsk, Ed. house "Andrei", 2007. - 182 p.

12. Khachiyan, D. Complexity of linear programming problems. [Text] / D. Khachiyan - M: Knowledge, 1987, 32 p.

13. Nekrashevich V.I. What charts of freight motion [Text] / V.I. Nekrashevich, A.F. Borod-in// Railway transport – 1992. – № 12. – p. 2–8.

14. Papakhov, O. Using of method of function of great number for rational organization of wagon flows [Text] / Papakhov, O // Transport system and technologies of transportations. Col-lection of scientific works of the Dnipropetrovsk National University of railway Transport named after academitian V. Lazaryan. – 2016. – 12. – p. 69 – 74.

15. Vernigora R. Analytical calculation of coefficient of output of freight trains passenger in the conditions of speed motion [Text] /R. Vernigora, A. Papakhov, N. Lohvinova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies-2013. N 2/3 (62) - pp. 51-55

Целью данной работы является обоснование и разработка нового теоретического подхода к решению задачи организации движения поездов по энергооптимальному графику с учетом нескольких противоречащих друг другу факторов и разработка алгоритма ее решения в современных условиях.

Основной задачей исследования есть организация движения поездов по энергооптимальному графику с учетом количества поездов на фидерной зоне, продольного профиля пути и массы состава поезда, а также технической скорости следования.

Объектом исследования выступает движение поездов по графику с учетом продольного профиля.

Предметом исследования есть определение оптимального количества поездов на фидерной зоне с учетом исполнения графика движения поездов, а также массы поезда и скорости его движения.

Методом исследования является теории тяги и функции множества.

Научная новизна заключается в решении задачи векторной оптимизации применительно к организации движения поездов по энергооптимальному графику с учетом эффективного соотношения массы и скорости, а также ограничением количества поездов на фидерной зоне. Получены необходимые условия решения задачи организации движения поездов по энергооптимальному графику с учетом нескольких параметров векторной оптимизации: массы и скорости движения поезда по энергооптимальному графику в современных условиях.

Ключевые слова: график движения; масса поезда; скорость; функции множества.

УДК 656.212

О. Ю. ПАПАХОВ¹, Н. О. ЛОГВИНОВА², Х. В. МАТВИЄНКО³ (ДНУЗТ)

Кафедра «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна

¹тел. + 38-067-524-43-22, e-mail: papahova0362@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2357-8158>

²тел. + 38-067-524-43-22, e-mail: logvinovanata1987@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9350-881X>

³тел. + 38-095-792-11-75, e-mail: dissertaciaz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9054-7824>

ВЕКТОРНА ОПТИМІЗАЦІЯ В УМОВАХ РУХУ ПОЇЗДІВ ЗА ГРАФІКОМ В ЕНЕРГООПТИМАЛЬНОМУ РЕЖИМІ

Метою даної роботи являється обґрунтування та розробка нового теоретичного підходу до вирішення задачі організації руху поїздів за енергооптимальним графіком з урахуванням декількох суперечливих один одному факторів і розробка алгоритму її вирішення у сучасних умовах.

Основною задачею дослідження є організація руху поїздів за енергооптимальним графіком з урахуванням кількості поїздів на фідерній зоні, повздовжнього профілю колії та маси складу поїзда, а також технічної швидкості слідування.

Об'єктом дослідження виступає рух поїздів за графіком з урахуванням повздовжнього профілю.

Предметом дослідження є визначення оптимальної кількості поїздів на фідерній зоні з урахуванням виконання графіка руху поїздів, а також маси поїзду і швидкості його руху.

Методом дослідження являється теорія тяги і функції множин.

Наукова новизна полягає у вирішенні задачі векторної оптимізації призначеної до організації руху поїздів за енергооптимальним графіком з урахуванням ефективного співвідношення маси і швидкості, а також обмеженні кількості поїздів на фідерній зоні. Отримані необхідні умови вирішення задачі організації руху поїздів за енергооптимальним графіком з урахуванням декількох параметрів векторної оптимізації: маси і швидкості руху поїзду за енергооптимальним графіком у сучасних умовах.

Ключові слова: графік руху; маса поїзда; швидкість; функції множин.

UDC 656.212

O. YU. PAPAHOV¹, N. A. LOGVINOVA², K. V. MATVIENKO³ (DNURT)

Department "Management of operational work", Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan st. Lazaryan, 2, 49010, Dnipro, Ukraine

¹Tel. + 38-067-524-43-22, e-mail: papahova0362@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2357-8158>

²Tel. + 38-067-524-43-22, e-mail: logvinovanata1987@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9350-881X>

³Tel + 38-095-792-11-75, e-mail: dissertaciaz@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9054-7824>

VECTOR OPTIMIZATION IN THE CONDITIONS OF MOTION OF TRAINS ON CHART IN ENERGYOPTIMAL MODE

The purpose of work are a ground and development of the new theoretical going near the decision of task of organization of motion of trains on an energy optimal chart taking into account a few conflicting with each other of factors and development of algorithm of her decision in modern terms.

