

Харківська державна академія залізничного транспорту

ГУСЄВСЬКИЙ Юрій Ілліч

УДК 629.424.4: 621.335-833

**НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ТЯГОВОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ТИРИСТОРНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДЛЯ
АВТОНОМНИХ ЛОКОМОТИВІВ**

**05.22.07 - Рухомий склад залізниць
та тяга поїздів**

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

Харків 1999
Дисертацією є рукопис

**Робота виконана на кафедрі "Системи електричної тяги"
Харківської державної академії залізничного транспорту Міністер-
ства транспорту України**

**Науковий консультант: доктор технічних наук, професор ПАНАСЕНКО
Микола Васильович, завідувач кафедрою
"Системи електричної тяги" Харківської
державної академії залізничного транспорту**

Офіційні опоненти :

1. Доктор технічних наук, професор, директор

Українського науково-дослідного інституту електровозобудівництва,
м. Дніпропетровськ

БРАТАШ

Віктор Олександрович

2. Доктор технічних наук, професор кафедри
"Експлуатація та ремонт рухомого складу"

Харківської державної академії залізничного транспорту, м.Харків

КОЛЕСНИК

Іван Кузьмич

3. Доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедрою "Електротехніка"

Харківської державної академії міського господарства, м.Харків

СОСКОВ

Анатолій Георгієвич

Провідна організація - Харківський політехнічний університет, кафедра "Локомотивобудування", Міністерство освіти України, м.Харків

Захист відбудеться " 6 " 05 1999 р. о 14⁰⁰ годині в ауд. 417 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.820.04 при Харківській академії залізничного транспорту за адресою: 310050, м. Харків-50, площа Фейєрбаха, 7

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці академії

Автореферат розісланий " 2 " 04 1999 р

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

ЗАПАРА В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Основний вид залізничної тяги на неелектрифікованих ділянках залізниць України - тепловозна. По даним 1994 року приписний парк залізниць України складав майже 2200 одиниць магістральних тепловозів різноманітного призначення і потужності. Із них найбільш масовими є тепловози: 2ТЕ10 (424 од.), 2ТЕ116 (588 од.), М62 (536 од), ТЕП60 (231 од.). Маневрова робота на залізничних станціях також виконується тепловозами. Парк маневрових тепловозів на Україні налічує понад 2100 одиниць. В основному це тепловози типу ЧМЕЗ різноманітних модифікацій. Видно, що за два останніх десятиріччя тепловози не зазнали серйозних технічних удосконалень і характеризуються показниками, що застаріли, практично за всіма технологічними та експлуатаційними параметрами. Тому в умовах старіння локомотивного парку, обмеженості фінансових, виробничих і трудових ресурсів надто актуально стає проблема підвищення ефективності автономних локомотивів. Це підтверджується прийнятими Міністерством транспорту України і Укрзалізницею рішеннями, що відбиті в документі "Концепція та програма реструктуризації на залізничному транспорті України". Щодо автономних локомотивів, то в ближчий час намічено списати

тепловози типу ТЕП60, 2ТЕ10Л, що відпрацювали свій ресурс і морально застаріли, а також оновити локомотивний парк України новими магістральними пасажирськими, маневровими тепловозами та дизель-поїздами. В тепловозах нового покоління, опрацьованих ведучими зарубіжними фірмами, на підставі попередніх науково-дослідних робіт застосовані нові технічні рішення в конструкції локомотивів. В першу чергу, це торкається широкого застосування тягових асинхронних електродвигунів (АД), що дозволило суттєво підвищити надійність, коефіцієнт тяги та продуктивність локомотивів, покращити їх статичні і динамічні характеристики, знизити поточні витрати на експлуатацію і ремонт. Сучасні тенденції розвитку локомотивобудування складаються з широкого впровадження систем асинхронного тягового електроприводу, що підтверджується успішним досвідом експлуатації кількох тисяч локомотивів. Це говорить про те, що рішення проблеми удосконалення вітчизняних автономних локомотивів неможливо без утворення більше прогресивних систем тягового електроприводу (ТЕП) і підвищення їх ефективності. Для рішення цієї важливої народногосподарської проблеми створені сприятливі передумови, що базуються на досягненнях сучасної електроніки та перетворювальної техніки. Застосування тиристорних перетворювачів електроенергії в системах автономного ТЕП є якісно новим і перспективним напрямком удосконалення вітчизняних автономних локомотивів. Їх використання надає ТЕП нові інтегративні (системні) властивості. В той же час проблема створення більш удосконалених систем автономного ТЕП з тиристорними перетворювачами сполучена з необхідністю рішення нових складних та нетрадиційних для сучасного локомотивобудування завдань, зв'язаних з недостатньою вивченістю електроенергетичних процесів в силових ланцюгах автономних локомотивів, недостатньою обґрунтованістю технічних рішень, що приймаються, необхідністю забезпечення умов електромагнітної сумісності тягових перетворювачів з джерелом живлення і тяговими електродвигунами, оптимізацією режимів роботи силового тягового електрообладнання. В зв'язку із зростаючими вимогами до якості сучасних автономних локомотивів та з урахуванням необхідності всілякої економії топливно-енергетичних ресурсів та дефіцитних електротехнічних матеріалів в дисертації виконані дослідження, спрямовані на вирішення важливої прикладної наукової проблеми створення ефективних методів та засобів управління електроенергетичними процесами в системах автономного ТЕП з тиристорними перетворювачами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалася відповідно до Цільової комплексної програми розвитку транспортного комплексу України "Транспорт", по бюджетним темам Міністерства транспорту України (тема: "Розробка, макетування та дослідження раціональних структур асинхронного тягового електроприводу для перспективного електрорухомого складу"), по замовленню Укрзалізниці (тема: "Проведення досліджень, розробка конструкторської документації, та доводка стенду електричної передачі дизель - поїзду з двофазними асинхронними тяговими дви-

гунами") і т.д.

Мета і задачі дослідження.

Мета роботи містить рішення науково-технічної проблеми підвищення ефективності систем ТЕП шляхом розширення їх функціональних можливостей та підвищення керованості за рахунок застосування в силових схемах ТЕП тиристорних перетворювачів з урахуванням зовнішніх обмежень, що накладаються специфікою автономних локомотивів, а також в уточненні закономірностей протікання електроенергетичних процесів і в опрацюванні методів та засобів управління тяговим електрообладнанням і ТЕП в цілому.

Для досягнення зазначеної цілі необхідно вирішити ряд наступних взаємозв'язаних завдань :

- синтез і дослідження ефективних структур автономного ТЕП з тиристорними перетворювачами;
- удосконалення схемотехніки і режимів роботи силових перетворювачів з урахуванням специфіки автономних локомотивів і динаміки розвитку нових виробів силової і слабкострумкової електроніки;
- аналіз можливих аварійних станів в ТЕП та синтез ефективних засобів захисту основного тягового електрообладнання;
- підвищення якості систем автоматичного управління і регулювання ТЕП, удосконалення елементів автоматики;
- опрацювання більш досконалих методів аналізу, синтезу, розрахунку і експериментальних досліджень елементів і систем автономного ТЕП в цілому;
- опрацювання заходів, сприятливих компонуванню тягового електрообладнання, що знову створюється, в обмеженому просторі кузову локомотива.

