

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Семененко Олександр Іванович

УДК 629.423.3: 621.314

**Поліпшення характеристик бортових систем живлення електрорухомого
складу**

05.22.09 – Електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українській державній академії залізничного транспорту на кафедрі “Системи електричної тяги”, Міністерство транспорту України

Науковий керівник Доктор технічних наук, професор
Панасенко Микола Васильович, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, кафедра “Електричний транспорт та тепловозобудування”, професор

Офіційні опоненти Доктор технічних наук, професор
Браташ Віктор Олександрович, Український науково-дослідний, проектно-конструкторський та технологічний інститут електровозобудування, м. Дніпропетровськ, директор

Кандидат технічних наук
Носков Валентин Іванович, Науково-дослідний інститут ДП “Електроважмаш”, м. Харків, головний конструктор

Провідна установа Дніпропетровський національний технічний університет залізничного транспорту, кафедра “Електрорухомий склад”, Міністерство транспорту України, м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться “27” лютого 2003р. о 13³⁰ годині в конференцзалі на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.820.04 при Українській державній академії залізничного транспорту за адресою:

61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха,7.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Української державної академії залізничного транспорту, 61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха,7.

Автореферат розіслано “27” січня 2003р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Бабанін О.Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Для поповнення наявного парку та заміни зношеного електрорухомого складу (ЕРС) в Україні розгортається виробництво нових електровозів та електропоїздів, які повинні відповідати сучасному рівню науки і техніки. В комплексі електрообладнання ЕРС важливе місце займають бортові системи живлення (БСЖ), призначені для забезпечення допоміжних ланок електроенергією необхідної якості. Сьогодні покращення характеристик БСЖ ЕРС залізниць України пов'язане зі створенням високоефективних статичних напівпровідникових перетворювачів (НП) електроенергії, які повинні прийти на заміну електромашинним перетворювачам.

Актуальність теми. На всіх етапах розвитку імпульсної перетворювальної техніки ЕРС залізниць в силу своєї специфіки був своєрідним полігоном для перевірки ефективності нових схемотехнічних та конструкторських рішень. Впровадженням нових розробок перетворювальних установок на ЕРС займалися такі відомі вчені в галузі електричного транспорту як Тіхмен'єв Б.М., Трахтман Л.М., Розенфельд В.Є., Тулупов В.Д., Ротанов М.А., Феоктістов В.П., Іньков Ю.М. та інші. Сьогодні для розробників перетворювачів для ЕРС одною із головних є задача створення та впровадження високоефективних НП БСЖ.

Поліпшення ефективності НП БСЖ ЕРС полягає в підвищенні коефіцієнта корисної дії та надійності систем; зменшенні їх маси, габаритів, вартості виготовлення та експлуатаційних витрат. Цього можна досягти в першу чергу за рахунок збільшення робочої частоти в НП БСЖ при зменшенні комутаційних втрат в напівпровідникових ключах (НК) шляхом використання спеціальних схемотехнічних рішень, а також застосування швидкодіючих НК.

В роботі показано, що традиційні ланцюги комутаційного захисту (снабери), які захищають НК від перевантажень при виконанні примусової (в зарубіжній літературі “жорсткої”) комутації, особливо при високій напрузі живлення, яка характерна для БСЖ ЕРС постійного струму, спричиняють значні втрати електроенергії. При цьому зростають також маса та габарити НК. Обмежено в таких автономних НП і застосування схем з виключно природною (“м'якою”) комутацією, наприклад резонансних інверторів, де комутація НК відбувається без напруги і комутаційні втрати в них практично відсутні. Це обмеження пояснюється несприятливим співвідношенням середніх, діючих і амплітудних значень струму та напруги на елементах схеми, а також великою установленою потужністю елементів резонансного контуру, який забезпечує коливальний характер струму і, тим самим, природну комутацію.

Застосування в НП БСЖ ЕРС нових швидкодіючих НК (наприклад, на базі IGBT) дозволяє покращити характеристики систем за рахунок підвищення частоти перетворення електроенергії. Ці НК можуть працювати без ланок комутаційного захисту в так званому “безснаберному” режимі, і тоді від перевантажень при виконанні примусової комутації їх захищають збільшенням

тривалості фронтів переключення, але при цьому комутаційні втрати в напівпровідникових приладах ключів значно зростають.

Щоб полегшити умови роботи силових НК автономних НП БСЖ ЕРС зменшенням комутаційних втрат, запобігти втратам в снаберах, якщо вони застосовуються, та спростити їх, в роботі пропонується використовувати режим так званої однорідної комутації. При цьому підвищується коефіцієнт корисної дії та надійність БСЖ ЕРС за рахунок зменшення комутаційних втрат в НК та снаберах, можливість підвищення частоти перетворення та спрощення снаберів забезпечує покращення питомих енергетичних характеристик НП, зменшується вартість їх виготовлення та витрати при експлуатації.

Використанням переваг однорідної комутації в НП займаються як у нас так і за кордоном, про що свідчать публікації авторів із США, Франції та Південної Кореї. Щоправда, в своїх роботах ці автори не наводять методик синтезу схем даного класу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі "Системи електричної тяги" Української державної академії залізничного транспорту за завданням «Укрзалізниці» по темі №339-95Цтех «Розробка та дослідно-промислова реалізація високоефективної бортової системи електропостачання на базі тиристорного інвертора напруги для електровоза постійного струму» номер держреєстрації №0196U001417.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є поліпшення масо-енергетичних характеристик бортових систем живлення електрорухомого складу за рахунок використання в комутаторах автономних напівпровідникових перетворювачів режиму однорідної комутації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні задачі:

- виконати аналіз способів поліпшення характеристик НП БСЖ ЕРС шляхом покращення умов комутації ключів;
- виконати аналіз параметрів НК для перетворювачів БСЖ ЕРС, а також базової схеми нового НК, який призначений для використання в комутаторах з однорідною комутацією другого роду;
- доопрацювати методологію використання однорідної комутації в частині вибору структури НП з проміжною ланкою підвищеної частоти з однорідною комутацією та роду комутації в їх комутаторах;
- доопрацювати структуру НП БСЖ ЕРС постійного струму з однорідною комутацією ключів;
- виконати аналіз динамічної стійкості НП з однорідною комутацією, яка реалізується насиченням осердя трансформатора та розробити структури і методику розрахунку параметрів елементів демпфуючих ланцюгів, які забезпечують динамічну стійкість НП з однорідною комутацією БСЖ ЕРС;
- розробити методику розрахунку параметрів елементів комутаційного захисту НК перетворювачів з однорідною комутацією БСЖ ЕРС.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси, що протікають в автономних напівпровідникових перетворювачах бортових систем живлення електрорухомого складу залізниць.