The basic task of research is organization of motion of trains on an energy optimal chart taking into account the amount of trains on a feeder zone, longitudinal profile of way and mass of composition of train, and also technical speed of the following.

Motion of trains comes forward a research object on a chart taking into account a longitudinal profile.

The article of research is determining the optimal amount of trains on a feeder zone taking into account execution of train table, and also mass of train and rate of his movement.

A research method is to the theory of traction and function of great number.

A scientific novelty consists in the decision of task of vectorial optimization as it applies to organization of motion of trains on an energy optimal chart taking into account effective correlation of mass and speed, and also by the limit of amount of trains on a feeder zone. The necessary terms of decision of task of organization of motion of trains are got on an energy optimal chart taking into account a few parameters of vectorial optimization: the masses and rates of movement of train on energy optimal chart in modern terms.

Keywords: chart of motion; mass of train; speed; functions of great number.

Received 11.10.2017; accepted in revised form 07.12.2017.

В. Г. СИЧЕНКО (ДНУЗТ), О. І. БОНДАР (ДНУЗТ), А. В. МІЩЕНКО (ДНУЗТ),
В. В. КУЗНЕЦОВ (НМЕТАУ), О. П. КОРДІН (ПРИДНІПРОВЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ)

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, 49010 м. Дніпро, вул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: elpostz@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9533-2897>

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, тел.: +38(056)373-15-47, e-mail: etemdiiit@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3884-5589>

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, 49010 м. Дніпро, вул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: temkamishchenko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3156-8443>

Кафедра «Електротехніка та електропривод» Національної металургійної академії України, 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4, тел. +38(056) 3748446, wit_jane2000@i.ua, <http://orcid.org/0000-0002-8169-4598>

Дорожня електротехнічна лабораторія Придніпровської залізниці, 49124 м. Дніпро, вул. Іларіонівська 6Б, O.Kordin@dp.uz.gov.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8652-1605>

ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЛІНІЙ ПОВЗДОВЖНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦЬ ПРИ ПІДВИЩЕННІ НАПРУГИ В МЕРЕЖІ

Вступ

На сьогодні актуальною проблемою залишається необхідність підвищення якості і економії електроенергії в електричних мережах. В умовах розвитку ринку електроенергії і враховуючи специфіку енергосистеми України дана проблема поділяється на дві складові, кожна з яких має різні підходи. В даному випадку мова йде про розділення енергосистеми на живлячі і розподільчі мережі. До живлячих відноситься мережі високої та надвисокої напруги, а до розподільчих мереж відносяться мережі з напругою середнього класу.

В той час коли проблемні питання функціонування живлячих мереж вирішуються на державному рівні енергопостачальними організаціями, проблема розподільчих мереж повністю лягає на власників цих мереж.

Більшість розподільчих мереж середнього класу напруги являються консервативними і однонаправленими, виконуючи функції транспортування і розподілу електричної енергії, вони мають низький відсоток автоматизації, застарілий релейний захист і автоматику, великі втрати електроенергії, значний відсоток неперспективних напруг (6, 10 кВ) [1].

Більша частина нинішньої української енергосистеми була побудована ще в 60-х, 70-х роках ХХ століття з використанням старих технологій СРСР. Тому на сьогодні лінії електропередач, а також силові устаткування давно вичерпали свій ресурс.

Старе обладнання та побудована структура мереж ускладнюють обслуговування та експлуатацію мереж.

Розвиток країни і її економіки неминуче призводить до зростання числа енергоємного обладнання при загальному збільшенні кількості споживачів (і, як результат, навантаження на електричні мережі), яке часто досягає технічно можливої межі існуючих мереж. Дефіцит потужності прийнято вирішувати локально. Для забезпечення електроживленням нових споживачів від електростанцій (або підстанцій) прокладаються паралельно нові лінії електропередач, будуються нові розподільчі підстанції.

Одним із перспективних шляхів підвищення енергоефективності розподільчих мереж на сьогодні є підвищення рівня номінальної напруги мережі.

Так, наприклад, в роботах [2, 3] авторами запропоновано підвищення напруги живлення системи підземного електропостачання енергоємних шахт до 35 кВ з метою зниження втрат електроенергії та скорочення витрат кольорових металів при модернізації мережі.

Грунтовною роботою щодо питань ефективності роботи розподільчих мереж при підвищенні їх класу напруги є [4]. Вона присвячена розробці методів реконфігурації схем розподільчих мереж при підвищенні їх номінальної напруги до 20 кВ.

Питанням впровадження підвищеного рівня напруги 20 кВ в електричних мережах залізниць України присвячена робота [5], у якій розглядається можливість впровадження техноло-

гій Smart Grid для підвищення рівня надійності системи за рахунок зміни структури розподілу та передачі енергії.