Методика дослідження.

Об'єктом дослідження є перспективні системи тягового електроприводу автономного локомотива, а предметом досліджень - основне і допоміжне тягове електрообладнання.

При проведенні досліджень використані методологічні основи досліджень ефективності технічних систем, включаючи методи системного аналізу. Теоретичні дослідження базуються на теорії диференціальних і інтегральних рівнянь, засобах чисельного і гармонійного аналізу, теорії матриць. Дослідження електроенергетичних процесів в тиристорних перетворювачах ТЕП змінно-постійного струму виконані способом імітаційного моделювання складних логіко - диференціальних систем, експериментальні дослідження проведені на натурних стендах і на реальних об'єктах.

Достовірність одержаних в дисертації наукових результатів підтверджується коректністю прийнятих допущень, обґрунтованістю теоретичного аналізу, стійкою збіжністю результатів аналітичних та експериментальних досліджень (погрішність результатів в статичних режимах не перевищує 5%, в динамічних режимах - не більше 15%).

Наукова новизна одержаних результатів :

Наукова новизна полягає в одержанні нових науково-обґрунтованих результатів в галузі рухомого складу залізниць та тяги

поїздів, що є основою для рішення важливої науково-практичної проблеми утворення ефективних систем ТЕП з тиристорними перетворювачами для автономних локомотивів:

- розроблений і теоретично обґрунтований спосіб синтезу інваріантних систем фазо-імпульсного керування (СІФК) випрямлячами, що керуються (КВ), при напрузі і частоті джерела живлення, що змінюються, і пов'язано з регулюванням частоти обертання тягового синхронного генератора (СГ); при використанні відомих методів синтезу не можна створити систему фазового управління з граничною швидкістю та із стабілізацією коефіцієнту передачі блоків КВ-СІФК в указаних умовах;
- виконаний теоретичний аналіз режимів роботи гібридного КВ, що складається із двох послідовно включених трифазних нульових тиристорних схем і живиться відповідно від двох трифазних джерел з довільним фазовим зсувом між ними; дано математичний опис регульованих характеристик та передаточних коефіцієнтів гібридного КВ, працюючого в напівкерованому та керованому режимах; до цього часу зазначені КВ досліджені тільки в режимі симетричного управління і при фіксованому фазовому зсуві $\pi/6$ між двома джерелами живлення;
- розроблений метод компенсації надмірної реактивної енергії навантаження в інверторному ТЕП тепловозу з АД і з джерелом живлення, який не має зворотної провідності; метод заснований на введенні фазового зсуву моментів комутації між паралельно працюючими автономними інверторами напруги (АІН) на кут, кратний їх кількості; це дозволило відмовитися від застосування спеціальних компенсуючих конденсаторів і звести до мінімуму об'єм і масу перетворювальної установки;
- виконано теоретичне обґрунтування доцільності застосування на перспективних автономних локомотивах систем ТЕП з двофазними блоками АІН-АД; ці висновки базуються на результатах аналізу тимчасових гармонік магнітного потоку в повітряному зазорі АД (при m і 2), аналізу електроенергетичних процесів в АІН, які показали можливість спрощення силової схеми ТЕП і зниження приблизно в 2 рази додаткових втрат в АД при несінусоїдальному живленні; наведені способи технічної реалізації таких систем і розроблені методи розрахунку фазних струмів АД та синтезу оптимальних кривих фазної напруги АІН, наведені способи їх технічної реалізації і розроблені узагальнений метод розрахунку фазних струмів АД та метод синтезу оптимальних кривих фазної напруги АІН;
- розроблено метод синтезу швидкодіючих логічних захистів тягового блоку СГ-В (В - силовий некерований випрямляч), заснований на безперервному контролі фазних напруг СГ, вияві та ідентифікації аварійного стану з ознакою одночасної рівності потенціалів всіх фаз хоч би в одній із зірок тягового СГ; пристрої захисту, що реалізують зазначений принцип, спрацьовують при всіх видах коротких замикань на боці постійного і змінного струму чи при

пробі довольного числа плеч В, а час спрацьовування не перевищує тривалості періоду живлячої напруги; пристрої захисту, що застосовуються в схемах вітчизняних тепловозів, засновані на контролі різниці потенціалів між нулями зірок тягового СГ, не реагують на симетричні короткі замикання і не мають високою швидкістю;

- дано теоретичне обґрунтування нових принципів побудови багатуступінчатих безударних захистів тягового блоку АІН-АД; в якості першого ступеня такого захисту рекомендовано логічний захист, що спрацьовує в разі некомутації плеча головних тиристорів інвертора, блокує подачу керуючих імпульсів на протифазні тиристори і здійснює прискорену повторну комутацію аварійного плеча, не допускаючи перекидання інвертора при умовно - обернутих відмовах тиристорів; другий ступінь спрацьовує при перекиданні інвертора, включає тиристорний короткозамикач (ТКЗ) і протягом першої (позитивної) півхвилі коливального перезаряду конденсатора фільтру вимикає аварійний інвертор від джерела живлення, а протягом другої півхвилі - вимикає ТКЗ, не допускаючи виникнення ударних механічних впливів на елементи тягового приводу; зарубіжні тепловози з асинхронним ТЕП аналогічних захистів не мають.

Винесені на захист наукові положення та результати є теоретичною базою для вирішення науково - технічної проблеми утворення ефективних систем ТЕП з тиристорними перетворювачами для тепловозів вітчизняного виробництва, що наново проектується або модернізуються.

Особистий внесок здобувача:

- теоретичні дослідження та модулювання ефективної системи ТЕП змінно-постійного струму з тиристорними перетворювачами, в якому використані максимально відпрацьовані в умовах виробництва та експлуатації серійні тягові електродвигуни постійного струму з послідовним збудженням (ТЕД)*;
- дослідження електромагнітних процесів в двофазних системах АІН-АД, розробка методів синтезу оптимальних кривих фазної напруги [7] та розрахунку фазних стумів двофазного АД* , обґрунтування
- * Тут і далі особистий внесок автора підтверджується опублікованими тезами доповідей і матеріалами конференцій та семінарів.
- доцільності застосування двофазних тягових блоків АІН-АД в ТЕП автономних локомотивів
- опрацювання інваріантної системи автоматичного керування (САК) тягового асинхронного електроприводу тепловоза [24];
- опрацювання методики розрахунку тягових та регулювальних характеристик асинхронного ТЕП автономного локомотива з АІН, що ураховує роботу САК, нелінійність магнітного ланцюга тягових АД та несинусоїдальності їх напруги живлення;
- дослідження впливу пульсацій струму живлення в багатодвигунному ТЕП з АІН та АД на стабільність тягових та регулювальних характеристик автономного локомотиву;
- оцінка відхилення розподілу кривої магнітного потоку в повітря-

ному зазорі АД від синусоїдального закону для різноманітних систем АІН-АД при $m \geq 2$ [9];

- аналіз електромагнітних процесів та дослідження регульовальних характеристик гібридних КВ у різноманітних режимах його роботи при довільному фазовому зсуві між двома симетричними трифазними джерелами живлення [10,11];
- опрацювання принципів інваріантного управління тиристорними випрямлячами в умовах, коли змінюються напруга та частота джерела живлення [8].

