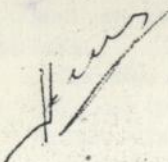


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

На правах рукопису.



ПАВЛОВ Віктор Борисович

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ У СИСТЕМАХ
ЕНЕРГОЖИВЛЕННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.

Спеціальність: 06.09.12 - Напівпровідникові
перетворювачі електроенергії.

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ - 1996



00759688 (0)

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті електродинаміки
НАН України, м.Київ.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор,
академік НАН України
ШИДЛОВСЬКИЙ Анатолій Корнійович

Офіційні опоненти;

Доктор технічних наук, професор
СЕНЬКО Віталій Іванович

Доктор технічних наук, професор
НОВОСЕЛЬЦЕВ Олександр Вікторович

Доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
ЩЕРБА Анатолій Андрійович

Провідна організація НВО "Київський інститут автоматики".

Захист відбудеться " 5 " 11 1996 р. о 10 год. на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д01.98.02 при Інституті
електродинаміки НАН України за адресою: 252680, Київ-57,
пр. Перемоги, 56.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці інституту.

Автореферат розісланий " 1 " 10 1996р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради

В.С. Федій

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми і ступінь дослідження тематики дисертації.

Головним стимулом розвитку електромобілебудування є погіршення екології навколишнього середовища. Найбільш актуально питання екології постали в Україні після аварії на Чорнобильській АЕС, оскільки поєднання радіації та автомобільних викидів особливо згубно впливає на здоров'я людей.

Сьогодні на території України у екологічно важких умовах проживає більше 40% населення - зона аварії Чорнобильської АЕС, Дніпровсько-Криворізький промрайон, Донбас, Причорномор'я та інші регіони.

Головним джерелом забруднення навколишнього середовища є автомобільний транспорт. За даними екологів автотранспорт генерує понад 72% від загального забруднення повітряного середовища, а в окремих випадках (великі міста) навіть більше. Крім того, автотранспорт є потужним та самим поширеним джерелом шуму у великих містах. Встановлено, що на міських автомагістралях максимальні рівні шуму досягають 90-95 дБ, мають тенденцію до зростання і це в той час, коли рівень шуму у 85 дБ являє собою середній критичний рівень, перевищення якого шкідливе для здоров'я людини.

Слід також відзначити, що в умовах загострення енергетичної кризи у нашій країні та обмеженості паливно-енергетичних ресурсів проблема забезпечення автотранспорту паливом продовжує загострюватись. Світові ціни на нафту та газ зберігають стійку тенденцію до зростання. Враховуючи те, що світовий автомобільний парк продовжує стрімко зростати, ця тенденція для цін збережеться. Відомо, що 40% світового видобутку нафти переробляється у бензин і використовується як паливо для автомобілів з двигунами внутрішнього згорання. І це при тому, що карбюраторні двигуни, що працюють на високооктановому бензині, якими оснащений практично увесь легковий транспорт країни, являються сьогодні найбільш токсичними енергетичними установками.

Розробка та освоєння виробництва електромобілів спрямовані на вирішення зазначених вище проблем в Україні. Незважаючи на більш високу вартість електромобілів у порівнянні з автомобілями, вигода їх широкого розповсюдження в Україні очевидна. Тим більше, що практично всі промислово розвинуті країни (Японія, США, Франція,

Великобританія, Швеція, Італія, Німеччина та інші) реалізують свої прийняті на державному рівні національні програми електромобілебудування.

Робота виконана у відповідності до планів досліджень НАН України (координаційний план н-д робіт "Наукові основи електроенергетики"; з проблеми "Перетворення параметрів електричної енергії" - розпорядження Президії АН УРСР N 474 від 27.12.85 та N 7 від 24.12.92); по темах "Устройство" та "Устройство - 2" ГР 01.86.0.083877; у відповідності до розпорядження Ради Міністрів СРСР № 473р від 03.12.80; у відповідності до програми автомобілебудування Мінмашпрому України від 12.10.92, підпрограма по електротранспорту, а також у межах програми "Ресурсозберігаючі проблеми виконавчих та транспортних систем" - ДКНТПП, 5.51.04, проект "Електромобіль", 1994р.

Мета і основні завдання наукового дослідження - узагальнення та наукове обґрунтування схемотехнічних та алгоритмічних рішень для напівпровідникових перетворювачів в системах енергоживлення електромобілів, зорієнтованих на сучасну (електронну та мікропроцесорну) елементну базу, реалізація яких вносить значний вклад у прискорення науково-технічного прогресу та зменшення техногенного навантаження на зовнішнє середовище.

Поставлена мета вимагає вирішення таких основних задач:

- виявлення характерних особливостей функціонування та експлуатації окремих компонентів систем енергоживлення, їх характеристик та параметрів, як електричних навантажень для первинного джерела енергії;

- аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових імпульсних перетворювачах для приводів електромобілів з урахуванням реальних навантажувальних режимів та характеристик тягової акумуляторної батареї, дослідження комутаційних процесів у низьковольтних імпульсних перетворювачах та способів підвищення комутаційної надійності;

- розробки методів дослідження енергетичної ефективності систем енергоживлення з урахуванням коефіцієнта корисної дії (ККД) окремих компонентів системи та способів оптимального управління силовими напівпровідниковими перетворювачами;

- створення ряду нових силових напівпровідникових перетворювачів для приводів електромобілів і систем управління, що реалізують тягові режими та режими рекуперативного гальмування;

- створення нових економічних, надійних та малогабаритних компонентів спеціального електрообладнання, електромобіля;

- розробки ряду рекомендацій з проектування окремих компонентів і створення систем енергоживлення постійного струму електромобілів в цілому, що мають сприяти підвищенню ефективності таких систем та їх практичній реалізації.

Об'єкт і предмет дослідження. Досліджуються напівпровідникові перетворювачі і системи енергоживлення постійного струму електромобілів на предмет підвищення їх енергетичної ефективності і технічної надійності.

Методологія і метод дослідження предмету і об'єкта. Вирішення розглянутих у дисертації задач аналізу електромагнітних процесів в силових колах та енергетичних характеристик елементів систем енергоживлення виконано з використанням теорії електричних кіл, перетворення Лапласа, різницевих рівнянь, математичного моделювання та теорії електроприводу і електричних машин.

Наукова новизна роботи міститься у наступному:

- сформульовані й обгрунтовані головні положення методу визначення параметрів первинного джерела енергії, виходячи з основних критеріїв ефективності функціонування електромобіля та умов його безпечної експлуатації;

- вперше при аналізі комутаційних процесів імпульсних перетворювачів досліджена комутаційна здатність вузлів з паралельно-ємнісною комутацією з точки зору основних параметрів низьковольтної акумуляторної батареї та тягового електродвигуна і доведена доцільність підвищення комутуючої напруги у порівнянні із збільшенням комутуючої ємності для досягнення необхідної надійності імпульсного перетворювача постійної напруги;

- сформульовані нові підходи до проектування та методи створення тиристорних імпульсних перетворювачів з підвищеною комутаційною здатністю, отримані нові аналітичні вирази для визначення параметрів комутуючого пристрою в імпульсних перетворювачах, працюючих у різних режимах;

- розроблено й обгрунтовано новий метод визначення енергетичної ефективності систем енергоживлення електромобіля;

- одержані раніше невідомі графо-аналітичні залежності втрат енергії в окремих елементах і системі в цілому. Проведена кількісна оцінка таких втрат в залежності від режимів роботи системи, стану джерела живлення і типу тягового двигуна. Визначені найбільш

доцільні алгоритми управління силовими напівпровідниковими перетворювачами;

- досліджені особливості роботи транзисторних імпульсних перетворювачів постійної напруги з живленням від бортової акумуляторної батареї, коли навантаженням перетворювача є двигун постійного струму, шунтований зворотнім діодом;

- отримані аналітичні залежності для знаходження оптимальних частот перетворення електричної енергії, що визначаються мінімально можливими втратами у перетворювачі і масогабаритними показниками вхідного фільтру та охолоджувача;

- вперше досліджені особливості оригінальних схем транзисторних імпульсних перетворювачів, призначених як для силових кіл, так і для допоміжних пристроїв. Встановлено, що такі перетворювачі забезпечують оптимальний комбінований широтно-частотно-імпульсний спосіб регулювання із сталим рівнем пульсацій струму навантаження, що сприяє підвищенню ефективності роботи привода в цілому.

Вірогідність одержаних наукових результатів забезпечується значним об'ємом експериментальних даних, що отримані з використанням відповідних методів досліджень, а також позитивними результатами випробувань і промислового застосування.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- отримані теоретичні результати дозволили аналітичним шляхом вірогідно визначати необхідні параметри первинного джерела енергії електромобіля при мінімумі заданих величин, що дає можливість на етапі проектування машини забезпечити досягнення заданих характеристик;

- реалізовані у вигляді інженерних методик розрахунку результати досліджень комутаційної надійності тиристорних імпульсних перетворювачів, що живляться від низьковольтної акумуляторної батареї. на основі запропонованих способів створено ряд перетворювачів з підвищеною комутаційною спроможністю, які успішно функціонують на низьковольтному електротранспорті;

- запропоновано ряд нових способів підвищення ефективності роботи транзисторних імпульсних перетворювачів, що забезпечують надійну роботу таких пристроїв з різними типами тягових двигунів постійного струму і первинних джерел енергії, що застосовуються на електромобілях;

- розроблений метод визначення повного ККД системи енергоживлення дозволив побудувати та реалізувати алгоритми управління си-

ловими імпульсними перетворювачами для забезпечення мінімальних втрат енергії в усьому діапазоні регулювання для різних режимів роботи привода електромобіля;

- одержані результати дозволяють підвищити технічний рівень широкого класу силових напівпровідникових перетворювачів з мікропроцесорними системами управління, а також напівпровідникових пристроїв допоміжного призначення і можуть бути використані при розробці систем енергоживлення для різноманітних безрейкових транспортних засобів з бортовою акумуляторною батареєю.

Автор захищає:

1. Метод визначення енергоємності автономного джерела живлення електромобіля.

2. Результати порівнювального аналізу напівпровідникових перетворювачів, призначених для тягового приводу постійного струму електромобілів.

3. Способи підвищення комутаційної спроможності низьковольтних тиристорних імпульсних перетворювачів.

4. Способи підвищення ефективності роботи транзисторних імпульсних перетворювачів, що працюють з різними типами електродвигунів постійного струму і первинними джерелами енергії, які застосовуються на електромобілях.

5. Методи визначення ККД системи енергоживлення електромобіля та параметрів оптимального управління силовими імпульсними перетворювачами в різних режимах роботи.

6. Нові схемотехнічні рішення силових та допоміжних напівпровідникових перетворювачів і систем управління на базі мікропроцесорної техніки.

7. Результати впровадження розроблених напівпровідникових перетворювачів та пристроїв, що реалізують підвищення ефективності систем енергоживлення електромобілів.

Реалізація результатів роботи здійснювалась шляхом розробки макетів напівпровідникових пристроїв та створення дослідно-промислових зразків силових тягових перетворювачів та компонентів спеціального допоміжного електрообладнання для систем енергоживлення електромобілів АвтоВАЗа і АвтоЗАЗа, а також ряду електроприводів внутрішньозаводського акумуляторного електротранспорту. Під керівництвом та з участю автора створені силові тиристорні та транзисторні перетворювачі для електромобілів ВАЗ-2801, 2802, 2702, а також перші у СНД мікропроцесорні системи управління для електромобілів.

білів ВАЗ-2702 і 2802-01; розроблена концепція побудови та створення система енергоживлення для дослідних зразків перших українських електромобілів на базі автомобіля "Таврія" - ВАЗ-1109 і ВАЗ-11091-легкової та вантажно-пасажирської модифікацій; створені низьковольтні тиристорні та транзисторні перетворювачі проходили випробування та дослідну експлуатацію у заводських умовах на електрокарах ЕК-2, ЕН-161, електронавантажувачах ЕП-0204 на раді підприємств України (м.м.Київ та Запоріжжя).