Предмет дослідження – комутаційні характеристики автономних напівпровідникових перетворювачів бортових систем живлення електрорухомого складу.

Методи дослідження. В роботі використані:

- метод основних гармонік і метод комутаційних функцій при дослідженні структур НК та НП БСЖ при реалізації однорідної комутації;
- метод фазової площини та перший метод Ляпунова при дослідженні динамічної стійкості НП БСЖ з однорідною комутацією.

Для перевірки достовірності теоретичних результатів застосовувалось комп'ютерне моделювання з використанням спеціально розроблених програм з ручним формуванням диференційних рівнянь, а також фізичне моделювання на масштабних макетних зразках НП БСЖ.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- вперше встановлено основні співвідношення параметрів базової схеми нового НК для використання в комутаторах з однорідною комутацією другого роду НП БСЖ ЕРС;
- доопрацьовано методологію використання однорідної комутації в частині вибору структури НП з проміжною ланкою підвищеної частоти з однорідною комутацією та роду комутації в їх комутаторах;
- отримано уточнену формулу для визначення диференційної провідності НП з однорідною комутацією, яка реалізується насиченням осердя трансформатора;
- запропоновано структури демпфуючих ланцюгів, що забезпечують динамічну стійкість НП БСЖ ЕРС з однорідною комутацією;
- встановлено співвідношення для визначення параметрів елементів ланок комутаційного захисту ключів НП БСЖ ЕРС з однорідною комутацією.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- запропоновано методику розрахунку параметрів базової схеми нового НК, застосування якого в комутаторах з однорідною комутацією другого роду забезпечує високі енергетичні та динамічні характеристики НП БСЖ ЕРС;
- доопрацьовано структурну схему НП для БСЖ електровозів постійного струму, який має понижені комутаційні втрати в НК за рахунок використання однорідної комутації;
- розроблено та запропоновано до впровадження методику проектування схем НП з пониженими комутаційними втратами для БСЖ ЕРС;

а) вибору структури автономних перетворювачів з проміжною ланкою підвищеної частоти з однорідною комутацією та роду комутації, що використовують в їх комутаторах;

б) розрахунку вузлів комутаційного захисту НК при однорідній комутації;

в) розрахунку демпфуючих ланцюгів, що забезпечують динамічну стійкість НП з однорідною комутацією.

Результати дисертації використовуються в науково-дослідних роботах в НТУ "ХП" та в Інституті електродинаміки НАН України по створенню БСЖ для вітчизняних магістральних електровозів постійного струму, а також в навчальному процесі Української державної академії залізничного транспорту при викладанні дисципліни "Тягові статичні перетворювачі ЕРС" та дипломному проектуванні студентів спеціальності "Електричний транспорт", що підтверджено відповідними актами про впровадження.

Особистий внесок здобувача у роботах по темі дисертації опублікованих із співавторами. Автору дисертації особисто належать:

- в роботі [1] – аналіз характеристик перетворювача з однорідною комутацією та трансформатором, осердя якого насичується у перебігу роботи;
- в роботах [3, 6] – співвідношення основних параметрів базової схеми нового НК для перетворювачів з однорідною комутацією;
- в роботі [5] – методика розрахунку та структури демпфуючих ланцюгів, що забезпечують динамічну стійкість перетворювачів з однорідною комутацією.

В інших спільних роботах внесок авторів однаковий.

Апробація результатів дисертації. В повному обсязі результати роботи доповідались на засіданнях кафедри «Системи електричної тяги» УкрДАЗТ та кафедри «Промислова та біомедична електроніка» НТУ «ХП» у 2002 році. Окремі розділи роботи доповідались на науково-технічних радах в НВО ДЕВЗ (Дніпропетровськ, 1998р.). Основні результати роботи доповідались на:

- міжнародній науково-технічній конференції «Силова електроніка у вирішенні проблем ресурсо- та енергозбереження», Харків, 1996р.;
- семінарі Наукової Ради НАН України «Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах транспорту» з комплексних проблем «Наукові основи електроенергетики» в 1998-2002 роках;
- щорічних науково-технічних конференціях кафедр Української державної академії залізничного транспорту в 1994-2002 роках.

Публікації. По матеріалам дисертації опубліковано дев'ять робіт, із яких шість у виданнях, рекомендованих ВАК України для публікації основних результатів дисертацій, а три є тезами доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 109 найменувань і 2 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 179 сторінок, із них 145 сторінок основного тексту, 17 сторінок з ілюстраціями, 11 сторінок списку використаних джерел та 6 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету і завдання дослідження, а також викладено методи дослідження, наукову новизну, практичне значення результатів дисертації, наведено відомості про апробацію та публікації.

У розділі 1 проведено аналіз схемотехнічних способів поліпшення умов комутації ключів НП БСЖ ЕРС, які дозволяють знизити комутаційні втрати, підвищити частоту перетворення електроенергії, покращити питомі енергетичні характеристики.

НК на базі транзисторів з польовим керуванням IGBT і MOSFET можна захищати від комутаційних перевантажень обмеженням швидкості наростання і амплітуди струму та напруги під час комутації засобами керування – збільшенням тривалості фронтів переключення. Але формування таким способом необхідних комутаційних траєкторій веде до значного зростання комутаційних втрат в силових транзисторах ключів, що обмежує їх навантажувальні можливості та збільшення частоти ШІМ.

Щоб зменшити комутаційні втрати в силових напівпровідникових приладах ключів при виконанні примусових комутацій, застосовують ланцюги комутаційного захисту – снабери. До складу схем снаберів входять реактивні елементи – конденсатори та дроселі, які забезпечують зниження швидкості зростання напруги du/dt при вимкненні НК (ємнісні снабери) або струму di/dt при ввімкненні НК (індуктивні снабери), приймаючи на себе енергію комутаційних перевантажень. Енергія, що накопичується в реактивних елементах снаберів, потім розсіюється в резисторах або скидається спеціальними ланками бездисипативних снаберів в джерело живлення чи в навантаження. Таке традиційне рішення, особливо в схемах високовольтних НП, якими є НП БСЖ ЕРС постійного струму, приводить до значних втрат електроенергії в снаберах та ускладнення силової схеми і конструкції.