Серед праць інших авторів присвячених питанням підвищення енергетичної ефективності розподільчих мереж можна відзначити роботи [6 – 8].

Загалом на сьогодні можна констатувати, що питання переведення електричних мереж залізниць, які живляться від ліній повздожнього електропостачання на підвищену напругу розроблені недостатньо.

Мета

Виходячи з вищевикладеного метою зазначеної роботи є оцінка енергетичної ефективності систем повздожнього електропостачання шляхом підвищенням їх класу напруги, а також аналіз змін електричних показників розподільчих мереж залізничі за рахунок переходу на вищий рівень напруги.

Проблематика питання

Аналіз стану існуючих електричних мереж вказує на фізичну і моральну зношеність електрообладнання (термін служби деякого обладнання сягає 50-70 років). Через застарілу технічну оснащеність для наших розподільчих електричних мереж стала звичною висока втрата електроенергії. На якості передачі електроенергії кінцевому споживачу позначається і низький рівень автоматизації.

Без сумніву можна сказати, що ефективність впровадження нового класу напруги є очевидною: більша напруга – менші втрати. Впровадження напруги 20 кВ в міські мережі (заміна старих електромереж або будівництво нових) економічно може бути вигідним завдяки постійному збільшенню щільності навантаження в містах, посилення вимог до якості електроенергії. Застосовувати електричні мережі з напругою 20 кВ вигідно не тільки в масштабі міст. Моделювання сільських мереж на напругу 10, 20 і 35 кВ показало, що електричні мережі 10 кВ доцільні при щільності навантаження менше 60 кВт/км². Мережі з напругою 35 кВ раціонально реалізовувати, якщо зона обслуговування перевищує 25 км. Впроваджувати електричні мережі з напругою 20 кВ доцільно в наступних випадках: при щільності навантаження більше 65 кВт/км², при заміні ліній живлення 6 кВ, при будівництві нових селищ.

Однак, при переведенні ліній на напругу 20 кВ виникає низка проблем, не вирішивши які, застосування цієї напруги не буде рентабе-

льним [5]: відсутність широкої лінійки електрообладнання на номінал напруги 20 кВ; відсутність досконалої нормативно-правової бази використання в Україні напруги 20 кВ; відсутність партнерської програми з країнами, які вже використовують технологію використання напруги 20 кВ; відсутність проекту сценарного типу, який враховував би особливості переведення частин мереж з напруги 6 (10) кВ на напругу 20 кВ з паралельною роботою основної кількості цих мереж.

Клас напруги 20 кВ є новим для українських мереж, тому для обслуговування мереж 20 кВ потрібні відповідна нормативна документація, законодавство про навчання працівників по обслуговуванню. Окрім іншого, основна частина мереж у великих містах виконана кабельними лініями. Заміна кабелів в містах приведе до додаткових затрат на демонтаж старих та закладання нових кабелів, оскільки старі кабелі фактично відпрацювали свій ресурс.

На сьогодні не можливо зробити повний перехід на інший клас напруги в зв'язку економічним становищем в країні, а часткове переведення мереж на напругу 20 кВ не дасть тієї надійності енергосистеми, яка б відповідала нормам. Коли розвивають мережі, їх прийнято “підпирати” - це означає що не можна лишати висячими так звані “глухі кути”, а треба будувати саме мережу-сітку. Мережами 20 кВ це зробити буде неможливо, адже навколо є тільки існуючі мережі 6, 10 і 35 кВ, як наслідок закілювати лінії і підстанції на класі напруги 20 кВ не можливо. Ці “глухі кути” будуть висіти десятки років, а надійність та секціонування у таких випадках можна забезпечити тільки шляхом додаткових витрат на трансформатори зв'язку [9].

Створення мереж 20 кВ дійсно може мати сенс, коли розвивається нова територія, без мереж взагалі або з тотальною заміною вже існуючих мереж.

І все ж не очевидно, що застосування напруги 20 кВ буде кращим рішенням - навіть у такому випадку потрібно розробити ТЕО і обґрунтувати, що рівень напруги 20 кВ матиме кращі показники ніж напруга 10 або 35 кВ. Адже 20 кВ у більшості випадків програє 35 кВ (через втрати), а аргумент, що обладнання 20 кВ має ті ж габарити, що й на 10 кВ, на нових територіях не матиме переваги.

До речі, коли розробляється ТЕО, у якому порівнюються варіант переходу з 10 кВ на 20 кВ, не можна забувати, що на сьогодні вар-

тість існуючих мереж 10 кВ треба вважати нульовими, це так звані “втоплені витрати” [9].