Роботи [2,7-11,24] написані автором. Результати робіт [1, 3,23] належать авторам в рівній мірі. В статтях [4-6,12-23], які опубліковані в співавторстві, відбиті результати робіт, виконаних під науковим керівництвом автора. В них автору належать постановка наукових завдань, обґрунтування шляхів і методів їх рішення, аналіз результатів. В роботах [25,26] особистий внесок автора визначений довідками про творчу участь в створенні винаходів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці методів синтезу, розрахунку, експериментальних досліджень систем автоматизованого ТЕП з тиристорними перетворювачами і засобів їх технічної реалізації. Основні висновки та рекомендації автора використані при створенні комплектів тягового електрообладнання, при створенні макетних та дослідних тепловозів, а також в процесі проведення експериментальних та експлуатаційних досліджень. Використання результатів наукової роботи автора підтверджено прикладеними до дисертації актами впровадження від НДІ "Електроважмаш" (м. Харків), ОАО ХК "Коломенський завод" (м. Коломна, Росія), НВО "Електротехніка" (зараз підприємство ESTEL AS, м.Таллінн, Естонія).

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Всесоюзній науково-технічній конференції "Утворення локомотивів великої потужності та підвищення їх технічного рівня" (Ворошиловград, 1981р.), III Всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми розвитку локомотивобудування" (Луганськ, 1990 р.), Всесоюзній науково-технічній конф. "Проблеми створення рухомого складу з асинхронними тяговими двигунами" (Москва, 1986 р.), Республіканській (міжнародній) школі-семінарі "Мікропроцесорні системи зв'язку та управління на залізничному транспорті" (Алушта, 1986...1998 р.р.), II Міжнародній науково - технічній конф. "Проблеми створення рухомого складу з асинхронними тяговими двигунами" (Рига, 1990 р.), II Міжнародній конф. "Стан та перспективи розвитку електрорухомого складу" (Новочеркаськ, 1997 р.), науково-технічних конф. кафедр ХарДАЗТ та фахівців залізничного транспорту.

У повному обсязі матеріали дисертації докладалися на поширених засіданнях кафедри "Системи електричної тяги" Харківської державної академії залізничного транспорту травня 1996 р та 30 травня 1998 р.

Публікації.

Основний зміст дисертації відбито в 1 монографії, 33 стат-

тях, 34 авторських посвідченнях, 40 опублікованих матеріалах та тезах доповідей на міжнародних, Всесоюзних, Республіканських науково-технічних конференціях та семінарах, включаючи науково-технічні конференції ХарДАЗТ.

Структура та обсяг роботи.

Дисертація складається із вступу, семи розділів та висновку, що включають 298 сторінок машинописного тексту, 75 сторінок з малюнками, 14 таблиць. Список літератури із 225 назв (в тому числі 33 закордонних джерел) та двох додатків, які містять 52 сторінки.

З М І С Т Р О Б О Т И

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації та дана загальна характеристика роботи, показано існування великої прикладної наукової проблеми, пов'язаної із необхідністю удосконалення ТЕП автономних локомотивів на базі статичних перетворювачів електроенергії, сформульовані мета та основні завдання дослідження.

В першому розділі проаналізовано поточний стан тепловозного парку в Україні та в країнах далекого зарубіжжя і обґрунтовано існування значної прикладної науково-технічної проблеми, пов'язаної з необхідністю удосконалення вітчизняних автономних локомотивів. Показано, що одним з кардинальних шляхів вирішення цієї проблеми є підвищення ефективності систем автономного ТЕП на базі досягнень перетворювальної техніки. В загальному випадку, система автономного ТЕП, як деяка цілісність, представляє собою сукупність окремих елементів (тягові електричні машини, апаратура управління і регулювання, пристрої захисту), що знаходяться в певних співвідношеннях один з одним. В неї додатково вводяться тиристорні перетворювачі. В зв'язку з цим, ТЕП набуває нові специфічні системні (інтегративні) властивості, які не належать до існуючої системи і жодному з вхідних в неї елементів. Здавалось би ускладнення ТЕП приведе до зниження надійності локомотива, але насправді при тиристорному управлінні силовими агрегатами є можливість на високоякісному рівні вирішити проблему підвищення ефективності ТЕП та локомотива в цілому:

- підвищити тягово-енергетичні характеристики автономних локомотивів з ТЕП змінно-постійного струму за рахунок оптимізації режимів роботи силового тягового електрообладнання;
- застосувати на перспективних локомотивах більш прості і надійні асинхронні електродвигуни у вигляді тягових;
- підняти на (15...20)% коефіцієнт тяги локомотиву за рахунок підвищення жорсткості електромеханічних характеристик тягових електродвигунів при втраті зчеплення;
- підвищити культуру обслуговування локомотивів і скоротити частку важких робіт по ремонту тягового електрообладнання.

Наукові основи утворення ТЕП сучасних вітчизняних тепловозів були закладені в роботах О.Є. Алексєєва, А.Д. Степанова, І.П.

Ісаєва, К.Я. Гаккель. В теорію асинхронного ТЕП і тягових перетворювачів помітний внесок зробили Н.А. Ротанов, А.Т. Бурков, А.С. Курбасов, Ю.Г. Биков, Ю.М. Іньков. Створенню сучасних систем автоматичного управління автономного ТЕП присвячені роботи А.М. Костроміна, Г.І. Загарія, М.І. Аронова. Проте, накопичений до цього часу теоретичний базис і досвід практичних розробок не дозволяють в повній мірі вирішити питання створення ефективних систем автономного ТЕП. Для формування перспективних варіантів вирішення проблеми удосконалення систем ТЕП, вияву масштабів невизначеності по кожному з варіантів і їх зіставлення по ефективності запропонована класифікація систем ТЕП. При її проведенні у вигляді найбільш чітко відбитої категорії прийнято кількість перетворень електроенергії, а у вигляді достатнього признаку (критерію) прийнятий вид її перетворення. Особливу актуальність ця класифікація здобула в умовах безупинного зростання потоків науково-технічної та патентної інформації, що надходить. Вона не вичерпує всіх можливих варіантів структур силового кола ТЕП автономних локомотивів, але дає можливість чітко визначити тип електропередачі, склад силового тягового електрообладнання в її силовому колі і вказати призначення та тип статичних перетворювачів в системах перспективного ТЕП.