Зараз у межах програми автомобілебудування Мінмашпрому України та проекту "Електромобіль" ДКНТПП розглядається питання про випуск дослідної партії електромобілів ВАЗ-1109 та 11091 з системами енергоживлення, розробленими в ІЕД НАН України при безпосередній участі автора.

Апробація роботи. Основні положення та результати роботи доповідались і були схвалені на протязі 1976-1995р.р. на двох міжнародних, 8 всесоюзних та 7 регіональних конференціях і галузевих нарадах.

Публікації. Основні результати дисертації відображені у 53 наукових працях, в тому числі у 4-х монографіях, 46 статтях і доповідях, а також у 3-х звітах по НДР. Новизна технічних рішень захищена 22 авторськими свідоцтвами СРСР та патентом України.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, семи глав, загальних висновків, списку літератури (162 найменування) і додатку. Вона містить 287 сторінок основного тексту, 101-малюнок, 14 таблиць. Додаток викладено в окремому томі на 57 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведена оцінка сучасного стану проблеми та поставлено задачі наукового дослідження, перераховані методи досліджень, обґрунтовані актуальність, наукова та практична новизна, наведена інформація про реалізацію результатів роботи, її апробацію, про публікації та структуру дисертації.

У першій главі розглянуті варіанти побудови систем енергоживлення електромобілів, наведена узагальнена структурна схема таких систем. Тут же наведені характеристики та особливості функціонування складових компонентів системи енергоживлення.

Джерела живлення для електромобілів здебільшого функціонують за рахунок електрохімічних перетворень як у середовищі складових

їх елементів, так і в самих цих елементах. У роботі запропоновано класифікацію джерел енергії для автономного електротранспорту.

Як вже було показано, первинним джерелом енергії електромобіля є електрохімічне джерело постійної напруги. Тому природним є той факт, що електропривод постійного струму займає домінуюче положення у системах тягових приводів транспортних засобів з автономним електрохімічним джерелом енергії. Проте, на протязі усього часу розробок електромобілів альтернативою приводам постійного струму були електроприводи змінного струму з асинхронними, синхронними та вентильними машинами.

У роботі докладно розглянуті переваги й недоліки тягових електродвигунів постійного та змінного струму і зроблено висновок, що успіхи перетворювальної техніки останнього десятиріччя, освоєння промислового випуску потужних польових транзисторів дозволяють вважати за можливе більш інтенсивний розвиток різних систем тягового приводу електромобілів.

Очевидно, що доцільним є подальший розвиток тягових електроприводів постійного та змінного струму, а також електродвигунів інших конструкцій, призначених для електромобілів, з постійним удосконаленням кожного напрямку без взаємовиключення одного іншим.

Однак, враховуючи, що до цього часу електропривод постійного струму з двигунами послідовного та незалежного збудження на акумуляторному транспорті становить 98% і лише 2% припадають на інші типи електродвигунів для електромобілів здебільшого некомерційного (дослідницького) призначення, основну увагу в цій роботі приділено саме електроприводу з тяговими двигунами постійного струму.

Реостатне регулювання частоти обертання двигуна постійного струму, яке використовувалося раніше, крім простоти реалізації має ряд недоліків. Найсуттєвішим з них слід вважати непродуктивні втрати енергії в реостатних структурах при регулюванні швидкості тягового двигуна електромобіля, бо енергія акумуляторної батареї обмежена однією зарядкою і проблема її раціонального використання є досить важливою. З цієї причини імпульсні напівпровідникові перетворювачі знайшли широке застосування у системах тягового електроприводу електромобілів, де з їх допомогою досягається економія електроенергії до 20% у порівнянні з реостатним управлінням.

Ряд основних теоретичних та практичних питань щодо імпульсних перетворювачів вирішено в роботах Л.В.Бірзнієкса, Т.А.Глазенко, О.А.Косова, В.Д.Нагорського, Ю.І.Конєва, Р.Моргана, Х.Джонса, Х.Вебера.

Сьогодні знаходяться у розвитку розробки та дослідження низьковольтних імпульсних перетворювачів, які живляться від автономного джерела (аккумуляторної батареї). Такі перетворювачі мають ряд особливостей, обумовлених специфікою їх практичного використання та процесами, що в них протікають. Аналіз декотрих схем низьковольтних перетворювачів наведено у роботах відомих авторів, а саме: В.І.Некрасова, Г.Н.Гаврилова, М.І.Крайцберга, Е.В.Шикутя, К.К.Рашевіця, М.Коха, Е.Крохлінга, К.Стора, І.Масларова, Н.Чомпелова, Н.Толева, Б.Годєва, К.Меднікарова, Х.Кахлена та інш.

На першому етапі розвитку тягового електроприводу в основному застосовувались тиристорні імпульсні перетворювачі. Подальший розвиток та удосконалення напівпровідникових технологій дозволило реалізувати випуск потужних транзисторів (на сотні ампер), підняти рівень їх робочої напруги і забезпечити високі частоти перемикання.

Значний внесок у розвиток транзисторної перетворювальної техніки зробили такі вчені, як В.С.Васильєв, Г.М.Веденєєв, С.Г.Герман-Галкін, Ю.І.Драбович, Е.М.Ромаш, В.І.Сенько, С.С.Букреев, Н.Н.Лаптев, В.С.Моін, В.П.Міловзоров та багато інших.

В роботі проаналізовано переваги та недоліки застосовуваної елементної бази і для більш обгрунтованого прийняття рішення щодо можливості застосування того чи іншого типу напівпровідникового приладу, проведено порівняння тиристорних та транзисторних імпульсних перетворювачів, виходячи з їх функціонального призначення - регулювання частоти обертання тягового двигуна автономного електротранспорту, а також проаналізовані особливості функціонування вторинних джерел живлення електромобілів та зарядних пристроїв.

Критерії ефективності систем енергоживлення електромобілів, що сформульовані в роботі, дозволяють констатувати їх багатобразність та взаємовпливність, а часто і взаємовиключність.

Дуже часто практично єдиним інтегральним показником ефективності електромобіля, на покращення якого спрямовані основні зусилля розробників тягового електрообладнання, є міжзарядний пробіг машини. В підсумку на цей показник "працює" як кожний елемент системи енергоживлення так і усі елементи у їх взаємозв'язку. Однак, слід зауважити, що останнім часом усе більше уваги приділяється такому показнику, як вартість електромобіля, тобто декларується її зниження навіть за рахунок деякого погіршення інших показників. Одночасно з цим на передній план виходять ергономічні якості електромобіля, його комфортність, простота та дешевизна обслуговування та еко-

платациі. На вирішення цілого комплексу перелічених вище питань спрямовані зусилля розробників систем енергоживлення електромобілів та акумуляторних транспортних засобів в цілому.

Друга глава присвячена аналізу первинних джерел живлення, які застосовуються на електромобілях. Практика створення та експлуатації електромобілів за останні 30 років показує, що 90% електроприводів живляться від свинцево-кислотних акумуляторних батарей, 5-8% - від нікель-кадмієвих, нікель-залізних, нікель-цинкових та натрій-сіркових акумуляторів. Приблизно 2% припадає на усі інші види джерел живлення, які часто-густо ще не вийшли за межі лабораторій. Електрохімічні генератори, маючи високі питомі характеристики, мають при цьому і суттєві недоліки, які роблять проблематичним їх широке застосування на електромобілях вже сьогодні. З цієї причини у другій главі аналізуються саме акумуляторні батареї, які застосовуються в теперішній час як основне джерело первинної енергії електромобіля. Сформульовані також критерії порівняння тягових акумуляторних батарей, до яких відносяться: простота конструкції та габарити; вартість сировини; дешевизна технології та виготовлення; простота і безпечність обслуговування; інтенсивність саморозряду; температурна девіація ємності; стійкість до перевантажень; можливість прискореного заряду; можливість регенерації відпрацьованих елементів та утилізації їх токсичних компонентів. За цими критеріями проаналізовані свинцево-кислотні, нікель-цинкові, нікель-залізні, нікель-кадмієві, нікель-гідридні, цинк-галогенні, натрій-сіркові, літій-сіркові, літій-заліzosульфідні та натрій-хлорні акумулятори.

Порівняльна оцінка застосовуваних акумуляторних батарей показує, що основним джерелом енергоживлення електромобілів в теперішній час по вартості та експлуатаційним показникам слід вважати свинцево-кислотні акумулятори. Нікель-кадмієві та нікель-залізні тягові акумулятори можуть успішно застосовуватись у сучасних електромобілях, хоча тут буде потрібне суттєве доопрацювання для зниження їх вартості, поліпшення екологічних факторів як при виробництві, так і на етапі утилізації. Решта типів тягових акумуляторів ще не вийшла за межі лабораторних досліджень та випробувань.

Одним з найважливіших питань при створенні електромобіля є питання визначення установленної потужності (енергоемності) тягової акумуляторної батареї.

Відомо, що довжина пробігу електромобіля знаходиться у прямій

залежності від маси акумуляторної батареї і зростає із збільшенням її питомої енергії. У роботі розроблено метод визначення необхідної для конкретного електромобіля енергоємності (установленої потужності) акумуляторної батареї, виходячи з мінімуму параметрів: маси електромобіля, потрібного запасу ходу при сталій швидкості та при русі в міському циклі SAEJ 227 (A-D). Пропонується метод дозволяє також визначити масу акумуляторної батареї та корисного вантажу, що перевозиться електромобілем. Для виконання інженерного розрахунку складені відповідні розрахункові програми для ЕОМ, які дозволяють отримати бажаний результат ще на етапі проектування шляхом варіації вихідних (заданих) величин.

Другим значним питанням після визначення енергоємності тягової акумуляторної батареї є питання вибору величини напруги первинного джерела енергії. Цей фактор чинить безпосередній вплив як на проектування силових компонентів системи (зокрема на визначення класу напівпровідникових приладів), так і на вибір комутаційної апаратури та допоміжних пристроїв.

Проведений у роботі аналіз залежності масогабаритних показників різних акумуляторних батарей показує - загальна тенденція покращення питомих величин і, як наслідок, зниження масогабаритних показників із зростанням величини ампер-годин батареї для різних типів акумуляторів та фірм-виготовлювачів залишається незмінною.

Таким чином, з точки зору масогабаритних показників більш доцільно вибирати низький рівень напруги тягової акумуляторної батареї та збільшувати кількість установлених ампер-годин. В цьому разі зменшення масогабаритних показників батареї можливе на 5-20%, або відповідне збільшення установленної потужності матиме місце.

Крім того, на вибір напруги впливає також ергономічний фактор. У практиці електромобілебудування існує термін "напруга дотику". Враховуючи той факт, що користувачами електромобілів будуть здебільшого люди, які не мають досвіду роботи з електроустановками, слід враховувати це, вибираючи рівень напруги первинного джерела живлення, тим більше, що цей фактор стає дуже суттєвим в умовах атмосферних опадів. В цьому разі висока напруга може загрожувати життю пасажирів та обслуговуючого персоналу у разі пробігу ізоляції та потрапляння потенціалу на корпус машини.

Аналіз наведених вище факторів дозволяє зробити висновок, що для зменшення масогабаритних показників встановленого обладнання системи енергоживлення електромобіля та безпечної експлуатації

більш доцільне використання тягової акумуляторної батареї з якомога низьким рівнем напруги. Практика показала, що на електромобілях класу до 500 кг найчастіше приймається напруга 48-84 В, до 1500 кг - 84-120 В, вище 1500 кг - 150-220 В. В окремих випадках на дослідних електромобілях напруга джерела живлення сягає 300-400 В.

Відомо, що характеристики акумуляторної батареї та способи її експлуатації чинять безпосередній вплив на міжзарядний пробіг машини, тому потрібно ретельно враховувати усі особливості, що виникають при роботі джерела з силовим імпульсним перетворювачем у тяговому приводі електромобіля. При цьому слід відзначити, що саме на акумуляторну тягову батарею припадає значна частина загальної маси машини. Підвищення коефіцієнта корисної дії системи акумуляторна батарея - перетворювач - двигун дозволяє пропорційно зменшувати масу батареї при заданому пробігу, або збільшувати міжзарядний пробіг при заданій її масі.

При роботі акумуляторної батареї з імпульсним перетворювачем струм батареї може мати пульсації або бути імпульсним. Пульсації струму виникають як у тяговому режимі (розряд батареї), так і в гальмівному режимі з рекуперацією енергії (заряд батареї). Аналіз впливу характеру струмів, які споживаються від джерела, на коефіцієнт корисної дії акумуляторної батареї показує, що для прямокутних імпульсів струму вираз для ККД батареї буде мати вигляд:

$$\eta = 1 - I^*, \quad (I)$$

де: $I^* = \frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{кз}}}$, $I_{\text{макс}}$ - максимальний струм, протікаючий крізь акумуляторну батарею; $I_{\text{кз}} = \frac{E}{r_{\text{д}}}$ - струм короткого замикання акумуляторної батареї; E , $r_{\text{д}}$ - Е.Р.С. та внутрішній опір акумуляторної батареї відповідно.

При пікообразній формі імпульсів струму ККД батареї визначається за такою формулою:

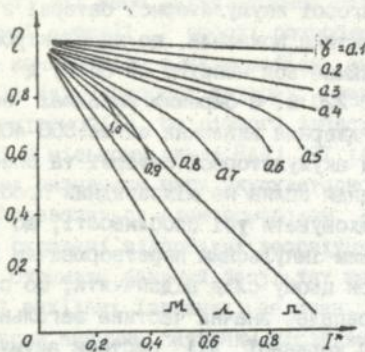
$$\eta = 1 - I^* k_{\alpha} \quad (2)$$

де: $k_{\alpha} = 1 + \alpha^2/12$; $\alpha = \frac{\Delta I_{\text{макс}}}{I_{\text{макс}}}$ - коефіцієнт пульсацій струму навантаження; $\Delta I_{\text{макс}}$ - амплітуда пульсацій струму навантаження.

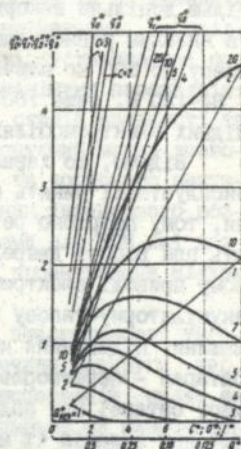
При розряді акумуляторної батареї постійним струмом вираз для ККД буде мати такий вигляд:

$$\eta = (1 + \sqrt{1 - 4 I^* (1 - I^*) \gamma}) / 2 \quad (3)$$

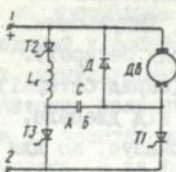
На мал.1 наведені залежності ККД акумуляторної батареї при розряді струмами різної форми, що має місце при імпульсному регулюванні. З аналізу цих графіків видно, що, чим більш яскраво виявляється пікоподібна форма імпульсу (тобто збільшені пульсації



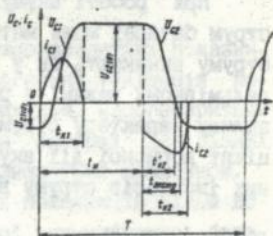
мал.1



мал.2



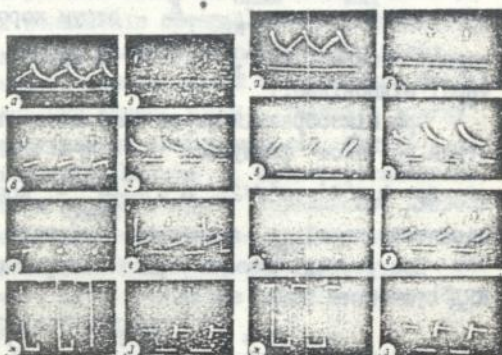
а



б

мал.3

мал.4



$I_{cp} = 30A$

$I_{cp} = 50A$

струму), тим нижче ККД батареї. Найбільші значення ККД акумулятор-на батарея має при розряді постійним струмом. Аналіз отриманих виразів показує, що ККД батареї можна підвищити, якщо зменшувати амплітуду струмових пульсацій або збільшувати струм короткого замикання батареї.

У третій главі розглянуто особливості ємнісної комутації тиристорних імпульсних перетворювачів постійної напруги, що живляться від низьковольтної акумуляторної батареї, проведено порівняльний аналіз низьковольтних тиристорних перетворювачів, що застосовуються на електромобілях, проведені теоретичні дослідження електромагнітних процесів в схемах тиристорних перетворювачів з постійним та змінним рівнем комутаційної напруги і сформульовані принципи підвищення комутаційної здатності низьковольтних тиристорних перетворювачів, проведена класифікація схем папівпровідникових перетворювачів, призначених для забезпечення різних режимів роботи низьковольтного акумуляторного електротранспорту.

Надійність комутації силового тиристора залежить від ряду факторів, що впливають на процес його вимикання. До них належать час відновлення тиристора, величини прямого струму і зворотної напруги, що прикладається до тиристора і т.п. Необхідна для вимикання тиристора величина заряду q_1 визначається формулою:

$$q_1 = I_{\text{макс.т}} \cdot t_{\text{в}} \quad (4)$$

де $I_{\text{макс.т}}$ - максимальний струм, що протікає через тиристор; $t_{\text{в}}$ - час відновлення тиристора.

Для забезпечення надійної комутації необхідне дотримання нерівності $q_1 \leq q_0$. Тут q_0 - заряд комутаційного конденсатора саме перед вимиканням тиристора, $q_0 = C U_{\text{к}}$, де C - ємність комутаційного конденсатора, а $U_{\text{к}}$ - напруга на ньому перед комутацією. Треба зауважити, що ємність комутаційного конденсатора та величина напруги на ньому однаково впливають на надійність вузла комутації. У найпростішому випадку напруга на комутаційному конденсаторі визначається рівнянням:

$$U_{\text{к}} = U e^{-\pi/2Q} \quad (5)$$

де U - напруга джерела живлення (акумуляторної батареї); Q - добротність перезарядного контуру, $Q = \sqrt{L} / (r \sqrt{C})$ (L і r - індуктивність та активний опір контуру).

Таким чином, вираз для q_0 буде мати вигляд:

$$q_0 = C U e^{-\pi \sqrt{C} / (2\sqrt{L})} \quad (6)$$

На основі приведених вище виразів можна зробити висновок, що при заданій частоті комутації збільшення ємності, необхідної для надійного вимикання, потребує зменшення індуктивності перезарядного контуру. Це призводить до зменшення добротності i , як наслідок, до зменшення заряду комутаційного конденсатора.

У низьковольтних перетворювачах з живленням від акумуляторної батареї при широкому діапазоні зміни напруги та великих струмах, що комутуються значне збільшення ємності може призвести до зниження комутаційної здатності схеми і обмеженому діапазону струмів, що комутуються.

На мал.2 зображена залежність заряду $q_1(C^*)$ від величини комутаційної ємності. За базові були прийняті одиничні величини C^* ; U^* ; I^* . Криві побудовані для різних початкових значень добротності $Q_{\text{поч.}}^*$. Функція $q_0^*(C^*)$ має нелінійний параболический характер і значною мірою залежить від добротності контуру Q^* . При цьому, чим нижча добротність, тим менше значення q_0^* , і максимум кривої зсувається до початку відліку. При добротності $Q^* \leq 3$ крива $q_0^*(C^*)$ практично не має максимуму і q_0 зменшується з ростом C^* . На цьому ж малюнку зображені залежності $q_0^{**}(U^*)$ (прямі лінії) для різних значень Q_0^* (із зміною Q^* змінюється нахил прямої) і $q_0^{***}(U^*)$, отримані для різних значень C^* (1,2,3...). Величину аряду q_1^* , необхідну для комутації максимального струму, відображає залежність $q_1^*(I^*)$.

Аналізуючи наведені залежності, можна зробити висновок, що забезпечення заряду q_1^* в області максимальних струмів швидше досягається збільшенням комутаційної напруги при збереженні постійної ємності конденсатора. В той же час досягнення необхідного заряду збільшенням комутаційної ємності у багатьох випадках взагалі неможливе через зниження добротності контуру, тоді як за допомогою зміни напруги на комутаційному конденсаторі необхідний заряд досягається при досить низьких значеннях Q^* .

За останні 30 років у вітчизняній та зарубіжній технічній літературі надруковано велику кількість схем перетворювачів постійної напруги. В роботі зроблена спроба узагальнити якомога більшу кількість схем тиристорних перетворювачів, що були коли-небудь заявлені і запропоновані для застосування у низьковольтному тяговому електроприводі з імпульсним управлінням. Зрозуміло, що через постійну появу нових схем неможливо претендувати на їх повний перебір, але очевидно, що розглянуті в роботі схеми складають основну частину низьковольтних перетворювачів.

У роботі наведено ряд схем імпульсних перетворювачів з постійною та змінною величиною напруги на комутаційному конденсаторі, котра для різних схем має значення від $U_k = U$ до $U_k = 3U$ і більше. Для низьковольтних перетворювачів найбільш цікавими є схеми з більш високим рівнем комутаційної напруги, які до того ж мають і високу початкову комутаційну здатність.

На мал.3,а зображено схему імпульсного перетворювача з постійним рівнем напруги на комутаційному конденсаторі.

Електромагнітні процеси у комутаційному пристрої перетворювача відбуваються у означені проміжки часу (мал.3,б). Струми і напруги, що відповідають кожному інтервалу описуються рівняннями:

$$i_{c1} = \frac{U - u_{c1}(0)}{L_{k1}\omega_1} e^{-\delta_1 t} \sin \omega_1 t \quad (7)$$

$$u_{c1} = \frac{U + u_{c1}(0)}{L_{k1}\omega_1 C} \left[-\frac{e^{-\delta_1 t}}{\delta_1^2 + \omega_1^2} \left(\delta_1 \sin \omega_1 t + \omega_1 \cos \omega_1 t \right) + \frac{\omega_1}{\delta_1^2 + \omega_1^2} \right] - u_{c1}(0); \quad (8)$$

$$i_{c2} = e^{-\delta_2 t} \left[\frac{U - E + u_{c2}(0) - L_{k2} I_{\max} \delta_2}{L_{k2} \omega_2} \sin \omega_2 t + I_{\max} \cos \omega_2 t \right]; \quad (9)$$

$$u_{c2} = \frac{U - E + u_{c2}(0) - L_{k2} I_{\max} \delta_2}{L_{k2} C (\delta_2^2 + \omega_2^2)} \left[1 - e^{-\delta_2 t} \left(\sin \omega_2 t + \omega_2 \cos \omega_2 t \right) + \frac{I_{\max}}{C (\delta_2^2 + \omega_2^2)} \left[\delta_2 + e^{-\delta_2 t} \left(\omega_2 \sin \omega_2 t + \delta_2 \cos \omega_2 t \right) \right] - u_{c2}(0) \right] \quad (10)$$

де E - ЕРС акумуляторної батареї; i_{c1} - струм перезаряду конденсатора по колу $C-TI-2-I-T2-L_k-C$, за проміжок часу $0 \leq t \leq t_1$ - перший перезарядний контур; i_{c2} - струм перезаряду конденсатора по колу навантаження за проміжок часу $t_2 \leq t \leq t_3$ - другий перезарядний контур; u_{c1} і u_{c2} - напруга на комутаційному конденсаторі на проміжках часу відповідно $0 \leq t \leq t_2$ та $t_2 \leq t \leq t_3$; $u_{c1}(0)$ та $u_{c2}(0)$ - початкові напруги на комутаційному конденсаторі у відповідні проміжки часу; δ_1 та δ_2 - декременти затухання, $\delta_1 = r_{k1}/2L_{k1}$; $\delta_2 = r_{k2}/2L_{k2}$; ω_1 та ω_2 - власна частота першого і другого перезарядних контурів, $\omega_1 = \sqrt{(1/L_{k1}C) - \delta_1^2}$; $\omega_2 = \sqrt{(1/L_{k2}C) - \delta_2^2}$; L_{k1} , L_{k2} та r_{k1} , r_{k2} - індуктивності та опори, еквівалентні активним втратам кожного контуру, $L_{k1} = L_k + L_1 + L_{пр}$; $L_{k2} = L_a + L_1 + L_{пр}$; $r_{k1} = r_k + r_1 + r_{пр}$; $r_{k2} = r_a + r_1 + r_{пр}$; L_k , r_k - індуктивність та опір комутаційного дроселя; L_d , $L_{пр}$ та r_d , $r_{пр}$ - індуктивність та опір відповідно джерела живлення та з'єднувальних

провідників; L_a та r_a - індуктивність та опір двигуна; ω_0 - власна частота коливного контуру без врахування затухання, $\omega_0 = 1/\sqrt{L_k C}$.

Для розглянутої схеми початкова напруга $u_{c1}(0) = U$, тому, що після комутації силового тиристора конденсатор заряджається до напруги джерела живлення, після чого відкривається зворотній діод, через який і починає протікати якірний струм. Тоді рівняння, що описують зарядний струм і напругу на проміжку часу $0 \leq t \leq t_1$, матимуть вигляд:

$$i_{c1} = 2U \sqrt{\frac{C}{L_k}} e^{-\delta_1 t} \sin \omega_1 t; \quad (11)$$

$$u_{c1} = 2U \frac{\omega_0}{\omega_1} e^{-\delta_1 t} (\sin \omega_1 t + \phi) - U, \quad \phi_1 = \arctg \frac{\omega_1}{\delta_1}$$

Максимальна напруга на комутаційному конденсаторі, яка дорівнює $u_{c2}(0)$, описується виразом:

$$U_k = u_{c2}(0) = -U(1 + 2e^{-\pi/\sqrt{4Q^2 - 1}}) \approx 3U \quad (12)$$

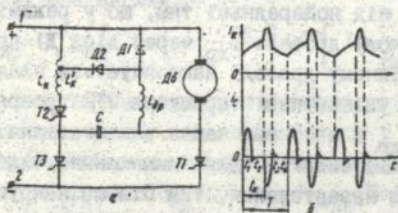
тому, що добротність контуру $Q \geq 10$.

Осцилограми струмів і напруг у електричних колах перетворювача, що були зняті при середньому струмі навантаження $I_{\text{сер}} = 30$ та 50 А, наведені на мал.4, де а - якірний струм; б-д - струми у колах комутаційного конденсатора, силового тиристора Т1, шунтуючого діода Д та комутаційного тиристора ТЗ; е - струм джерела живлення; ж-з - напруга на комутаційному конденсаторі та двигуні. Параметри комутаційного контуру $C=100$ мкФ, $L_k=0,1$ мГ, $t_{BT1}=100$ мкс.

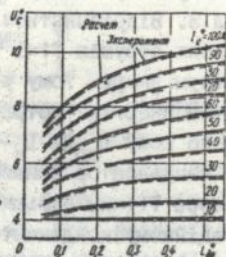
Теоретичні та експериментальні дослідження довели, що із зменшенням середнього струму навантаження та величини напруги джерела форма кривих струмів і напруг у колах перетворювача практично не змінюється, а амплітудне значення напруги на комутаційному конденсаторі залишається приблизно постійним, рівним $4U$.

Очевидно, що у низьковольтному тяговому електроприводі більш прийнятними є схеми із зворотнім зв'язком від струму навантаження. При цьому частина енергії передається з контуру тягового двигуна у комутаційний контур, однак ця енергія знімається з кола зворотнього діода, де якірний струм є пропорційним струму у силовому колі. Такі схеми дозволяють знизити втрати енергії і підвищити ККД перетворювача, бо при $\gamma=1$ струм у колі зворотнього діода відсутній.

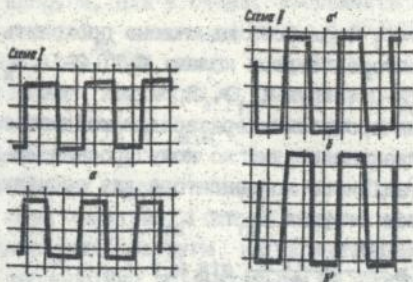
Автором запропоновано схему перетворювача (мал.5,а) з додатковим перезарядним контуром, що складається з допоміжного лінійного дроселя (дроселя зворотнього зв'язку), увімкненого в коло діода, що шунтує навантаження та додаткового діода. Ця схема має



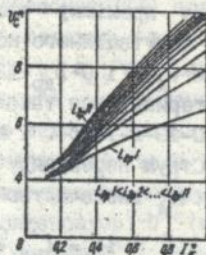
мал.5



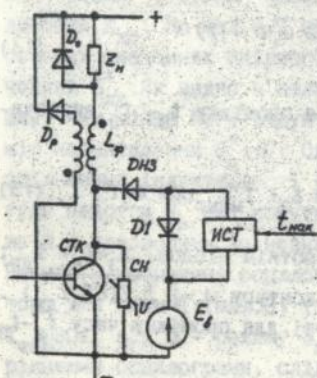
мал.6



мал.8



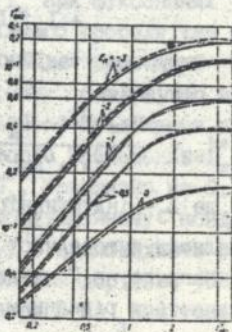
мал.7



мал.9



мал.10



мал.11

підвищену комутаційну здатність і є модифікацією схеми, зображеної на мал.3. Відрізняється вона від попередньої тим, що у режимі нерозривних струмів Т1 і Т2 по колу дроселя $L_{др}$ через діод Д1 протікає струм якоря. Тому у допоміжному дроселі накопичується електромагнітна енергія, котра після увімкнення тиристора Т2 розряджається по колу $L_{др}-D2-L_k-T2-C-L_{др}$ і частково через навантаження. При цьому конденсатор запасав більше енергії для вимикання силового тиристора Т1 (чим більший струм навантаження, тим більша напруга на комутаційному конденсаторі). Таким чином, здійснюється позитивний зворотній зв'язок від струму навантаження і підвищується комутаційна надійність схеми.

На проміжку часу $0 \leq t \leq t_1$ (мал.5.6) одночасно проходить перезаряд комутаційного конденсатора по двом колам: $C-T1-2-I-L_k-T2-C$ (струм i_{k1}) і $C-L_{др}-D2-L_k-T2-C$ (струм i'_{k1}). Проміжок часу t_2-t_3 характеризується також двома процесами: перезарядом конденсатора по колу $C-T3-2-I-D8-C$ і проходженням струму по колу дроселя $D8-L_{др}-D1-D8$. Струм перезаряду комутаційного конденсатора для проміжку часу $0 \leq t \leq t_1$ визначається сумою струмів i_{k1} та i'_{k1} :

$$i_{c1} = i_{k1} + i'_{k1} = \frac{U + u_{c1}(0)}{L_{k1}\omega_1} \sin \omega_1 t + \frac{u_{c1}(0)}{L_{k1}\omega_1} \sin \omega_1 t + I_{\min} \frac{L_{др}}{L_{k1}} \cos \omega_1 t \quad (13)$$

Напруга на комутаційному конденсаторі для цього ж проміжку часу знаходиться за допомогою формули:

$$u_{c1} = U(1 - \cos \omega_1 t) - u_{c1}(0)(\cos \omega_1 t + \cos \omega_1 t - 1) + I_{\min} L_{др} \omega_1 \sin \omega_1 t. \quad (14)$$

Струм комутаційного конденсатора на проміжку t_2-t_3 визначається рівнянням:

$$i_{c2} = \frac{U - E(1 - L_a/L_3) + u_{c2}(0)}{\omega_3 L_a L_{др} / L_3} \sin \omega_3 t + I_{\max} \cos \omega_3 t \quad (15)$$

де L_3 - індуктивність контуру із зворотнім діодом, $L_3 = L_a + L_{др}$; ω_3 - власна кутова частота комутаційного контуру, $\omega_3 = \sqrt{L_3 / (CL_a L_{др})}$.

Напруга на комутаційному конденсаторі для проміжку часу t_2-t_3 визначається рівнянням:

$$u_{c2} = \left[U - E \left(1 - \frac{L_a}{L_3} \right) + u_{c2}(0) \right] (1 - \cos \omega_3 t) + \frac{I_{\max}}{\omega_3 C} \sin \omega_3 t - u_{c2}(0) \quad (16)$$

Вираз для визначення величини індуктивності дроселя зворотнього зв'язку має вигляд:

$$L_{\text{др}} = T r_2 \left(1 - \gamma - \frac{t_{k2}}{T} \right) / \left[\ln \frac{E/r_2 + I_{\text{макс}}}{E/r_2 + I_{\text{мін}}} \right] \quad (17)$$

Комутаційна здатність імпульсного перетворювача визначається величиною заряду, що запасається у конденсаторі у момент часу, що передує вимиканню силового тиристора. Рівень цього заряду визначається напругою $u_{c2}(0) = (u_{c1})_{t=t_{k1}}$. Порівнюючи вирази (8) та (14) і аналізуючи їх, приходимо до висновку, що при наявності кола $L_{\text{др}} - D2$ (мал.5, а) комутаційний конденсатор заряджється до більш високої напруги, ніж у схемі, зображеній на мал.3. Дійсно, з (14) при відсутності $L_{\text{др}}$ власна частота $\omega_1 = 0$ і співвідношення (14) перетворюється у (8). При цьому, напруга u_{c1} (8) не залежить від струму навантаження. Якщо ж $\omega_1 \neq 0$ (наявність $L_{\text{др}} - D2$), то u_{c1} збільшується пропорційно струму $I_{\text{мін}}$. Внаслідок цього напруга на конденсаторі при наявності дроселя стає більшою, ніж без нього і збільшується із зростанням струму навантаження. Тому при наявності кола $L_{\text{др}} - D2$ схема може комутувати більші струми при тій же ємності конденсатора.

Амплітуда напруги на комутаційному конденсаторі U_c^* (мал.6) майже пропорційно збільшується із зростанням струму I_a^* і практично не залежить від індуктивності навантаження. Треба зауважити, що із зменшенням струму I_a^* вплив додаткового контуру ($L_{\text{др}} - D2$) зменшується і величина U_c^* наближається до $4U$.

Вплив додаткового перезарядного контуру $L_{\text{др}} - D2$ визначається не тільки струмом навантаження, але й індуктивністю допоміжного дроселя $L_{\text{др}}$. На мал.6,7 наведені залежності U_c^* від $L_{\text{др}}^*$ при фіксованих значеннях якірного струму I_a^* і від I_a^* при фіксованих значеннях $L_{\text{др}}^*$. Як видно з малюнку, вплив допоміжного дроселя тим слабший, чим менша його індуктивність. При $L_{\text{др}}^* = 0$ для будь-яких струмів навантаження $U_c^* = 4U$. Однак з тих же кривих слідує, що значне збільшення індуктивності $L_{\text{др}}^*$ не дає пропорційного збільшення амплітуди напруги U_c^* на комутаційному конденсаторі. Збільшення $L_{\text{др}}^*$ вище 0,4 призводить до незначного зростання U_c^* , приблизно на $0,16U_c^*$. На мал.8 зображені осцилограми напруг на комутаційному конденсаторі для схем I (мал.3) та II (мал.5), де а і б відповідають режиму $I_{\text{сер}} = 30\text{А}$, а* і б* - режиму $I_{\text{сер}} = 50\text{А}$. Одна поділка дорівнює 40В . Порівнюючи осцилограми, слід зауважити, що напруга на комутаційному конденсаторі збільшується із зростанням струму навантаження, це підтверджує зроблені раніше висновки.

Таким чином, проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок про те, що для низьковольтного акумуляторного електротранспорту (напруга джерела живлення 12-80В) найбільш ефективною за комутаційною здатністю є схема з позитивним зворотнім зв'язком від струму навантаження (із змінним рівнем U_K), яка включає допоміжний дросель у колі зворотнього діода і додатковий діод. В той же час, досліджувану схему імпульсного перетворювача з паралельною ємнісною комутацією (з постійним рівнем U_K) слід застосовувати при напрузі живлення 80 В і вище.

На основі схеми, зображеної на мал.5 автором розроблено ряд схем імпульсних перетворювачів з підвищеною комутаційною здатністю і розроблена методика розрахунку таких перетворювачів для низьковольтного акумуляторного електротранспорту.

У четвертій главі проаналізовані особливості роботи транзисторних імпульсних перетворювачів, навантаженням яких є тяговий двигун електромобіля, живлення якого здійснюється від низьковольтної акумуляторної батареї; проведені дослідження електромагнітних процесів у силовому колі транзисторного ключа при вмиканні та вимиканні, з урахуванням розглянутих вище особливостей, а також детальний аналіз схеми багатofункціонального транзисторного перетворювача з урахуванням впливу джерела живлення та навантаження на характеристики імпульсного циклу, розглянуто варіанти застосування такого перетворювача.

Найбільш важливою частиною, що істотно впливає на надійність і ефективну роботу імпульсного перетворювача, є силовий транзисторний ключ (СТК). Серед його характеристик слід звернути увагу на втрати енергії і стійкість до вторинного пробоя при великих швидкостях перемикання, що мають місце при роботі СТК.

На практиці для зниження швидкості зростання струму у колекторному колі СТК і зменшення комутаційних струмових піків у колі діод-транзистор у силове коло включають лінійний дросель. У низьковольтному електротранспорті питання зменшення втрат у такому дроселі дуже актуальне, тому, що доводиться мати справу з великими струмами (сотні ампер) навантаження. Для оптимального вибору параметрів елементів СТК і допоміжних кіл (вищезгаданий дросель, коло формування траєкторії перемикання силового транзистора і т.п.) необхідно було провести детальний аналіз процесів комутації у СТК з урахуванням параметрів первинного джерела живлення і навантаження.

Вираз, що описує величину відносного максимального струму

комутації з урахуванням внутрішнього опору та ЕРС акумуляторної батареї має вигляд:

$$I_{к.макс} = \frac{E \pm \gamma I_a \tau_B}{\gamma L_{\Phi} I_a \tau_B} * \ln \left(\frac{1}{\gamma} \left(\gamma \frac{L_{\Phi} I_a (1 - 0.5 \Delta I_{макс} (1 - \gamma))}{(E \pm \gamma I_a \tau_B) \tau_d} - c \right) \right), \quad (18)$$

де L_{Φ} - індуктивність, що обмежує струм комутації; I_a - якірний струм; τ_d - часова стала діода; а і с - коефіцієнти апроксимації; γ - щільність імпульсу.

Тут знак "мінус" відповідає режиму руху, а знак "плюс" - режиму рекуперативного гальмування. Аналіз цього виразу показує, що максимальний струм комутації відповідає режиму рекуперативного гальмування електротранспортного засобу при $E = E_{макс}$; $\gamma = \gamma_{мін}$; $I_a = I_{амакс}$ ($I_{амакс}$ - максимальний струм якоря при роботі струмообмеження).

Вираз для $I_{к.макс}$ дозволяє вибрати індуктивність, що обмежує комутаційний струм у колі діод - транзистор СТК.

Нелінійне коло формування траєкторії перемикання силового транзистора (мал.9) працює таким чином.

Перед вмиканням СТК на імпульсний керований стабілізатор струму СС подають імпульс тривалістю $t_{нак}$, що викликає протікання струму по колу: джерело додаткової ЕРС $E_{д}$ СС- ДНЗ (діод з накопиченням заряду) - перехід колектор- емітер СТК. При вимиканні СТК струм навантаження деякий час протікає по колу: ДНЗ - додатковий діод $D_{д}$ - $E_{д}$, викликаючи розсіювання накопиченого в ДНЗ заряду. Через час $t_{вимк}$ після початку протікання струму навантаження через ДНЗ всі увімкнені паралельно транзистори, що входять до складу СТК, вимикаються. Струм навантаження, при протіканні через ДНЗ, "виносить" з нього надлишковий заряд неосновних носіїв, після чого ДНЗ, відновлюючи свій зворотній опір, вимикається.

У роботі отримані розрахункові та експериментальні залежності відносного часу розсмоктування неосновних носіїв $t_{роз}/\tau_p$ у ДНЗ при вимкненні СТК від параметрів перемикання $i^* = i_{роз}/i_{нак}$ для різних величин вбудованого поля $B_{д}$ та при $(t_{нак}/\tau_p) > 5$, що відповідає перемикаючому із стаціонарних значень струму накопичення (суцільні криві).

Аналіз наведених на мал.10 та II залежностей показав, що в умовах реальних співвідношень параметрів для надійного функціонування пристрою формування траєкторії (ПФТ) на етапі вимкнення раціональним є дотримання наступних співвідношень:

$$i^* = (i_{роз}/i_{нак}) \geq 8; \quad t_{нак}^* = (t_{нак}/\tau_p) \geq 0,125. \quad (19)$$

Зменшення значень відносного струму розсмоктування i^* приз-

водить до зростання втрат у ПТТ, а зменшення відносного часу накопичення неосновних носіїв $t_{\text{нак}}^*$ можуть вивести з ладу СТК у результаті вторинного пробігу через велику миттєву потужність, яка виділяється у транзисторних структурах СТК, що вимикаються досить "повільно".

У відповідності до аналізу електромагнітних процесів і за результатами випробувань та експлуатації розробленого ПТТ у роботі запропонована інженерна методика його розрахунку.

у п'ятій главі дане обґрунтування методу визначення ККД системи приводу постійного струму з імпульсним напівпровідниковим перетворювачем, проведено аналіз енергетичних показників елементів силового кола та електроприводу в цілому у режимах тяги та рекуперативного гальмування і розглянуто вплив параметрів управління імпульсним перетворювачем на ці показники, розроблено метод визначення параметрів оптимального управління в обох режимах роботи, проаналізовано енергетичні показники способу рекуперативного гальмування із дискретизацією структури акумуляторної батареї і фактори, що впливають на ефективність тягового приводу електромобіля.

Проблема збільшення пробігу автономного електротранспорту між зарядами бортового джерела живлення - акумуляторної батареї - може бути вирішена за трьома основними напрямками (або їх сукупністю): покращення енергетичних і техніко-економічних показників елементів бортового електрообладнання машин; використання режиму рекуперативного гальмування з якомога більшою кількістю енергії, що повертається в акумуляторну батарею; розробка принципів і систем управління силовими перетворювачами для забезпечення оптимальних режимів руху машини. Очевидно, що подальші дослідження у перших двох напрямках вимагатимуть великих капіталовкладень для покращення вже існуючих показників, в тому числі і для акумуляторних батарей, вдосконалення котрих буде сприяти покращенню енергетичних показників автономного джерела живлення та збільшенню міжзарядного пробігу електромобілів.

В той же час виявляється доречною орієнтація досліджень на розробку засобів управління, які дали б змогу оптимізувати режими роботи системи електроприводу електротранспортного засобу. Під оптимізацією мається на увазі дослідження та впровадження у практику кращого поєднання робочих характеристик, ефективності, пробігу, надійності та вартості системи.

Для вирішення цієї задачі запропоновано метод аналізу енергетичних характеристик системи електроприводу електромобіля. Цей метод має на меті отримання виразів, що описують ККД різних елемен-

тив і системи АБ-ІП-ДПС у цілому, зведених до одної системи змінних, яка повинна включати основні параметри управління перетворювачем- частоту та щільність імпульсів напруги. При цьому передбачається мінімізація числа змінних у кінцевих виразах для ККД. Метод складається з таких етапів:

- Виділення у структурній схемі системи приводу елементів і контурів для визначення ККД в них.

- Вибір базового параметру - струму чи напруги або і струму, і напруги - для одного з елементів системи.

- Визначення середніх і діючих значень струмів і напруг у елементах (контурах) системи, а також потужності споживання та втрат у кожному елементі (контурі) системи.

- Вибір базового параметру, відносно якого доцільно виконати перехід до відносних одиниць для виразів, що описують величини спожитої та втраченої потужності, а також струмів у елементах (контурах) системи.

- Визначення безрозмірних коефіцієнтів, що зв'язують між собою базові параметри зведення до відносних одиниць (якщо використовуються два і більше таких параметрів),

- Визначення ККД елементів (контурів) системи приводу з імпульсним напівпровідниковим перетворювачем.

- Визначення загального ККД системи АБ-ІП-ДПС .

На мал.12,а зображена схема імпульсного регулювання частоти обертання двигуна постійного струму. Імпульсний перетворювач виконує роль безконтактного напівпровідникового ключа. Змінюючи щільність імпульсів напруги живлення, можна регулювати число обертів двигуна у широкому діапазоні. Активні та пасивні елементи схеми об'єднані в контури, для яких визначення ККД має реальний зміст. Заступна схема системи регулювання зображена на мал.12,б, а на мал.13 наведені часові діаграми струмів у силовому колі двигун-діод.

Вираз, що описує ККД контуру двигун-діод у тяговому режимі має вигляд:

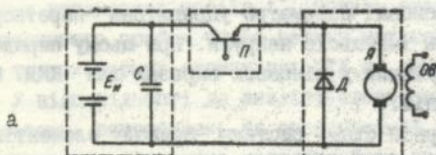
$$\eta_{я-д} = 1 - \frac{I^* [1 + k_{я} (1 - \gamma) (1 - \gamma + k_{д} k_{\alpha})]}{k_{д} \gamma (1 - I^*)} - \frac{\Delta P_{я.д}^*}{I^* k_{д}^2 k_{я} \gamma (1 - I^*)} \quad (20)$$

де $k_{я} = \gamma_{д} / \gamma_{я}$; $k_{\alpha} = 1 + \alpha^2 / 12$; $\alpha = \Delta I / I$

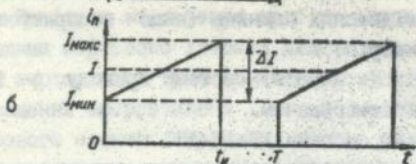
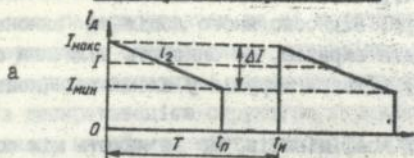
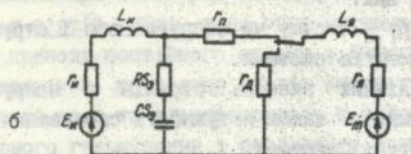
ККД транзисторного перетворювача визначається за формулою:

$$\eta_{т} = 1 - \frac{I^* k_{т} k_{\alpha} (1 + k_{в})}{\gamma (\gamma (1 - I^*)) - k_{в} \lambda (1 + k_{в})} \cdot \frac{1}{\gamma^2} \quad (21)$$

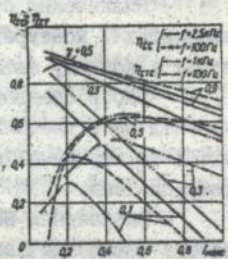
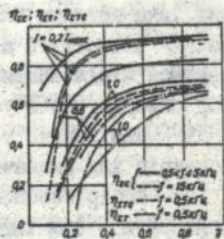
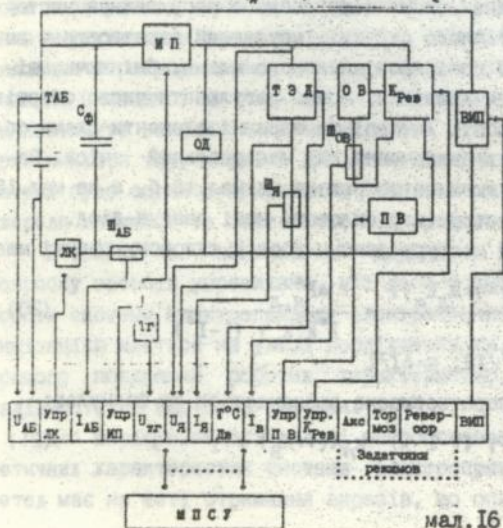
а тиристорного



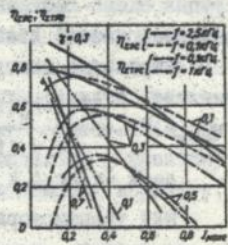
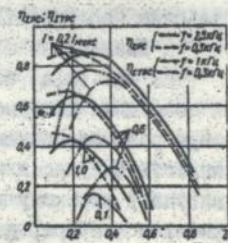
мал. 12



мал. 13



мал. I4



мал. 15

$$\eta_{\text{П}} = 1 - \frac{I^* [k_{\text{T1}} \gamma (1+k_{\gamma})^2 + k_{\text{я.д}} (k_{\alpha} + 3,5k_{\gamma}) + 4k_{\text{T}} k_{\gamma} (\gamma k_{\gamma} + 1,5k_{\text{TД}})]}{k_{\text{я}} \gamma (1-I^*)} +$$

$$+ \frac{k_{\text{я}}^{\text{T}} k_{\gamma} (\gamma k_{\gamma} + 1,5k_{\text{TД}})}{k_{\text{я}} \gamma (1-I^*)} - \frac{I^* 6k_{\gamma} (k_{\text{L}} + k_{\text{СК}})}{k_{\text{я}} \gamma (1-I^*)} - \frac{k_{\text{H}} (1+5k_{\gamma})}{\gamma}, \quad (22)$$

де $k_{\text{T1}} = \gamma_{\text{T1}} / \gamma_{\text{я}}$; $k_{\gamma} = 1,5\gamma_0 / \gamma$; $k_{\text{я.д}} = k_{\text{T1}} k_{\text{T1Д}} = R_{\text{T1Дин}} / \gamma_{\text{я}}$;

$k_{\text{T}} = \gamma_{\text{T}} / \gamma_{\text{я}}$; $k_{\text{TД}} = R_{\text{Tк.дин}} / \gamma_{\text{Tк}}$; $k_{\text{я}}^{\text{T}} = \gamma_{\text{д}} / \gamma_{\text{я}}$; $k_{\text{д}}^{\text{T}} = R_{\text{дин}}^{\text{д}} / \gamma_{\text{д}}$; $k_{\beta} = 1 + \frac{\alpha}{2}$;

$k_{\text{H}} = t_{\text{H}} f / 3,6$; $k_{\text{L}} = \gamma_{\text{L}} / \gamma_{\text{я}}$; $k_{\text{СК}} = R_{\text{Се}} / \gamma_{\text{я}}$; $k_{\text{п}} = \gamma_{\text{T}} / \gamma_{\text{я}}$; $k = \frac{\Delta P_{\text{В}}}{\Delta P_{\text{п}}}$.

ККД контуру акумуляторна батарея-ємнісний фільтр (розряд АБ квазіпостійним струмом) описується виразом:

$$\eta_{\text{Б-О}} = (1 + \sqrt{1 - 4I^* \gamma [1 - I^* (1 - (1 - \gamma)k_{\text{О}})]}) / 2, \quad (23)$$

де $k_{\text{О}} = R_{\text{с}} / m \gamma_{\text{д}}$ (m -число паралельно увімкнених конденсаторів у фільтрі).

Для тягового режиму системи АБ-ІП-ДПС з транзисторним перетворювачем без ємнісного фільтру у колі АБ формула ККД має вигляд:

$$\eta_{\text{т}} = 1 - I^* k_{\alpha} - \frac{I^* [1 + k_{\text{р.п}} k_{\alpha} (1 + k_{\text{В}}) + k_{\text{я}} (1 - \gamma) (1 - \gamma + k_{\text{д}} k_{\alpha})]}{k \gamma (1 - I^*)} -$$

$$- \frac{k_{\beta} \lambda (1 + k_{\text{В}}) / \gamma^2 - \Delta P_{\text{я-д}}^* / I^* k_{\text{я}}^2 k_{\text{я}} \gamma (1 - I^*)}{k \gamma (1 - I^*)}, \quad (24)$$

а при наявності фільтру у колі джерела живлення ККД системи визначається формулою:

$$\eta_{\text{Б-О}} = 0,5 + 0,5 \sqrt{1 - 4I^* \gamma [1 - I^* \gamma (1 - (1 - \gamma)k_{\text{О}})] - \lambda k_{\beta} (1 + k_{\text{В}}) / \gamma^2 -}$$

$$- I^* \frac{1 + k_{\text{р.п}} k_{\alpha} (1 + k_{\text{В}}) + k_{\text{я}} (1 - \gamma) (1 - \gamma + k_{\text{д}} k_{\alpha})}{k_{\text{я}} \gamma (1 - I^*)} - \frac{\Delta P_{\text{я-д}}^*}{I^* k_{\text{я}}^2 k_{\text{я}} \gamma (1 - I^*)}. \quad (25)$$

Аналітичні співвідношення були отримані як для тягового режиму, так і для режиму рекуперативного гальмування для обох типів перетворювачів.

Розрахунок ККД було проведено у відповідності до отриманих виразів для випадку використання у системі АБ-ІП-ДПС свинцево-кислотної (типу КТ-380) та лужної нікель - цинкової (типу НЦ-125-У2) акумуляторних батарей, для котрих $I_{\text{макс}} = 250 \text{ А}$, $U_{\text{ном}} = 135 \text{ В}$, $I_{\text{кз}} = 1350 \text{ А}$, $r_{\text{д}} = 0,1 \text{ Ом}$. На основі розрахунку були побудовані залежності ККД як окремих елементів та контурів, так і системи у цілому, при зміні частоти, щільності та струму навантаження. Для кожного випадку проведено аналіз якісної та кількісної картини зміни ККД і зроблені відповідні висновки про можливість реалізації таких параметрів уп-

равління, при яких втрати енергії у системі АБ-ІП-ДПС були б мінімально можливими для різних режимів роботи.

На мал.14-15 зображені залежності ККД системи з транзисторним та тиристорним перетворювачами з ємнісним фільтром у колі акумуляторної батареї та без нього, для режимів тяги і рекуперативного гальмування. Головні висновки за результатами проведеного аналізу такі:

1. Застосування ємнісного фільтру, що вмикається паралельно АБ, покращує енергетичні показники не тільки джерела живлення, але й системи в цілому, не зважаючи на втрати у фільтрі.

2. Найбільш доречним діапазоном частот, що забезпечує максимальні значення ККД системи АБ-ІП-ДПС з транзисторним перетворювачем, слід вважати діапазон 1 - 5 кГц.

3. Для всіх частот та струмів ККД системи має мінімальні значення при $\gamma < 0,3$. Тому режими регулювання з малими щільностями (особливо при великих струмах навантаження) слід або зовсім не застосовувати, або максимально обмежити час їх дії.

4. Найбільш доречними параметрами управління, при яких ККД системи АБ-ІП-ДПС з тиристорним перетворювачем приймає найбільші значення, слід вважати діапазон частот 200-600 Гц при щільності $0,4 \leq \gamma \leq 1$ та струмах навантаження до $0,8 I_{\text{макс}}$.

5. Тиристорна система має гірші енергетичні показники у порівнянні з системою з транзисторним перетворювачем, що особливо помітно в області малих частот (менше 200 Гц), а також у режимах малих струмів при $\gamma < 0,4$.

6. Для забезпечення достатньо ефективної рекуперації енергії у батарею необхідно дотримуватися режимів, для яких $\gamma \leq 0,5$; $I \leq 0,7 I_{\text{макс}}$, а частота відповідає діапазону, вказаному у п.2.

7. Найбільш несприятливі режими рекуперації виникають при малих струмах ($I \leq 0,3 I_{\text{макс}}$) у області низьких частот ($f < 200$ Гц) практично для всіх значень γ , а також для великих струмів ($I > 0,5 I_{\text{макс}}$) та малих значень щільності ($\gamma \leq 0,3$) у області великих частот ($f > 500$ Гц).

Крім того, слід підкреслити, що завдяки тому, що проведений аналіз включає в себе дослідження впливу на ККД системи АБ-ІП-ДПС як частоти, так і щільності, зроблені висновки справедливі для будь-яких відомих способів імпульсного регулювання.

Таким чином, результати аналізу енергетичних показників у функції параметрів управління перетворювачем, що були отримані у п. 2 цієї глави відповідно для тягового та рекуперативного режимів, доз-

волили сформулювати ряд окремих та загальних висновків і рекомендацій, що мають на меті підвищення енергетичної ефективності як окремих елементів, так і систем автономних приводів у цілому у довільних режимах роботи. Однак, реалізація задачі підвищення ефективності автономних тягових приводів потребує розробки функціонально потужних систем управління та відповідного алгоритмічного забезпечення, яке повинно повною мірою враховувати отримані вище результати.

У шостій главі розглянуто системи управління напівпровідниковими імпульсними перетворювачами у ретроспективі розвитку елементної бази, що застосовувалась для створення таких систем, аналізуються характеристики та принципи побудови систем управління, більш детально розглядаються системи із застосуванням мікропроцесорної техніки, проведено також аналіз внутрішніх дискретних контурів електроприводу електромобіля за лінійним наближенням різницьових рівнянь та розглянуто основи і принципи реалізації упереджувачого управління імпульсними напівпровідниковими перетворювачами у системах енергоживлення електромобілів.

Системи управління (СУ) у перетворювальній техніці займають важливе місце. З розвитком елементної бази ці системи пройшли кілька етапів свого розвитку - транзисторні системи управління, СУ на основі аналогових елементів, цифрові СУ, спеціалізовані цифро-аналогові СУ та мікропроцесорні системи управління (МПСУ). Забезпечуючи в тій чи іншій мірі різні характеристики управління та режими регулювання всі перелічені системи управління відрізняються за складністю, надійністю, вартістю та функціональними можливостями.

Відомо, що передумовами застосування мікропроцесорів є:

1) покращення характеристик приводів; 2) стандартизація та уніфікація регуляторів; 3) зменшення числа вузлів; 4) підвищення надійності; 5) зменшення витрат.

Однак МПСУ повинні бути зорієнтовані не на просту заміну систем, побудованих на дискретних компонентах та інтегральних схемах (хоча і в цьому випадку має місце ефект економії), а на забезпечення обробки максимально необхідного об'єму інформації для реалізації оптимального управління автономним об'єктом.

Розробка МПСУ включає в себе декілька етапів, найважливішими з яких є вирішення алгоритмічної задачі, створення апаратної частини та розробка прикладного програмного забезпечення. Кожен з етапів є складною самостійною задачею, хоча і вирішуються вони у тісному взаємозв'язку.

На мал.16 зображена загальна структура бортового тягового електрообладнання електромобіля у взаємозв'язку з МПСУ. У даному випадку не розглядається конкретна схема системи управління, а лише показані необхідні інформаційні зв'язки її з об'єктом для реалізації двохзонного регулювання у тяговому та гальмівному режимах руху електромобіля.

З наведеного малюнку видно, що МПСУ отримує та обробляє кілька аналогових сигналів (напруга АБ; струм АБ; напруга тахогенератора, пропорційна швидкості руху; напруга та струм якоря ДПС; напруга, пропорційна температурі двигуна; струм збудження; напруга з задавачів руху (акселератора) та гальмування, а також дискретних сигналів 0 чи 1, про наявність аварійних струмів, стан контактору реверса, спокою акселератора і т.п. Результатами обробки цих сигналів у відповідності до прийнятих алгоритмів є керівні дії. Як показав досвід експлуатації, МПСУ забезпечує стійке безаварійне управління приводом у відповідності до розроблених алгоритмів, блокує неправильні дії водія, надійно відпрацьовує аварійні режими та виводить на індикацію причини примусових вимикань чи незапусків елементів тягового електрообладнання.

У майбутньому на МПСУ також будуть покладені такі функції, як управління зарядним перетворювачем, облік балансу зарядно-розрядних ампергодин бортової АБ, функціональне тестування та відповідну індикацію стану головних компонентів бортового електрообладнання. Слід підкреслити, що останнім часом перевага надається системам, які побудовані на спеціалізованих мікросхемах та мікропроцесорним системам управління.

Очевидно, що напрям підвищення ефективності силових приводів та систем регулювання електромобілів має розвиватися не тільки шляхом підвищення ККД окремих вузлів та систем, але й шляхом підвищення ефективності їх взаємодії та якості регулювання. Тому вирішення актуальної проблеми створення електромобілів з високоефективними системами регулювання потребує детального аналізу внутрішніх контурів електроприводу електромобіля. Розгляд дискретних систем управління дуже доречний також з точки зору високоефективних компонентів спеціального електрообладнання електромобілів.

Для управління силовими ключами у колі якоря електроприводу електромобіля використовується інтегральний закон частотно-імпульсної модуляції довжини імпульсу та паузи. З метою порівняння паралельно аналізуються динамічні властивості аналогічних контурів, але

модуляцією або тільки довжини імпульсу, або паузи. У роботі отримані аналітичні вирази та побудовані графічні залежності типових годографів замкнених контурів з лінійною нерозривною частиною першого порядку та інтегральною частотно-імпульсною модуляцією. У результаті теоретичного аналізу були зроблені такі висновки:

1. При всіх рівних умовах у системі з модуляцією і імпульсу, і паузи фаза комплексно-спряжених коренів зростає швидше, кордон області стійкості визначається умовою, коли найбільший модуль кореня характеристичного рівняння стає рівним одиниці.

2. При двоохонному регулюванні швидкості обертання тягового двигуна для підтримки на заданому рівні струму збудження доречно застосовувати систему без пилкоподібного сигналу, тому, що при цьому здійснюється найбільша швидкодія, що дуже важливо при різкозмінному навантаженні електроприводу автомобіля.

3. Розрахункова частота пропускання контуру з частотно-імпульсною модуляцією другого роду при рівних довжині імпульсу та його паузи в усталеному режимі у два рази вища, ніж при роздільній модуляції довжини імпульсу чи паузи вихідної напруги перетворювача.

У сьомій главі представлені відомості про лабораторно-стендові засоби для проведення експериментальних досліджень та випробувань низьковольтних напівпровідникових імпульсних перетворювачів у складі тягових електроприводів.

Проведено детальні експериментальні дослідження тиристорних перетворювачів з підвищеною комутаційною здатністю, силових транзисторних перетворювачів, а також перетворювачів та стабілізаторів для вторинних джерел живлення та внутрішніх споживачів. Аналіз осцилограм та результатів числової обробки експериментів показав високу збіжність з результатами та висновками теоретичних досліджень.

У роботі наведена інформація про результати розробки, випробувань та експлуатації МПСУ, що застосовуються для управління тиристорними та транзисторними імпульсними перетворювачами електромобілів, а також інформація про реалізовані алгоритми та програми оптимального управління приводом автомобіля.

Описані силові імпульсні перетворювачі та напівпровідникові пристрої, що були створені для комплектів електрообладнання електромобілів АвтоВАЗу і АвтоЗАЗу та низьковольтного акумуляторного електротранспорту. Їх параметри наведені у табл.1.

У роботі наведені результати ходових випробувань за міським циклом руху SAEj227 електромобілів ВАЗ та ЗАЗ з тиристорними і

Таблиця 1.

№ п/п	Найменування пристрою	Тип транспортного засобу	U _{AB} В	$\frac{P_{ном}}{P_{макс}}$ кВт	P _{ком} кГц	Габаритні розміри мм	Маса кг	Рік
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Низьковольтний тиристорний імпульсний перетворювач	Електрокар ЭК-2	30	$\frac{0,7}{2}$	0,28	350 200 350	20	1972
2.	- *** -	Електро-навантажувач ЕП-0204	80	$\frac{2}{4}$	0,3	365 200 350	22	1973
3.	- *** -	Електрокар ЕН-161	80	$\frac{6,3}{10}$	0,3	455 350 410	30	1973
4.	- *** -	Електромобіль ЗАЗ-968	60	$\frac{4}{8}$	0,3	365 200 350	22	1973
5.	Транзисторний імпульсний перетворювач	Електромобіль ВАЗ-2701	120	$\frac{12}{25}$	10	300 15 250	12	1985
6.	Блок вторинного живлення	Електромобіль ВАЗ-2801	=120 / =12	0,36	10	180 260 100	5,3	1980
7.	Транзисторний імпульсний перетворювач	Електромобіль ЗАЗ-1109	84	$\frac{10}{20}$	16	350 150 150	10	1991

Таблиця 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8.	Транзисторний імпульсний перетворювач	Електрокар ЭК-2	30	$\frac{1,4}{4}$	2	180 275 100	6,2	1991
9.	Тиристорний імпульсний перетворювач	Електро-мобіль ЗАЗ - II09I	84	$\frac{12}{24}$	0,45	335 155 230	14	1994
10.	Транзисторний імпульсний перетворювач	Електро-мобіль ЗАЗ - II09I	84	$\frac{12}{24}$	18	250 250 115	7	1996
11.	Бортовий зарядний пристрій	Електро-мобіль ЗАЗ-II09	~ 220 / =84	2	20	180 260 100	4,8	1995
12.	Блок вторинного живлення	Електро-мобіль ЗАЗ - II09I	=84 / =12	0,2	20	255 165 87	3,2	1995

транзисторними перетворювачами та мікропроцесорними системами управління. Встановлено, що у різних режимах руху на електромобілі з транзисторним перетворювачем та мікропроцесорною системою управління досягається збільшення міжзарядного пробігу до 28-35 відсотків.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Виконана робота являє собою узагальнення та вирішення комплексу задач підвищення ефективності силових напівпровідникових перетворювачів, первинних та вторинних джерел живлення і систем управління, що стало основою для створення систем енергоживлення постійного струму вітчизняних електромобілів з поліпшеними енерге-

тичними та ергономічними показниками.

1. Теоретично та експериментально вивчено енергетичні та функціональні характеристики та параметри компонентів систем енергоживлення, визначено оптимальні енергетичні та експлуатаційні критерії, а також особливості та вимоги, які необхідно враховувати при розробці систем енергоживлення постійного струму електромобілів.

2. Досліджено енергетичні характеристики тягової акумуляторної батареї для різних форм та параметрів струмів навантаження. Розроблено метод визначення оптимальної енергоємності автономного джерела живлення електромобіля та визначено умови, що впливають на вибір рівня оптимальної напруги бортового джерела.

3. Виконано дослідження електромагнітних процесів у силових тиристорних перетворювачах з урахуванням особливостей їх роботи від бортової тягової акумуляторної батареї, що стало основою для розвитку методів поліпшення комутаційної надійності низьковольтних імпульсних перетворювачів з різними принципами побудови та схемами реалізації, виконуваними функціями і характером навантажень. Одержано аналітичні залежності для основних параметрів, що характеризують комутаційну здатність тиристорного перетворювача у низьковольтному електроприводі постійного струму.

4. Досліджено процеси комутації у силовому транзисторному ключі акумуляторного електроприводу, запропоновано новий пристрій формування траєкторії перемикання робочої точки транзисторного ключа та розроблено пристрій пропорційно-струмового управління, що дозволило зменшити як миттєву потужність на інтервалах комутації, так і здійснити управління імпульсним перетворювачем з мінімальними втратами при змінах струму навантаження у широкому діапазоні.

5. Розроблено метод визначення коефіцієнта корисної дії як окремих елементів, так і усієї системи енергоживлення електромобіля, а також проведено дослідження енергетичних характеристик системи енергоживлення в залежності від параметрів управління імпульсним перетворювачем. Показано, що доцільний діапазон частот комутації транзисторного імпульсного перетворювача, який визначається з умов оптимізації масогабаритних показників фільтра та охолоджувача, відповідає діапазону, який визначається з умов оптимального ККД системи енергоживлення.

6. Розроблені, обґрунтовані та реалізовані за допомогою мікропроцесорних засобів алгоритми управління напівпровідниковими перетворювачами, що забезпечують підвищення ефективності систем енер-

гоживлення електромобілів.

7. Досліджено електромагнітні процеси у запропонованих напівпровідникових пристроях багатфункціонального призначення, які придатні до роботи як у силових колах, так і у колах живлення допоміжних компонентів системи енергоживлення електромобіля. Отримано аналітичні вирази для розрахунку оптимальних частот комутації, що визначаються стабілізаційними характеристиками пристрою, розроблено інженерні методики розрахунку та проектування подібних пристроїв.

8. На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено ряд нових напівпровідникових пристроїв (силових перетворювачів, систем управління, стабілізаторів, вторинних джерел живлення, зарядних пристроїв), що дозволило створити компоненти тягового електроприводу та спеціального електрообладнання для електромобілів ВАЗу та ЗАЗу, а також для внутрішньозводського електротранспорту. Випробування цих пристроїв у реальних умовах руху в міському циклі та великий комплекс стендових випробувань підтвердили вірність вибраних технічних рішень та обґрунтованість теоретичних передумов, а також покладених в основу методів їх проектування.

Основні положення дисертації викладено у наступних роботах:

1. Гладышев С.П., Павлов В.Б. Динамика дискретно управляемых полупроводниковых преобразователей. - Киев: Наукова Думка, 1983. - 224 с.
2. Жуйков В.Я., Павлов В.Б., Стжелецки Р.Г. Системы упреждающего управления вентильными преобразователями - Киев: Наукова Думка 1991. - 240 с.
3. Павлов В.Б., Шидловский А.К., Скиданов В.М., Рычков В.А. Полупроводниковые преобразователи в автономном электроприводе постоянного тока. - Киев: Наукова думка, 1987. - 283 с.
4. Шидловский А.К., Павлов В.Б. Тиристорные преобразователи постоянного напряжения для низковольтного электротранспорта. - Киев: Наукова думка, 1982. - 188 с.
5. Овчаренко А.А., Юрченко О.Н., Скиданов В.М., Павлов В.Б. Анализ работы транзисторного импульсного преобразователя // Техн. электродинамика. - 1994. - №2. - С.42-45.
6. Павлов В.Б. Анализ коммутационной способности схем низковольтных импульсных преобразователей. // Проблемы технической электродинамики. вып. 62, Наукова Думка. Киев 1977. С.91-93.
7. Павлов В.Б. Исследование реверсивных импульсных преобразователей. / Сб. Повышение качества электрической энергии. Киев. Нау-

кова Думка; 1978. С. 58-62.

8. Павлов В.Б. Методы снижения пульсаций тока при импульсном управлении тяговым электродвигателем постоянного тока. / В кн.: Проблемы преобразовательной техники. Киев ИЗД АН УССР. 1983. ч. I. С. 80-84.

9. Павлов В.Б., Павлов И.А. Преобразователь постоянного напряжения в импульсы переменной сважности. // Техническая электродинамика, 1980. №3, С. 35-39.

10. Павлов В.Б., Скиданов В.М. Энергетические показатели системы аккумуляторная батарея - широтно-импульсный преобразователь - двигатель постоянного тока электромобиля в тяговом режиме // Техническая электродинамика. - 1983. - №6. - С. 61-69.

11. Павлов В.Б., Скиданов В.М., Рычков В.А. Электромобиль. Технический и эксплуатационный аспекты. - Промышленный транспорт. 1987. №10. С. 11-12.

12. Рычков В.А., Овчаренко А.А., Юрченко О.Н., Павлов В.Б., Скиданов В.М. Низковольтный импульсный транзисторный преобразователь // Техн. электродинамика. - 1993. - №4. - С. 27-31.

13. Рычков В.А., Павлов В.Б., Скиданов В.М., Юрченко О.Н., Овчаренко А.А. Эффективный преобразователь для низковольтного электро-транспорта. // Энергетика и электрификация. - 1992. - №4. - С. 49-51.

14. Скиданов В.М., Павлов В.Б., Рычков В.А. Некоторые критерии параметров управления и их реализация в системе автономного электропривода. // Повышение качества электрической энергии. Сб. научн. тр. - Киев: Наукова думка, 1983. - С. 177-181.

15. Скиданов В.М., Павлов В.Б. Реализация комбинационных логических структур в системах управления на базе микропроцессора // Процессы в устройствах преобраз. параметров электрической энергии. Сб. науч. тр. - Киев: Наук. думка, 1983. - С. 38-51.

16. Шидловский А.К., Павлов В.Б. Электромагнитные процессы в импульсном преобразователе с повышенной коммутационной способностью // Методы и средства повышения качества электрической энергии. - Киев: Наукова Думка, 1976. - С. 148-153.

17. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Скиданов В.М., Рычков В.А. Эффективность использования энергии аккумуляторной батареи, как функция формы разрядного тока при импульсном регулировании // Повышение качества электрической энергии. Сб. научн. тр. - Киев: Наукова думка, 1983. - С. 14-20.

18. Шидловский А.К., Скиданов В.М., Павлов В.Б., Юрченко О.Н. Энергетические показатели автономного электропривода постоянного тока с комбинированным широтно - импульсным регулятором. // Техническая

электродинамика. - 1989. №3. - С.31-36.

19. Шидловский А.К., Скиданов В.М., Павлов В.Б., Юрченко О.Н. Энергетические показатели автономного электропривода постоянного тока с комбинированным широтно-импульсным регулятором // Техн. электродинамика. - 1989. - №3. - С.31-36.

20. Шидловский А.К., Юрченко О.Н., Павлов В.Б., Скиданов В.М. Анализ энергетических показателей источника вторичного электропитания низковольтных потребителей транспортных средств. // Техническая электродинамика. - 1989. №4. С.27-31.

21. Шидловская Н.А., Павлов В.Б. Анализ электромагнитных процессов в системе энергоснабжения электроавтомобиля. // Электротехнологии и ресурсосбережение. - 1996. - №3. - С.17-20.

22. А.с. №570505 (СССР) Устройство для импульсного регулирования частоты вращения тягового электродвигателя постоянного тока. / Павлов В.Б. - Оpubл. в Б.И. 1977, №32.

23. А.с. №586015. (СССР) Устройство импульсного регулирования тягового электродвигателя. / Шидловский А.К., Павлов В.Б. - Оpubл. в Б.И. 1978. №48.

24. А.с. №591995. (СССР) Преобразователь постоянного тока в постоянный. / Гречко Э.Н., Павлов В.Б., Якимов О.С., Фирсов О.Н. - Оpubл. в Б.И. 1978. №5.

25. А.с. №647154 (СССР) Устройство для импульсного регулирования частоты вращения тягового электродвигателя постоянного тока. / Шидловский А.К., Павлов В.Б. Степанов А.С., Хайков А.А. - Оpubл. в Б.И. 1979. №6.

26. А.с. №663053. (СССР) Устройство для управления электродвигателем постоянного тока последовательного возбуждения. / Шидловский А.К., Павлов В.Б. - Оpubл. в Б.И. 1979. №18.

27. А.с. №935331 (СССР) Устройство для импульсного управления тяговым электродвигателем постоянного тока. / Шидловский А.К. Павлов В.Б., Скиданов В.М., Степанов А.С. и др. - Оpubл. в Б.И., 1982, №22.

28. А.с. №955412 (СССР) Устройство для формирования импульсов управления. / Шидловский А.К., Павлов В.Б., Степанов А.С. Скиданов В.М., и др. - Оpubл. в Б.И., 1982, №32.

29. А.с. №1051683 (СССР) Устройство для управления широтно-импульсным преобразователем. / Шидловский А.К., Скиданов В.М., Гладышев С.П., Павлов В.Б., Рычков В.А. - Оpubл. в Б.И., 1983, №40.

30. А.с. №1185518. (СССР) Электропривод постоянного тока. / Шидловский А.К., Павлов В.Б., Липковская И.П. и др. - Оpubл. в Б.И.

• 1985. №38.

31. А.с. №191913. (СССР) Устройство ввода-вывода информации. / Шидловский А.К., Павлов В.Б., Скиданов В.М. и др. - Оpubл. в Б.И. 1985. №42.
32. А.с. №1576373 (СССР) Устройство для управления тяговым электродвигателем постоянного тока независимого возбуждения. / Шидловский А.К., Павлов В.Б., Скиданов В.М. и Юрченко О.Н. - Оpubл. в Б.И., 1990, №25.
33. А.с. №1610587 (СССР) Электропривод постоянного тока. / Павлов В.Б., Рычков В.А., Скиданов В.М., Юрченко О.Н., Андрияшев А.В. - Оpubл. в Б.И., 1990. №44.
34. А.с. №1653116 (СССР) Устройство для управления электродвигателем постоянного тока. / Павлов В.Б., Скиданов В.М., Юрченко О.Н., Андрияшев А.В. - Оpubл. в Б.И. 1991. №20.
35. А.с. № 1750010 Устройство для управления тиристорным преобразователем постоянного напряжения. / Павлов В.Б., Скиданов В.М., Рычков В.А. и др. - Оpubл. в Б.И., 1992, №27.
36. Павлов В.Б. Повышение надежности низковольтных импульсных преобразователей. - Киев, 1976. - 46 с. - (Препринт/ Ин-т электродинамики АН Украины; №125).
37. Шидловский А.К., Гладышев С.П., Павлов И.А., Павлов В.Б., Рычков В.А. Анализ внутренних контуров электропривода электромотоцикла. - Киев. 1981. 27 с. (Препринт/Институт электродинамики АН Украины №271).
38. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Скиданов В.М., Юрченко О.Н. Источники питания электромотоциклов и автономных транспортных средств. - Киев-1996г. - 44с. (Препринт/Институт электродинамики НАН Украины, №786).
39. Павлов В.Б. Павлов И.А., Скиданов В.М., Степанов А.С. Микропроцессор в системе управления тиристорным преобразователем привода электромотоцикла. / Сб. Проблемы преобразовательной техники, тезисы доклада на Всесоюзной н-т конференции. Киев. ИЗД АН УССР. 1979. ч. III. с. 63-66.
40. Павлов В.Б., Скиданов В.М., Юрченко О.Н. Источник питания низковольтных потребителей транспортных средств от контактной сети постоянного напряжения. // Проблемы преобразовательной техники: Тез. докл. 4 Всесоюз. научн.- техн. конф. - Киев-1987. - ч. I. - С. 176-177.
41. Шидловский А.К., Драбович Ю.И., Павлов В.Б. и др. Транзисторный импульсный преобразователь для привода электромотоцикла // Всесоюз. научно-техн. конф. "Пробл. преобразов. техники", Киев, сент. 1979 г.

Тез. докл.- Киев : ІЗД АН УССР, 1979.-ч. І.-с. 78-81.

Особистий вклад автора в основних публікаціях: роботи [6,7, 8,36] написані особисто; у монографії [1] самостійно написані гл.4 і 6, у монографії [2] гл. 1,5,7, у монографії [3] гл.1-4, у монографії [4] гл.1-3. У роботах [5,9-16,37,41] автором виконана постановка задачі та розроблені основні теоретичні положення. У інших роботах вклад всіх співавторів рівноцінний. У роботах 22 - 35 вклад автора визначається справками про творчу участь у створенні винаходу.

А Н Н О Т А Ц И Я

Павлов В.В. Полупроводниковые преобразователи в системах энергоснабжения постоянного тока электромобилей. Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 - полупроводниковые преобразователи электроэнергии. Институт электродинамики НАН Украины, Киев, 1996.

Защищается 53 научных работы и 22 авторских свидетельства, которые содержат теоретические исследования систем энергоснабжения постоянного тока электромобилей с полупроводниковыми преобразователями, а также результаты экспериментальных исследований силовых тяговых преобразователей, систем управления и специального вспомогательного электрооборудования. Установлено, что предложенные новые методы исследования и практические разработки обеспечивают повышение энергетической эффективности тяговых приводов электромобилей. Осуществлено промышленное внедрение тягового электрооборудования на электромобилях ВАЗ, ЗАЗ и на низковольтном внутризаводском электротранспорте.

S U M M A R Y

V.Pavlov. Semiconductor converters in direct current energy supply systems of Electric Vehicles. Dissertation in the form of manuscript for a doctor's degree in technical sciences in specialty 05.09.12 - Semiconductor converters of electric energy. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Elektrodynamics, Kiev, 1996.

53 scientific works and 22 author's certificates are being defended and contains theoretical researches of DC energy supply

systems with semiconductor converters for Electric Vehicles and experimental researches results of power traction converters, control systems and special auxiliary electric equipment. It is established, that new methods of researches and working out practical models wich are proposed allow to increase energetical efficiency of Electric Vehicle's traction drives. The introduction into industrial practice of traction electric equipment is performed at Electric Vehicles of VAZ, ZAZ and at low voltage intraplant electric tranports.

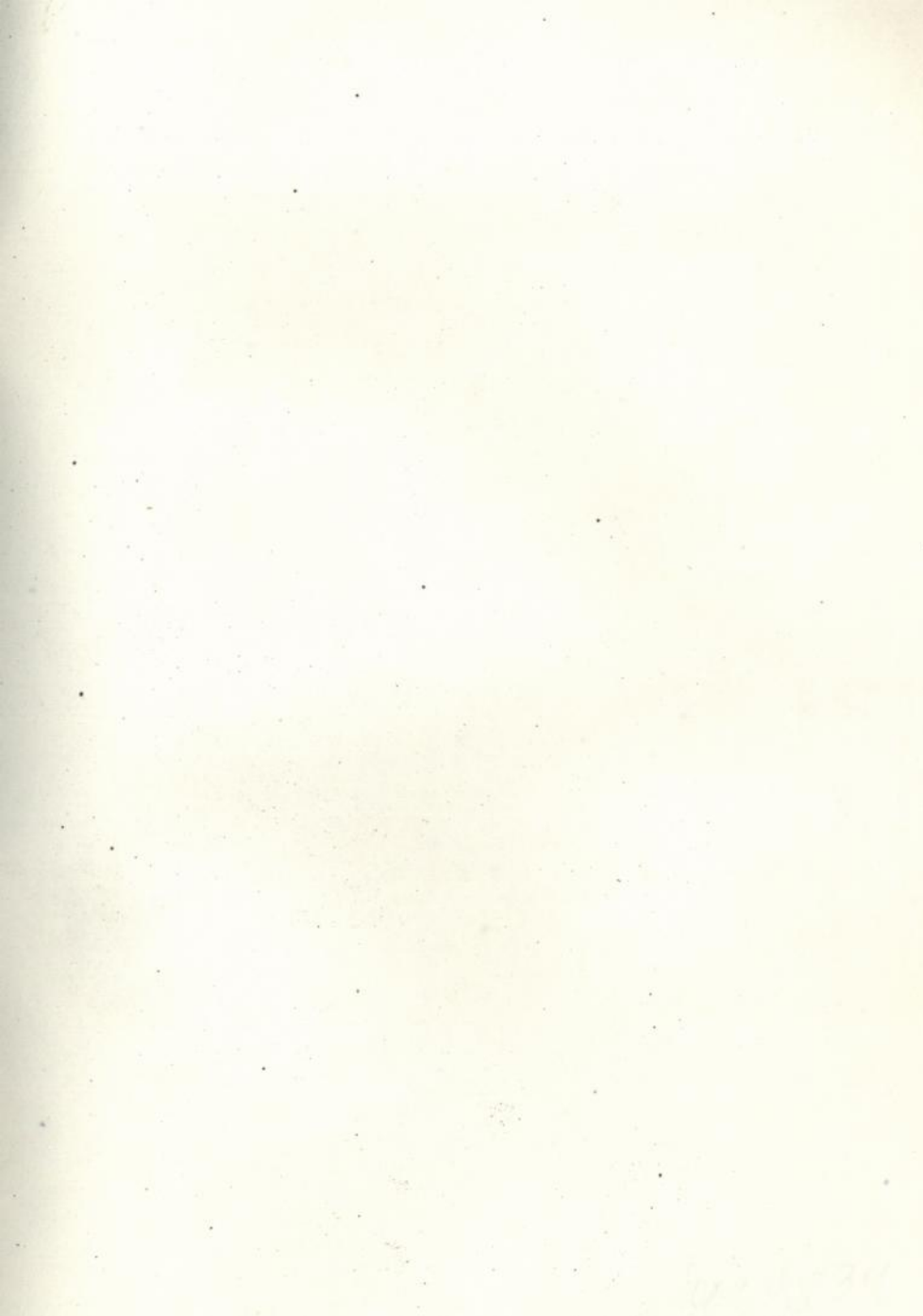
Ключові слова: система енергоживлення, електромобіль, ефективність, перетворювач, акумуляторна батарея. тяговий привод.

Підписано до друку 17.09.96р. Формат 60x84/16

Папір офсетний. Умовн.-друк.аркуш.2,0

Об.-вид.аркуш 2,0. Тираж 120 : Замовл.324 .

Поліграф. ДІІІІ. Інституту електродинаміки АН України,
252680, Київ-57, проспект Перемоги,56



438834

AB 35.776