

РОЗРОБКА КЕРОВАНОГО ПІДСИЛЮЮЧОГО ПУНКТУ ДЛЯ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

В умовах впровадження важковагового та швидкісного руху застосування існуючих заходів з забезпечення належної якості напруги на струмоприймачах електрорухомого складу стає недостатнім. Сучасний розвиток техніки та технологій дає змогу розробляти та впроваджувати удосконалені системи тягового електропостачання. Авторами статті запропонована конфігурація схеми підсилюючого пункту, розрахунок та вибір його основних масогабаритних показників. Визначено критичну частоту роботи високочастотної ланки підсилюючого пункту. Проведено порівняльний аналіз матеріалів магнітопроводу імпульсного трансформатора. Для звуження діапазону відхилення напруги на струмоприймачах електрорухомого складу розроблений алгоритм роботи системи автоматичного керування вихідною потужністю підсилюючого пункту. Бібл. 9, табл. 2, рис. 8.

Ключові слова: постійний струм, відхилення напруги, підсилюючий пункт, імпульсний перетворювач, система керування.

В условиях внедрения тяжеловесных и скоростного движения применение существующих мер по обеспечению надлежащего качества напряжения токоприемников электроподвижного состава становится недостаточным. Современное развитие техники и технологий позволяет разрабатывать и внедрять усовершенствованные системы тягового электроснабжения. Авторами статьи предложена конфигурация схемы усиливающего пункта, расчет и выбор его основных массогабаритных показателей. Определена критическая частота работы высокочастотной звена усиливающего пункта. Проведен сравнительный анализ материалов магнитопровода импульсного трансформатора. Для сужения диапазона отклонения напряжения на токоприемниках электроподвижного состава разработан алгоритм работы системы автоматического управления выходной мощностью усиливающего пункта. Библ. 9, табл. 2, рис. 8.

Ключевые слова: постоянный ток, отклонение напряжения, усиливающий пункт, импульсный преобразователь, система управления.

Вступ. Електрична тяга сучасного залізничного транспорту забезпечує конкурентні показники перевізного процесу в умовах особливих вимог до якості електропостачання. В останні роки інтенсивно розвиваються технології силової електроніки. На залізничному транспорті досягнення в цій галузі призвели до поступової заміни традиційних колекторних двигунів постійного струму на безколекторні асинхронні двигуни трифазного струму, які отримують живлення від електронних перетворювачів з регульованою напругою і частотою. Оскільки більшість ділянок залізниць мають систему тягового електропостачання (СТЕ), що спроектована на організацію руху, яка відрізняється від наявної, то вже зараз окремі, найбільш навантажені ділянки Укрзалізниці, працюють без належних резервів, необхідних для запланованого об'єму перевезень. Відповідно система тягового електропостачання в нових умовах підвищення рівня споживаної потужності і швидкості руху не в змозі забезпечити необхідний рівень питомої потужності тягової мережі та відповідну якість напруги на струмоприймачах електрорухомого складу (ЕРС). Особливо це проявляється на ділянках, електрифікованих постійним струмом, які характеризуються великими значеннями струмових навантажень і, як наслідок, більш суттєвим падінням напруги в контактній мережі, що негативно відображається на організації швидкісного та важковагового руху.

Вирішення таких проблем шляхом встановлення пунктів паралельного з'єднання, збільшення сумарного перерізу контактної мережі, застосування пристроїв РПН навіть при встановлених 12-типульсових випрямлячах на тягових підстанціях не дає належних результатів. В свою чергу, збільшення напруги холостого ходу вентильних перетворювачів за допомогою перемикачів числа витків силових і тягових трансфо-

рматорів обмежує можливість застосування електричного рекуперативного гальмування.

Постановка задачі. Застосування на тягових підстанціях пристроїв автоматичного регулювання та керованих перетворювальних агрегатів зі стабілізацією вихідної напруги дозволяє ліквідувати лише коливання напруги живлячої енергосистеми та її падіння на внутрішньому опорі тягових підстанцій. При цьому втрати напруги в опорі проводів контактної мережі міжпідстанційної зони від тягового навантаження зберігаються. Тому, при жорстких вимогах до якості напруги, впровадження стабілізації лише на шинах тягових підстанцій буде недостатнім. Для вирішення даної проблеми необхідно додатково зменшувати коливання напруги на струмоприймачах ЕРС.

Актуальність цієї теми підтверджується великою кількістю наукових праць видатних вчених таких як Аржанніков Б. О., Марикін О. М., Гончаров Ю. П.

Метою даної роботи є розробка структурної схеми підсилюючого пункту, розрахунок його основних масогабаритних параметрів та побудова алгоритму роботи системи керування, який би забезпечував зменшення коливань напруги на струмоприймачах ЕРС при русі міжпідстанційною зоною.

Розробка структури підсилюючого пункту. Сучасний етап розвитку технологій в галузі силової електроніки, електротехнічних матеріалів, систем автоматичного керування дозволяє будувати системи підсилення тягового електропостачання для забезпечення заданого рівня напруги та зменшення її коливань на струмоприймачах ЕРС, що дозволить досягти енергооптимальних режимів роботи СТЕ.

Авторами статті для підсилення СТЕ постійного струму пропонується використовувати керовані під-

силюючі пункти, розподілені вздовж міжпідстанційної зони. Джерелом живлення таких пунктів можуть слугувати сонячні елементи, розміщені в вздовж міжпідстанційної зони залізниці. Така система [1] складається з фотомодулів, що приєднані до поздовжньої лінії та підсилюючого пункту.

В залежності від ступеня нерівномірності розподілу споживання потужності вздовж міжпідстанційної зони та вимог по забезпеченню заданого рівня напруги на струмоприймачі ЕРС потужність ПП пропонується обирати в діапазоні 0,5...1,5 МВт [2]. Підсилюючий пункт розміщується на опорах контактної мережі та побудований за схемою підвищуючого повномостового імпульсного перетворювача (рис. 1).

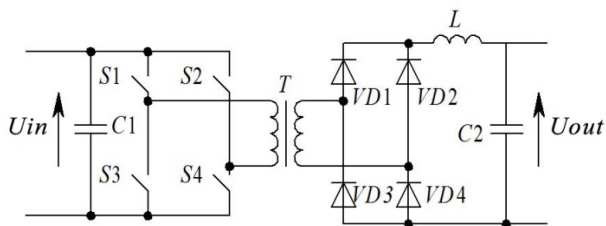


Рис. 1. Схема мостового перетворювача

Обрана схема забезпечує високий рівень вихідної потужності та коефіцієнт корисної дії (ККД), здійснює гальванічну розв'язку первинних і вторинних кіл та, в порівнянні з іншими схемами, має менше навантаження на комутаційні елементи [3]. Зважаючи на те, що ПП буде розміщуватись на опорах контактної мережі, необхідно досягти якомога менших масогабаритних показників пристрою. В перетворювальних ланцюгах джерел живлення трансформатор є найбільш громіздким елементом, і тому доцільним є зменшення його об'єму. Існує три основні способи підвищення компактності трансформатора:

1. Застосування надпровідних обмоток;
2. Застосування для магнітопроводу нових матеріалів з більшою індукцією насичення;
3. Підвищення робочої частоти напруги.

На практиці найбільшого застосування отримав останній спосіб. Однак, збільшення робочої частоти призводить до збільшення динамічних втрат в ключах імпульсного перетворювача та може призвести до зростання сумарних втрат, що перевищують допустиме значення. Сумарна потужність втрат в IGBT обмежена максимально допустимим значенням температури напівпровідникової структури та значенням теплового опору потоку тепла в охолоджуюче середовище. Так, наприклад, для силового IGBT модуля FZ3600R17HP4 фірми Infineon [4] допустима потужність розсіювання становить 21 кВт. Відповідно до методики, запропонованої в [5], максимально допустиме значення частоти комутації модуля IGBT, відповідаюче такій потужності розсіювання, при амплітуді струму на виході інвертора майже 800 А становить 8341 Гц. Робота силових модулів на такій частоті може призвести до недопустимого перевищення температури. Для запобігання перегріву розроблені і розробляються високоефективні системи охолодження повітряного, водяного і випарного типів. Використання сучасних високоефективних систем охоло-

дження забезпечить номінальний температурний режим роботи модуля, але й значно підніме вартість всієї установки в цілому. Тому критична частота перемикання силових ключів не є оптимальною. Доцільніше обирати значення частоти комутації зі співвідношення «потужність теплових втрат/вартість системи охолодження».

Критична частота роботи імпульсного перетворювача також може бути обмежена властивостями матеріалу магнітопроводу трансформатора та вимогами з охолодження та ізоляції. Відповідно до критерія подібності оптимальних за масогабаритними показниками трансформаторів [6, 7], з підвищенням робочої частоти габарити і маса трансформатора можуть бути зменшені до певної межі, що відповідає значенню критичної частоти. Це викликане дією низки фізичних факторів, наприклад: зменшення коефіцієнта передачі трансформатора, падіння напруги на індуктивності розсіювання, обмеження можливості розміщення обмотки в вікні магнітопроводу і т. і. Допустима робоча частота трансформатора визначається, головним чином, магнітними та електричними властивостями матеріалу магнітопроводу. Підвищення частоти призводить до зростання нагріву сердечника, що зумовлено, з одного боку, дією вихрових струмів, а з іншого – зменшенням площі поверхні охолодження (внаслідок зменшення габаритів трансформатора). Тому для зменшення температури нагріву необхідно знижувати вихрові струми в сердечнику. Для цього потрібно застосовувати магнітом'які матеріали з питомим опором більшим, ніж у електротехнічних сталях. Останнім часом, в області силового трансформаторобудування широке розповсюдження отримали аморфні сплави, які мають випадкову (некристалічну) структуру [5].

Критична частота для обраного матеріалу магнітопроводу визначається за формулою:

$$f_{cr} = \frac{3,98 \cdot 10^7}{A} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T}{P}}, \quad (1)$$

де A – коефіцієнт питомих втрат магнітного матеріалу (коефіцієнт Штейнметца); ΔT – температура перегріву магнітопроводу.

Об'єм магнітопроводу імпульсного трансформатора на якому може бути реалізована задана потужність при заданій частоті, можна розрахувати за виразом:

$$V_{magn} = 1,5 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot k_{ad} \cdot k_{tr} \cdot \gamma_U \cdot \gamma_I}{k_c}} \cdot \frac{P_I}{f^{\frac{1}{4}} \cdot \Delta T}, \quad (2)$$

де k_{add} – коефіцієнт додаткових втрат; k_{tr} – коефіцієнт нагріву трансформатора; γ_U – коефіцієнт збільшення втрат потужності в магнітопроводі при несинусоїдальній напрузі; γ_I – коефіцієнт оціночного значення збільшення потужності втрат в магнітопроводі при несинусоїдальному струмі; k_c – коефіцієнт заповнення вікна міддю; P_I – потужність першої гармоніки.

Для порівняння в табл. 1 показані розрахунки критичної частоти аморфного сплаву MM11-N товщиною стрічки 0,02 мм та сталі 3424 товщиною стрічки 0,08 мм при потужності трансформатора 500 кВт.

Таблиця 1

Результати розрахунку критичної частоти

	За допустимою потужністю розсіювання IGBT	Аморфний сплав MM11-Н тов- щиною стрічки 0,02 мм	Сталь 3424 товщиною стрічки 0,08 мм
Критична частота, Гц	8341	7386	928

Для порівняння масогабаритних показників магнітопроводу трансформатора, подальший розрахунок параметрів проводився для аморфного сплаву MM11-Н товщиною стрічки 0,02 мм на частоті 5000 Гц, сталі 3424 товщиною стрічки 0,08 мм на частоті 900 Гц та сталі 3424 товщиною стрічки 0,08 мм на частоті 50 Гц. Результати розрахунку зведені в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри магнітопроводу з різних матеріалів

Матеріал	Аморфний сплав MM11-Н товщиною стрічки 0,02мм, $f=5000$ Гц	Сталь 3424 товщиною стрічки 0,08 мм, $f=900$ Гц	Сталь 3424 товщиною стрічки 0,08 мм, $f=50$ Гц
Питомі втрати в магнітопроводі, Вт/кг	0,572	13,381	0,417
Об'єм магніто- проводу, м ³	0,028	0,173	0,357
Маса магнітопро- воду, кг	200	1300	2677
Втрати в магніто- проводі, Вт	114	17395	1116

З урахуванням результатів розрахунку масогабаритних показників та втрат в магнітопроводі очевидним є доцільність використання в якості матеріалу магнітопроводу аморфного сплаву MM11-Н. Заміна кристалічних сплавів аморфними в серійних виробках дозволить досягти значного економічного ефекту за рахунок спрощення технологічного процесу виготовлення магнітопроводів, зниження трудоемності, матеріалоемності та енергоемності процесу [6].

Побудова алгоритму керування підсилюючим пунктом. За результатами попередніх розрахунків та за методикою, наведеною в [6, 7] отримано вихідну характеристику підсилюючого пункту рис. 2 при формі імпульсної напруги вказаної на рис. 3. Побудова вихідної характеристики виконувалась за формулою (3).

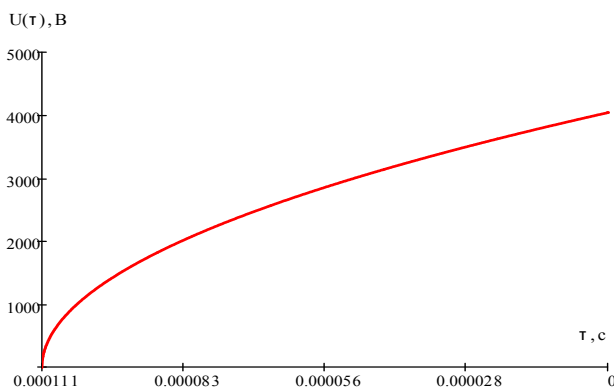


Рис. 2. Вихідна характеристика підсилюючого пункту

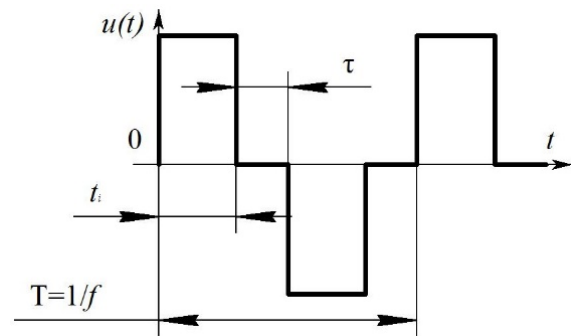


Рис. 3. Форма вихідної напруги інвертора

$$U_d(\tau) = 0,9 \cdot \frac{U_{in} \cdot \sqrt{\frac{T}{2} - \tau}}{\frac{T}{2}}, \quad (3)$$

де U_d – напруга на виході підсилюючого пункту; U_{in} – амплітудне значення напруги на вході інвертора; $T/2$ – півперіод функції напруги на вході інвертора; τ – тривалість паузи; n – коефіцієнт трансформації.

В формулі (3) підкореневий вираз визначає скважність імпульсів. Змінюючи скважність імпульсів можна отримати необхідне вихідне значення напруги на виході підсилюючого пункту. Згідно з нормативними документами [9], напруга на струмоприймачі повинна бути в діапазоні 2700...4000 В. Відповідно до цих вимог робочий діапазон напруги підсилюючого пункту обирається таким же. На цьому інтервалі напруги графік залежності $U(\tau)$ (рис. 3) носить характер близький до прямої лінії, тому можна з достатньою точністю, для побудови системи керування записати вираз (4), який представляє собою пряму (рис. 4).

$$\tau(U) = \frac{0,01 \cdot T - 0,285 \cdot T}{1330} \cdot U + 0,01 \cdot T - \frac{0,01 \cdot T - 0,285 \cdot T}{1330} \cdot 4000. \quad (4)$$

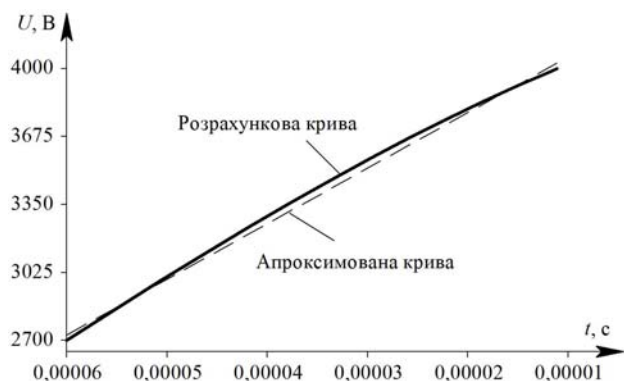


Рис. 4. Вихідна характеристика підсилюючого пункту в діапазоні напруг 2700 ... 4000 В

В подальшому, для забезпечення необхідного значення вихідної напруги підсилюючого пункту для зменшення коливальних на струмоприймачі ЕРС використовується вираз (4). Система керування підсилюючого пункту базується на інформації про рівень напруги, отриманій від розподіленої системи вимірювань вздовж міжпідстанційної зони [8]. Далі, відповідно до

[9] визначається струм підсилюючого пункту, необхідний для забезпечення заданого рівня напруги на струмоприймачі ЕРС:

$$I_{bp} = \frac{\Delta U_{set} - \Delta U'_{cn}(I_{circ})}{f(x)}, \quad (5)$$

де $\Delta U'_{cn}(I_{circ})$ – падіння напруги в контактній мережі з урахуванням вирівнювального струму; ΔU_{set} – втрата напруги до струмоприймача електровозу, при якій на останньому буде забезпечено заданий рівень напруги; $f(x)$ – функція опору, яка визначається із співвідношення струму підсилюючого пункту та розподілу цього струму в контактній мережі.

Для забезпечення протікання струму підсилюючого пункту до навантаження, необхідно досягти такої різниці потенціалів між ПП і навантаженням, щоб при її відношенні до опору ділянки L (рис. 5) забезпечувався необхідний струм.

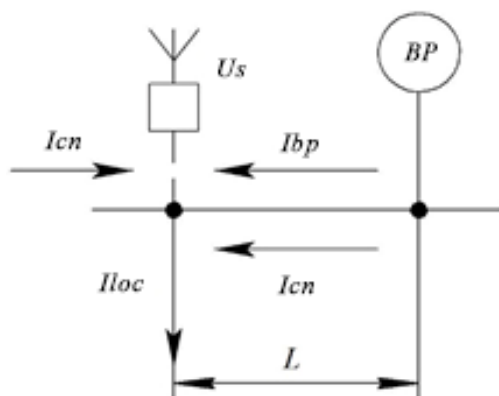


Рис. 5. Ділянка контактної мережі з підсилюючим пунктом

Таким чином напруга ПП розраховується за виразом:

$$U_{bp} = U_s + I_{bp} \cdot r_{0m} \cdot L, \quad (6)$$

де U_s – напруга на датчику; I_{bp} – струм пункту підсилення; r_{0m} – питомий опір тягової мережі; L – відстань від пункту підсилення до точки мінімуму напруги.

Після розрахунку необхідного рівня напруги, за формулою (4) визначається керуючий вплив τ . На основі вищевказаних розрахунків побудований алгоритм роботи системи керування підсилюючим пунктом (рис. 6) та імітаційна модель ділянки контактної мережі з підсилюючим пунктом (рис. 7).

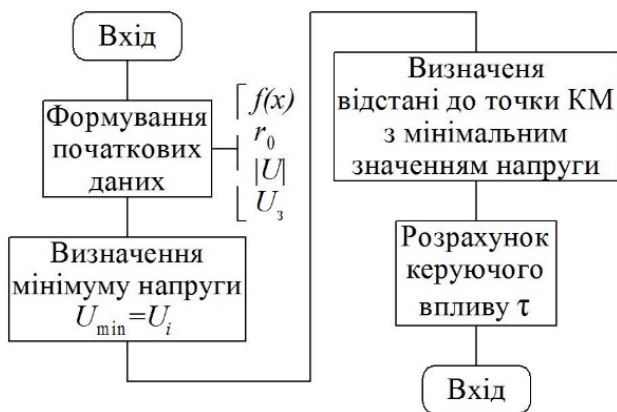


Рис. 6. Алгоритм роботи системи керування

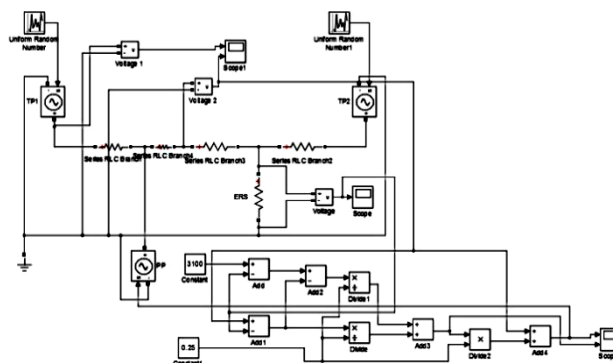


Рис. 7. Імітаційна модель системи керування

За результатами моделювання отримані графіки напруги на струмоприймачі ЕРС до включення ПП в роботу та після його включення при заданій напрузі 3100 В (рис. 8).

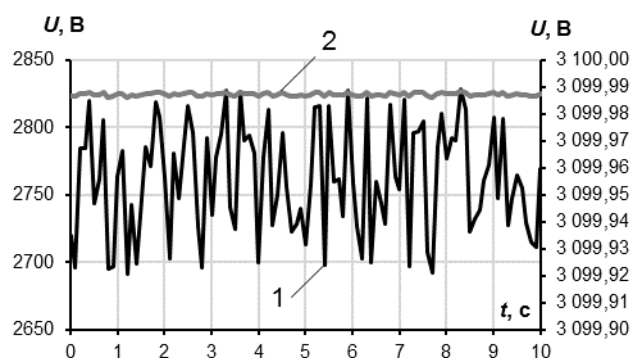


Рис. 8. Графік зміни напруги на струмоприймачі електровоза: 1 – до підключення підсилюючого пункту; 2 – після підключення підсилюючого пункту

Як видно з результатів моделювання, при роботі підсилюючого пункту значно зменшуються коливання напруги на струмоприймачі ЕРС та досягається заданий рівень напруги.

Висновки.

1. Запропонована структура схеми підсилюючого пункту дозволяє при односторонньому напрямі потоку енергії, реалізовувати встановлені потужності, забезпечувати гальванічну розв'язку первинних і вторинних кіл та регулювати вихідну потужність у досить широкому діапазоні. При необхідності забезпечення двостороннього напрямку передачі енергії, діоди в випрямлячі на виході схеми (рис. 1) можна замінити керованими силовими напівпровідниковими ключами.

2. В якості матеріалу магнітопроводу трансформатора обраний аморфний сплав ММ11-Н, властивості якого дозволяють значно підвищити робочу частоту, зменшити масогабаритні показники та втрати неробочого ходу трансформатора в порівнянні з електротехнічними сталями.

3. Приведений алгоритм роботи системи керування підсилюючим пунктом та імітаційна модель, побудована на його основі. За результатами моделювання встановлено, що при роботі керованого підсилюючого пункту розмах зміни коливань напруги на струмоприймачі ЕРС знаходиться в межах 1 В. При моделюванні також досліджувався вплив відстані між ЕРС та

датчиком напруги на точність регулювання. Результати показали, що при рівних умовах, збільшення відстані від 0 до 1000 м призводить до зростання похибки регулювання від 0,0038 до 2,65 %. Таким чином, задану точність регулювання можна забезпечити за рахунок зміни кількості та відстані між датчиками напруги, що розподілені вздовж міжпідстанційної зони.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гончаров Ю.П., Сокол Е. И., Замаруев В. В., Ивахно В. В., Кривошеев С. Ю., Ереско А. В., Малиаренко Е. А., Стысло Б. А., Панасенко Н. В., Сыченко В. Г., Косарев Е. Н. Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – Вип. 30. – Т. 2. – С. 98-108.
2. Sychenko V.G., Bosiy D.O., Kosarev E.M. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current // The archives of transport. – 2015. – Vol. 35, Iss. 3. – pp. 63-70.
3. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. – Москва: Транспорт, 1999. – 464 с.
4. IGBT модуль FZ3600R17HP4 – Режим доступу: www.infineon.com. – Перевірено: 03.07.16
5. Забаріло Д.О. Визначення частоти високочастотної ланки для перспективної схеми електрорухомого складу // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 65-73
6. Горский А.Н., Русин Ю.С., Иванов Н.Р., Сергеева Л.А. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. – Москва: Радио и связь, 1988. – 176 с.
7. Русин Ю.С., Гликман И.Я., Горский А.Н. Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. – Москва: Радио и связь, 1991. – 224 с.
8. Босий Д. О., Сиченко В. Г., Косарев Е. М. Спосіб стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму (патент на корисну модель №98483). – Державний реєстр патентів України, 27.04.15.
9. Косарев Е. М. Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму // Електрифікація транспорту. – 2015. – №9. – С. 37-43

REFERENCES

1. Goncharov Yu.P., Sokol E. I., Zamaruev V. V., Ivakhno V. V., Krivosheev S. Yu., Eres'ko A. V., Maliarenko E. A., Styslo B. A., Panasencko N. V., Sychenko V. G., Kosarev E. N. Transformation of power generated in railways dispossession belt by solar energy. – Bulletin of Pryazovskyi State Technical University, 2015. – no. 30. – Vol. 2. – pp 98-108.
2. Sychenko, V. G., Bosiy D. O., Kosarev E. M. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current // The archives of transport. – 2015. – Vol. 35, Iss. 3. – pp. 63-70.
3. Burkov A. T. Elektronnaia tekhnika i preobrazovateli. [Electronic equipment and converters]. Moscow, Transport Publ, 1999. 464 p.
4. IGBT module FZ3600R17HP4 Available at: www.infineon.com. (accessed 3 July 2016).
5. Zabarylo, D. O. Frequency Determination of High-Frequency Link for Perspective Electric Rolling Stock // Science and Transport Progress, 2014. – no 5 (53). – pp. 65-73.
6. Gorskii A. N., Rusin Iu. S., Ivanov N. R., Sergeeva L. A. Raschet elektromagnitnykh elementov istochnikov vtorichnogo elektropitaniia [Calculation of the electromagnetic components of the secondary power source]. Moscow, Radio i sviaz' Publ, 1988. 176 p.

7. Rusin Iu. S., Glikman I. Ia., Gorskii A. N. Elektromagnitnye elementy radioelektronnoi apparatury: Spravochnik [Electromagnetic elements of electronic equipment: Handbook], Moscow, Radio i sviaz' Publ, 1991. 224 p.
8. Bosyj D. O., Sychenko V. G., Kosarjev Je. M. Sposib stabi-lizacii' naprugi v kontaktnij merezhi elektryfikovanoi' diljanky postijnogo strumu [Method of stabilization voltage in the contact network of electrified DC area]. Patent UA, no. 98483.
9. Kosarjev Je. M. Voltage Control in a Contact Network of DC Electrified Railways // Electrification of transport, 2015. – no. 9. – pp. 37-43.

Надійшла (received) 25.05.2016

Косарев Євген Миколайович¹, аспірант,
Сиченко Віктор Григорович¹, д.т.н., проф.,
Муха Андрій Миколайович¹, д.т.н., проф.,
Хань Костянтин Олександрович¹, студент,
¹ Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна,
49010, Дніпро, вул. Лазаряна, 2,
тел/phone +38 056 3731525, e-mail: kosarev@e.diit.edu.ua

Ye.M. Kosarev¹, V.G. Sychenko¹, A.M. Mukha¹, K.O. Khan¹
¹ Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan,
2, Lazaryan st., Dnipro, 49010, Ukraine.

Development of controlled boost point for distributed traction power supply system.

The article is devoted to the development of the DC power supply system. The main **purpose** of the article is schematic structure development of the boost point and calculation of its main weight-size parameters. It also needs to elaborate a work algorithm of the control system for decreasing the voltage ripples on the pantograph of the electric locomotives. **Methodology.** To minimize expenses on modernization of existing electrified lines, authors proposed the methodology of modernization the electric traction system, which provides the transition to the new schematic decisions. This methodology based on using the boost points distributed along the traction network, which powered by alternative electric energy sources. The boost point work based on the methodology of forced – feed current distribution, and its current calculation conducted applying the method using the resistance function. The switching converter critical frequency value is the basis of the definition the main weight-size parameters of the boost point. **Results.** The control system testing on the simulation model demonstrated that the distributed power supply system with the use of points allows to optimize the amplification mode of the voltage in the traction network and realize the high-speed traffic modes while reducing energy losses. **Originality.** We have developed the system structure for decreasing the voltage ripples on the pantograph of the electric locomotives powered by alternative electric sources. **Practical value.** Traction power supply system with distributed PV generation, discussed in this article, will make it possible to put into practice the concept of intelligence traction power supply system and optimize the process of electric energy consumption in the traction network. This system allows supporting the established voltage quality. As a result, it decreases the power dissipation in traction network. In case of using the alternative energy sources the fuel and energy consumption decreases. References 9, tables 2, figures 8.

Key words: DC current, voltage deviation, boost point, switching converter, control system.