Інший спосіб поліпшення умов комутації НК полягає в застосуванні схем НП з виключно природною комутацією ключів у них, коли комутаційні втрати практично відсутні. Такі НП, створені на базі резонансних інверторів або тиристорно-конденсаторних ключових переривачів, мають додаткові елементи, що забезпечують коливальний характер струму і, тим самим, природну комутацію ключів – елементи резонансних контурів і комутуючі конденсатори. Установлена потужність цих елементів досить велика, вона перевищує навіть потужність навантаження. Крім цього у таких НП досить несприятливе

співвідношення середніх, діючих і амплітудних значень струму та напруги на елементах схеми. Все це обмежує застосування НП на базі резонансних інверторів або тиристорно-конденсаторних ключових переривачів у БСЖ ЕРС.

Показано, що полегшити умови роботи силових НК автономних перетворювачів БСЖ ЕРС зменшенням комутаційних втрат у них, запобігти втратам в ланках комутаційного захисту НК, якщо вони застосовуються, та спростити їх можна завдяки використанню в комутаторах НП режиму однорідної комутації. В режимі однорідної комутації НК комутатора на періоді процесу перетворення електроенергії виконують примусову комутацію тільки одного роду (тільки примусове ввімкнення або тільки примусове вимкнення), а друга комутація є природною. Якщо ж операції примусового ввімкнення та примусового вимкнення в комутаторі чергуються, то такий режим називається неоднорідною комутацією. Можна виділити однорідну комутацію першого роду, коли ввімкнення примусові та вимкнення природні, а також однорідну комутацію другого роду, коли ввімкнення природні та вимкнення примусові.

Виявлено, що оскільки при однорідній комутації одна з двох комутацій на періоді процесу перетворення енергії природна, то її виконання не потребує ніяких додаткових засобів для формування комутаційної траєкторії, які підвищують комутаційні втрати. Якщо для полегшення другої (примусової) комутації застосовують снабери, то вони суттєво простіші, ніж при неоднорідній комутації – індуктивні при однорідній комутації першого роду і ємнісні при однорідній комутації другого роду. Не потрібні елементи поглинання або повернення енергії, що накопичується в реактивних елементах снаберів, адже ця енергія безпосередньо з використанням основних схемних елементів повертається в електричну ланку до наступної комутації, яка є природною. Показано, що в деяких випадках такі бездисипативні снабери при однорідній комутації можуть бути суміщені з реактивними елементами, які вже є в схемі, наприклад, індуктивністю розсіяння трансформатора. Все це забезпечує спрощення силової схеми НП, зменшення втрат при комутації в НК та снаберах і підвищення частоти перетворення, чим покращуються питомі енергетичні характеристики, підвищується коефіцієнт корисної дії і знижується вартість БСЖ ЕРС та експлуатаційні витрати.

НП БСЖ, які вже впроваджено на вітчизняному ЕРС постійного струму, побудовані на базі напівмостових інверторів напруги з некерованими вихідними випрямлячами. Це стосується розробок НП БСЖ для вітчизняних магістральних електровозів типу ДЕ1 та НП бортової мережі електропоїздів метрополітенів російського виробництва. НК напівмостових інверторів напруги в обох випадках виконано на IGBT, що забезпечує досить високі енергетичні характеристики БСЖ. Але вони працюють в безснаберному режимі з неоднорідною комутацією, що веде до значного зростання комутаційних втрат в силових транзисторах ключів і обмежує їх навантажувальні можливості. Встановлено, що труднощі, пов'язані з неоднорідністю комутації ключів, виникають також і в інших традиційних схемах НП з ШІМ, наприклад, в прямоходовому, зворотногоходовому та інших.

Показано, що для використання переваг однорідної комутації необхідно будувати структури НП та алгоритми керування роботою НК дещо інакше. Один із способів отримання режиму однорідної комутації полягає в розподіленні комутацій різного роду між комутаторами первинних та вторинних ланок НП. Наприклад, як показано в дисертації, між інвертором напруги на двоопераційних ключах первинної ланки, де реалізується однорідна комутація другого роду, та керованими випрямлячами на одноопераційних тиристорах вторинної ланки НП, де реалізується однорідна комутація першого роду. Широке регулювання напруги на виході при такому розподіленні комутацій забезпечується шляхом зсуву між інтервалами ввімкненого стану ключів в комутаторах первинної та вторинної ланок НП.

Розділ 2 присвячено дослідженню НК для схем автономних НП з однорідною комутацією БСЖ ЕРС. Такі НК при однорідній комутації другого роду, як було сказано вище, можна захищати від комутаційних перевантажень бездисипативними ємнісними снаберами. Показано, що струм неперіодичного розряду захисних конденсаторів можна обмежувати дроселями, а при невеликій потужності, що циркулює в ємнісних снаберах, (до 1 кВА) в якості струмообмежуючих елементів пропонується використовувати низькоомні дровові резистори. Струмообмежуючі дроселі снаберів можуть одночасно використовуватись і як лінійні для захисту НК від струмових перевантажень.

Встановлено, що при однорідній комутації за рахунок невикористання примусової комутації протилежного роду доцільно застосовувати НК з внутрішнім зворотним зв'язком, який утримує його в одному із двох стійких станів “ввімкнено” або “вимкнено”. Цим запобігається можливість тривалого знаходження напівпровідникового приладу ключа в проміжному активному режимі, що підвищує надійність його роботи. Наявність внутрішнього зворотного зв'язку в НК при однорідній комутації прискорює виконання примусової комутації за рахунок сповільнення природної комутації, що забезпечує зниження комутаційних втрат.

До таких НК слід віднести тиристорні ключі, застосовувати які найбільш доцільно в схемах комутаторів з природним вимкненням (керовані випрямлячі, ведені інвертори, БПЧ) при однорідній комутації першого роду, де внутрішній зворотний зв'язок в НК прискорює примусове ввімкнення. В таких комутаторах для зменшення втрат при ввімкненні та спрощення формувача імпульсів керування ключі НП ЕРС доцільно реалізовувати на одноопераційних тиристорах з розгалуженим електродом та внутрішнім підсиленням сигналу керування. В роботі показано, що в НП БСЖ ЕРС при реалізації однорідної комутації другого роду найбільш прийнятними є тиристорні ключі на базі двоопераційних тиристорів, що комутується по електроду керування (IGCT).

Наявність внутрішнього зворотного зв'язку в тиристорному ключі при виконанні примусового вимкнення знижує швидкодію та потребує потужного сигналу керування, тому при однорідній комутації другого роду краще мати НК дуальний тиристорному з внутрішнім зворотним зв'язком, який прискорює

вимкнення. Цей НК повинен мати вольтамперну характеристику схожу на вольтамперну характеристику тиристора, але при умові заміни осі напруги на вісь струму i навпаки. Він працює дуально тиристорі, вимикаючись при досягненні струму переключення $i_{пер}$ та повертаючись у ввімкнений стан при зниженні напруги на ньому до напруги утримання u_0 (рис.1).

