

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

ХОЛОД ОЛЬГА ІГОРІВНА



УДК 621.314

**ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ  
ДЛЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТРАНСПОРТУ**

Спеціальність 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

Харків – 2013

Дисертація є рукописом

Робота виконана на кафедрі промислової і біомедичної електроніки  
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»  
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Харків

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Жемеров Георгій Георгійович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри  
промислової і біомедичної електроніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Щербак Яків Васильович**,  
Українська державна академія  
залізничного транспорту,  
завідувач кафедри  
автоматизованих систем  
електричного транспорту

кандидат технічних наук  
**Божко Володимир Вячеславович**,  
Харківська філія Державного підприємства  
«Державний науково-дослідний центр  
залізничного транспорту України»,  
начальник філії

Захист відбудеться «14» березня 2013 р. о 16<sup>45</sup> годині на засіданні  
спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 в Національному технічному  
університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою:  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного  
університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою:  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

Автореферат розісланий «4» лютого 2013 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Осичев О.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Системи електропостачання (СЕ) залізничного і міського транспорту, які проектувалися і створювалися кілька десятиліть тому, мають потребу удосконалення елементної бази для покращення електромагнітної сумісності (ЕМС) з промисловою мережею живлення і зменшення втрат електроенергії. Удосконалення СЕ пов'язане з вирішенням наступних питань:

- Нерівномірність навантаження фаз трифазної мережі живлення. Часткове вирівнювання навантаження фаз здійснюється шляхом чергування в контактній мережі ділянок, підключених до фаз *A* та *B*, та поділу цих ділянок нейтральними вставками.

- Застосування перетворювачів на одноопераційні тиристорах і діодах, мережеві струми яких містять широкий спектр гармонік. У системах електропостачання застосовують різні пасивні системи фільтрації вищих гармонік і компенсації реактивної потужності, але ці заходи недостатньо ефективні.

- Використання колекторних двигунів постійного струму з резистивним гальмуванням в рухомому складі залізниці та метрополітену.

В останні десятиліття розроблені і освоєні у виробництві енергозберігаючі напівпровідникові перетворювачі – активні випрямлячі (АВ), силові активні фільтри (САФ), багаторівневі інвертори, а також потужні накопичувачі енергії (НЕ), виконані на базі сучасних суперконденсаторів. Застосування енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів і накопичувачів енергії в системах електропостачання транспорту дозволяє істотно поліпшити електромагнітну сумісність таких систем з мережею живлення і зменшити втрати енергії.

Таким чином, аналіз електромагнітних процесів, характеристик та ККД енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів з потужними накопичувачами енергії для систем електропостачання (СЕ) залізничного і міського транспорту є актуальною задачею, яка визначила напрямок дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами** Дисертаційна робота виконана на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХПІ» та пов'язана з протоколом про співробітництво з КП «Харківський метрополітен» (м. Харків). Результати дисертаційної роботи використовувались при виконанні держбюджетної теми МОНмолодьспорту України «Дослідження напівпровідникових перетворювачів для підвищення ефективності енергоспоживання та поліпшення якості електроенергії в розподіляючих мережах електропостачання» (ДР № 0109U002423).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення силових схем і систем керування енергозберігаючих напівпровідникових

перетворювачів з накопичувачами енергії для систем електропостачання залізниці та метрополітену, вдосконалення методів розрахунку та характеристик цих перетворювачів.

Для досягнення мети в дисертації поставлені наступні завдання:

– розробка методів визначення коефіцієнта корисної дії для п'яти типів систем електропостачання з перетворювачами і накопичувачами енергії для переходу від поняття коефіцієнта потужності СЕ до більш ємного і точного показника її ефективності – ККД;

– аналіз електромагнітних процесів в схемі активного випрямляча – джерела напруги (АВДН), дослідження характеристик АВ в режимах шестипульсного некерованого випрямляча (НВ) з ємнісним фільтром і в режимі підвищувального широтно-імпульсного перетворювача (ШП), оцінка впливу АВ на мережу живлення;

– аналіз роботи АВ з гістерезисною, – при змінній частоті модуляції, – і з векторною, – при постійній частоті модуляції, – системами керування, розробка методів розрахунку індуктивності вхідних реакторів АВ;

– розробка методу обліку динамічних втрат при комп'ютерному моделюванні перетворювачів із широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) з для визначення ККД перетворювальних систем і температури структури транзисторно-діодних модулів;

– розробка математичних моделей САФ та АВ зі стаціонарним або з бортовим потужними накопичувачами енергії для систем електропостачання залізниці та метрополітену.

*Об'єктом дослідження* є електромагнітні процеси та енергоефективність енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів з потужними накопичувачами енергії для систем електропостачання залізниці та метрополітену.

*Предметом дослідження* є схемотехнічні рішення, алгоритми управління, режими роботи і характеристики напівпровідникових перетворювачів з накопичувачами енергії, що забезпечують необхідну електромагнітну сумісність з мережею живлення та енергозбереження в СЕ залізниці і МП.

**Методи дослідження.** Всі основні теоретичні розробки дисертації базуються на фундаментальних положеннях теорії електричних кіл і сучасної теорії миттєвої потужності. При аналізі електромагнітних процесів в перетворювачах використовувалися чисельні методи рішення диференціальних та алгебраїчних рівнянь. Матричні перетворення координат використовувалися при побудові систем управління напівпровідниковими перетворювачами. Для моделювання електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах розроблені комп'ютерні математичні моделі в середовищі пакету MatLab R2008a.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

– запропоновано метод розрахунку максимально можливого і реального ККД п'яти систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами і накопичувачами енергії. Отримані розрахункові формули та таблиці дозволяють з досить високою точністю оцінювати максимально можливий і реальний ККД СЕ;

– при дослідженні електромагнітних процесів в потужному АВ в режимі некерowanego випрямляча з ємнісним фільтром отримані розрахункові формули та графічні залежності для визначення максимуму переривчастого струму НВ по відомій відносній випрямленій напрузі, рівняння зовнішньої характеристики НВ, з яких видно, що переривчастий струм складає 22–44% від середнього номінального струму НВ, кут комутації НВ досягає 30 ел.град. при відносній випрямленій напрузі 0,89;

– встановлено, що напруги і струми в силових колах активних випрямлячів-джерел напруги, що працюють в режимі підвищуючого перетворювача, необхідно розглядати як суму двох складових, що накладаються одна на одну: одна – з частотою напруги мережі й друга – з частотою модуляції так, що в інтервалі модуляції миттєві значення напруги, струму мережі і напруги на виході АВ залишаються незмінними. При цьому в активному випрямлячі амплітуда основної гармоніки на вході транзисторного моста тотожно дорівнює амплітуді фазної напруги мережі;

– визначено розрахункове співвідношення для визначення поточної частоти модуляції фазного струму АВ з якого випливає, що відношення максимальної частоти модуляції до мінімальної однозначно залежить від відношення вихідної напруги АВ до амплітуди лінійної напруги мережі – коефіцієнта  $k$ . Встановлено, що оптимальне значення коефіцієнта  $k$  у АВ лежить в діапазоні від 1,4 до 1,6;

– отримані співвідношення для розрахунку індуктивності вхідних реакторів активного випрямляча з гістерезисною і векторною системами керування, наближена розрахункова формула для визначення  $THD_U$  мережі в точці підключення АВ по  $THD_I$  мережі, споживаного АВ з мережі;

– розроблено метод обліку динамічних втрат в транзисторно-діодних модулях при комп'ютерному моделюванні перетворювачів з ШІМ, використання якого дозволяє визначити ККД перетворювальних систем і контролювати температуру рп-переходу транзисторно-діодного модуля;

– розроблено алгоритми керування АВ з бортовим і зі стаціонарним накопичувачами енергії, які забезпечують виконання основних функцій та регулювання потоку енергії, накопиченої рухомим поїздом.

**Практичне значення одержаних результатів** дослідження для електротехніки полягає в наступному:

– застосування САФ, АВ і системи активний випрямляч – автономний інвертор напруги (АВ – АІН) в СЕ залізниці і МП дозволяє забезпечити необхідне значення коефіцієнтів несинусоїдальності напруги і струму мережі,

підвищення ККД СЕ на 2-10%, а в разі застосування АВ з накопичувачем енергії – скорочення більш ніж у два рази споживаної з мережі енергії;

– встановлено, що на практиці в АВІН немає необхідності використовувати модулі транзистор-діод, де обидва прилади розраховані на однакові прямі струми. Прямий струм діода в 4-8 разів більше струму транзистора;

– надані рекомендації щодо застосування різних типів напівпровідникових перетворювачів і накопичувачів енергії в СЕ залізниці і МП, які дозволяють поліпшити електромагнітну сумісність з мережею і підвищити ККД всієї СЕ.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені на виробництві в КП «Харківський метрополітен» (м. Харків), Науково-виробничому підприємстві «ЕОС» (м. Харків), ДП «НДІ ХЕМЗ» (м. Харків), ТОВ науково-виробниче об'єднання «Вертикаль» (м. Харків ) та в навчальному процесі на кафедрі промислової та біомедичної електроніки НТУ «ХП» в дисциплінах «Енергетична електроніка», «Перетворювачі для електропривода», «Методи розрахунку і моделювання перетворювачів».

**Особистий внесок здобувача** полягає в розробці математичних моделей СЕ з напівпровідниковими перетворювачами і перевірці розроблених методів визначення ККД СЕ за допомогою віртуального експерименту; підтвердженні теоретично отриманих співвідношень і характеристик для активного випрямляча з постійною і змінною частотою модуляції, потужного некерованого випрямляча з ємнісним фільтром; розробці моделі перетворювача, в якій враховуються динамічні втрати транзисторно-діодних модулів; аналізі та комп'ютерному моделюванні САФ, АВ, АВ–АІН для СЕ залізниці на постійному і змінному струмі; аналізі та комп'ютерному моделюванні САФ, АВ зі стаціонарним або з бортовим накопичувачем енергії для СЕ метрополітену; розробка алгоритму роботи системи керування АВ з накопичувачами енергії для СЕ МП.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідалися та обговорювалися на Міжнародних науково-технічній конференціях: «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2010р.), «Силова електроніка та енергоефективність» (м. Алушта, 2010 – 2012 рр.) та на наукових семінарах НАН України «Силова і біомедична електроніка» (м. Харків, НТУ «ХП», 2010, 2012 рр.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 11 статтях, опублікованих у спеціалізованих наукових виданнях України.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 234 сторінок, з них 78 рисунків за текстом та 25 рисунків на 22 сторінках; 3 таблиці за текстом та 2 таблиці на 2 сторінках; 3 додатки на 34 сторінках і 122 найменування використаних джерел на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність і доцільність виконаної роботи, сформульовано мету та завдання наукового дослідження, наведені дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладена наукова новизна, практичне значення і реалізація результатів дисертаційних досліджень, наведені дані про їх апробацію, публікацію та впровадження.

У першому розділі проаналізовано силові схеми і системи управління енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів – активних випрямлячів, силових активних фільтрів, багаторівневих інверторів, а також існуючі типи потужних накопичувачів енергії для визначення їх основних переваг та недоліків при застосуванні в СЕ залізничного і міського транспорту.

Відзначено, що для СЕ залізниці та МП перспективним є застосування АВДН з релейною або векторною системами керування (СК), що забезпечує двонаправлений потік енергії, майже синусоїдальний мережевий струм, який співпадає по фазі з напругою мережі, регулювання і стабілізацію напруги на виході АВ і, як наслідок, підвищення ККД СЕ.

Іншим ефективним способом модернізації СЕ залізничного і міського транспорту є застосування паралельного силового активного фільтра, який дозволяє компенсувати миттєву реактивну потужність і пульсації миттєвої активної потужності, що призводить до підвищення ККД СЕ і її електромагнітної сумісності з мережею живлення. Для паралельного САФ на базі АІН доцільно застосовувати СК на базі *pqr* теорії потужності, яка оперує миттєвими значеннями активних та реактивних потужностей і дозволяє ввести три незалежних регулятора трьох складових потужності по трьох осях, що забезпечить високу швидкодію і точність системи автоматичного регулювання САФ.

Застосування накопичувачів енергії для тягового електропостачання дозволяє зменшити встановлену потужність знижувальних і перетворювальних трансформаторів тягових підстанцій, зменшити витрати енергії, знизити втрати електроенергії в тяговій мережі. З урахуванням величини накопичуваної енергії, величини струму заряду-розряду НЕ і інтервалу часу, за який повинен відбуватися цикл заряду-розряду, перспективним в ролі НЕ для залізниці і МП є суперконденсатори, наприклад, що випускаються фірмою Maxwell або фірмою Елтон. Сучасні акумуляторні батареї, що випускаються провідними фірмами, поки не можуть бути використані в якості НЕ для СЕ транспорту, тому що, незважаючи на високі досягнення в підвищенні їх ККД, вони характеризуються порівняно малим числом допустимих циклів заряду-розряду.

Умовою практичної реалізації модернізованих СЕ є одночасне покращання ЕМС СЕ і зменшення сумарних втрат енергії. Для цього потрібна розробка методів розрахунку максимально можливих і реальних значень ККД СЕ з напівпровідниковими перетворювачами і накопичувачами енергії.

У другому розділі розроблено метод розрахунку максимально можливого і реального ККД п'яти систем електропостачання: з постійною напругою джерела; із трифазною симетричною синусоїдальною напругою джерела; із трифазною симетричною синусоїдальною напругою джерела і з несиметричним нелінійним навантаженням; з однофазною змінною прямокутною напругою джерела та однофазною змінною синусоїдальною напругою джерела.

Максимальний ККД СЕ досягається при виконанні ряду умов:

- енергія передається від джерела в навантаження з постійною швидкістю;
- відсутній двонаправлений обмін енергією між реактивними елементами СЕ;

- форма струму джерела співпадає з формою напруги джерела.

Реальний ККД СЕ завжди менше розрахункового максимально можливого значення внаслідок відхилення від оптимальної форми графіка активної потужності і струму навантаження. Введено також параметр «втрата ККД», який визначається як різниця між максимально можливим і реальним ККД розглянутої СЕ.

Розроблено MatLab-моделі систем електропостачання, віртуальні експерименти на яких підтвердили отримані теоретичні результати. Показано, що середні за період повторюваності ККД систем електропостачання постійної напруги джерела і трифазної симетричної синусоїдальної напруги джерела збігаються при однакових відношеннях потужності резистивного короткого замикання до корисної потужності або при однакових відношення корисного струму навантаження до струму резистивного короткого замикання

$$K_I = \frac{I_{usf}}{I_{SC}} \cong \frac{P_{usf}}{P_{SC}}. \quad (1)$$

Корисна активна потужність дорівнює середньому за період повторюваності значенню активної потужності навантаження і визначає величину енергії, яка поступає в навантаження за період повторюваності. Корисний струм – це струм при якому енергія надходить в навантаження з постійною середньою швидкістю, рівній корисній потужності.

Отримані розрахункові формули та таблиці, що дозволяють розраховувати максимально можливий і реальний ККД систем електропостачання постійної напруги джерела і трифазної симетричної синусоїдальної напруги джерела (2), (3), систем електропостачання зі змінною напругою прямокутної форми при синусоїдальному струмі навантаження, що відстає по фазі від напруги джерела, по їх відомим параметрам і графіку навантаження (4).

Максимальне значення ККД системи електропостачання постійної напруги

$$\eta = \eta_{AV} = \eta_{\max} = 1 - K_I = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{P_{SC}/P_{usf}}}. \quad (2)$$

Реальне значення ККД системи електропостачання постійної напруги



$$\eta_{AVreal} = 1 - K_I - \frac{1}{2} K_I \Delta_I^2, \quad (3)$$

де  $\Delta_I$  – відносна амплітуда змінної складової струму навантаження.

Середній за період повторюваності реальний ККД для СЕ з джерелом напруги прямокутної форми при синусоїдальному струмі навантаження, що відстає по фазі від напруги джерела

$$\eta_{AVreal} = 1 - \frac{\pi^2 \cdot K_I}{8 \cos^2 \varphi} = 1 - 1,2337 \frac{K_I}{\cos^2 \varphi}, \quad (4)$$

де  $\varphi$  - кут зсуву по фазі струму навантаження від напруги джерела.

Співвідношення і таблиці для системи електропостачання зі змінною напругою джерела прямокутної форми при синусоїдальному струмі навантаження, що відстає по фазі від напруги джерела, справедливі також для СЕ змінної синусоїдальної напруги джерела при прямокутній формі струму джерела.

Зіставлення теоретичних значень ККД і значень, отриманих у віртуальних експериментах, для трифазної системи електропостачання з несиметричним нелінійним навантаженням, показали хорошу збіжність результатів при значеннях кута зрушення струму щодо напруги в діапазоні  $0 \leq \varphi \leq \pi/4$ .

Коефіцієнт корисної дії СЕ однофазної змінної напруги прямокутної форми залежить від форми струму навантаження. У випадку якщо навантаження чисто резистивне і струм навантаження має прямокутну форму, то СЕ однофазної змінної напруги прямокутної форми еквівалентна системі електропостачання постійної напруги і для неї справедливі співвідношення і таблиці, отримані для СЕ постійної напруги.

У **третьому розділі** проаналізовано електромагнітні процеси в АВДН в двох режимах роботи: некерованого випрямляча і підвищуючого перетворювача.

Встановлено, що робочим режимом потужного шестипульсного мостового

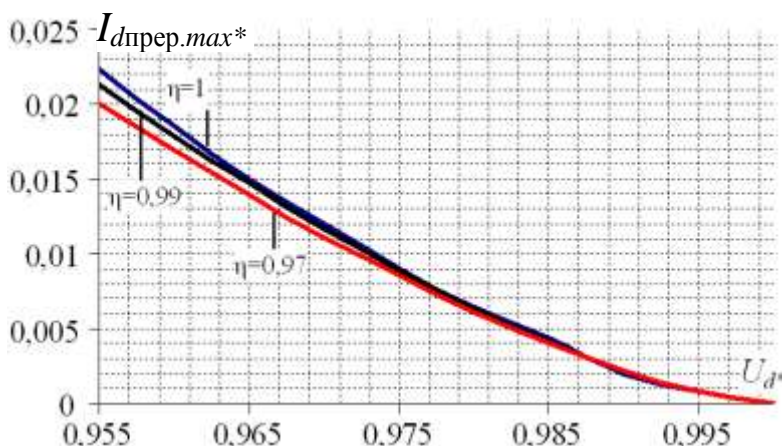


Рис. 1. Амплітуда переривчастого струму НВ з ємнісним навантаженням

НВ поряд з режимом безперервного струму є режим переривчастого струму, який виникає, коли величина напруги на навантаженні  $U_d=U_{Load}$  стає менше амплітуди лінійної напруги мережі  $E_{Smax}$ , але більше деякого значення випрямленої напруги  $U_{днач.непр.}$  при якому виникає переривчастий струм на виході НВ, максимальне

значення якого відповідає начально-безперервному струму на виході НВ  $I_{dнач.непр.мах}$ .

Отримані розрахункова формула (7) і графічні залежності (рис. 1) для визначення максимуму переривчастого струму НВ по відомій відносній випрямленій напрузі при різних значеннях ККД НВ. Показано, що відносне значення максимуму переривчастого струму зменшується із збільшенням відносного значення випрямленої напруги і із зменшенням ККД НВ, та становить 22-44% від номінального середнього струму НВ

$$I_{dпер.мах}^* = \sqrt{6} \sin \arccos U_{d^*} - U_{d^*} \arccos U_{d^*} \quad (7)$$

де базисний струм 
$$I_{base} = \frac{E_{S \max}}{\sqrt{6} X_S}; \quad (8)$$

$X_S$  – індуктивний опір мережі;

$$\frac{3}{\pi} \leq U_{d^*} = \frac{U_d}{E_{S \max}} \leq 1. \quad (9)$$

В режимі безперервного струму НВ отримані рівняння зовнішньої характеристики і залежності кута комутації  $\gamma$  від параметра  $g$  (рис. 2). Показано, що зі зменшенням відносного значення випрямленої напруги збільшується кут комутації НВ досягаючи 30 ел.град. при відносній випрямленій напрузі 0,89.

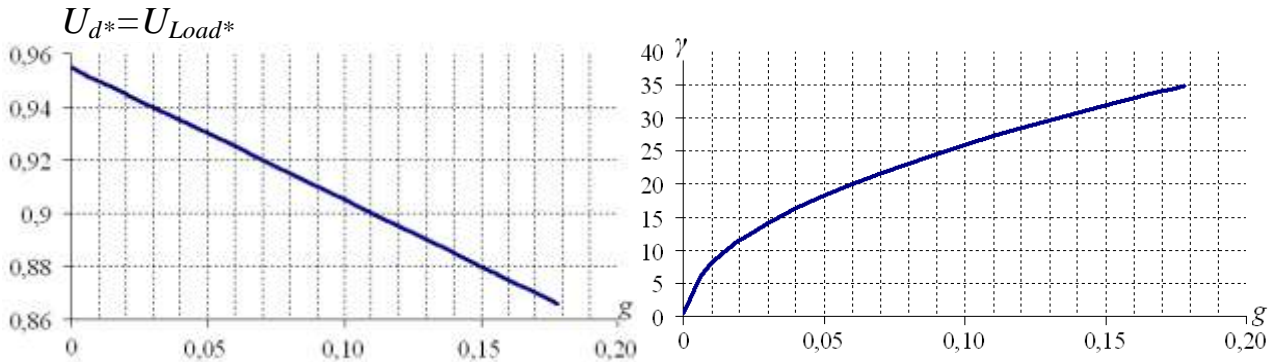


Рис. 2 Зовнішня характеристика НВ і залежність кута комутації  $\gamma$  від параметра  $g$

Аналітичні вирази для зовнішньої характеристики і залежності кута комутації  $\gamma$  від параметра  $g$ :

$$U_{d^*} = \frac{U_d}{E_{S \max}} = \frac{3}{\pi} (1 - 0,5g) \quad (10)$$

$$\gamma = \arccos \left( 1 - \frac{3}{\pi} g \right), \quad (11)$$

$$g = e_{K\Sigma} \frac{I_{d\gamma}}{I_{dnom}}, \quad (12)$$

де  $I_{d\gamma}$  – миттєве значення випрямленого струму в момент закінчення комутації;  $I_{dnom}$  – номінальне значення випрямленого струму.

Отримано також вираз для розрахунку змінної складової струму через конденсатор

$$I_{P\max} \cong \frac{E_{S\max} \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right)}{24\pi f_S L_S}, \quad (13)$$

де  $f_S$  – частота напруги мережі живлення;  $L_S$  – індуктивність мережі живлення.

Напруги і струми в силових колах АВДН, працюючого в режимі підвищуючого перетворювача, можна розглядати як суму двох складових, що накладаються одна на одну: одна – з частотою напруги мережі й друга – з частотою модуляції так, що в інтервалі модуляції миттєві значення напруги, струму мережі і напруги на виході АВ залишаються незмінними. При цьому аналітично і у віртуальному експерименті показано, що в активному випрямлячі амплітуда основної гармоніки напруги на вході транзисторного моста тотожно дорівнює амплітуді фазної напруги мережі  $U'_{S1\max} = U_{S\max}$ .

Отримано розрахункове співвідношення для визначення поточної частоти модуляції фазного струму активного випрямляча по миттєвій фазній напрузі мережі  $u_S$ , індуктивності реактора  $L_S$ , величині гістерезису  $\Delta I_S$  і по параметру відношення напруги на виході АВ до амплітуди лінійної напруги мережі  $k$

$$f_{\text{mod}} = \frac{1}{T_{\text{mod}}} = \frac{-u_S^2 + \frac{3}{4}k^2 U_{S\max}^2}{2\sqrt{3}kL_S \Delta I_S U_{S\max}}. \quad (14)$$

Відповідно відношення максимальної частоти модуляції до мінімальної однозначно залежить від відношення вихідної напруги АВ до амплітуди лінійної напруги мережі – коефіцієнта  $k$

$$\frac{f_{\text{modmax}}}{f_{\text{modmin}}} = \frac{1}{T_{\text{mod}}} = \frac{3k^2}{4\left(-1 + \frac{3}{4}k^2\right)}. \quad (15)$$

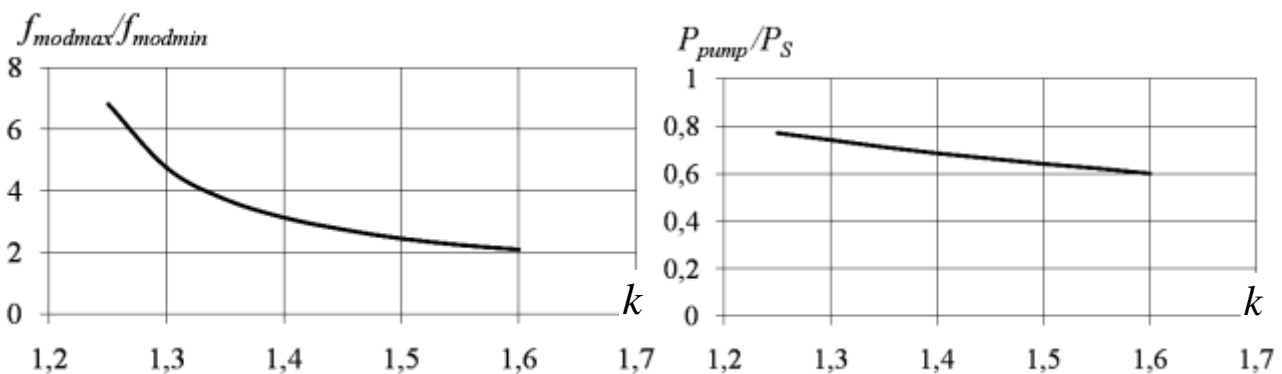


Рис. 3. Відношення максимальної частоти модуляції до мінімальної і відносна величина потужності «накачування» в залежності від коефіцієнта  $k$

У сталому режимі енергія мережі передається в навантаження активного випрямляча двома потоками, один з яких мінає вхідні реактори, а інший проходить через них. Відношення величин цих потоків однозначно визначається параметром відношення вихідної напруги до амплітуди лінійної напруги мережі – коефіцієнтом  $k$

$$P_{pump*} = \frac{P_{pump}}{P_S} = \frac{5}{3\sqrt{3}k} = \frac{0,962}{k}, \quad (16)$$

де  $P_S$  – середня за період повторюваності потужність мережі;  $P_{pump}$  – потужність «накачування».

На рис. 3 приведена залежність відношення максимальної частоти модуляції до мінімальної і відносної величини потужності «накачування» від коефіцієнта  $k$ , з яких встановлено, що оптимальне значення коефіцієнта  $k$  у АВ лежить в діапазоні від 1,4 до 1,6.

Розроблено метод вибору індуктивності реакторів активного випрямляча, який полягає в наступному:

1. По відомим параметрам силової схеми знаходиться розрахункове значення сумарної індуктивності  $L_{\Sigma 1p}$  зі співвідношення

$$L_{\Sigma 1p} = \frac{\sqrt{\frac{R_{\Sigma} \cdot R_{Load}}{k^2} - R_{\Sigma}^2}}{\omega_S} \quad (17)$$

де  $R_{\Sigma}$  – сумарний активний опір мережі;  $R_{Load}$  – опір навантаження;

$$\omega_S = 2\pi f_S. \quad (18)$$

2. Відповідно до виразу

$$\varphi = \alpha - \alpha_1 = \arctg \frac{\omega_S \cdot L_{\Sigma 1*}}{R_{\Sigma}} - \arccos \frac{k^2 \cdot \sqrt{R_{\Sigma}^2 + \omega_S^2 \cdot L_{\Sigma 1*}^2}}{R_{Load}}, \quad (19)$$

де  $L_{\Sigma 1*} = \frac{L_{\Sigma 1}}{L_{\Sigma 1p}}$ ,

будується залежність  $\cos\varphi$  від  $L_{\Sigma 1*}$  (див. рис. 4).

3. Із залежності (19) визначається можливий діапазон зміни індуктивності  $L_{\Sigma 1*}$ , з урахуванням режиму роботи АВ та зменшення  $\cos\varphi$  не більше ніж на 0.5%.

4. Відповідно до виразу

$$L_{\Sigma 2*} = \frac{R_{Load} \cdot \sqrt{1 \cdot k^2 - 2}}{16 \cdot \sqrt{3} \cdot k^3 \cdot \Delta I_{S*} \cdot f_{mod}}, \quad (20)$$

де  $L_{\Sigma 2*} = \frac{L_{\Sigma 2}}{L_{\Sigma 1p}}$ ,

будується залежність  $L_{\Sigma 2*}$  від  $\Delta I_{S*}$  (див. рис. 5).

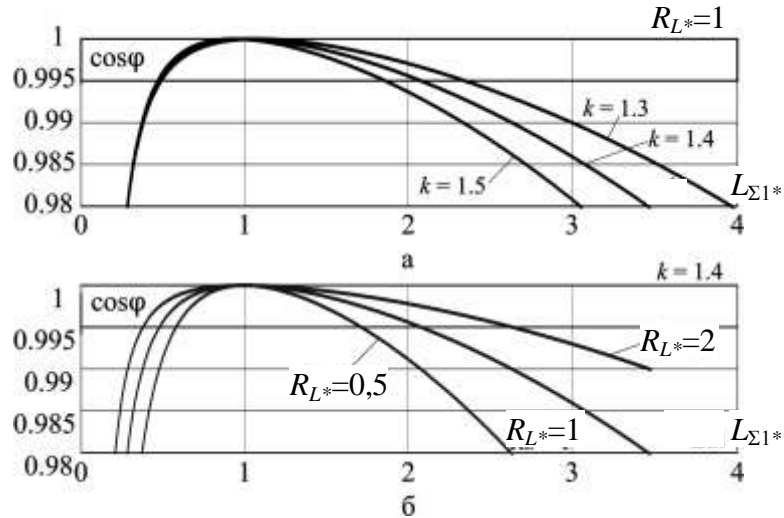


Рис. 4. Залежність коефіцієнта зсуву від відносної сумарної індуктивності

5. Із залежності (20) з урахуванням обраного в пункті 3 діапазону зміни індуктивності та умови, що величина  $\Delta I_{S*}$  не повинна перевищувати 5% від  $I_{S1}$  – амплітуди основної гармоніки фазного струму мережі, проводиться остаточний вибір індуктивності реакторів.

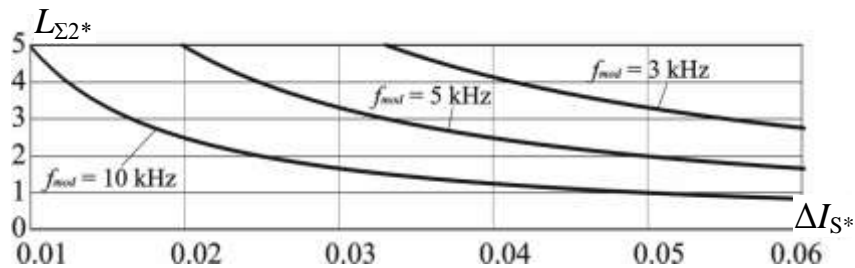


Рис. 5. Залежність відносного значення сумарної індуктивності від середнього значення максимального відхилення струму

Отримана наближена розрахункова формула для визначення  $THD_U$  напруги мережі в точці підключення АВ по  $THD_I$  струму, споживаного АВ з мережі, яка справедлива як для АВ з векторною системою керування, так і для АВ з релейною системою керування. В останньому випадку – при еквівалентній середній частоті модуляції

$$THD_U = THD_I \cdot e_K \frac{f_{mod}}{f_S} \frac{I_{S1max}}{I_{S1max.nom}} \quad (21)$$

де  $I_{S1max}$  – амплітуда основної гармоніки фазного струму;  $I_{S1max.nom}$  – амплітуда основної гармоніки фазної номінального струму мережі, основна гармоніка струму мережі збігається по фазі з фазною напругою мережі.

У четвертому розділі проаналізовані і зіставлені характеристики традиційних СЕ залізниці і МП, які експлуатуються на даний час, і перспективних СЕ, в яких використовуються енергозберігаючі напівпровідникові перетворювачі (АВ і САФ) з потужними накопичувачами

енергії. Характеристики СЕ визначаються шляхом застосування математичного моделювання з використанням пакетів MatLab.

Розроблений метод визначення сумарної миттєвої потужності статичних і динамічних втрат рп-переходів транзисторно-діодних модулів при дискретному моделюванні напівпровідникових перетворювачів за допомогою пакета MatLab/Simulink в режимах, коли інтервал дискретизації в моделі близький до часів включення і виключення транзистора. Результати, одержані в MatLab-моделі в усталеному режимі, практично збігаються з результатами в програмі Semisel. На відміну від Semisel, в MatLab/Simulink можливо промодельовати будь-яку схему перетворювача в будь-якому режимі роботи і при цьому контролювати миттєву температуру структури транзистора.

Проаналізовані режими роботи традиційної системи електропостачання залізниці змінного струму частотою 50 Hz і номінальною напругою 25 kV. На MatLab-моделі систем електропостачання залізниці на змінному струмі продемонстрована можливість симетрування фазних струмів мережі 110 kV і повної компенсації реактивної потужності за допомогою силового активного фільтра, підключеного паралельно клем первинних обмоток трансформатора.

Запропонована модернізована система електропостачання залізниці на змінному струмі із застосуванням системи «АВ-АН», яка забезпечує необхідну електромагнітну сумісність системи електропостачання з мережею живлення 110 kV і, за приблизною оцінкою, підвищення ККД на 2-10%, в залежності від параметрів лінії і характеру навантаження. Оцінка ККД виконувалася шляхом вимірювання миттєвих активних потужностей мережі та навантаження в усталеному режимі роботи схеми, визначення миттєвих значень потужності мережі та навантаження і їх інтегрування на періоді повторюваності  $T=0,02$  s:

$$P_S = \frac{1}{T} \int_0^T u_{SA} i_{SA} + u_{SB} i_{SB} + u_{SC} i_{SC} \underline{dt}, \quad (22)$$

$$P_{Load} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{Load} i_{Load} \underline{dt}, \quad (23)$$

$$\eta = \frac{P_{Load}}{P_S}. \quad (24)$$

Проаналізовані режими роботи традиційної системи електропостачання залізниці постійного струму номінальною напругою 3,3 kV. Застосування активних фільтрів і активних випрямлячів в СЕ залізниці на постійному струмі дозволяє істотно поліпшити її електромагнітну сумісність з мережею живлення і на 1-3% зменшити втрати електроенергії. А використання активних випрямлячів відкриває додаткову можливість переходу від резистивного гальмування до рекуперативного в поїздах з тяговими електроприводами постійного і змінного струму і напівпровідниковими перетворювачами. Додаткове зниження втрат електроенергії може бути досягнуто за рахунок

використання накопичувачів енергії, що встановлюються на поїзді або тяговій підстанції.

Перехід від динамічного (резистивного) гальмування до рекуперативного в поїзді МП дозволяє зменшити більше ніж в два рази енергію, споживану з мережі на тягу поїзда, і в чотири рази скоротити втрати енергії в елементах СЕ. Застосування стаціонарного або бортового НЕ дозволяє забезпечити сталість графіка потужності мережі і зменшити втрати енергії в елементах СЕ МП, при цьому СЕ МП з бортовим НЕ має істотно менші втрати енергії в контактному дроті, ніж СЕ зі стаціонарним НЕ. При визначенні відносних втрат енергії у якості базисної величини була прийнята кінетична енергія поїзда МП, що рухається з максимально допустимою швидкістю.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача аналізу електромагнітних процесів, створення методів розрахунку, характеристик і алгоритми роботи систем керування енергозберігаючих напівпровідникових перетворювачів з потужними накопичувачами енергії для системах електропостачання залізничного транспорту та метрополітену.

1. Виконаний аналіз силових схем і систем керування сучасних напівпровідникових перетворювачів, а також досягнень в області виробництва потужних накопичувачів енергії показав, що найбільш перспективними для систем електропостачання залізниці та метрополітену є: паралельний САФ на базі АІН з системою керування на основі  $pqr$  або  $pq$  теорії потужності, АВДН з релейною або векторною СК і накопичувачі енергії на основі суперконденсаторів.

2. Розроблено метод розрахунку максимально можливого і реального ККД п'яти систем електропостачання: з постійною напругою джерела; із трифазною симетричною синусоїдальною напругою джерела; із трифазною симетричною синусоїдальною напругою джерела і з несиметричним нелінійним навантаженням, з однофазною змінною прямокутною напругою джерела та однофазною змінною синусоїдальною напругою джерела. Отримані розрахункові формули та таблиці, що дозволяють з досить високою для практичних розрахунків точністю, оцінювати максимальний і реальний ККД систем електропостачання. Розроблено MatLab-моделі систем електропостачання, що експериментально підтверджують отримані теоретичні результати і дозволяють виконати точний розрахунок ККД по відомим вихідним даним.

3. Досліджені електромагнітні процеси в потужному АВ при його роботі в режимах переривчастого і безперервного струму некерованого випрямляча з ємнісним фільтром і в основному режимі роботи – підвищуючого перетворювача з постійною і змінною частотою модуляції. Отримані

розрахункові формули та графічні залежності для визначення максимуму переривчастого струму НВ по відомій відносній випрямленій напрузі, рівняння зовнішньої характеристики НВ в режимі безперервного струму, наближений вираз для визначення змінної складової струму через конденсатор, розрахункові відношення для визначення поточної частоти модуляції фазного струму АВ, наближена розрахункова формула для визначення  $THD_U$  напруги мережі в точці підключення АВ.

4. Розроблено метод вибору індуктивності реакторів активного випрямляча з релейною і векторною системами керування, що враховує особливості електромагнітних процесів в АВ: напруги і струми в силових колах АВ розглядаються як сума двох складових, що накладаються одна на одну: одна – з частотою напруги мережі й друга – з частотою модуляції. Встановлено, що амплітуда основної гармоніки напруги на вході транзисторного моста АВ тотожно дорівнює амплітуді фазної напруги мережі. Показано, що в усталеному режимі роботи енергія мережі передається в навантаження АВ двома потоками, один з яких минає вхідні реактори, а інший проходить через них.

5. Проаналізовано режими роботи традиційних систем електропостачання залізниці з контактною мережею змінного струму частотою 50 Hz і номінальною напругою 25 kV, залізниці з контактною мережею постійного струму номінальною напругою 3,3 kV і метрополітену з контактною мережею постійного струму номінальною напругою 825 V. Показано, що застосування активних фільтрів і активних випрямлячів в СЕ залізниці і МП дозволяє істотно поліпшити їх електромагнітну сумісність з мережею живлення і зменшити втрати електроенергії. Використання активних випрямлячів відкриває додаткову можливість переходу від резистивного гальмування до рекуперативних в поїздах з тяговими електроприводами постійного і змінного струму.

6. Перехід від динамічного (резистивного) гальмування до рекуперативного в поїзді МП дозволяє зменшити більш ніж у два рази енергію, споживану з мережі на тягу поїзда, і приблизно в чотири рази скоротити втрати енергії в елементах СЕ. Застосування стаціонарного або бортового НЕ дозволяє забезпечити сталість графіка потужності мережі та істотно зменшити втрати енергії в елементах СЕ МП.

7. Результати досліджень впроваджені на виробництві в КП «Харківський метрополітен», Науково-виробничому підприємстві «ЕОС», ДП «НДІ ХЕМЗ», ТОВ науково-виробниче об'єднання «Вертикаль» і в навчальному процесі на кафедрі промислової і біомедичної електроніки НТУ «ХП».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ковальчук О.И. (Холод О.И.) Симметричная трехфазная электромагнитносовместимая с питающей сетью система электроснабжения



переменного напруги для залізничних доріг / Г.Г. Жемеров, О.И. Ковальчук (О.И. Холод) // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – №2. – С. 57–62.

*Здобувачкою виконані розрахунок і математичне моделювання діючої і запропонованої симетричної трифазної електромагнітносумісної з мережею живлення системи електропостачання змінної напруги для залізниць. Здійснено оцінку систем електропостачання залізниці по ККД та за коефіцієнтами несинусоїдальності струму і напруги мережі.*

2. Ковальчук О.И. (Холод О.И.) Модернізація систем електропостачання переменного напруги залізничних доріг / Г.Г. Жемеров, О.И. Ковальчук (О.И. Холод) // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2010. – Ч. 1, Тематичний вип. – С. 111–117.

*Здобувачкою виконані розрахунок і математичне моделювання діючої і запропонованої модернізованої системи електропостачання змінної напруги для залізниць. Здійснено зіставлення двох систем електропостачання залізниці по ККД та за коефіцієнтами несинусоїдальності струму і напруги мережі.*

3. КПД системи електропостачання постійного напруги і трифазної симетричної системи синусоїдальних напруг / Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина, О.В. Ильина, О.И. Ковальчук (О.И. Холод), Е.И. Сокол // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2010. – Ч. 2, Тематичний вип. – С. 107–115.

*Здобувачкою виконане комп'ютерне моделювання систем електропостачання. Розроблений порядок проведення віртуальних експериментів.*

4. КПД трифазної чотирипровідної системи електропостачання з асиметричною навантаженням / Г.Г. Жемеров, Н.А. Ильина, О.В. Ильина, О.И. Ковальчук (О.И. Холод), Е.И. Сокол // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2010. – Ч. 1, Тематичний вип. – С. 22–31.

*Здобувачкою виконані розрахунок і математичне моделювання систем електропостачання. Проведені і оброблені результати віртуальних експериментів.*

5. Ковальчук О.И. (Холод О.И.) КПД систем електропостачання однофазного переменного напруги прямокутної і синусоїдальної форми / Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина, О.И. Ковальчук (О.И. Холод) // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2010. – Ч. 2, Тематичний вип. – С. 7–15.

*Здобувачкою виконана перевірка теоретично отриманих результатів. Розроблені математичні моделі систем електропостачання. Проведені і оброблені результати віртуальних експериментів.*

6. Ковальчук О.И. (Холод О.И.) Характеристики потужного шестипульсового мостового неуправляемого випрямителя з ємкісним фільтром / Г.Г. Жемеров, О.И. Ковальчук (О.И. Холод) // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №1. – С. 19–24.

*Здобувачкою виконані розрахунок і математичне моделювання потужного шестипульсного мостового некерованого випрямляча з С-фільтром. Проведені і оброблені результати віртуальних експериментів.*

7. Ковальчук О.И. (Холод О.И.) Коэффициент несинусоидальности напряжения сети в точке подключения активного выпрямителя / Г.Г. Жемеров, О.И. Ковальчук (О.И. Холод) // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2011. – Ч. 2, Тематичний вип. – С. 33–40.

*Здобувачкою виконані розрахунок і математичне моделювання схеми активного випрямляча – джерела напруги з релейною і векторною системами керування. Проведені і оброблені результати експериментів.*

8. Ковальчук О.И. (Холод О.И.) Автономный выпрямитель – источник напряжения с гистерезисной системой управления / Г.Г. Жемеров, О.И. Ковальчук (О.И. Холод) // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2011. – Ч. 2, Тематичний вип. – С. 75–82.

*Здобувачкою виконані розрахунок і математичне моделювання схеми активного випрямляча – джерела напруги з релейною системою керування. Проведені і оброблені результати експериментів.*

9. Ковальчук О.И. (Холод О.И.) Расчет мощности потерь и температуры структуры транзисторно-диодных модулей при компьютерном моделировании преобразователей / Г.Г. Жемеров, В.В. Ивахно, О.И. Ковальчук (О.И. Холод) // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №4. – С. 21–28.

*Здобувачкою виконані розрахунок і математичне моделювання схеми понижуючого широтно-імпульсного перетворювача і автономного інвертора напруги з системою обліку динамічних втрат в транзисторі і контролю температури структури транзисторно-діодного модулю. Зіставлені результати моделювання з результатами, отриманими за допомогою спеціалізованої програми Semisel.*

10. Холод О.И. Выбор индуктивности реакторов активного выпрямителя – источника напряжения при постоянной частоте ШИМ / Г.Г. Жемеров, Д.В. Тугай, О.И. Холод // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №6. – С. 46–51.

*Здобувачкою був виконаний аналіз отриманих результатів та проведений віртуальний експеримент для перевірки методу розрахунку індуктивності вхідних реакторів активного випрямляча.*

11. Холод О.И. Пути модернизации систем электроснабжения метрополитена / Г.Г. Жемеров, О.И. Холод // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2012. – Ч. 1, Тематичний вип. – С. 27–35.

*Здобувачем виконані розрахунок і математичне моделювання схеми системи електропостачання метрополітену. Здійснено зіставлення систем електропостачання по ККД та за коефіцієнтами несинусоїдальності струму і напруги мережі. Проведені і оброблені результати експериментів.*

## АНОТАЦІЇ

**Холод О.І. Енергозберігаючі напівпровідникові перетворювачі для систем електропостачання транспорту.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.12 – напівпровідникові перетворювачі електроенергії. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2013.

Дисертація присвячена розробці силових схем і систем керування енергозберігаючими напівпровідниковими перетворювачами з накопичувачами енергії для систем електропостачання залізниці та метрополітену, вдосконаленню методів розрахунку характеристик цих перетворювачів.

Виконано аналіз силових схем і систем управління сучасних напівпровідникових перетворювачів, а також досягнень в області виробництва потужних накопичувачів енергії. Виявлено, що найбільш перспективними для систем електропостачання залізниці та метрополітену є: паралельний САФ на базі АІН з системою управління на основі  $pqr$  або  $pq$  теорії потужності, АВДН з релейною або векторною СУ і накопичувачем енергії на основі суперконденсаторів.

Розроблено метод розрахунку максимально можливого і реального ККД п'яти систем електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами.

Досліджено електромагнітні процеси в потужному АВ при його роботі в режимах некерованого випрямляча з ємнісним фільтром і в режимі перетворювача з постійною і змінною частотою модуляції. Розроблено метод вибору індуктивності реакторів активного випрямляча.

Проаналізовано режими роботи традиційних систем електропостачання залізниці і метрополітену. Показано, що застосування активних фільтрів, активних випрямлячів і накопичувачів енергії в СЕ залізниці і МП дозволяє істотно покращити їх електромагнітну сумісність з мережею живлення і зменшити втрати електроенергії.

**Ключові слова:** некерований випрямляч, активний випрямляч, силовий активний фільтр, накопичувач енергії, коефіцієнт корисної дії, енергоефективність, електромагнітна сумісність.

**Холод О.И. Энергосберегающие полупроводниковые преобразователи для систем электроснабжения транспорта.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – полупроводниковые преобразователи электроэнергии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2013.

Диссертация посвящена разработке силовых схем и систем управления энергосберегающих полупроводниковых преобразователей с накопителями

энергии для систем электроснабжения железной дороги и метрополитена, совершенствованию методов расчета характеристик этих преобразователей.

Выполнен анализ силовых схем и систем управления современных полупроводниковых преобразователей, а также достижений в области производства мощных накопителей энергии. Выявлено, что наиболее перспективными для систем электроснабжения железной дороги и метрополитена являются: параллельный силовой активный фильтр на базе автономного инвертора напряжения с системой управления на основе  $p-q-r$  или  $p-q$  теории мощности, активный выпрямитель – источник напряжения с релейной или векторной системами управления и накопители энергии на основе суперконденсаторов.

Разработан метод расчета максимально возможного и реального КПД пяти систем электроснабжения: с постоянным напряжением источника; с трехфазным симметричным синусоидальным напряжением источника; с трехфазным симметричным синусоидальным напряжением источника и с несимметричной нелинейной нагрузкой, с однофазным переменным прямоугольным напряжением источника и однофазным переменным синусоидальным напряжением источника. Получены расчетные формулы и таблицы, позволяющие с достаточно высокой для практических расчетов точностью, оценивать максимальный и реальный КПД систем электроснабжения. Разработаны MatLab – модели систем электроснабжения, подтверждающие полученные теоретические результаты.

Исследованы электромагнитные процессы в мощном активном выпрямителе при его работе в режимах неуправляемого выпрямителя с емкостным фильтром и в режиме повышающего преобразователя с постоянной и переменной частотой модуляции. Получены расчетные формулы и графические зависимости для определения максимума прерывистого тока неуправляемого выпрямителя по известному относительному выпрямленному напряжению, уравнение внешней характеристики неуправляемого выпрямителя в режиме непрерывного тока, приближенное выражение для определения переменной составляющей тока через конденсатор, расчетные соотношения для определения текущей частоты модуляции фазного тока активного выпрямителя, приближенная расчетная формула для определения  $THD_U$  напряжения сети в точке подключения активного выпрямителя.

Разработан метод выбора индуктивности реакторов активного выпрямителя с релейной и векторной системами управления, учитывающий особенности электромагнитных процессов в активном выпрямителе: напряжения и токи в силовых цепях АВ рассматриваются как сумма двух накладывающихся друг на друга составляющих: одной – с частотой напряжения сети и другой – с частотой модуляции. Установлено, что амплитуда основной гармоники напряжения на входе транзисторного моста тождественно равна амплитуде фазного напряжения сети.

Проанализированы режимы работы традиционных систем электроснабжения железной дороги и метрополитена. Показано, что применение активных фильтров и активных выпрямителей в системах электроснабжения железной дороги и метрополитена позволяет существенно улучшить их электромагнитную совместимость с питающей сетью и уменьшить потери электроэнергии. Использование активных выпрямителей открывает дополнительную возможность перехода от резистивного торможения к рекуперативному в поездах с тяговыми электроприводами постоянного и переменного тока.

Применение стационарного или бортового накопителя энергии позволяет обеспечить постоянство графика мощности сети и существенно уменьшить потери энергии в элементах системы электроснабжения.

**Ключевые слова:** неуправляемый выпрямитель, активный выпрямитель, силовой активный фильтр, накопитель энергии, коэффициент полезного действия, энергетическая эффективность, электромагнитная совместимость.

**Kholod O.I. Energysaving semiconductor converters for transport power supply systems.** – Manuscript.

Thesis for a candidate of technical sciences degree in the speciality 05.09.12 – Semiconductor converters of electric energy – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2013.

Thesis is devoted to the development of power circuits and control systems of energysaving semiconductor converters with energy storages for railway and subway, development of improve methods for calculating the characteristics of converters.

The analysis of power circuits and control systems of energysaving semiconductor converters and advances in the production of high-power energy storage are done. Found that the most promising systems for railway and subway are: parallel active filter based on voltage source inverter with a control system based on  $pqr$  or  $pq$  power theory, active rectifier with relay or vector control system and with energy storage based on supercapacitor.

The method of calculating the maximum possible and real efficiency of five power systems.

Electromagnetic processes in powerful active rectifier for its work in the modes of diode rectifier with capacitive filter and mode converter with constant and variable frequency modulation are studied. The method of choice inductance reactors active rectifier are developed.

Modes of traditional railway and subway power supply system are considered. It is shown that the use of active filters, active rectifier and energy storage in railway and subway power supply system can significantly improve their electromagnetic compatibility of the power supply and reduce electricity losses.

**Keywords:** diode rectifier, active rectifier, power active filter, energy storage, efficiency, electromagnetic compatibility.



Підписано до друку 17.01.2013 р. Формат 60x90 1/16.  
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.  
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 085148

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.  
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.  
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21