Основними перевагами підвищеної напруги 20 кВ над класами напруги 6, 10 кВ є те, що при збільшенні напруги до 20 кВ при сталій потужності струми зменшуються, і, як наслідок, зменшуються технологічні втрати електроенергії. Підвищення напруги сприятиме збільшенню запасу потужності мережі при максимальному навантаженні, підвищенню якості електричної енергії. Також можна відзначити те, що з точки зору схем і компонування, РП 20 кВ і 6, (10) кВ відносяться до мереж одного класу. Обладнання на 20 кВ є комплексним, компактним і за розмірами його можна порівняти з обладнанням 10 кВ. Іншими словами потреби заміни проводів, кабелів немає. Використання номінальної напруги 20 кВ дозволить збільшити надійність і безпеку використовуваних електричних мереж [4, 8].

В межах існуючої дискусії на сьогоднішній день актуальним залишається питання: **«Чи слід переводити розподільчі мережі 6(10) кВ Укрзалізниці на підвищену напругу 20 кВ?»**.

Результати

Для прикладу проведемо електричний розрахунок існуючої лінії повздовжнього електропостачання і проаналізуємо отримані результати.

Існуюча лінія повздовжнього електропостачання «С» - «Ф» має довжину 18613 м, яка складається з 5764 м кабельної вставки, виконаної кабелем АСБ 3х185 мм² та 12849 м повітряної лінії виконаної проводом СП-3-1х120 мм² (рис. 1). На даній ділянці застосовується консольна схема електропостачання, при такій схемі живлення здійснюється від однієї із суміжних підстанцій. З підстанції «С» живлення лінії виконується від ВРУ - 10 кВ через трансформатор ТМ-2500/10/6,3. З іншої сторони, тобто зі підстанції «Ф», живлення виконується від ВРП-6кВ. Від даної лінії живляться такі споживачі: ТОВ «О» - 400 кВА, КТП - «В» - 63 кВА, ТОВ «Т» - 400 кВА, КТП-2 «О» - 320 кВА, КТП «Д» - 63 кВА. Живлення може відбуватись як зі сторони підстанції С, так і зі сторони Ф.

Слід зазначити, що споживачі, які одержують електричну енергію від постачальника електричної енергії в точці продажу електричної енергії зі ступенем напруги нижче за 27,5 кВ відносяться до другого класу. Для ПАТ «Укрзалізниця» на сьогодні вартість 1 кВт електричної енергії другого класу складає 193,852 коп/кВт·год.

Результати розрахунку зведені у таблицю 1. З розрахунків видно, що при підвищенні напруги до 20 кВ суттєво зменшуються втрати, а відхилення напруги не перевищують норм, встановлених ГОСТ 13109-97 [10].

Слід зазначити, що при переведенні на підвищену напругу 20 кВ, не потрібно збільшувати переріз проводів, розташування проводів, що дасть змогу використовувати ті ж опори і живлячі проводи, які застосовуються на напрузі 6 (10) кВ.

Система повздовжнього електропостачання залізниці складний динамічний об'єкт, який характеризуються великою довжиною, різноманітним навантаженням (об'єкти інфраструктури, в тому числі локомотивного і вагонного господарства, культурно-побутові об'єкти, сторонні споживачі електричної енергії). Живлення розподільчих мереж нетягових споживачів виконується від тягових підстанцій напругами 35, 10, 6 кВ. При цьому для застосування підвищеної напруги 20 кВ потрібно використовувати нестандартне для нашої держави силове обладнання. Значні капіталовкладення потрібні на трансформування живлячої напруги тягових підстанцій (35, 110, 154, 220 кВ) на 20 кВ, а саме на закупівлю силових трансформаторів різних типів, які будуть встановлюватись на тягових підстанціях. Також потрібно визначити, як буде відбуватися трансформування електричної енергії на затисках споживача, адже основними нетяговими споживачами є споживачі на вводі яких застосовується напруга 10, 6, 0,4 кВ, а це - додаткові затрати як для залізниці, так і для споживачів.

Необхідно також вказати, що лінії повздовжнього електропостачання та лінії ДПР розташовуються уздовж залізничних колій в смугі відведення. Основна частина цих ліній розташована за межами міст і вони, в основному, виконуються повітряними лініями. Якщо в межах міста необхідне виконання їх кабельними, це не викличе проблем, оскільки ці лінії будуть знаходитись в технологічній смугі відведення залізниці.

Технічні характеристики ліній повздовжнього електропостачання вибирають за технічними і економічними умовами [11]. До технічних умов відносять вибір перерізів по нагріву розрахунковим струмом, механічній міцності (згідно ПУЕ повинні застосовуватися багатодротні дроти), нагріву від короточасного виділення тепла струмом КЗ, втратам напруги в нормальному і післяаварійному режимах. Економічні умови вибору полягають у визначенні перерізу лінії, приведені витрати на спорудження якої будуть мінімальними.

Для розподільчих ліній напругою 6-10 кВ Придніпровської залізниці в Дорожній електро-технічній лабораторії виконуються розрахунки для коригування уставок високовольтних вимикачів при підключенні додаткових споживачів, а також проводиться розрахунок по падінню напруги на цих лініях. У разі досягнення робочих струмів до величин максимально допустимих струмів (по довідниках) рекомендується збільшення перерізу дротів відповідно до таблиць по довідниках.