Аналіз науково-технічної інформації у галузі систем ТЕП сучасних автономних локомотивів показує, що тривалі тенденції їх розвитку пов'язані виключно з асинхронним електроприводом. Проте вибір варіанту ТЕП для конкретного типу локомотиву може бути виконаний тільки внаслідок аналізу і зіставлення варіантів по цілому ряду показників. Тому першочерговим стає завдання опрацювання наукових основ створення ефективних систем ТЕП на принципі їх декомпозиції (на узагальненому і детальному рівнях). В якості формалізованого критерію ефективності для оцінки перспективних систем ТЕП в рамках концепції оптимізації прийнятий критерій найбільшого середнього результату, що має властивості аддитивності. Сформульовані основні показники ефективності перспективних систем ТЕП.

В другому розділі приведені результати досліджень по удосконаленню тягових електропередач змінно-постійного струму на базі застосування тиристорних перетворювачів в силовій схемі і в схемі енергопостачання власних потреб автономного локомотиву.

Вирішена важлива прикладна проблема, яка пов'язана з розміщенням силових перетворювачів, що наново створюються, в обмеженому просторі кузова локомотива шляхом впровадження на тепловозах розробленою автором системи енергопостачання власних потреб з самозбудженням СГЕ та тиристорними перетворювачами в ланцюгах збудження тягових СГ. Цьому сприяло також об'єднання тягових СГ в єдиний електромашинний агрегат, застосування комплектних пристроїв автоматики і виключення окремих електромашинних збудників. Вперше в практиці вітчизняного тепловозобудування зазначені технічні рішення після всебічних теоретичних та експериментальних досліджень застосовані на тепловозах ТЕ120, 2ТЕ121, ТЕП75, ТЕ136. При утворенні систем самозбудження СГЕ з КВ установлена неефективність

СІФК, робота яких ґрунтується на реалізації широкоживаного вертикального принципу управління з лінійними або арккосинусними фазовими характеристиками. Це пояснюється тим, що напруга та частота тепловозних СГ змінюються (по умовам їх роботи) в широких межах, а в системі самозбудження СГЕ в разі незалежного формування куту керування тиристорами через ланцюг живлення КВ завжди формує внутрішній контур позитивного зворотного зв'язку, що істотно погіршує динаміку системи в цілому. Тому автором проведено пошук та теоретичне обґрунтування ефективних алгоритмів інваріантного керування тиристорами КВ. В основу розробленого алгоритму інваріантного керування покладений принцип інтегрування в часовій області підінтегральної функції $F_i(\omega t)$, яка входить до формули обчислення середнього значення напруги на виході наданої схеми КВ. Інтегрування в кожному з каналів керування ведеться з нульовими початковими умовами, причому за початок відліку прийнятий момент включення даного тиристора, який відповідає еквівалентній діодній схемі. Інтегрування провадиться до моменту виходу наданого тиристора з роботи. Алгоритм формування куту включення (а) тиристорів КВ загальному виді описується виразом:

$$F(d) = \int_0^{\alpha} F_i(\omega t) d\omega t = \frac{2\pi k}{q_m U_m} \left[\frac{q_m \omega r_{\text{и}}}{2\pi k K_{\text{тр}}} U_{\text{ик}} - U_y \right], \quad (1)$$

де $F(d)$ - первісна по відношенню до функції $F_i(\omega t)$ при $\omega t = \alpha$;

U_m - амплітуда фазної напруги джерела живлення;

$t_{\text{и}}$ - постійна часу інтеграторів в кожному із каналів СІФК;

$U_{\text{ик}}$ - кінцеве значення інтегралу на попередньому інтервалі інтегрування.

Інваріантна СІФК, побудована по описаному вище алгоритму, забезпечує стабілізацію коефіцієнту передачі блока КВ - СІФК, має граничну швидкодію та високу перешкодозахисність.

В другому розділі показано також, що неодноразові спроби удосконалення систем автономного ТЕП змінно-постійного струму з некерованими В не дали відчутних результатів і що успішне вирішення цієї проблеми можливо при використанні в ТЕП тиристорних перетворювачів при збереженні традиційних ТЕД послідовного збудження. Збереження в силовій схемі тепловозу максимально відпрацьованих у виробництві та експлуатації серійних ТЕД при дефіциті матеріальних та виробничих ресурсів може дати швидкий та істотний економічний ефект, бо не вимагає для реалізації чималої перебудови виробництва і утворення нової ремонтної та експлуатаційної бази. Автором запропонована та досліджена тиристорна схема автономного ТЕП змінно - постійного струму, що на відміну від традиційних систем дозволяє:

- при втраті зчеплення підвищити протибуксовальні властивості локомотива за рахунок автоматичного переводу ТЕД в режим квазіне-

залежного збудження;

- реалізувати режим плавного ослаблення поля ТЕД і, відповідно, підвищити інтегральний ККД електропередачі в тяговому режимі;
- підвищити ефективність схеми електричного гальмування за рахунок тиристорного керування збудженням ТЕД та виключення із контуру регулювання каналу струму збудження тягового СГ;
- значно скоротити кількість силової контактної апаратури;
- підвищити протиаварійні властивості ТЕП шляхом реалізації швидкодіючого "сіткового" захисту;
- реалізувати більш ефективні алгоритми управління ТЕП.

Автономний ТЕП змінно-постійного струму, як об'єкт дослідження, становить складну електроенергетичну систему обмеженої потужності. Вона характеризується багаточисленністю та різноманітністю елементів, несхожістю їх по типу зв'язку, наявністю у системі інтегративних функцій, яких немає у частин складових її елементів. Дослідження цього ТЕП виконано способом імітаційного моделювання (ІМ). Структурна схема системної моделі тиристорного ТЕП приведена на рис.1. Позначення: ФДР і СДР - відповідно блоки формування і рішення системи диференціальних рівнянь; БФС - блок формування стану вентилів перетворювача; БРП - блок розрахунку параметрів; Fкер та Fв - логічні вектори відповідно керування та стану вентилів перетворювача.

Застосування технології імітаційного моделювання дозволило без істотних допущень дослідити електромагнітні процеси в автономному тиристорному ТЕП змінно-постійного струму, визначити показники якості електричної енергії, що характеризують електромагнітну сумісність електрообладнання з перетворювачами, і основні технологічні характеристики системи в цілому. Аналіз результатів моделювання в режимах тяги при повному та при послабленому полі ТЕД, втраті зчеплення, режимах електричного гальмування підтвердив приведені вище переваги тиристорного ТЕП у порівнянні з традиційними системами та показав доцільність його застосування на тепловозах, зокрема, для модернізації існуючого локомотивного парку.

В режимі електродинамічного гальмування ТЕП вироджується в дві одноконтурні схеми для ланцюгів якоря ТЕД та просту схему ланцюгів їх струму збудження, що складається із двох послідовно включених трифазних нульових тиристорних КВ. Джерелами живлення гібридного КВ служать дві зсунені в просторі трифазні статорні обмотки тягового СГ. Тому, що такі схеми раніше не досліджувалися, постала необхідність в їх детальному вивченні. Автором проведений теоретичний аналіз роботи гібридних КВ для загального випадку, коли фазовий зсув α між двома трифазними джерелами живлення може приймати довільне значення. Виявлені та докладно досліджені наступні чотири режима роботи схеми :

- режим 1: всі тиристори працюють в діодному режимі;
- режим 2: тиристори анодної групи працюють в діодному режимі, тиристори катодної групи працюють в керованому режимі;
- режим 3: тиристори анодної групи працюють в керованому режимі,

- тиристори катодної групи працюють в діодному режимі;
- режим 4: всі тиристори працюють в керованому режимі.
- Четвертий режим досліджений в наступних варіантах керування:
- симетричне управління, для якого вимагається шість незалежних каналів фазо-імпульсного керування;
 - несиметричне управління (три незалежних каналу управління) із синхронізацією від джерела живлення з ЕРС, що випереджає ;
 - несиметричне управління (три незалежних каналу управління) із синхронізацією від джерела живлення з ЕРС, що відстає.

Аналіз режимів роботи гібридного КВ та засобів його управління дозволив віддати перевагу четвертому режиму роботи при несиметричному управлінні із синхронізацією від джерела з ЕРС, що відстає. Тоді регульовальна характеристика гібридного КВ має вигляд:

$$\frac{U_d}{U_m} = \begin{cases} \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos(\pi/6 - \psi/2) \cos(\alpha + \pi/6 - \psi/2), & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \psi/2, \\ \frac{3}{\pi} \cos(\pi/6 - \psi/2) [1 + \cos(\alpha + \pi/3 - \psi/2)], & \text{при } \psi/2 \leq \alpha \leq (2\pi/3 + \psi/2). \end{cases} \quad (2)$$

а коефіцієнт передачі (у відносних одиницях) дорівнює :

$$K_{\pi} = \begin{cases} - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos(\pi/6 - \psi/2) \sin(\alpha + \pi/6 - \psi/2), & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \psi/2, \\ - \frac{3}{\pi} \cos(\pi/6 - \psi/2) \sin(\alpha + \pi/3 - \psi/2), & \text{при } \psi/2 \leq \alpha \leq (2\pi/3 + \psi/2) \end{cases} \quad (3)$$

Застосування в замкнутих САК гібридного КВ, який працює в режимі несиметричного управління з синхронізацією від джерела живлення з ЕРС, що випереджає, не рекомендується із-за наявності в його регульовальній характеристиці зон, які відповідають позитивним та від'ємним значенням коефіцієнту передачі.

В третьому розділі розглянуті питання, зв'язані з підвищенням ефективності автономного ТЕП з трифазними АД та АІН, і розширено теоретичний базис для удосконалення таких систем.

Зокрема, уточнено значення одного з показників ефективності ТЕП, зв'язаного з повним використанням вільної потужності первинного двигуна при роботі ТЕП не тільки по граничній тяговій характеристиці, але і в часткових режимах. Для цього виконано теоретичний аналіз граничного режиму роботи автономного ТЕП з АД по умові його статичної стійкості. Установлена закономірність зміни границі статичної стійкості асинхронного ТЕП в залежності від виду

економічної характеристики первинного двигуна при роботі локомотива в режимах повної і неповної потужності:

$$V_{\max} = \frac{mf_{1H} \pi D_k n_m (U_1)^2 \min}{2X_0 (1 + \tau_1) \rho \mu K_3 N_{cb} (w_D)}, \quad (4)$$

де $N_{cb}(w_D)$ - економічна характеристика первинного двигуна. Вираз (4) і інші розрахункові формули, які одержані внаслідок аналізу, дозволяють вже на стадії проектування правильно обрати параметри тягового електрообладнання та механічної передачі.

З цією ж метою досліджені також умови компенсації надмірної реактивної енергії в багатодвигунному ТЕП автономного локомотиву з АІН та АД при загальному джерелі живлення, що не має зворотньої провідності. Умовою повної компенсації реактивної енергії навантаження в такій системі є однонаправленість потоку енергії в ланці постійної напруги. В трифазній системі АІН-АД ця умова виконується при $c > 0,525$. Якщо відбувається зниження коефіцієнту потужності тягового АД, що можливо при втраті зчеплення, в ланці постійної напруги в певні моменти часу потік енергії змінює свій напрям. Для компенсації цієї надмірної реактивної енергії звичайно установлюють спеціальні компенсуючі конденсатори. В роботі показано, що найбільш ефективним способом компенсації надмірної реактивної енергії є синхронне управління всіма тяговими блоками АІН-АД з рівномірним фіксованим зсувом між ними на інтервалі комутації одиночного інвертора. В цьому випадку граничне значення коефіцієнту потужності навантаження, при якому ще здійснюється повна компенсація реактивної енергії, визначається виразом:

$$\chi_{гр} = \sqrt{1 - 3f_1 T_n \frac{1 - a_{гр}^2}{1 - a_{гр} + a_{гр}^2}} \quad (5)$$

де граничний режим $a_{гр} = a = \exp(-1/6f_1 T_n)$ настає при значеннях частоти вихідної напруги інвертора f_1 та параметрах навантаження T_n , коли виконується умова:

$$2k - \frac{a+1}{1-a+a^2} (1 + a^{1/k} + a^{2/k} + \dots + a^{(k-1)/k}) = 0 \quad (6)$$

де корені цього рівняння мають фізичний зміст при $0,5 \leq J \leq 1$. Зокрема, при синхронному управлінні трьома тяговими блоками АІН-АД із фазовим зсувом між ними на $\pi/9$ повна компенсація реактивної енергії тягових АД можлива при зниженні їх коефіцієнту потужності до $c = 0,18$. В цьому випадку обмін надмірною реактивною енергією здійснюється між тяговими блоками АІН-АД крізь загальні шини ланки постійної напруги. Супутнє підвищення частоти та зниження амплітуди пульсацій струму на виході В дозволяє мінімізу-

вати встановлену ємність конденсаторів фільтру і істотно знизити масу та габарити перетворювальної установки в цілому.

Розроблений уточнений метод розрахунку фазних струмів в системі АІН-АД при управлінні головними тиристорами АІН по закону $q\tau = \text{const}$, де $q\tau$ належить інтервалу $[2p/3; p]$. Він є спрощенням методу гармонічних складових та базується на допущенні про рівність струмів вищих гармонік, розрахованих для схем заміщення з параметрами АД на відповідних частотах і для схеми заміщення загальмованого АД. Процедура розрахунку миттєвих значень фазного струму АД способом двох складових зводиться до:

- виділення першої гармоніки живлячої напруги;
- знаходженню та підсумовуванню синусоїдальної складової фазного струму (як різниці реакцій схеми заміщення АД для першої гармоніки та схеми заміщення для загальмованого АД на першу гармоніку фазної напруги) і несинусоїдальної складової (реакція схеми заміщення загальмованого АД на повну фазну напругу інвертора).

Форма фазної напруги АІН при $2p/3 \leq q\tau \leq p$ та його складові: (синусоїдальна і сума напруг вищих гармонік), приведені на рис.2.

Одержані аналітичні рішення миттєвих значень фазного струму на всіх дев'яти інтервалах постійності кривої фазної напруги в функції кутів провідного стану тиристорів ($q\tau$) та реактивних діодів ($q\delta$), що при введенні амплітудної G_n і кутової Q_n комутуючих функцій, можна подати у вигляді одного виразу :

$$i(\theta) = \frac{U_d}{Z_c} \left\{ \frac{U_{1m}}{2U_d} \sin(\theta - \varphi + \psi) + \frac{Z_c}{6R_k} G_n - \left[\frac{Z_c}{6R_k} \sum_{i=1}^n (G_i - G_{i-1}) \right] * e^{Q(i-1)/\theta_k} + \frac{U_{1m}}{2U_d} \sin(\psi - \varphi) e^{\theta/\theta_k} \right\} \quad (7)$$

де Z_c, j - параметри схеми заміщення АД для синусоїдальної складової фазного струму;

$U_{1m, y}$ - амплітуда і фазовий зсув синусоїдальної складової фазної напруги;

φ - поточний кут.

По цьому виразу для фіксованих значень $q\tau$ і $q\delta$ (крива напруги задана) можна з високою точністю (погрішність не більш 5%) розраховувати середні по модулю, діючі і пікові значення фазних струмів на межах інтервалів, в тому числі, їх передкомутаційного і передаварійного значення. Рішення ж зворотнього завдання (визначення форми фазної напруги) вимагає обчислення куту $q\delta$ та призводить до необхідності рішення трансцендентних рівнянь.

Проаналізовані можливі варіанти схем АІН. Показана доцільність застосування в автономному ТЕП АІН з амплітудним регулюванням напруги, а для зниження їх масо-габаритних показників на сучасному етапі рекомендовано виконувати інвертори на базі одноопераційних тиристорів середньої швидкодії з однополярною низьковольтною С-комутацією та двоопераційними тиристорами в контурах комутації.

На підставі результатів виконаного автором раніше теорети-

чного аналізу електромагнітних процесів в системі АІН-АД по методу однієї реакції при законі управління інвертором $q_t = 5p/6$ запропоновані засоби формування сигналів зворотнього зв'язку по струму та магнітному потоку АД. Методична погрішність виміру активного реактивного і повного значень фазного струму не перевищує 2,5%, а погрішність виміру магнітного потоку не перевищує 5%. Результати теоретичних та експериментальних досліджень використані при створенні тепловозу ТЕ120 секційною потужністю 4000 к.с. Розроблені методики безреостатного настроювання електропередачі тепловозу з АІН і АД та експлуатаційних іспитів. Проведені тягово - енергетичні іспити тепловозу ТЕ120 на залізницях МШС, в процесі яких досягнуті всі розрахункові параметри ТЕП. За час тяговоенергетичних іспитів тепловоз виконав пробіг понад 5000 км. Максимальна маса вантажних поїздів склала 5100 т. Результати теоретичних та експериментальних досліджень підтвердили перспективність широкого впровадження в практику систем асинхронного ТЕП.

В четвертому розділі приведені результати досліджень систем ТЕП з АН і АД, число фаз яких не дорівнює трьом.

Проведення таких досліджень викликане необхідністю підвищення тягово-енергетичних показників асинхронного ТЕП. Показана можливість рішення цього завдання шляхом поліпшення форми годографа вектору магнітного поля в повітряному зазорі АД і при виконанні умов електричної рівноваги асинхронної машини, яка живиться несинусоїдальною напругою від АІН. Останнє характеризує здійсненість умов електромагнітної сумісності АІН і АД у всьому полі робочих режимів. Дослідження базуються на аналізі тимчасових гармонік магнітного поля в повітряному зазорі багатofазних асинхронних машин при живленні їх несинусоїдальною напругою від перетворювача частоти. Установлено, що для виконання умов електричної рівноваги асинхронної машини з симетричною m -фазною обмоткою на статорі (де $m > 2$), яка живиться несинусоїдальною напругою від АІН, необхідно, щоб форми фазних напруг і відповідних їм сумарних фазних ЕРС були тотожні. В найпростішому випадку це досягається варіацією числа фаз системи з одночасним формуванням необхідної форми живлячої напруги. Умови електричної рівноваги завжди виконуються для статорних обмоток АД з непарним числом фаз при живленні їх від мостових АІН тієї ж фазності. Проте, якщо зміст першої гармоніки в загальному діючому значенні напруги для трифазного АІН при повному управлінні дорівнює 0,955, то при підвищенні фазності системи гармонійний склад вихідної напруги АІН погіршується, наприклад при $m = 5$ $K_i = 0,922$. В п'ятифазній системі АІН-АД можливо підвищення K_i до 0,985, а в несиметричній шестифазній системі - до 0,988, що призводить до необхідності формування багатоступінчатих кривих фазної напруги та до невиправданого ускладнення схем АІН.

Автором розроблені способи синтезу оптимальної форми фазної напруги АІН для асинхронної машини довільної фазності:

- по заданому годографу узагальнюючого вектору магнітного поля АД;
- способом гармонійного аналізу.

Під оптимальною розуміється форма фазної напруги АД, що не призводить до надмірного ускладнення схемотехніки АІН, має високий

склад першої гармоніки в загальному діючому значенні, а також забезпечує повну електромагнітну сумісність системи АІН-АД довільній фазності в усіх робочих режимах.

Підвищений склад першої гармоніки у вихідній напрузі АІН приводить до зниження додаткових втрат в АД та до підвищення ККД всієї системи ТЕП. По зазначеним методикам виконаний синтез оптимальних кривих фазної напруги для АД різноманітної фазності та досліджені режими роботи двигунів. Наприклад, на рис.3 приведені результати синтезу кривих фазної напруги для двофазної системи АІН-АД по заданому годографу магнітного поля АД для двох видів симетрії вісей фазних обмоток. Встановлено, що в двофазному АД умови електромагнітної сумісності з АІН виконуються при будь-якій формі прикладеної напруги. Це пояснюється тим, що в двофазній машині, осі фазних обмоток якої взаємо перпендикулярні, всі тимчасові гармоніки напруг в сполучених фазах тотожно дорівнюють нулю. Можливо спрощення силової схеми двофазного ТЕП у порівнянні з трифазним варіантом шляхом вилучення з неї громіздких фільтрів вищих гармонік і контакторів змінного струму. При цьому скорочується витрата міді та дефіцитних електротехнічних матеріалів, підвищуються тягово-енергетичні характеристики автономного електроприводу в номінальному режимі і при швидкостях вище номінальних.

Виконано теоретичний аналіз електромагнітних процесів у двофазній системі АІН-АД при узагальненій кривій фазної напруги, який приведено на рис.4а. На рис.4б приведені залежності U_1/U при різноманітному поєднанні параметрів q і a узагальненої кривої фазної напруги. Вирази, що описують фазні струми АД для узагальненої кривої фазної напруги (статичне навантаження), мають вигляд

$$\begin{cases} i_1(\theta) = I \left\{ q - \frac{q(2 - a + av) + a(1 - v)}{1 + a^2 v} e^{-\theta/\omega\tau} \right\} & 0 \leq \theta \leq a \\ i_2(\theta) = I \left\{ 1 - \frac{(1 + a^2) - q(1 - a)^2}{1 + a^2 v} e^{-\theta/\omega\tau} \right\} & 0 \leq \theta \leq (\pi - 2a) \\ i_3(\theta) = I \left\{ q - \frac{q(1 - v + 2av) - (1 - v)}{1 + a^2 v} e^{-\theta/\omega\tau} \right\} & 0 \leq \theta \leq a \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{де } a &= e^{-a/\omega\tau}; \\ v &= e^{-(\pi - 2a)/\omega\tau} \end{aligned}$$

На підставі цих виразів одержано розрахункові співвідношення, що дозволяють визначити всі параметри двофазної системи АІН-АД, які необхідні при її проектуванні.

Проаналізовані різноманітні варіанти схем тягових АІН і рекомендовані раціональні структури двофазних систем АІН-АД, що спрощують силову схему ТЕП автономного локомотиву в цілому.

В п'ятому розділі виконані теоретичні та експериментальні дослідження тягового блоку СГ-В в аварійних режимах.

Підвищені вимоги до безпеки руху і надійності автономних локомотивів викликають необхідність в проведенні досліджень нових систем ТЕП в аварійних режимах з метою створення більш ефективних засобів захисту силового тягового електрообладнання. Для структур ТЕП сучасних тепловозів з електропередачами змінно-постійного та змінного струму характерним є наявність загального елемента - тягового блоку СГ-В. Тяговий блок СГ-В складається із СГ з двома трифазними обмотками на статорі, зсунутими в просторі на кут 30 електричних градусів, і двох мостових некерованих В, що включаються паралельно або послідовно.

В роботі проаналізовані пристрої захисту тягових блоків СГ-В сучасних тепловозів, в тому числі і ті, робота яких заснована на контролі різниці потенціалів між нулями зірок тягового СГ. Установлено, що пристрої, що застосовуються, не володіють достатніми чутливістю та швидкодією, або не реагують на симетричні короткі замикання (КЗ) в ланцюгах статорних обмоток СГ, або на КЗ в ланцюзі навантаження.

Для утворення більш ефективних пристроїв захисту вимагалося опрацювання надійних засобів ідентифікації імовірних аварійних станів. Для цього автором досліджена робота блоку СГ-В в нормальних та аварійних режимах і одержані нові наукові результати, що дозволили удосконалити алгоритми побудови пристроїв захисту СГ і В. У вигляді гарантованого джерела інформації про виникнення аварії в тяговому блоці СГ-В використаний факт про наступ в певний момент часу рівності миттєвих значень всіх трьох фазних напруг хоч би в одній з зірок тягового СГ. Показано, що це завжди відбувається в тяговому блоці СГ-В при $g < \rho/3$ (g - кут комутації вентилів) і тільки тоді, коли виникає будь-яка із імовірних аварій: симетричні та несиметричні КЗ на боці змінного чи постійного струму силової випрямної установки, пробою будь-якого числа вентилів випрямляча. Аварійний стан тягового блоку СГ-В можна ідентифікувати за допомогою найпростішого датчика, виконаного, наприклад, на стабілітронах або стабісторах. Датчики аварійного стану підключаються до виводів нуля і фазних обмоток в кожній із зірок тягового СГ.

Вихідний сигнал на спрацювання захисту формується окремим логічним блоком, в якому виконуються також операції гальванічного розв'язування і запам'ятовування факту аварійного стану. Для винятку помилкових спрацьовувань захисту, можливих при роботі блоку СГ-В в нормальному режимі з підвищеними значеннями куту комутації (випрямні мости працюють в третьому або в четвертому режимах, коли одночасно включено по три або чотири вентиля), в логічний блок вводиться також інформація про рівень напруги на виході В. Це дозволяє блокувати вихідний сигнал пристрою захисту за відсутністю аварійного стану. Підвищені значення куту комутації можливі при роботі локомотива в пускових режимах, що відповідає ро-

боті ТЕП в зоні обмеження струму. Виникнення аварії в блоці СГ-В в цих випадках не викликає небезпеки і не супроводжується надструмами короткого замикання.

По результатах виконаних теоретичних досліджень розроблена документація і виготовлені пробні зразки пристроїв захисту логічного типу. Експериментально (на стенді та на реальному тепловозі) підтверджено правильність теоретичного аналізу аварійних режимів в тяговому блоці СГ-В та надійне функціонування пробних зразків пристрою захисту при імітації імовірних аварійних станів. Час спрацювання захисту не перевищує тривалості періоду живлючої напруги.

В шостому розділі проведені аналіз та дослідження можливих аварійних станів в тяговому блоці АІН-АД і сформульовані принципи побудови ефективних систем захисту. Тяговий АІН є найбільш критичним елементом ТЕП до перевищення граничних параметрів і виявляє чималий вплив на протиаварійні властивості ТЕП та автономного локомотиву в цілому.

Аналіз можливих аварійних станів в блоці АІН-АД дозволив виявити основні види відмов, сформулювати завдання дослідження найбільш характерних етапів розвитку аварійного процесу та синтезу ефективних пристроїв захисту. Показано, що в переважній більшості випадків первинні відмови є умовно-оборотні, причому найбільш частими з них є некомутація плеча головних тиристорів інвертора. Така відмова майже завжди викликається порушеннями режиму комутації та характеризує перший етап розвитку аварійного процесу. На першому етапі виникає несиметрія фазних напруг АІН і починається інтенсивне зростання фазних струмів двигуну. На другому етапі виникає найбільш небезпечний аварійний режим - двофазне перекидання інвертора. Другий етап аварійного процесу супроводжується ударними струмами КЗ з боку конденсаторів фільтру та тягових електричних машин, а також чималими механічними впливами на дизель та елементи тягової передачі.

У вигляді базового аналітичного способу аналізу передаварійних процесів в системі АІН-АД на першому етапі аварійного стану (некомутація тиристорів АІН) обраний спосіб двох складових, докладно описаний в розділі 3. Розповсюдження цього способу на випадок аналізу аварійних процесів при некомутації базується на допущенні про збереження величини і знаку фазної напруги на наступному інтервалі після комутації, яка ще не сталася. Результати розрахунків передаварійних струмів в системі АІН-АД з параметрами електрообладнання стосовно до тепловозу ТЕ120 дозволили визначити зону найбільш важких режимів з точки зору можливості реалізації захисту від некомутації і рекомендувати швидкодію такого захисту в межах (300...400) мкс.

На другому етапі розвитку аварійного процесу через короткозамкнуту фазу АІН протікає сума струмів :

$$i_k(t) = i_{kp}(t) + i_{kf}(t) + i_{kn}(t),$$

де $i_{кп}(t)$, $i_{кф}(t)$, $i_{кн}(t)$ - відповідно, складові струмів короткого замикання блоку СГ-В, конденсатора фільтру та АД.

Характер зміни аварійних струмів $i_{кп}(t)$ та $i_{кф}(t)$ і способи їх обчислень загальновідомі. Струм короткого замикання двигуна $i_{кн}(t)$, що залежить від запасу енергії в магнітному полі АД, можна визначити із умови, що при перекиданні інвертора просторові

вектори потокозчеплення статора $\bar{\Psi}_s$ та $\bar{\Psi}_r$ ротора представляються непорушними векторами щодо своїх обмоток і змінюються лише по модулю. Обертання ротору викликає зміну взаємного просторового положення векторів потокозчеплення. В момент короткого замикання век-

тори потокозчеплення $\bar{\Psi}_s$ та $\bar{\Psi}_r$ приблизно рівні по модулю і майже збігаються по напрямку. По закінченні напівперіода потокозчеплення статора та ротора мають супротивні напрямки і приблизно рівні по модулю. Внаслідок цього магнітні струми статора і ротора замикаються виключно по шляхах розсіяння і струми АД досягають чималих величин :

$$i_{ад\max} = \frac{U_s}{W_s I_s'} [e^{-T/2T_s'} + (1 - \sigma)e^{-T/2T_r'}] \quad (10)$$

де U_s - модуль просторового вектору напруги першої гармоніки до моменту короткого замикання;

$T_s' = L_s / r_s$ - перехідна постійна часу статора;

$T_r' = L_r' / r_r$ - перехідна постійна часу ротора;

σ - результуючий коефіцієнт розсіяння.

Результати розрахунку величин струмів при некомутації тиристорів і ударних струмів при перекиданні інвертора, а також результати експериментальних досліджень, виконаних з використанням методу планування експерименту, дозволили оцінити їх кратність на рівні 4...5 у відношенні до номінальних значень. Отже, можливо створення єдиного виконавчого пристрою захисту при виникненні цих двох видів аварій. Для виключення ударних впливів на дизель та елементи механічної передачі загальний час спрацьовування захисту не повинен бути більше 1 мс.

Запропонований принцип побудови комплексного багатоступінчатого захисту тягових блоків АІН-АД, заснований на безупинному контролі їх стану, вияву та ідентифікації етапів виникнення аварійних процесів, виробництві керуючого впливу на відповідні виконавчі пристрої захисту. У вигляді перших двох ступенів комплексного захисту рекомендовані :

- логічний захист попереджувального типу від некомутації плеча головних тиристорів, що не допускає двофазного перекидання АІН;
- швидкодійний безударний захист, який спрацьовує при виникненні двофазного перекидання інвертора.

В разі успішного відновлення працездатності інвертора, що відказав, система захисту включає пристрій автоматичного повтор-

ного включення. Якщо в АІН виникають неповернені відмови, необхідно включати третій ступінь захисту, у вигляді якого можуть бути використані відомі і добре відпрацьовані пристрої захисту шунтуючої дії з тиристорними або механічними короткозамикачами, і формувати сигнал на вимкнення ТЕП для локалізації наслідків аварійного процесу.

В роботі приведені приклади технічної реалізації структур та конкретних пристроїв захисту в тому числі, і ряду датчиків, що необхідні для здійснення безупинного контролю за станом тиристорних плеч перетворювача та для реалізації ефективних алгоритмів багатоступінчатого захисту тягового блоку АІН-АД.

Сьомий розділ присвячений питанням удосконалення САК ТЕП автономних локомотивів з електропередачею змінного струму.

Енергетична система автономних локомотивів містить ряд керованих перетворювачів енергії: дизель, СГ-В і АІН-АД. САК такої складної системи повинна мати, принаймі, дві автономні підсистеми: підсистему регулювання дизеля і підсистему регулювання ТЕП. В роботі приведені результати досліджень запропонованої автором підсистеми регулювання ТЕП (в подальшому - САК). САК ТЕП містить два регулятори із змінною структурою: регулятор збудження (РВ) тягового СГ, що забезпечує умови сумісної роботи ТЕП з дизелем, і регулятор частоти (РЧ), що забезпечує роботу тягових АД по квазіоптимальним законам частотного управління. РЧ є підпорядкованим по відношенню до РВ і здійснює інваріантне тризонне регулювання АД.

В режимі тяги РВ формує необхідні зовнішні гіперболічні характеристики блоку СГ-В в функції струму найбільш навантаженого тягового АД, а в режимі гальмування здійснює слідкуюче регулювання напруги СГ-В за напругою на гальмувальному резисторі. Для підвищення якості регулювання та виключення впливу нестабільності коефіцієнту форми сигналу зворотнього зв'язку по струму найбільш навантаженого АД в РВ необхідно формувати сигнал зворотнього зв'язку по струму у вигляді різниці:

$$U_{от}(t) = \max[U_{in}(t) - \frac{i}{\tau_i} \int_0^t \{U_{от}(t) - \max[U_{\phi n}(t)]\} dt] \quad (11)$$

де τ_i - постійна часу інтегрування;

$U_{in}(t)$ - сигнали зворотнього зв'язку по струму АД;

$U_{\phi n}(t)$ - отфільтровані сигнали по струму АД;

n - номер працюючого тягового блоку АІН-АД ($1 < n < N$);

N - загальна кількість тягових блоків АІН-АД.

Синтезу структури регулятора частоти передувало дослідження законів оптимального частотного управління з метою вибору незалежних змінних. Відомо, що режим роботи АД однозначно визначається завданням будь-яких трьох незалежних змінних. В якості однієї з них доцільно обрати модуль струму статора, що задається РВ. В цьому випадку схема заміщення АД зводиться тільки до схеми

заміщення кола ротора. В роботі показано, що при примусовому завданні струму статора електромагнітний момент АД не залежить від частоти обертання ротора, а завдання оптимального управління зводиться до забезпечення максимуму моменту при заданому струмі статора. Тоді для однозначності режиму роботи ТЕП достатньо задати тільки ще одну незалежну змінну і функціонально пов'язати її з струмом статора. У вигляді другої незалежної змінної можуть бути використані такі параметри:

- кути повороту векторів струму статора і ротора щодо вектору ЕРС або кут між ними;
- модулі векторів струму ротора і струму намагнічування;
- магнітний струм чи частота абсолютного ковзання.

Дослідження показали, що по можливості оптимізації режимів роботи ТЕП всі розглянуті варіанти ідентичні. