

НЕРУБАЦЬКИЙ В. П., канд. техн. наук, УкрДУЗТ,
ПЛАХТІЙ О. А., канд. техн. наук, УкрДУЗТ,
ІВАХНО В. В., докт. техн. наук, НТУ «ХПІ»,
ГОРДІЄНКО Д. А., аспірант, УкрДУЗТ,
ШЕЛЕСТ Д. А., аспірант, НТУ «ХПІ»

Аналіз методів керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза

У статті наведено дослідження характеристик електромагнітної сумісності в системі «електровоз – контактна мережа». Проведено аналіз впливу якості електричної енергії на надійність і ресурс роботи залізничних пристроїв та інших об'єктів. Визначено недоліки режиму роботи тиристорних випрямлячів у статичних перетворювачах електровозів однофазного змінного струму. Проведено моделювання різних режимів керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза. Подано адаптивну систему різнофазного керування випрямно-інверторного перетворювача із застосуванням діодного плеча, ввімкненого паралельно колу випрямленого струму, що дає змогу незалежно від місця розташування на фідерній зоні максимально виконувати функцію зниження коефіцієнта гармонічних спотворень.

Ключові слова: випрямно-інверторний перетворювач, електричний рухомий склад, електромагнітна сумісність, коефіцієнт потужності, система керування, тяговий електричний двигун.

Вступ

Питання підвищення надійності та ефективності роботи технічних засобів електричного рухомого складу завжди були актуальними і їм приділяли особливу увагу в наукових дослідженнях [1, 2]. Відомі дослідження про електромагнітну сумісність електровозів і систем контактної мережі [3, 4].

Стрімкий науково-технічний розвиток у галузі силової електроніки значно полегшив виробництво потужних багатосистемних локомотивів, і всі основні світові виробники електричного рухомого складу мають великий досвід у цій галузі [5, 6]. Однак залишається проблема забезпечення електромагнітної сумісності, оскільки при роботі деяких систем сигналізації, централізації та блокування з використанням рейкових кіл по рейках одночасно протікають як тяговий струм силою в сотні ампер, так і слабкий струм вищевказаних систем. Наприклад, вищі гармоніки напруги, генеровані електровозами, викликають додаткові втрати в обмотках допоміжних машин електровоза, скорочуючи їхній термін служби [7, 8].

Пріоритетними завданнями стали розроблення та впровадження більш досконалих технологій, спрямованих на підвищення надійності роботи електрообладнання тягового рухомого складу [9, 10]. У цій стратегії питання підвищення якості електроенергії в системі електропостачання є головним, оскільки безпосередньо від якості електричної енергії залежить експлуатаційний ресурс

технічних засобів усього залізничного господарства. У зв'язку зі зростаючим вантажообігом і пасажирооборотом магістральних залізниць змінного струму до якості електричної енергії висувають дедалі жорсткіші вимоги.

Постановка проблеми, аналіз досліджень і публікацій

З метою покращення якості електричної енергії до перетворювачів електричного рухомого складу застосовано низку методів керування. Так, у публікаціях [11, 12] подано активні схеми випрямлячів, у яких послідовно з'єднані два мости, що працюють з однаковим навантаженням. Перевагою цих способів керування є низьке значення напруги, яку подають на вимикач, що дає змогу використовувати перетворювачі великої потужності. Недоліком цих рішень є необхідність використання трансформаторів, що збільшує вартість системи і знижує загальну ефективність.

У публікаціях [13, 14] наведено метод керування, орієнтований на регулювання напруги в електроприводах змінного струму. В основу методу покладено непряме керування потужністю за рахунок вилучення вторинної складової напруги. Уставки напруги для прямої і вторинної складових формує регулятор струму. Однак ці методи потребують визначення елемента постійного струму, встановлення на нуль еталона квадратичної складової, щоб мати одиничний коефіцієнт потужності.

Крім прямого керування моментом привода змінного струму, відомі й інші методи керування випрямлячем, орієнтовані на пряме керування потужністю [15, 16]. У цьому випадку є можливість керувати активною та реактивною потужністю одночасно, вибираючи відповідний стан інвертора з певної таблиці перемикань. У кожен момент часу вибірки вектор напруги відповідного інвертора вибирають відповідно до різниці між активною та реактивною потужністю, опором і положенням вектора напруги. Однак для точного оцінювання потужності потрібен малий період вибірки, а для високої частоти дискретизації потрібні швидкі мікропроцесори і аналого-цифрові перетворювачі.

– визначення недоліків режиму роботи тиристорних випрямлячів у статичних перетворювачах електровозів однофазно змінного струму;

– подання адаптивної системи різнофазного керування випрямно-інверторного перетворювача з застосуванням діодного плеча, ввімкненого паралельно колу випрямленого струму;

– моделювання різних режимів керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза та визначення найбільш прийняттого.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є покращення електромагнітної сумісності системи «електровоз – контактна мережа» за рахунок реалізації адаптивної системи різнофазного керування випрямно-інверторного перетворювача, що дасть змогу поліпшити умови роботи електровоза, його електронного обладнання та електроустаткування за якістю напруги в контактній мережі. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

– аналіз впливу якості електричної енергії на надійність і ресурс роботи залізничних пристроїв та інших об’єктів;

Викладення основного матеріалу

Вплив якості електричної енергії на надійність і ресурс роботи залізничних пристроїв та інших об’єктів. Спотворення синусоїдальної форми напруги в контактній мережі впливає як на експлуатаційні характеристики електровозів, так і систему тягового електропостачання [17, 18]. Так, вищі гармоніки напруги, генеровані електровозами, викликають додаткові втрати в обмотках допоміжних машин електровозів, що знижує їхній експлуатаційний ресурс. На рис. 1 наведено основні пристрої, схильні до негативного впливу тягової мережі змінного струму.

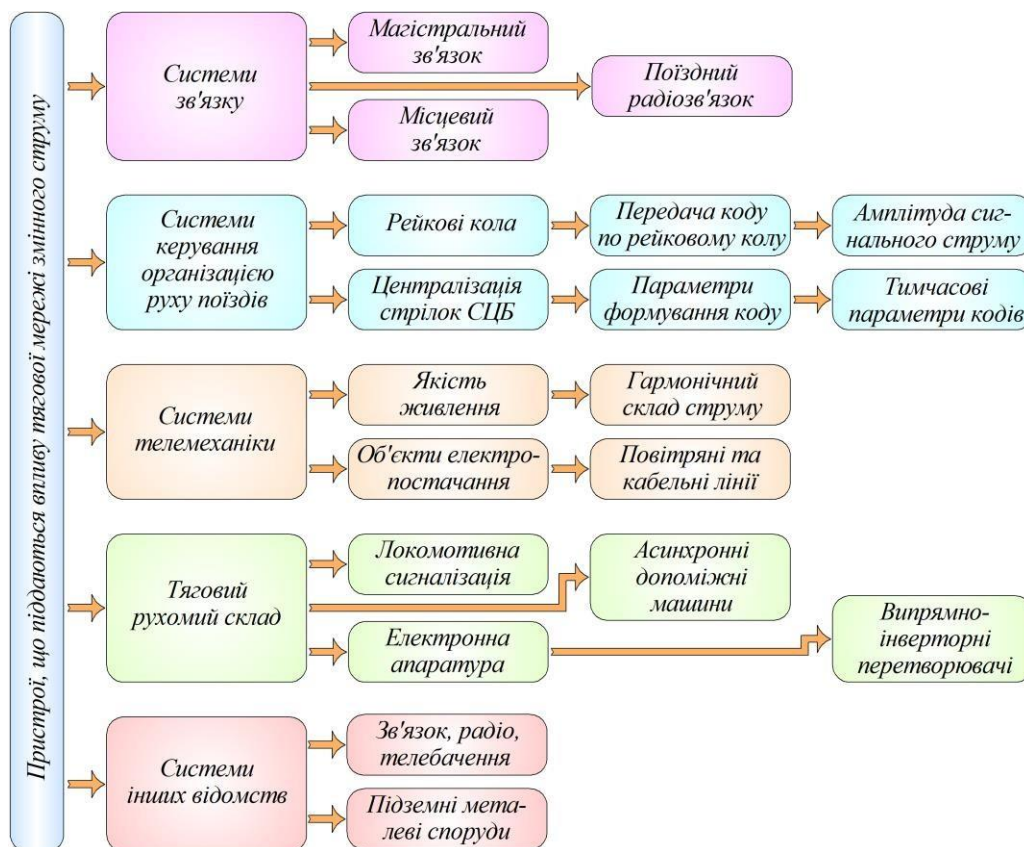


Рис. 1. Вплив якості електричної енергії на надійність і ресурс роботи залізничних пристроїв та інших об’єктів

У силовому трансформаторі гармоніки напруги викликають збільшення втрат на гістерезис, тобто втрат, пов'язаних із вихровими струмами в сталі і втрат в обмотках, а також підвищують витрати електроенергії на тягу поїздів [19, 20].

Вплив несинусоїдності напруги на індукційні та електронні прилади обліку електроенергії, споживаної електровозом, призводить до збільшення похибки результатів вимірювання цих приладів [21, 22]. Гармоніки порушують надійність роботи пристроїв захисту і погіршують їхні експлуатаційні характеристики. У цьому найпоширенішими є помилкові спрацьовування, найімовірніші в роботі систем захисту, заснованих на вимірюванні опорів.

Низька якість електроенергії призводить до скорочення терміну служби ізоляції електричних машин і апаратів, низької надійності роботи пристроїв сигналізації, централізації і блокування, автоматичної локомотивної сигналізації, збоїв у роботі систем керування перетворювачами електровоза, релейного захисту, автоматики, телемеханіки, зв'язку та обчислювальної техніки [23, 24].

Збитки від відмов технічних засобів з невиконання вимог електромагнітної сумісності є досить суттєвими через мережу залізниць. Це визначає актуальність та економічну значущість цієї проблеми.

Режим роботи тиристорних випрямлячів у статичних перетворювачах електровозів. Завдяки застосуванню тиристорних випрямлячів у статичних перетворювачах електровозів однофазного змінного струму є можливість здійснювати керування колекторними тяговими електродвигунами за рахунок плавного регулювання на них напруги [25, 26]. Це відбувається зміною моментів відключення відповідних плечей випрямно-інверторного перетворювача електровоза в межах періоду напруги живлення (рис. 2). Однак експлуатація таких електровозів разом із перевагами силових схем тиристорних перетворювачів виявила і ряд їхніх недоліків порівняно з електровозами, обладнаними напівпровідниковими неоднорідними діодами.

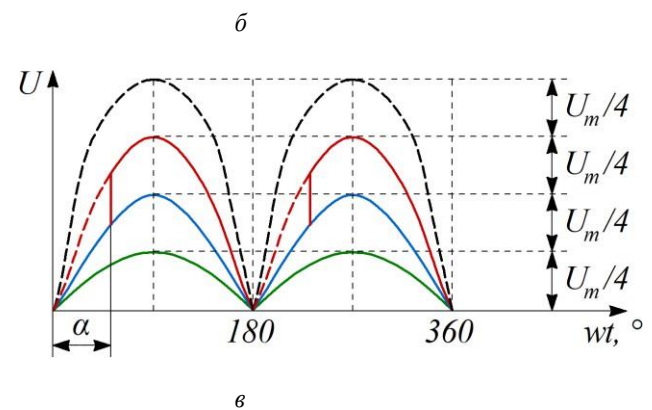
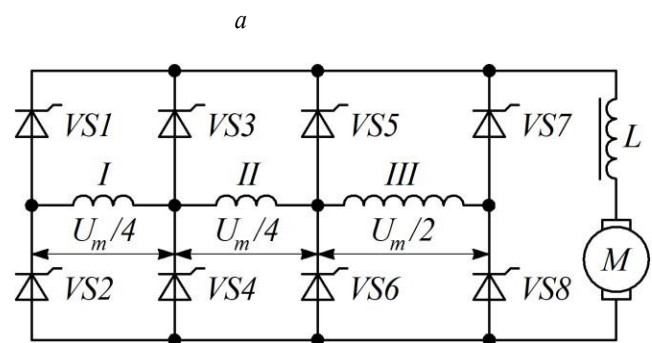
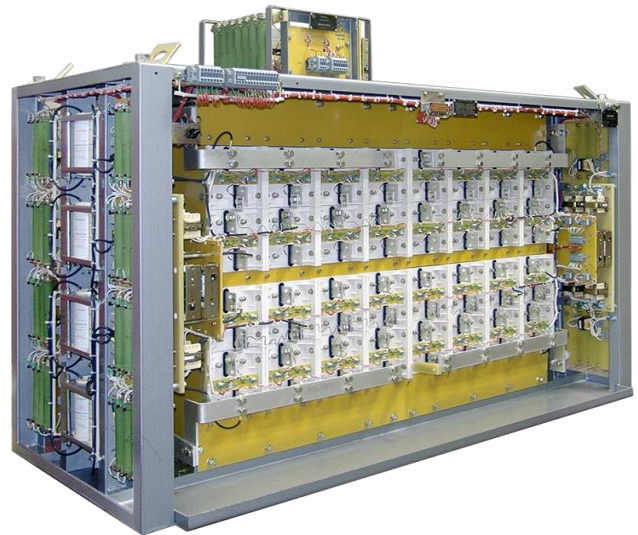


Рис. 2. Випрямно-інверторний перетворювач:

а – зовнішній вигляд; б – схема електрична принципова; в – діаграми напруги в зоні регулювання

Відповідно до штатного режиму роботи системи керування на сучасних електровозах змінного струму комутація в усіх випрямних інверторних перетворювачах відбувається одночасно [27, 28]. У момент початку комутації частина обмоток тягового трансформатора кожної секції електровоза починає працювати як коротко замкнена. Одночасний початок комутації всіх перетворювачів зумовлює різке зменшення напруги на струмоприймачі. Проте миттєвого зменшення напруги нема, оскільки внаслідок наявності в тяговій мережі розподілених

індуктивностей і ємностей виникають вільні коливання напруги. Будь-яка контактна мережа являє собою замкнений коливальний контур (RLC -коло) (рис. 3).