Альтернативою для розподільчих мереж залізниці може бути підвищення напруги до

35 кВ. Як зазначалось вище, 20 кВ програє в більшості випадків 35 кВ.

Напруга 35 кВ відноситься до першого класу. Вартість 1 кВт електричної енергії першого класу для ПАТ «Укрзалізниця» складає 160,725 коп./кВт·год.

Для прикладу проведемо розрахунки для тієї ж лінії повздовжнього електропостачання, з урахуванням відстаней між проводами (табл. 2).

На рис. 2 показано зміну вартості електричних втрат. Його аналіз підтверджує очевидний факт – чим вищий рівень напруги, тим менші втрати.

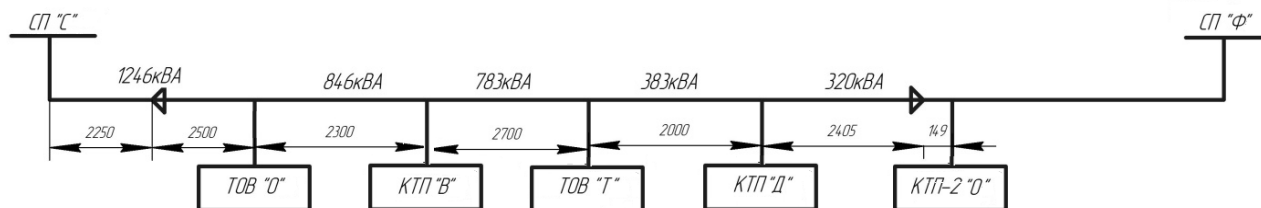


Рис. 1. Схема живлення розрахункової ділянки

Таблиця 1

Результати порівняльних розрахунків

Ділянка	Живлення від ПС С							
	6 кВ				20 кВ			
	Втрати U, В	Струм I, А	Втрати P, кВт	Вартість грн/кВт·год	Втрати U, В	Струм I, А	Втрати P, кВт	Вартість грн/кВт·год
ПС «С» - ТОВ «О»	303,409	114,19	2,177	101,305	97,975	35,969	0,238	11,075
ТОВ «О» - КТП «В»	142,692	77,756	1,004	46,702	48,838	24,422	0,109	5,106
КТП «В» - ТОВ «Т»	155,034	71,756	0,86	40,005	17,695	22,603	0,094	4,374
ТОВ «Т» - КТП «Д»	56,173	35,099	0,206	9,572	18,216	11,056	0,023	1,046
КТП «Д» – КТП-2 «О»	57,701	29,329	0,143	6,682	44,948	9,238	0,016	0,73
Всього	715,009	-	4,391	204,266	227,673	-	0,48	22,332
Відхилення напруги	11,349 %				1,138 %			

Таблиця 2

Результати порівняльних розрахунків

Ділянка	Живлення від ПС С							
	20 кВ				35 кВ			
	Втрати U, В	Струм I, А	Втрати P, кВт	Вартість грн/кВт·год	Втрати U, В	Струм I, А	Втрати P, кВт	Вартість грн/кВт·год
ПС «С» - ТОВ «О»	97,975	35,969	0,238	11,075	56,465	20,554	0,078	2,998
ТОВ «О» - КТП «В»	48,838	24,422	0,109	5,106	26,241	13,955	0,036	1,382
КТП «В» - ТОВ «Т»	17,695	22,603	0,094	4,374	28,51	12,916	0,031	1,184
ТОВ «Т» - КТП «Д»	18,216	11,056	0,023	1,046	10,33	6,318	0,007	0,283
КТП «Д» – КТП-2 «О»	44,948	9,238	0,016	0,73	10,629	5,279	0,005	0,198
Всього	227,673	-	0,48	22,332	132,175	-	0,157	6,046
Відхилення напруги	1,138 %				0,378 %			