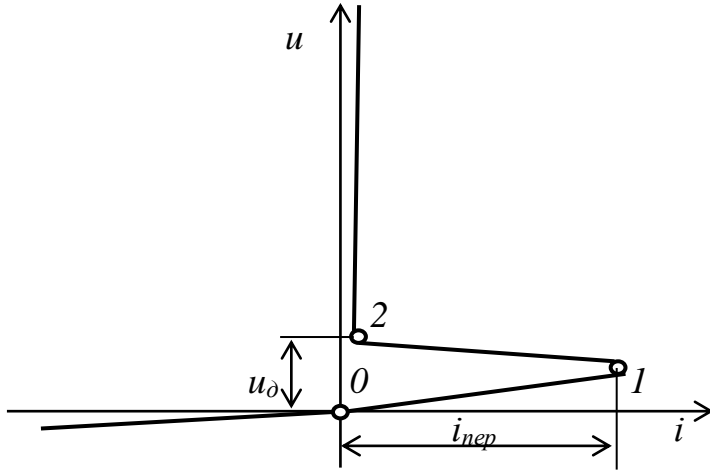


Рис.1. Вольтамперна характеристика НК

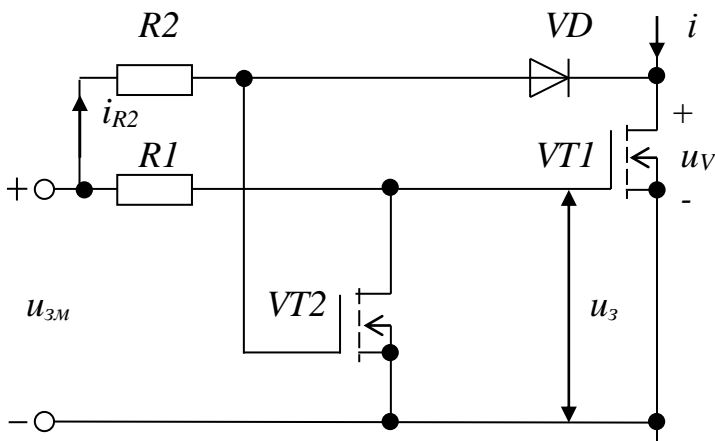


Рис.2. Базова схема анистора

порогової напруг на затворі транзистора $VT1$;

K_k – відносна частина падіння напруги на каналі транзистора $VT1$ при номінальному струмі та номінальній u_3 (межова величина $K_k = 0,2$);

u_{V1} – напруга на $VT1$ в точці 1 вольтамперної характеристики.

Це забезпечує зменшення падіння напруги на активному відрізьку 12 характеристики, а максимум струму НК при цьому відповідає струму переключення. Щоб не було динамічного запізнення переключення анистора, струм зміщення i_{R2} необхідно вибирати за співвідношенням

$$i_{R2} \geq \frac{C_k u_{V1}}{t_{зп}}, \quad (2)$$

де C_k – ємність ланки затвора транзистора керування $VT2$;

характеристику має λ -діод, який застосовується у засобах інформаційної електроніки, а в роботі розглядається новий НК для використання в силових схемах НП, який названо анистором. Його базова схема на силовому n -канальному польовому транзисторі $VT1$ представлена на рис.2. Цей НК перепадає у вимкнений стан та повертається у стан провідності за рахунок внутрішнього зворотного зв'язку через сигнал напруги на силовому транзисторі u_V .

Дослідження вольтамперної характеристики анистора показало, що необхідно приймати величину добутку $(R1g_k)$ більшою межової

$$R1g_k = \Delta u_{зп} / K_k u_{V1}, \quad (1)$$

де $R1$ – опір резистора $R1$;

g_k – крутизна характеристики керування транзистора $VT2$;

$\Delta u_{зп}$ – різниця номінальної та

$t_{зр}$ – час зростання струму анистора від 0 до $i_{пер}$.

Анисторні НК мають високі частотні властивості, а також малі комутаційні втрати при однорідній комутації другого роду та високу надійність за рахунок виключення можливості стійкого активного режиму і самозахисту від струмових перевантажень.

Розділ 3 присвячено розробці НП з однорідною комутацією БСЖ ЕРС.

Для аналізу енергетичних процесів, що відбуваються в НП при комутації та синтезу нових схем, комутатори яких працюють в режимі однорідної комутації, доцільно використовувати нову енергетичну характеристику, яку названо потужністю комутації. Вона визначається як приріст електричної потужності елемента, який спричинено зміною провідності елемента, тобто комутацією. З використанням цього поняття можна сказати, що при однорідній комутації НК комутатора генерується потужність комутації тільки одного знаку.

Проведено аналіз структури автономного НП, комутатори якого працюють в режимі однорідної комутації та поєднані між собою багатообмоточним трансформатором, що накладає певні обмеження на структуру та рід комутації в них:

- 1) тільки один з комутаторів повинен мати малий вхідний опір при однорідній комутації другого роду, тобто виконуватись на двоопераційних НК;
- 2) інші комутатори повинні мати великий вхідний опір при однорідній комутації першого роду і можуть виконуватись на одноопераційних НК.

Крім розглянутого в першому розділі першого способу отримання однорідної комутації, з урахуванням вище сказаного, запропоновано другий спосіб, який полягає в тому, що для спрощення та здешевлення інвертор первинної ланки НП БСЖ ЕРС постійного струму реалізовано на одноопераційних тиристорах (інвертор струму), а реалізацію однорідної комутації другого роду покладено на одну із вторинних, так звану ведучу ланку (випрямляч струму), яку реалізовано на двоопераційних НК. Інші комутатори вторинної ланки (керовані випрямлячі) при цьому виконують однорідну комутацію першого роду та можуть реалізовуватись на одноопераційних НК. На жаль в такій схемі можуть виникати труднощі з надійною комутацією НК інвертора під час пуску при неповному заряді конденсаторів фільтра ведучої ланки, потрібні також додаткові тиристри в інверторі при рекуперації енергії з навантаження (з обмоток збудження ТЕД).

Тому для реалізації НП БСЖ ЕРС постійного струму пропонується використовувати структуру зображену на рис.3 з автономним інвертором напруги (АІН) на двоопераційних ключах первинної ланки з однорідною комутацією другого роду та керованими випрямлячами (В1) на одноопераційних тиристорах вторинної ланки НП, де реалізується однорідна комутація першого роду. При застосуванні у вторинній ланці некерованих випрямлячів (В2) послідовно з діодами слід включити дроселі насичення, щоб не створювати навантаження на НК інвертора АІН в момент їх ввімкнення, зберігаючи тим самим в них режим однорідної комутації.

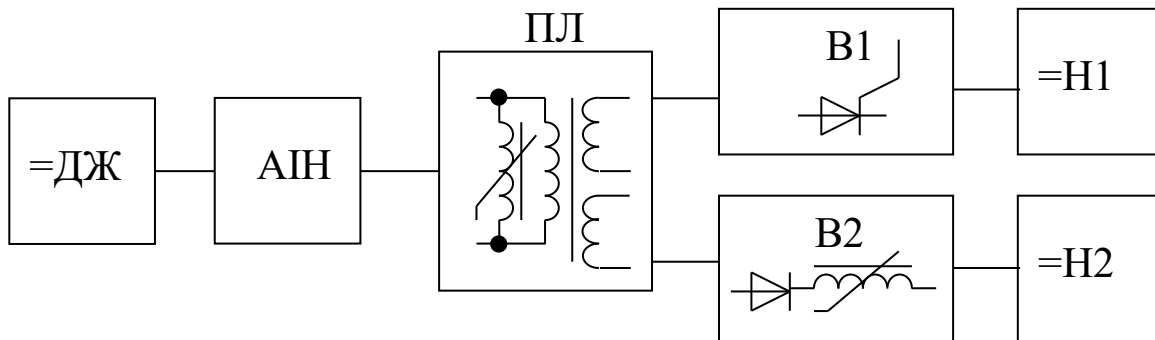


Рис.3. Базова структура НП БСЖ ЕРС постійного струму

При малому вихідному струмові інвертора негативну потужність комутації снаберних конденсаторів для збереження однорідної комутації в НК необхідно компенсувати. Це реалізується за рахунок збільшення струму намагнічування трансформатора (генерації додаткової позитивної потужності комутації) введенням немагнітного зазору в осерді, використанням насичення осердя трансформатора або застосуванням спеціального дроселя насичення в проміжній ланці (ПЛ), як показано на рис.3. Цим саме й відрізняється третій спосіб отримання однорідної комутації від першого.

Таким чином, однорідна комутація досягається за рахунок випередження комутації в одній із ланок перетворювача (в АН на рис.3) з одночасним її запізнюванням у решти ланок шляхом зсуву моменту подачі сигналів керування ключами або введенням елементів затримки. Слід підкреслити, що однорідна комутація реалізується тільки при одночасному використанні всіх додаткових елементів структури рис.3.

На основі базової структури розроблено структурну схему НП з однорідною комутацією БСЖ електровоза постійного струму, де реалізується третій спосіб отримання однорідної комутації (введенням немагнітного зазору в осерді трансформатора). Первинна ланка НП БСЖ виконана на базі трьохрівневого інвертора напруги з фіксуючими діодами, який реалізовано на двоопераційних НК IGCT.

В розділі 4 розглянуто динамічну стійкість НП з однорідною комутацією, яка реалізується насиченням осердя трансформатора. Причиною динамічної нестійкості таких НП є параметрична стабілізація вихідної напруги u_d . Підтримуючи постійну потужність p_d при незмінному навантаженні, такий НП, підключений паралельно вхідному LC- фільтру, збуджує в ньому коливання з резонансною частотою цього контуру.

$$\text{Із } p_d = u_d i_d = \text{const}$$

$$\text{витікає } u_d di_d + du_d i_d = 0$$

$$\text{або } g_d = \frac{di_d}{du_d} = -\frac{i_d}{u_d} = -g_{cm}, \quad (3)$$

де i_d – вихідний струм НП;

g_d та g_{cm} – диференційна та статична провідність НП відносно входу комутатора.

Як видно із рівняння (3) диференційна провідність негативна, що створює ефект зворотний демпфуванню коливань, тобто така система веде себе як генератор із самозбудженням. Аналіз перехідних процесів в НП з однорідною комутацією, яка реалізується насиченням осердя трансформатора, при відхиленні від періодичного режиму методом фазової площини підтвердив динамічну нестійкість такої системи.

Диференційна провідність за формулою (3) враховує усередненні миттєві значення струму та напруги, що приводить до значної похибки особливо при малоінерційному фільтрові. З використанням першого методу Ляпунова отримано точне співвідношення для визначення відносної диференційної провідності з урахуванням дискретності сигналів, яке необхідне для розрахунку вузлів, що забезпечують динамічну стійкість НП

$$g_d = -\frac{1}{T_n} \ln \left(1 + \frac{i_e}{u_d} \sin \alpha \right), \quad (4)$$

де T_n – тривалість періоду роботи перетворювача;

i_e – вхідний струм комутатора перетворювача;

u_d – напруга на вході комутатора перетворювача;

α – інтервал ввімкненого стану ключа.

Порівняння залежностей диференційної провідності рис.4, визначених за

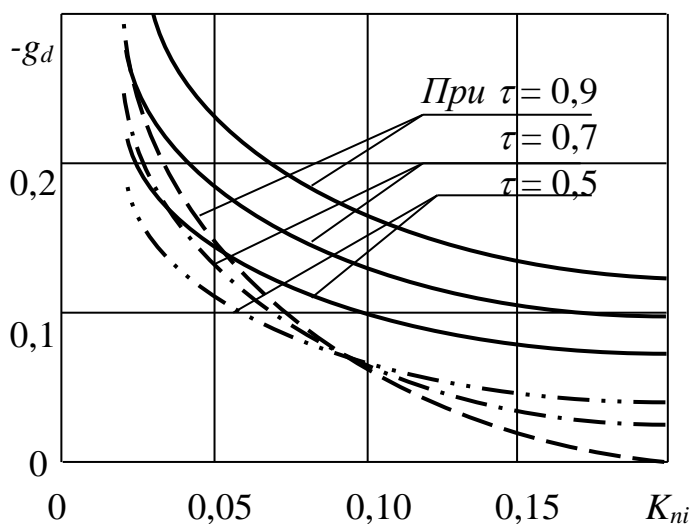


Рис.4. Залежність диференційної провідності, визначеної за точною (4) та приблизною (3) формулою

приблизною (зображено неперервними лініями) та точною (зображено перервними лініями) формулами, показало, що ці залежності близькі тільки при інерційному фільтрові, коли $K_{ni} \rightarrow 0$. При малоінерційному фільтрові розходження стає досить відчутним (за точною формулою диференційна провідність менша) і навіть в деяких випадках формула (3) може давати принципово невірний результат. Наприклад, при $K_{ni} = 0,2$ та $\tau = 0,9$ система стійка ($g_d > 0$),

в той же час за приблизною формулою (3) вона далека від цього.

Для забезпечення динамічної стійкості НП з однорідною комутацією БСЖ ЕРС пропонується застосовувати структури вхідного LC-фільтру з

демпфуючими RC - та RLC - ланцюгами, ввімкненими паралельно конденсатору фільтра. Встановлено, що при використанні демпфуючого RC - ланцюга мінімум ємності конденсатора відповідає умові, коли активна та реактивна провідності рівні одна одній і дорівнюють, кожна, подвоєній активній провідності, яку необхідно забезпечити на вході комутатора НП для компенсації негативної диференційної провідності. Указані результати було підтверджено перевіркою за допомогою комп'ютерного моделювання.

Як показують дослідження, втрати потужності в демпфуючому ланцюгові складають лише 0,1...1% номінальної потужності НП, що можна вважати допустимим. Показано, що використання резонансного демпфуючого RLC -ланцюга дозволяє зменшити в 5...16 разів ємність конденсатора в порівнянні з аперіодичним RC - ланцюгом, але потрібен ще додатковий елемент – дросель.

Розділ 5 присвячено розрахунку параметрів та фізичному моделюванню вузлів НП з однорідною комутацією БСЖ.

Запропоновано методика розрахунку захисних конденсаторів та струмообмежуючих дроселів снаберів НК схем НП з однорідною комутацією БСЖ ЕРС, яка враховує специфічні умови їх роботи. Встановлено, що для обмеження розмірів струмообмежуючих дроселів необхідно забезпечити швидкодію спрацювання захисту НК таких схем на рівні не більше половини часу роботи захисних конденсаторів при вимкненні НК.

Як було сказано вище, в деяких схемах НП БСЖ з однорідною комутацією при невеликих реактивних потужностях, які циркулюють в ємнісних снаберах, можливе застосування малоіндуктивних струмообмежуючих елементів – дровових низькоомних резисторів. Така заміна вигідна, адже резистори значно простіші та дешевші від дроселів, а втрати в таких снаберах складуть лише 5...10% від втрат в традиційних RCD -снаберах.

При високих потужностях НП, коли в снаберах циркулює потужність більше 1кВА, рекомендується застосовувати повітряні дроселі. Показано, що з урахуванням умов застосування в НП ЕРС залізниць для мінімізації маси та габаритних розмірів доцільно використовувати котушки дроселів з квадратним перерізом при співвідношенні діаметра до висоти як 3:1. При цьому абсолютну величину висоти котушки a необхідно визначати за умовами нагріву

$$a = \sqrt[4]{\frac{\rho}{2\mu_0 d^* \gamma_k \alpha \tau_n}} LI^2, \quad (5)$$

де ρ – питомий опір провідникового матеріалу;

$d^* = d / a$ – відносний діаметр котушки, $\gamma = \ln 8d^* - 1,75$;

k_k – коефіцієнт заповнення котушки;

α – коефіцієнт тепловіддачі;

τ_n – допустимий нагрів поверхні котушки,

після чого необхідно перевірити його за умовами постійної часу $\tau = \frac{L}{R}$

$$a = \sqrt{\frac{2\rho\tau}{\mu_0\gamma k_k}}. \quad (6)$$

Результати фізичного моделювання на масштабних макетних зразках НП підтвердили можливість реалізації в схемах перетворювачів БСЖ режиму однорідної комутації, що забезпечує низькі комутаційні втрати в НК.

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертації та порівняльні розрахунки застосування режиму однорідної комутації у НП БСЖ магістральних електровозів постійного струму вітчизняного виробництва. Як показали розрахунки, комутаційні втрати в НК, виконаних на IGBT типу FZ600R65KF1 фірми EUPEC, при однорідній комутації з бездисипативними снаберами у напівмостовому трьохрівневому інверторі напруги з фіксуючими діодами знижуються на 58% у порівнянні із безснаберним варіантом НК або на 64% у порівнянні із варіантом НК з традиційним *RCD*-снабером.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі автором запропоновані шляхи поліпшення характеристик бортових систем живлення електрорухомого складу на основі покращення комутаційних характеристик автономних напівпровідникових перетворювачів цих систем при застосуванні однорідної комутації напівпровідникових ключів.

1. Виконано аналіз способів поліпшення характеристик НП БСЖ ЕРС шляхом використання відомих схемних рішень, призначених для зниження комутаційних втрат в НК перетворювачів, який показав, що вони приводять до ускладнення силової схеми та збільшення втрат в ланцюгах комутаційного захисту. Встановлено, що комутаційні втрати в НК значно знижують коефіцієнт корисної дії та не дозволяють піднімати робочу частоту в НП БСЖ ЕРС постійного струму для поліпшення масо-енергетичних характеристик. Для поліпшення характеристик НП з проміжною ланкою підвищеної частоти БСЖ ЕРС шляхом зниження комутаційних втрат запропоновано використовувати режим однорідної комутації, при якому одна з комутацій на періоді процесу перетворення енергії природна, а друга примусова. Якщо при цьому застосовуються ланцюги комутаційного захисту НК, то досягається їх спрощення та зменшення маси і габаритних розмірів, не потрібні також елементи розсіяння або повернення до джерела живлення енергії, накопиченої реактивними елементами цих ланцюгів.
2. Виконано аналіз параметрів НК для НП БСЖ ЕРС. Показано, що при однорідній комутації доцільно застосовувати НК з внутрішнім зворотнім

зв'язком, який утримує його в одному із станів “ввімкнено” або “вимкнено” і попереджує, тим самим, можливість знаходження в проміжному (активному) режимі. Встановлено, що в схемах НП ЕРС при реалізації однорідної комутації першого роду краще використовувати НК на одноопераційних тиристорах з розгалуженим електродом та внутрішнім підсиленням сигналу керування, а при реалізації однорідної комутації другого роду найбільш прийнятними з тиристорів є тиристири, що комутується по електроду керування (GCT). Досліджено також статичні та динамічні характеристики базової схеми нового НК, дуального по своїм властивостям тиристору, який названо анистором. Такий НК за рахунок внутрішнього зворотного зв'язку, який прискорює вимкнення, має малі комутаційні втрати, високу надійність та забезпечує самозахист від струмових перевантажень без додаткових елементів і призначено для переважного використання в режимі однорідної комутації другого роду.

3. Показано, що для аналізу енергетичних явищ в НП доцільно користуватись новою енергетичною характеристикою – потужністю комутації. Для отримання в НП режиму однорідної комутації НК комутатора повинна генеруватись потужність комутації одного знаку, а джерела потужності комутації протилежного знаку повинні розміщуватись за межами схеми комутатора.
4. Доопрацьовано методологію використання однорідної комутації в частині вибору структури НП з проміжною ланкою підвищеної частоти з однорідною комутацією. Встановлено, що при організації режиму однорідної комутації в НП наявність трансформатора в проміжній ланці підвищеної частоти накладає ряд обмежень на вибір структури та роду комутації: тільки один комутатор повинен виконуватись з малим вхідним опором при однорідній комутації другого роду на двоопераційних НК; інші комутатори повинні мати великий вхідний опір при однорідній комутації першого роду і можуть виконуватись на одноопераційних НК. На основі цих принципів доопрацьовано структуру НП БСЖ ЕРС постійного струму з однорідною комутацією ключів.
5. Визначено, що отримати однорідний режим комутації можна розподіленням комутацій різного роду між первинними та вторинними ланками НП. Застосування однорідної комутації другого роду в одній із вторинних ланок дозволяє інші комутатори використовувати при однорідній комутації першого роду, що спрощує інвертор первинної ланки, оскільки він може бути реалізований на одноопераційних тиристорах. Третій спосіб отримання однорідної комутації полягає в тому, що генерація позитивної потужності комутації для компенсації негативної потужності комутації первинної ланки при малому навантаженні покладається на трансформатор проміжної ланки з немагнітним зазором в осерді, з насиченням осердя або на спеціальний дросель насичення в проміжній ланці. Розроблено структурну схему НП з однорідною комутацією БСЖ електровоза постійного струму, де реалізується третій спосіб отримання однорідної комутації (введенням

немагнітного зазору в осерді трансформатора). Згідно проведених досліджень комутаційні втрати в НК, виконаних на IGBT, при однорідній комутації з бездисипативними снаберами у напівмостовому трьохрівневому інверторі напруги з фіксуєчими діодами указанного вище НП знижуються на 58% у порівнянні із безснаберним варіантом НК або на 64% у порівнянні із варіантом НК з традиційним *RCD*-снабером.

6. Виконано аналіз динамічної стійкості НП з однорідною комутацією. Показано, що причиною динамічної нестійкості НП з однорідною комутацією, реалізованою насиченням осердя трансформатора, є властивість параметричної стабілізації вихідної напруги. Підтримуючи постійну потужність при незмінному навантаженні, такий НП, підключений паралельно коливальному контуру, збуджує в ньому коливання з резонансною частотою цього контуру. Для забезпечення динамічної стійкості НП з однорідною комутацією БСЖ ЕРС запропоновано структури вхідного *LC*-фільтру з демпфуючими *RC*- та *RLC*-ланцюгами, втрати в яких не перевищують 1% номінальної потужності НП. Отримано уточнену формулу для визначення диференційної провідності таких НП, необхідну для визначення параметрів елементів демпфуючих ланцюгів.
7. Запропоновано методику розрахунку параметрів конденсаторів та струмообмежуючих дроселів ланцюгів комутаційного захисту ключів НП БСЖ ЕРС з однорідною комутацією.
8. Достовірність теоретичних розробок і можливість практичної реалізації схем НП з однорідною комутацією для створення на їх основі БСЖ ЕРС залізниць підтверджена комп'ютерним та фізичним моделюванням. Результати дисертації використовуються в науково-дослідних роботах в НТУ "ХП" та в Інституті електродинаміки НАН України по створенню БСЖ для вітчизняних магістральних електровозів постійного струму, а також в навчальному процесі Української державної академії залізничного транспорту при викладанні дисципліни "Тягові статичні перетворювачі ЕРС" та дипломному проектуванні студентів спеціальності "Електричний транспорт", що підтверджено відповідними актами про впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Семененко А.И., Яцко С.И., Никитин А.В., Чумак В.В. Связи между энергетическими явлениями при коммутации в полупроводниковых преобразователях // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. Харьков, 1997. №3. - С. 64-69.
2. Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Семененко А.И., Чумак В.В. Источники питания с однородной коммутацией для устройств автоматизации управления электровозом // Сборник трудов ХГАЖТ. Выпуск 28. Харьков, 1997. - С. 9-17
3. Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Семененко А.И., Ересько А.В., Родин Н.Ю. Новая полупроводниковая структура для исполнения однородной

- коммутации // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Харків: ХарДАЗТ, 2000. № 3. - С. 22 - 27.
4. Гончаров Ю.П., Панасенко М.В., Семененко О.І. Бортові системи електроживлення для ЕРС // Збірник наукових праць ХарДАЗТ. Випуск 39. Харків, 2000. - С. 6-10.
 5. Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Семененко А.И., Чумак В.В. Применение силовых демпфированных фильтров в преобразователях бортовых систем электроснабжения транспортных средств // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - Харьков, 1996. № 6. – С.19-20.
 6. Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Ересько А.В., Ивахно В.В., Семененко А.И. Силовые полупроводниковые ключи с внутренней обратной связью, действующей на выключение // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ – 2000. №106 – С. 67-74.
 7. Семененко О.І. Первинний перетворювач напруги бортової системи електропостачання електровоза постійного струму // Тези доповідей 57 науково-технічної конференції кафедр академії та спеціалістів залізничного транспорту за міжнародною участю. – Харків: ХарДАЗТ, 1995. – С. 21.
 8. Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Семененко А.И., Маслов В.И., Чумак В.В. К вопросу о классификации видов коммутации в полупроводниковых преобразователях и энергетических характеристиках коммутационного процесса // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Силовая электроника в решении проблем ресурсо- и энергосбережения». Харьков, 1996. - С. 68-69.
 9. Семененко О.І. Використання режиму однорідної комутації в перетворювачах з проміжною ланкою підвищеної частоти. Тези доповідей 63 науково-технічної конференції кафедр академії та спеціалістів залізничного транспорту за міжнародною участю // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. Харків: ХарДАЗТ, 2001. № 5. - С. 119.

АНОТАЦІЇ

Семененко О.І. Поліпшення характеристик бортових систем живлення електрорухомого складу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.22.09 – «Електротранспорт». Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2003.

В дисертації розглянуто шляхи поліпшення характеристик бортових систем живлення електрорухомого складу. Для вирішення цієї задачі запропоновано напівпровідникові ключі та структури напівпровідникових перетворювачів таких бортових систем з пониженими комутаційними втратами за рахунок використання в комутаторах режиму однорідної комутації.

Встановлено основні співвідношення параметрів базової схеми нового напівпровідникового ключа із внутрішнім зворотним зв'язком, який забезпечує

високі динамічні та енергетичні характеристики при використанні ключа в комутаторах з однорідною комутацією другого роду. На основі розробленої методології вибору структури перетворювачів з однорідною комутацією доопрацьовано структурну схему напівпровідникового перетворювача бортової системи живлення магістральних електровозів постійного струму. Запропоновано уточнену формулу для визначення диференційної провідності напівпровідникових перетворювачів бортових систем живлення з однорідною комутацією, необхідну для розрахунку параметрів елементів демпфуючих ланцюгів, які забезпечують динамічну стійкість перетворювачів. Для напівпровідникових ключів при однорідній комутації пропонується використовувати бездисипативні ланцюги комутаційного захисту, розроблено методику розрахунку параметрів елементів цих ланцюгів.

Ключові слова: бортова система живлення, електрорухомий склад, напівпровідниковий перетворювач, однорідна комутація, ключ із внутрішнім зворотним зв'язком, динамічна стійкість, демпфуючі ланцюги.

Семененко А.И. Улучшение характеристик бортовых систем питания электроподвижного состава. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – «Электротранспорт». Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2003.

В диссертации рассмотрены пути улучшения характеристик бортовых систем питания электроподвижного состава. Для решения поставленной задачи предложено использовать в полупроводниковых преобразователях бортовых систем питания режим однородной коммутации ключей, что обеспечивает уменьшение коммутационных потерь в них и упрощение их цепей коммутационной защиты (снабберов), если они применяются, поскольку не нужны цепи рассеяния или возврата в источник питания энергии, запасаемой реактивными элементами снабберов. Следовательно, при однородной коммутации снабберы могут быть бездисипативными и состоять только из реактивных элементов либо их функцию могут выполнять уже имеющиеся в схеме реактивные элементы (индуктивность рассеяния трансформатора и т. п.).

Показано, что при однородной коммутации целесообразно использовать ключи с внутренней обратной связью, удерживающей их во включенном или выключенном состоянии и не допускающей длительного нахождения в промежуточном (активном) состоянии, чем повышается их надежность. Для схем преобразователей электроподвижного состава с естественным выключением и принудительным включением (при однородной коммутации первого рода) рекомендуется применять ключи на однооперационных тиристорах, для схем с естественным включением и принудительным выключением (при однородной коммутации второго рода) наиболее приемлемым типом тиристора есть GCT. Предложены соотношения для расчета основных параметров базовой схемы нового полупроводникового ключа

дуального тиристоры, названного анистором, с внутренней обратной связью, ускоряющей выключение. Этим обеспечиваются высокие динамические и энергетические характеристики ключа при использовании его в коммутаторах с однородной коммутацией второго рода, а также токовая самозащита без специальных дополнительных элементов.

Для анализа энергетических явлений в преобразователях целесообразно использовать новую энергетическую характеристику – мощность коммутации. С учетом этой характеристики можно сказать, что при однородной коммутации в коммутаторе ключами генерируется мощность коммутации только одного знака, а источники мощности коммутации противоположного знака должны размещаться вне этой схемы. Предложены способы получения однородной коммутации в преобразователях с промежуточным звеном повышенной частоты бортовых систем питания электроподвижного состава:

- разделением коммутаций разного рода между первичными и вторичными звеньями преобразователя;
- применением однородной коммутации второго рода в одном из вторичных звеньев, что позволяет реализовать входной инвертор на однооперационных приборах;
- применением трансформатора промежуточного звена с немагнитным зазором или насыщающимся сердечником для генерации необходимой для сохранения однородности коммутации мощности коммутации положительного знака.

Установлено, что при организации режима однородной коммутации наличие многообмоточного трансформатора в промежуточном звене повышенной частоты преобразователя накладывает ряд ограничений на выбор структуры и рода коммутации: только один из коммутаторов должен исполняться с малым входным сопротивлением при однородной коммутации второго рода на двухоперационных приборах, а остальные коммутаторы должны иметь большое входное сопротивление при однородной коммутации первого рода и могут выполняться на однооперационных приборах. На основании разработанных принципов предложена структура преобразователей с однородной коммутацией бортовых систем питания электроподвижного состава постоянного тока и доработана структурная схема преобразователя бортовой системы питания магистральных электропоездов постоянного тока, построенная на базе полумостового трехуровневого инвертора напряжения с фиксирующими диодами.

Показано, что причиной динамической неустойчивости автономных преобразователей с однородной коммутацией, реализуемой насыщением сердечника трансформатора, является свойство, которое заключается в параметрической стабилизации выходного напряжения, а, значит, и мощности при постоянной нагрузке. Предложены структуры, а также методика расчета параметров элементов демпфирующих RC - и RLC - цепей, которые обеспечивают динамическую устойчивость полупроводниковых преобразователей бортовых систем питания с однородной коммутацией.

Для бездиссипативных цепей коммутационной защиты полупроводниковых ключей при однородной коммутации разработана методика расчета параметров их элементов. Показано, что токоограничивающие дроссели таких емкостных снабберов при мощностях выше 1кВА, циркулирующих в них, необходимо изготавливать воздушными, а при меньших мощностях их можно заменять низкоомными проволочными резисторами.

Достоверность теоретичних разработок и возможность практической реализации схем полупроводниковых преобразователей с однородной коммутацией для создания на их основе бортовых систем питания электроподвижного состава подтверждена компьютерным и физическим моделированием.

Ключевые слова: бортовая система питания, электроподвижной состав, полупроводниковый преобразователь, однородная коммутация, ключ с внутренней обратной связью, динамическая стойкость, демпфирующие цепи.

A.I. Semenenko. Improvement of the characteristics of onboard power supply systems of the electrical rolling stock. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.22.09 - "Electrotransport". The Ukrainian state academy of a railway transportation, Kharkov, 2003.

In the dissertation the ways of improvement of the characteristics of onboard power supply systems of the electrical rolling stock are considered. For the decision of this task the semiconductor keys and structures of semiconductor converters of such onboard systems with the lowered switching losses are offered at the expense of use in switchboards of a mode of homogeneous switching.

The basic parities of parameters of the base circuit of a new semiconductor key with internal feedback providing the high dynamic and power characteristics at use of a key in switchboards with homogeneous switching of the second sort is developed. On the basis of the developed methodology of a choice of structure of converters with homogeneous switching the block diagram of the semiconductor converter of the onboard power supply system of main electric locomotives of a constant current is modified. The specified formula for definition of differential conductivity of semiconductor converters of onboard power supply systems with homogeneous switching necessary for account of parameters of elements damping of circuits is offered which provide dynamic stability of converters. For semiconductor keys at homogeneous switching it is offered to use dissipative free of a circuit of switching protection, the technique of account of parameters of elements of these circuits is developed.

Keywords: the onboard power supply system, electrical rolling stock, semiconductor converter, homogeneous switching, key with internal feedback, dynamic stability, damping of a circuit.