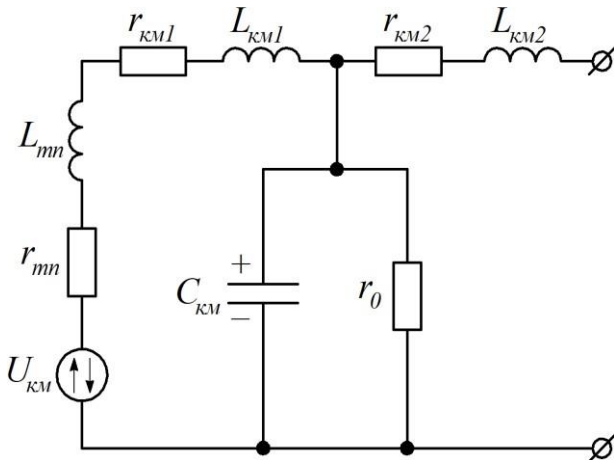


Рис. 3. Схема заміщення тягової підстанції та контактної мережі з її розподіленими параметрами

Наведена схема складається з касадно з'єднаних Т-подібних симетричних чотириполюсників, які у свою чергу моделюють погонні параметри системи (індуктивність контактної мережі, активний опір, розподілену ємність відносно землі та опір, обумовлений струмом витoku з проводів лінії та ізоляторів). Фізична сутність спотворення синусоїдальності змінної напруги полягає у виникненні режиму короткого замикання кола змінного струму (обмоток трансформатора) в інтервали комутації струмів тиристорів випрямляча, у результаті чого в цих інтервалах відбувається провал у кривій синусоїдальної напруги (рис. 4).

Рис. 4. Електромагнітні процеси напруги в контактній мережі (1) і випрямленої напруги тягового двигуна (2) при роботі електровоза в режимі тяги з базовим способом керування

Ці провали спотворюють форму кривої напруги і призводять до виникнення вищих гармонічних складових, найбільшими з яких є непарні 3, 5, 7, 9, 11, 13 і т. п. гармоніки, що впливають на надійність роботи технічних засобів.

У процесі протікання комутацій електромагнітна енергія, накопичена в індуктивності обмоток трансформатора, передається в контактну мережу. У результаті відбувається коливальний процес між індуктивністю задіяних у великому та малому контурах комутації секцій трансформатора електровоза та розподіленою ємністю контактної мережі. Частота комутаційних і післякомутаційних коливань напруги та їхня амплітуда залежать в основному від відстані між тяговими підстанціями та способу живлення міжпідстанційної зони (одностороння або двостороння) [29, 30].

Модельовання роботи тиристорних випрямлячів у статичних перетворювачах електровозів. Роботу електровоза в типовому та запропонованому режимі було змодельовано за допомогою програмного забезпечення OrCad. Модель електровоза є наближеною схемою до реальних умов. Під час роботи схеми електровоза в реальному і модельованому варіантах похибка склала 8 %. Отже, отримані результати обчислень під час роботи моделі можна вважати достовірними. Аналізуючи в такий спосіб роботу електровоза на четвертій зоні регулювання, особливо за несприятливих умов (робота електровоза у змушених режимах системи електропостачання), було отримано діаграму напруги в контактній мережі (рис. 5).

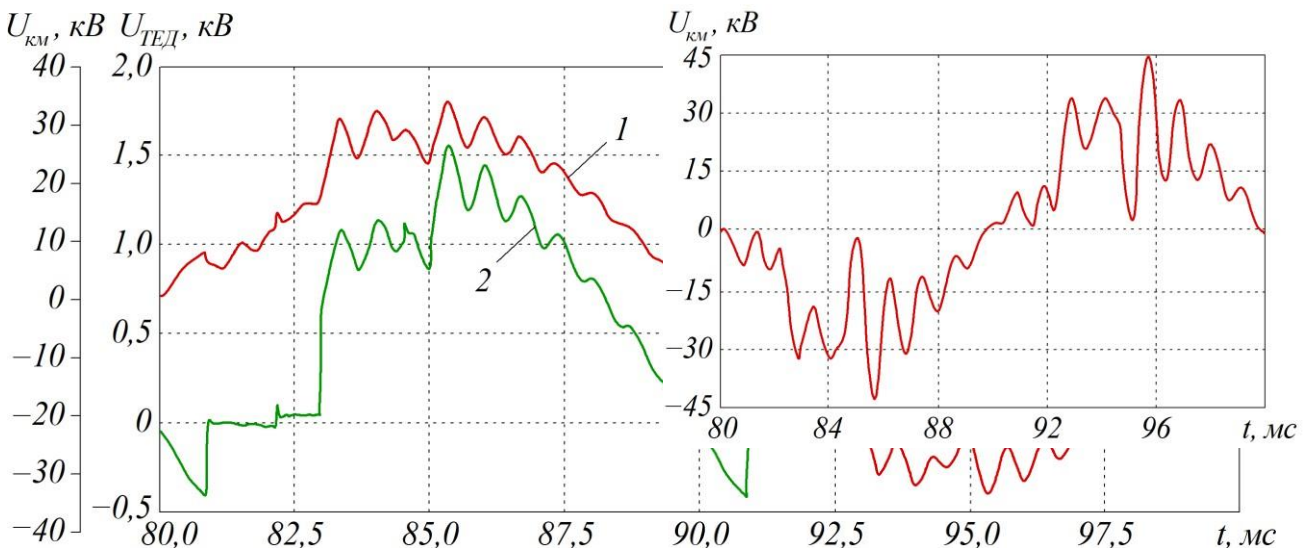


Рис. 5. Діаграма напруги в контактній мережі за годинного режиму роботи тягового електричного двигуна ($\alpha_p = 90^\circ$) у зоні регулювання напруги випрямно-інверторного перетворювача.

Одним із засобів підвищення надійності електрообладнання в експлуатації і зменшення амплітуди, комутаційних і післякомутаційних коливань запропоновано такий спосіб керування випрямно-інверторного перетворювача, що використовує метод одночасної комутації струмів тиристорів із застосуванням діодного плеча, ввімкненого паралельно колу випрямленого струму.

Цей метод керування полягає в тому, що подавання нерегульованих імпульсів керування з фазою 0 здійснюється одночасно в кожному

напівперіоді напруги не тільки на тиристорні плечей, що беруть участь у створенні такої зони, а й плечей, які брали участь у роботі попередніх зон, крім першої. Це розбиває великий контур протікання струму комутації, утворений плечима VS1 та VS7 (рис. 2), на кілька малих. Діодне плече, ввімкнене паралельно колу випрямленого струму, призначено для розряду енергії, накопиченої в тягових двигунах і згладжувальних реакторах при зміні полярності напруги без віддавання її в зовнішню мережу. Воно також є засобом, що сприяє створенню нормальних потенційних умов на анодах тиристорів, необхідних для надійної роботи плечей випрямно-інверторного перетворювача електровоза в експлуатації за малих кутів α_0 (рис. 6).

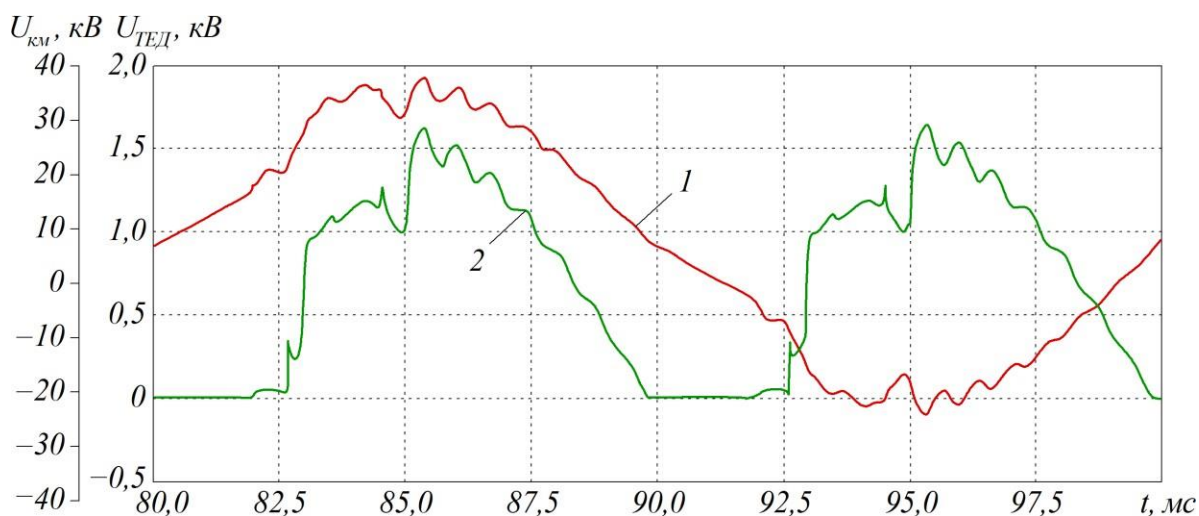


Рис. 6. Електромагнітні процеси напруги в контактній мережі (1) і випрямленої напруги тягового двигуна електровоза (2) за способу керування з ввімкненням розрядного діода

Як порівняння, на рис. 7 показано гармонічні склади напруги на струмоприймачі електровоза для запропонованого методу керування випрямно-інверторного перетворювача з 2 по 40 гармоніку.

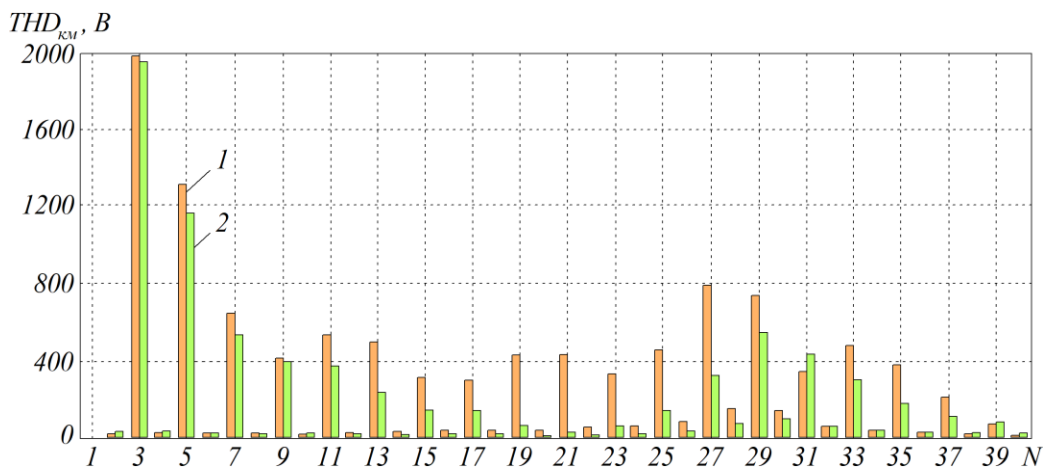


Рис. 7. Гармонічні складові напруги на струмоприймачі електровоза для методів керування випрямно-інверторного перетворювача з 2 по 40 гармоніку:

1 – почергова комутація; 2 – одночасна комутація з діодним плечем

З гістограми видно зниження амплітуд непарних гармонік у всьому діапазоні розглянутих частот, що визначено зниженням комутаційних і післякомутаційних коливань напруги. Особливо ефективним є зниження гармонік у діапазоні з 9 по 25.

Однак, використовуючи цей метод керування, завдання поліпшення якості напруги в контактній мережі вдалося вирішити тільки при протіканні основної комутації струму тиристорів плечей випрямно-інверторного перетворювача. За фазного регулювання на кожній зоні (додаткової комутації при керуванні імпульсами) вільні коливання залишилися без зміни і можуть в амплітуді досягати напруги мережі живлення, особливо за $\alpha_p = 90^\circ$. Через цей недолік постає завдання додаткового поліпшення форми кривої напруги контактної мережі при роботі електроозів із тиристорними перетворювачами за фазного регулювання напруги в усіх чотирьох зонах керування. На тягових електричних двигунах цього можна досягти за рахунок застосування різнофазного керування випрямно-інверторного перетворювача.

Спосіб різнофазного керування полягає в рознесенні в часі початку, а також закінчення комутації, що дає змогу зменшити стрибок змущеної напруги при вмиканні та вимиканні кожної групи перетворювачів і амплітуду вільних коливань напруги на струмоприймачі, що підвищує стійкість роботи апаратури керування електрооза і всіх систем залізничної автоматики і телемеханіки, зменшує завади в лініях зв'язку. Але на практиці спосіб різнофазного керування не отримав широкого застосування, оскільки різнофазності керування досягають постійним збільшенням кута відкриття тиристорів перетворювача α_0 і α_p на 89° , а це у свою чергу значно позначається на зниженні зовнішніх характеристик перетворювача і зниженні коефіцієнта потужності електрооза від 0,84 до 0,817.

Потужність електрооза в годинному і тривалому режимі дещо нижча, ніж за типового способу керування, відбувається і деяке зниження швидкості електрооза. До того ж сталість зсуву кута на 89° не дає повного ефекту зниження високочастотних коливань напруги контактної мережі через зміни індуктивності та ємності тягової мережі, що може призводити до періодичного порушення працездатності електрооза. В ідеальному випадку величина затримки імпульсів має дорівнювати напівперіоду власних коливань напруги в тяговій мережі. Внаслідок відмінності параметрів тягової мережі та змінного віддалення електрооза від шин

тягових підстанцій частота вільних коливань напруги на струмоприймачі електрооза змінюється. У зв'язку з цим відбувається лише часткове гасіння вільних коливань напруги.

Отже, для найбільш ефективного зменшення спотворень у формі кривої напруги живлення бажано введення регульованої затримки саме на напівперіод вільного коливання з урахуванням змінних розподілених параметрів контактної мережі. У зв'язку з цим пропонується використовувати одночасну комутацію з шунтуванням кола випрямленого струму електрооза розрядним діодним плечем із розробленням адаптивної системи різнофазного керування за кутом; проводити затримку керування плечима перетворювача, що дорівнює напівперіоду власних коливань напруги тягової мережі. Це дасть змогу підвищити коефіцієнт потужності електрооза з 0,84 до 0,88.

Власні коливання напруги тягової мережі визначають через спектральний аналіз, який дає змогу охарактеризувати вимірюваний частотний склад сигналу. Перетворення Фур'є є математичною основою, що зв'язує тимчасовий сигнал із його поданням у частотній ділянці. Перетворення Фур'є безперервного в часі сигналу ідентифікують частоти і амплітуди тих комплексних синусоїд (експонент), на які розкладено деякі довільні коливання та що визначають за виразом

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \exp(-j2\pi \cdot f \cdot t) dt \equiv F[x(t)]. \quad (1)$$

Спектральний аналіз напруги контактної мережі передбачено проводити з урахуванням контролерів DSP (digital signal processor), які забезпечують швидке перетворення Фур'є. Напряга контактної мережі через датчик напруги типу LV 100 надходить на вхід блока узгодження датчика напруги з DSP. Останній за заданим методом здійснює спектральний аналіз гармонічних коливань мережі живлення, виділяє гармоніку з найбільшою амплітудою і розраховує зміни кута запізнювання вмикання плечей випрямно-інверторного перетворювача імпульсами з фазою p . За сигналами блока керування випрямно-інверторного перетворювача відбувається чергування та розподілення імпульсів керування з перетворювачів і їхніх плечей.

Структурну схему реалізації різнофазного керування плечей випрямно-інверторного перетворювача наведено на рис. 8.

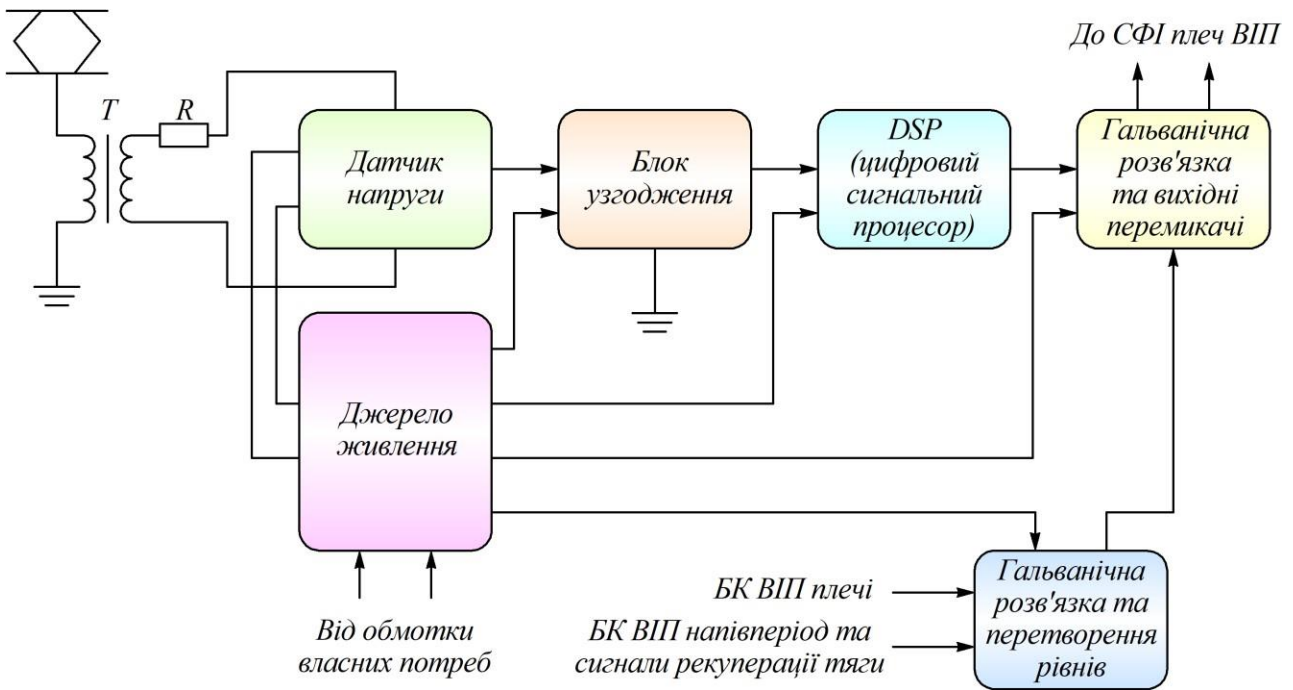


Рис. 8. Структурна схема реалізації різнофазного керування плечей випрямно-інверторного перетворювача

Запропонована адаптивна система різнофазного керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза дасть змогу, незалежно від місця розташування електровоза на фідерній зоні (зміни параметрів контактної мережі), максимально виконувати функцію значного зниження гармонік, що відповідають частотам цих коливань, і знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, тобто електричної енергії в контактній

мережі. Для того щоб зовнішня характеристика випрямно-інверторного перетворювача в секціях електровоза була однаковою, запропоновано чергувати відхилення кута для кожної секції, що регулюється, у різні напівперіоди. Діаграми напруги на тягових електричних двигунах і в контактній мережі за запропонованих методів роботи випрямно-інверторного перетворювача наведено на рис. 9 і 10.

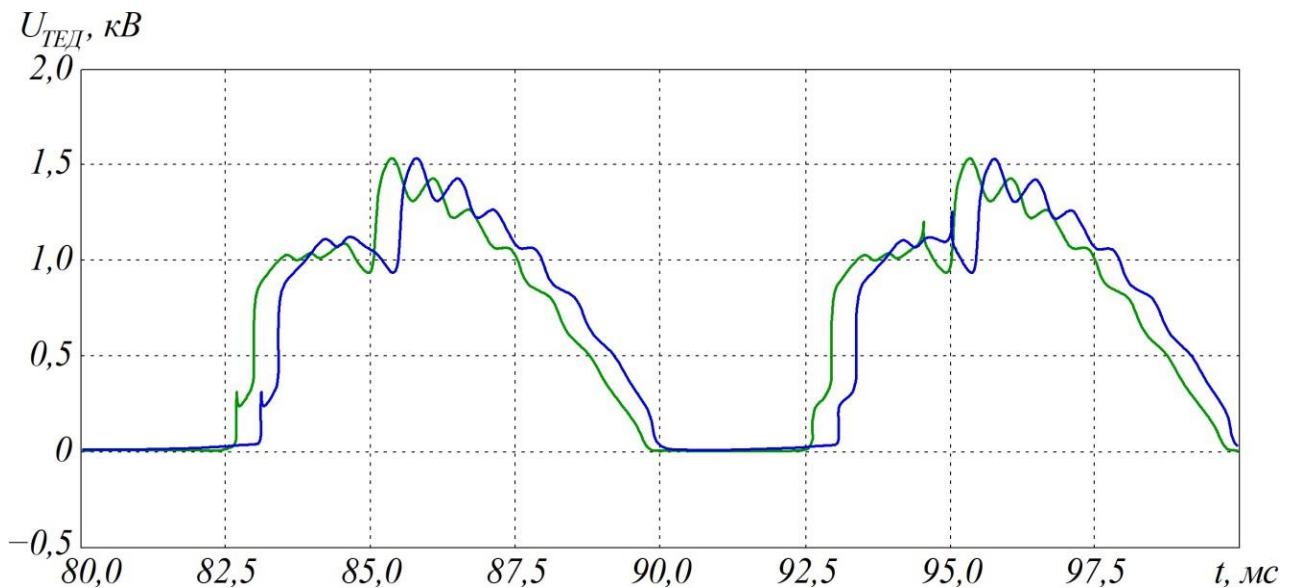


Рис. 9. Діаграма напруги на тягових електричних двигунах різних секцій за запропонованих методів роботи випрямно-інверторного перетворювача



Рис. 10. Діаграма напруги в контактній мережі за запропонованих методів роботи випрямно-інверторного перетворювача

За використанні цих методів керування можна очікувати значного зниження коливань і спотворень напруги в контактній мережі.

Для різних методів керування проведено розрахунок зовнішньої характеристики перетворювача.

1. Типовий метод регулювання напруги передбачає, що

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(-U_{m4} \cdot \int_0^{\alpha_0} \sin \varphi \cdot d\varphi + U_{m3} \cdot \int_{\alpha_3+\gamma_1}^{\alpha_p+\gamma_p} \sin \varphi \cdot d\varphi + U_{m4} \cdot \int_{\alpha_p+\gamma_p}^{\pi} \sin \varphi \cdot d\varphi \right), \quad (2)$$

де U_{m3} і U_{m4} – амплітуда напруги, прикладеної з боку вторинної обмотки тягового трансформатора на 3 і 4 зонах регулювання;

α_0 , α_3 , α_p – значення нульового, затриманого та регульованого імпульсу керування;

γ_1 , γ_p – тривалість комутації при подаванні затриманого та регульованого імпульсів.

У номінальному режимі існують втрати, виражені падінням напруги в силовому колі (ΔU), тому

$$U_{d\kappa} = U_{d0} - \Delta U = -\lambda \cdot \frac{2}{\pi} \cdot X_m \cdot I_{d\kappa} - (\xi \cdot R_m + R_d) \cdot I_{d\kappa} - \Delta U_{\xi}, \quad (3)$$

де λ – коефіцієнт, що враховує вплив пульсацій;

ξ – відношення амплітудного значення напруги на вторинній обмотці тягового трансформатора до значення цієї напруги наступної зони;

X_m , R_m – індуктивний та активний опори трансформатора;

ΔU_{ξ} – падіння напруги в перетворювальній установці;

R_d – активний опір обмоток двигуна.

2. Метод перетворювальної установки з різнофазним керуванням по секціях передбачає, що

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(-U_{m4} \cdot \int_0^{\alpha_0+\alpha_{p\text{ФК}}} \sin \varphi \cdot d\varphi + U_{m3} \cdot \int_{\alpha_3+\alpha_{p\text{ФК}}+\gamma_p}^{\alpha_p+\alpha_{p\text{ФК}}+\gamma_p} \sin \varphi \cdot d\varphi + U_{m4} \cdot \int_{\alpha_p+\alpha_{p\text{ФК}}+\gamma_p}^{\pi} \sin \varphi \cdot d\varphi \right), \quad (4)$$

де $\alpha_{0\text{РФК}}$, $\alpha_{3\text{РФК}}$, $\alpha_{p\text{РФК}}$ – кути зсуву для нульового, затриманого та регульованого імпульсів.

3. Метод перетворювальної установки з ввімкненням у коло випрямленого струму розрядного діода передбачає, що

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(U_{m3} \cdot \int_{\gamma}^{\alpha_p+\gamma_p} \sin \varphi \cdot d\varphi + U_{m4} \cdot \int_{\alpha_p+\gamma_p}^{\pi} \sin \varphi \cdot d\varphi \right), \quad (5)$$

де γ – кут, що характеризує зсув подавання вимикального імпульсу.

4. Метод із різнофазним керуванням по секціях, а також з ввімкненням у коло випрямленого струму розрядного діода передбачає, що

$$U_{d0} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(U_{m3} \cdot \int_{\gamma}^{\alpha_p+\alpha_{p\text{ФК}}+\gamma_p} \sin \varphi \cdot d\varphi + U_{m4} \cdot \int_{\alpha_p+\alpha_{p\text{ФК}}+\gamma_p}^{\pi} \sin \varphi \cdot d\varphi \right), \quad (6)$$

Напругу в номінальному режимі для трьох останніх методів розраховують аналогічно, як для першого методу за виразом (3). На рис. 11 наведено порівняльну зовнішню характеристику перетворювача для типового і трьох запропонованих методів керування.

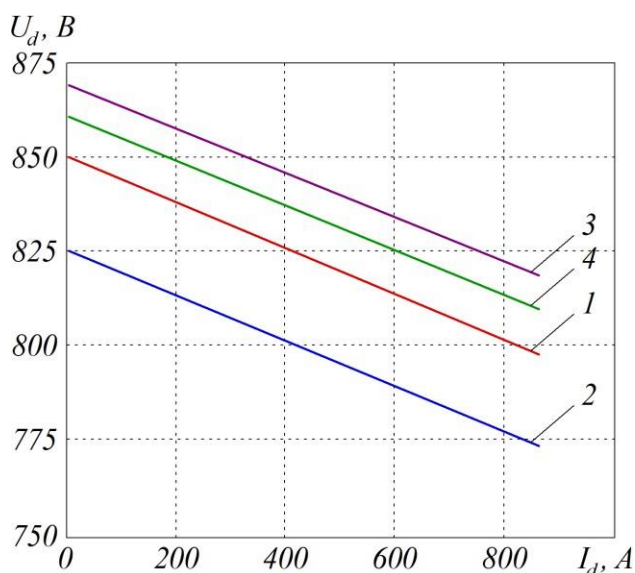


Рис. 11. Порівняльна зовнішня характеристика перетворювача за різних режимів керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза:

1 – типовий метод роботи 1; 2 – запропонований метод 2;

3 – запропонований метод 3; 4 – запропонований метод 4

За роботи електровоза запропонований метод 2 керування є найбільш прийнятним, оскільки в цьому випадку, незважаючи на зниження зовнішньої характеристики, значно покращені умови роботи електровоза за якістю напруги в контактній мережі, його електронного обладнання та електроустаткування, іншого обладнання, що знаходиться в безпосередній близькості до рейкової колії.

Отже, використання запропонованих методів керування разом із адаптивною системою дасть змогу значно поліпшити характеристики напруги в контактній мережі і, як наслідок, знизити негативний вплив на роботу електровоза. Підвищення якості електроенергії дасть змогу продовжити термін служби ізоляції електричних машин та апаратів, надійність роботи пристроїв сигналізації, централізації і блокування, автоматичної локомотивної сигналізації, систем керування перетворювачами електровоза, релейного захисту, автоматики, телемеханіки, зв'язку та обчислювальної техніки.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання

На підставі проведених досліджень можна

зробити такі висновки:

– визначено, що спотворення синусоїдальної форми напруги в контактній мережі негативно впливає як на експлуатаційні характеристики електровозів, так і систему тягового електропостачання, що відповідно знижує їхній експлуатаційний ресурс;

– відповідно до штатного режиму роботи системи керування на сучасних електровозах змінного струму комутація у всіх випрямних інверторних перетворювачах відбувається одночасно, у результаті чого в інтервалах комутації відбуваються провали, що спотворюють форму кривої напруги і призводять до виникнення вищих гармонічних складових;

– подано адаптивну систему різнофазного керування випрямно-інверторного перетворювача електровоза, що дає змогу, незалежно від місця розташування на фідерній зоні, максимально виконувати функцію значного зниження гармонік, що відповідають частотам цих коливань, і знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, тобто електричної енергії в контактній мережі. Для того щоб зовнішня характеристика випрямно-інверторного перетворювача в секціях електровоза була однаковою, запропоновано чергувати відхилення кута для кожної регульованої секції в різні напівперіоди;

– запропонований метод перетворювальної установки з різнофазним керуванням по секціях є найбільш прийнятним, оскільки дає змогу зменшити стрибок змущеної напруги при вмиканні та вимиканні кожної групи перетворювачів та амплітуду вільних коливань напруги на струмоприймачі, що підвищує стійкість роботи апаратури керування електровоза, а також усіх систем залізничної автоматики і телемеханіки, зменшує завади в лініях зв'язку.

Список використаних джерел

1. Efanov D. V., Khoroshev V. V. Improving the monitoring systems algorithmic support for railway automation equipment's based on dynamic questionnaires. *2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. 2020. P. 1–10. DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224693.
2. Su S. J., Seung Kwon B. Reliability enhancement scheme for wireless backhaul in high speed train. *2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. 2020. P. 894–897. DOI: 10.1109/ICTC49870.2020.9289523.
3. Serdiuk T., Ansari H. T., Rodica B. Electromagnetic influence of AC traction network on the railway communication lines. *2022 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*.

2022. P. 326–329. DOI: 10.1109/EMCSI39492.2022.9889435.
4. Nicolae P.-M., Nicolae I.-D., Nuca I., Nicolae M.-S. Determination of electromagnetic noise from a power supply substation of railway traction systems. *2022 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*. 2022. P. 619–624. DOI: 10.1109/EMCSI39492.2022.9889567.
 5. Wang D., Wu F., Yang B., Wang K., Li H., Wei H. Development of environmentally friendly and efficient new energy rail locomotives for industrial and mining enterprises. *2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. 2022. P. 2402–2408. DOI: 10.1109/EI256261.2022.10117300.
 6. Sarma U., Ganguly S., Adda R. Design and control of multi-input single-output DC/DC boost converter for the application of PEM fuel cell-battery-hybrid energy system in locomotives. *2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM48719.2022.9917089.
 7. Crotti G., D’Avanzo G., Landi C., Letizia P. S., Luiso M. Evaluation of voltage transformers’ accuracy in harmonic and interharmonic measurement. *IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement*. 2022. Vol. 1. P. 1–10. DOI: 10.1109/OJIM.2022.3198473.
 8. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я. *Тези доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції, ч. I (01–03 червня 2011 р., Харків) / за ред. Л. Л. Товажнянського*. Харків: НТУ «ХП», 2011. 280 с.
 9. Kobenkins G., Marinbans M., Bizans A., Rilevs N., Sliskis O. Determination of the level of vibroactivity of the traction motor-gear units. *2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/ELMA58392.2023.10202391.
 10. Hu H., Liu Y., Li Y., He Z., Gao S., Xiaojuan Z., Tao H. Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*. 2023. Vol. 32. P. 1–19. DOI: 10.1007/s40534-023-00320-6.
 11. Zhang J., Liu J., Yang J., Zhao N., Wang Y., Zheng T. A modified DC power electronic transformer based on series connection of full-bridge converters. *IEEE Trans. Power Electron.* 2019. Vol. 34, No. 3. P. 2119–2133.
 12. Purgat P., Bandyopadhyay S., Qin Z., Bauer P. Power flow decoupling controller for triple active bridge based on fourier decomposition of transformer currents. *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2020. P. 1201–1208. DOI: 10.1109/APEC39645.2020.9124006.
 13. Soyed A., Kadri A., Hassnaoui O., Bacha F. Voltage oriented control of indirect matrix converter applied to wind energy conversion system using PMSM generator. *2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. 2020. P. 790–795. DOI: 10.1109/CoDIT49905.2020.9263781.
 14. Rajendran G., Vaithilingam C., Misron N., Naidu K., Ahmed M. Voltage oriented controller based vienna rectifier for electric vehicle charging stations. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 50798–50809. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3068653.
 15. Jamil Asghar M. S. Discontinuous phase controlled (DPC) converters for charging of batteries of electrical vehicles. *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. 2020. P. 665–670. DOI: 10.1109/GUCON48875.2020.9231082.
 16. Jamil Asghar M. S. Digital control of thyristor switched reactors using discontinuous phase controlled switching. *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*. 2020. P. 394–398. DOI: 10.1109/GUCON48875.2020.9231064.
 17. Graber G., Calderaro V., Galdi V., Ippolito L., Massa G. Impact assessment of energy storage systems supporting DC railways on AC power grids. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 10783–10798. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3145239.
 18. Nerubatskyi V. P., Hordiienko D. A. Conceptual model of a micronetwork with distributed energy resources. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2023. Вип. 66. С. 16–20. DOI: 10.15407/publishing2023.66.016.
 19. Chen H., Huang Y., Hu H., Wang J., Wang W. Analysis of the influence of voltage harmonics on the maximum load capacity of the power supply transformer for the LHCD system. *2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. 2023. P. 2070–2075. DOI: 10.1109/CIEEC58067.2023.10166533.
 20. Дослідження точності моделювання втрат потужності в силових діодах і транзисторах / В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій, Д. А. Гордієнко та ін. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. Вип. 203. С. 73–87. DOI: 10.18664/1994-7852.203.2023.277905.

21. Fan R., Zhang M., Wang J., Chang X., Gao L., Song J., Zhang S., Xu Y. Overview of power factor calculation method for nonsinusoidal and unbalanced systems. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2023. Vol. 18. P. 1763–1771. DOI: 10.1002/tee.23909.
22. Khomenko I. V., Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Shelest D. A. Research and calculation of the levels of higher harmonics of rotary electric machines in active-adaptive networks. *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1254. 012040. P. 1–15. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012040.
23. Salles R. S., Ronnberg S. K. Review of waveform distortion interactions assessment in railway power systems. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 5411. DOI: 10.3390/en16145411.
24. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 1. P. 87–91. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.276028.
25. Chakraborty S., Maiti S. Control of a waveshaper-MMC with thyristor-based front-end converter for open-end winding variable speed medium-voltage induction motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2022. Vol. 58, No. 5. P. 6203–6216. DOI: 10.1109/TIA.2022.3180041.
26. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Study of the influence of sliding mode regulator on spectrum higher harmonics of the SEPIC converter. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402454.
27. Xiu F., Liu S., Xu S. Design of control system of three-level T-type bidirectional converter. *2022 2nd International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT)*. 2022. P. 185–192. DOI: 10.1109/ICEEMT56362.2022.9862767.
28. Zhu K., Deng F., Chen S., Hou J., Abulanwar S., Ufa R. An AC-side start-up scheme for thyristor-based modular multilevel converters. *2022 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*. 2022. P. 1426–1431. DOI: 10.1109/PEAC56338.2022.9959105.
29. Nnoli K. P., Delic F., Kettemann S. Transient dynamics and propagation of voltage and frequency fluctuations in transmission grids. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 11307–11328. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3241014.
30. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A. Study of the energy parameters of the system «solar panels – solar inverter – electric network». *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1254. 012092. P. 1–12. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012092.
- Nerubatskyi V., Plakhtii O., Ivakhno V., Hordiienko D., Shelest D. Analysis of control methods of the rectifier-inverter converter of an electric locomotive. The article presents a study of the characteristics of electromagnetic compatibility in the «electric locomotive – contact network» system. An analysis of the influence of the quality of electrical energy on the reliability and service life of railway devices and other objects was carried out. It was determined that the distortion of the sinusoidal form of voltage in the contact network negatively affects both the operational characteristics of electric locomotives and the traction power supply system, which, accordingly, reduces their operational resource. The shortcomings of the operation mode of thyristor rectifiers in static converters of single-phase alternating current electric locomotives have been determined. According to the standard mode of operation of the control system on modern alternating current electric locomotives, commutation in all rectifying inverter converters occurs simultaneously, as a result of which dips occur in the commutation intervals, which distort the shape of the voltage curve and lead to the appearance of higher harmonic components. An adaptive multi-phase control system of the rectifier-inverter converter using a diode arm connected in parallel to the rectified current circuit is presented, which allows, regardless of the location on the feeder zone, to maximally perform the function of significantly reducing the harmonics corresponding to the frequencies of these oscillations and to reduce the distortion factor of the sinusoidality of the voltage curve, i.e. electrical energy in the catenary network. Simulation of different control modes of the rectifier-inverter converter of the electric locomotive was carried out. The proposed algorithm of the converter installation with multi-phase control by sections is the most acceptable, as it allows to reduce the forced voltage jump when turning on and off each group of converters and the amplitude of free fluctuations of the voltage on the pantograph, which increases the stability of the operation of the electric locomotive control equipment, as well as all systems of railway automation and telemechanics, reduces interference in communication lines.**
- Key words:** rectifier-inverter converter, electric rolling stock, electromagnetic compatibility, power factor, control system, traction electric motor.
- Нерубацький Володимир Павлович, кандидат*

технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

E-mail: NVP9@i.ua.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>.

Плахтій Олександр Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна.

E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1535-8991>.

Івахно Володимир Вікторович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри промислової і біомедичної електроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна.

E-mail: v-ivakhno@ukr.net.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2122-6151>.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: D.Hordiienko@i.ua.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>.

Шелест Дмитро Андрійович, аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна. E-mail: shelllogist@gmail.com.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6095-658X>.

Nerubatskyi Volodymyr, PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: NVP9@i.ua.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4309-601X>.

Plakhtii Olexandr, PhD, Associate Professor of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1535-8991>.

Ivakhno Volodymyr, Doctor of Science, Associate Professor, Professor of Department of Industrial and Biomedical Electronics, National Technical University

«Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine. E-mail: v-ivakhno@ukr.net.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2122-6151>.

Hordiienko Denys, postgraduate of Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: D.Hordiienko@i.ua.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0347-5656>.

Shelest Dmytro, postgraduate of Department of Electricity Transmission, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine. E-mail: shelllogist@gmail.com.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6095-658X>.