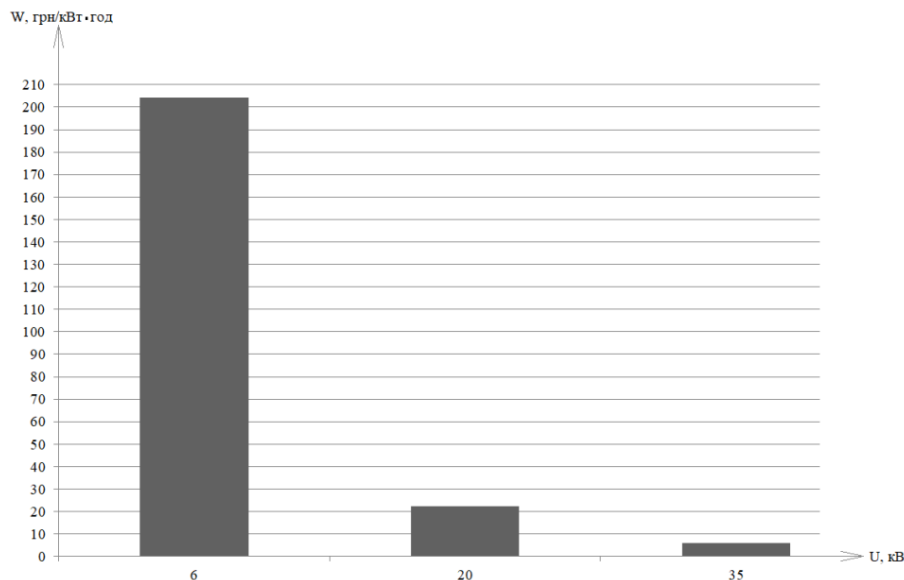


Рис. 2. Вартість електричних втрат

Висновки

На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

- проблема збільшення рівня напруги в розподільчих мережах повинна вирішуватись комплексно – співставленням втрат напруги і потужності та капітальних затрат;

- оскільки техніко-економічна доцільність не доведена в повній мірі та за наявності перерахованих вище недоліків можна вважати переведення розподільчих мереж залізничного транспорту на напругу 20 кВ недоцільним;

- при переоснащенні ліній на напругу 35 кВ можна в повному обсязі й на тривалий термін вирішити завдання якісного електропостачання споживачів електричної енергії з урахуванням перспективи зростання електричних навантажень.

Цей шлях удосконалення та підвищення ефективності електропостачання є більш прагматичним та економічно доцільнішим.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лоскутов А. Б. Городские распределительные сети 10–20 кВ с гексагональной конфигурацией / А.А. Лоскутов, Е.Н. Соснина., А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин // Электротехника и электроэнергетика. – 2013. – № 12. – С. 309–315.
2. Шкрабец Ф. П. Обеспечение перевода подземного электроснабжения энергоёмких шахт на напряжение 35 кВ // Ф. П. Шкрабец, А. В. Остапчук, Е. П. Месяц, А.В. Акулов
3. Шкрабец Ф. П. Глубокий ввод напряжения 35 кВ для питания потребителей глубоких горизонтов шахты ЗАО «Запорожский ЖРК» // Ф. П. Шкрабец, А. В. Остапчук, Ю. Н. Безручко.
4. Циганенко Б.В. Перспективы перевода розподільних мереж України на номінальну напругу 20 кВ / Наукові праці ВНТУ. – 2016 – № 1. – С. 1 – 4.
5. Денисюк С. П. / Перспективи використання технологій передачі електричної енергії на номінальній напрузі 20 кВ у розподільчих електричних мережах України // С. П. Денисюк, Д. С. Горенко, П. В. Соколовський, О. В. Степовий / Електри-

REFERENCES

1. Loskutov A. B., Gorodskie raspredelitelnyie seti 10–20 kV s geksgonalnoy konfiguratsiey [Urban distribution networks 10–20 kV with hexagonal configuration] / A.A. Loskutov, E.N. Sosnina., A.A. Loskutov, D.V. Zyirin // Elektrotehnika i elektroenergetika. – 2013. – №12. – s. 309–315
2. Shkrabets F. P. Obespechenie perevoda podzemnogo elektrosnabzheniya energoemkih shaht na napryazhenie 35 kV [Ensuring the transfer of underground power supply for energy-intensive mines to 35 kV] // F. P. Shkrabets, A. V. Ostapchuk, E. P. Mesyats, A.V. Akulov
3. Shkrabets F. P. Glubokiy vvod napryazheniya 35 kV dlya pitaniya potrebiteley glibokih gorizontov shahtyi ZAO «Zaporozhskiy ZhRK» [Deep voltage input of 35 kV for power supply of consumers of mine horizons of ZAO Zaporizhzhya ZhRK] // F. P. Shkrabets, A. V. Ostapchuk, Yu. N. Bezruchko
4. Tsiganenko B.V. Perspektivi perevedennya rozpodilnih merezh UkraYini na nominalnu napругu 20 kV [Prospects for the switching of Ukrainian distribution networks to rated voltage of 20 kV] / NaukovI pratsI

фікація транспорту №12, с.12-19.

6. Jopa T. Real Power Loss and Voltage Deviation Minimization by Reactive Power Control through Gravitational Search Algorithm / T. Jopa // European Journal of Scientific Research. 2012. № 3. P. 63 – 67.

7. Lyubchenko V. Ya. Electrical network optimization by genetic algorithm / V. Ya. Lyubchenko, D. A. Pavluchenko // Scientific Bulletin of the University of Pitesti, Series: Electronic and Computer Science. 2008. Vol. 2. P. 43 – 48.

8. Буре. И. Г. / Повышение напряжения до 20-25 кВ и качество электроэнергии в распределительных сетях. А. В. Гусев // Электро, 2012, № 5, с. 30-32 с.

9. Електронний ресурс. Режим доступу: www.epravda.com.ua/columns/2017/01/25/618730/

10. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия и совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – К. Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.

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

VNTU. – 2016 – # 1. – S. 1 – 4.

5. Denisyuk S. P. Perspektivi vikoristannya tehnologiy peredach elektrichnoyi energiyi na nominalny napruzi 20 kV u rozpodilchih elektrichnih me-rezhah Ukraini [Prospects of the use of technologies of transmission of electric energy at nominal voltage of 20 kV in distribution electric networks of Ukraine]//S. P. Denisyuk, D. S. Gorenko, P. V. Sokolovskiy, O. V. Stepoviy / Elektrifikatsiya transportu №12, s.12-19.

6. Jopa T. Real Power Loss and Voltage Deviation Minimization by Reactive Power Control through Gravitational Search Algorithm / T. Jopa // European Journal of Scientific Research. 2012. № 3. P. 63 – 67.

7. Lyubchenko V. Ya. Electrical network optimization by genetic algorithm / V. Ya. Lyubchenko, D. A. Pavluchenko // Scientific Bulletin of the University of Pitesti, Series: Electronic and Computer Science. 2008. Vol. 2. P. 43 – 48.

8. Bure. I. G. / Povyishenie napryazheniya do 20-25 kV i kachestvo elektroenergii v raspredelitelnyih setyah [Voltage up to 20-25 kV and power quality in distribution networks] A. V. Gusev // Elektro, 2012, № 5, s. 30-32 s.

Elektronnij resurs: <https://www.epravda.com.ua/columns/2017/01/25/618730/>

9. GOST 13109-97. Elektricheskaya energiya i sovместimost tehicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya. – K. Gosstandart Ukrainyi, 1999. – 32 s.

10. Ratner, M.P. Elektrosnabzhenie netyagovyih potrebiteley zheleznyih dorog. [Electricity supply to non-railway consumers of railways] / M.P. Ratner, E.L. Mogilevskiy. – M.: Transport, 1985. – 295 s.

На сьогодні в Україні ведеться дискусія щодо переведення розподільчих ліній 6 (10) кВ на напругу 20 кВ, більше того, приймаються відповідні рішення та розробляються проекти реконструкції існуючих ліній. В той же час існує велика невизначеність щодо застосування рівня напруги 20 кВ як в нормативно-правовому полі, так і в технічно-економічній доцільності, а також можливості технічної реалізації та апаратного забезпечення. Робота присвячена оцінці енергоефективності електричних мереж поздовжнього електропостачання залізничного транспорту при підвищенні номінальної напруги розподільчих мереж. Наведені розрахунки розподілу струмів, втрат потужностей і напруги в мережі для номінальних напруг 6, 20, 35 кВ. Виконано оцінку вартості втрат електричної енергії в мережі для вказаних номінальних напруг.

Ключові слова: електрична мережа; лінія поздовжнього електропостачання; струм; рівень напруги; втрата електричної енергії; енергетична ефективність.

УДК 621.331.3

В. Г. СЫЧЕНКО (ДНУЖТ), О. И. БОНДАР (ДНУЖТ), А. В. МИЩЕНКО (ДНУЖТ), В. В. КУЗНЕЦОВ (НМЕТАУ), А. П. КОРДИН (ПРИДЕПРОВСКАЯ Ж.Д.)

Кафедра «Интеллектуальные системы электроснабжения» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 49010 м. Днепр, ул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: elpostz@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-9533-2897

Кафедра «Электротехника и электромеханика», Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 49010 м. Днепр, ул. Лазаряна 2, к. 125, тел.: +38(056)373-15-47, e-mail: etemdiit@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-3884-5589

Кафедра «Интеллектуальные системы электроснабжения» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 49010 м. Днепр, ул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: temkamishchenko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3156-8443>

Кафедра «Електротехніка і електропривод» Національної металургічної академії України, 49600, г. Дніпро, пр. Гагарина, 4, тел. +38(056) 3748446, wit_jane2000@i.ua, orcid.org/0000-0002-8169-4598

Дорожня електротехнічна лабораторія Придніпровської залізничної дороги, 49124 м. Дніпро, ул. Ілларіоновська, 6Б, O.Kordin@dp.uz.gov.ua, ORCID: orcid.org/0000-0001-8652-1605

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИНИИ ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ ПОВЫШЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ

На сегодня в Украине ведется дискуссия о переводе распределительных линий 6 (10) кВ на напряжение 20 кВ, более того, принимаются соответствующие решения и разрабатываются проекты реконструкции существующих линий. В то же время существует большая неопределенность относительно применения уровня напряжения 20 кВ как в нормативно-правовом поле, так и в технико-экономической целесообразности, а также возможности технической реализации и аппаратного обеспечения. Работа посвящена оценке энергоэффективности электрических сетей продольного электроснабжения железнодорожного транспорта при повышении номинального напряжения распределительных сетей. Приведены расчеты распределения токов, потерь мощностей и напряжения в сети для номинальных напряжений 6, 20, 35 кВ. Выполнена оценка стоимости потерь электрической энергии в сети для указанных номинальных напряжений.

Ключевые слова: электрическая сеть; линия продольного электроснабжения; ток; уровень напряжения; потеря электрической энергии; энергетическая эффективность.

UDC 621.331.3

V. G. SYCHENKO (DNURT), O. I. BONDAR (DNURT), A. V. MISHCHENKO (DNURT), V. V. KUZNETSOV (NMEAU), A. P. CORDIN (PRIDPROVSKAYA RAILWAY)

Department of Intelligence electrification system, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 49010, Dnipro Lazaryan Str., 2, tel.: +38(056)373-15-47, e-mail: elpostz@i.ua, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9533-2897>

Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, office 125, Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38(056)373-15-47, e-mail: etemdiit@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3884-5589>

Department of Intelligence electrification system, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 49010, Dnipro Lazaryan str., 2, , tel.: +38(056)373-15-47, e-mail: temkamishchenko@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3156-8443>

Department of Electrical Engineering and Electric Drive of the National Metallurgical Academy of Ukraine, 49010, Dnipro, tel. +38 (056) 3748446, wit_jane2000@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0002-8169-4598

Road electrotechnical laboratory of Pridneprovskaya railway, 49124, Dnepr, Illarionovskaya st. 6B, O.Kordin@dp.uz.gov.ua, ORCID: orcid.org/0000-0001-8652-1605

ESTIMATION OF ENERGY EFFICIENCY OF LINES OF LONGITUDINAL ELECTRICAL SUPPLY OF RAILWAYS WITH INCREASING VOLTAGE IN THE NETWORK

For today, Ukraine is discussing the transfer of 6 (10) kV distribution lines to 20 kV, moreover, appropriate decisions are made and designs for the reconstruction of existing lines are being developed. At the same time, there is great uncertainty about the application of the voltage level of 20 kV both in the regulatory field and in technical and economic feasibility, as well as the possibilities of technical implementation and hardware support. The work is devoted to the estimation of energy efficiency of electric networks of longitudinal electric power supply of railway transport at increase of rated voltage of distribution networks. Calculations are given of the distribution of currents, power losses and voltage in the network for rated voltages of 6, 20, 35 kV. The cost of electricity losses in the network for these nominal voltages is estimated.

Keywords: electric network; power line; current; voltage level; loss of electrical energy; energy efficiency.

Received 03.10.2017; accepted in revised form 11.12.2017.

**ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ
ТРАНСПОРТУ**

науковий журнал

**ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ
ТРАНСПОРТА**

научный журнал

**ELECTRIFICATION
OF TRANSPORT**

scientific journal

Свідоцтво про державну реєстрацію № 17327 – 6097P від 14.10.2010 р.

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

Передплатний індекс 68641

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

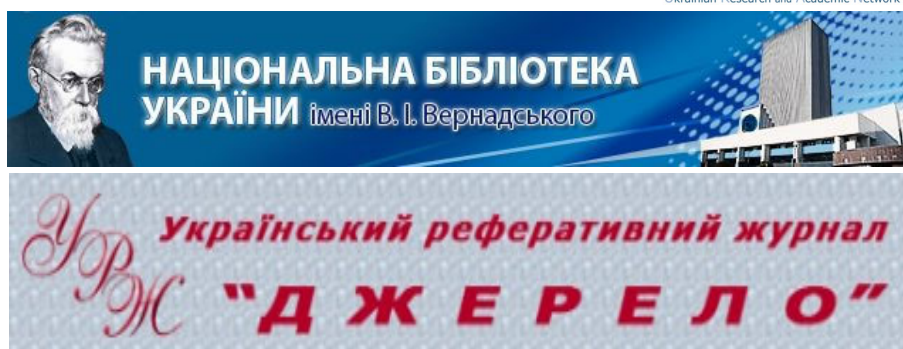
Передрук матеріалів здійснюється тільки з дозволу редакції

Члени редакційної колегії здійснюють рецензування та редагування статей

Статті друкуються українською, російською та англійською мовами

Журнал представлений у науково-метричних та реферативних базах даних

INDEX  COPERNICUS
I N T E R N A T I O N A L



Відповідальний за випуск – В. Г. Сиченко

Комп'ютерне верстання – Д. О. Босий

Формат 60×84 ¹/₈ Ум. др. арк. 13,2. Тираж 150 пр. Зам. №

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №1315 від 31.03.2003

Адреса редакції:

вул. Лазаряна, 2, кім. 1301, м. Дніпро, 49010, Україна
кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»

тел.: +38 (056) 373-19-11, e-mail: elpostz@i.ua, URL: <http://etr.diiit.edu.ua/>

Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна

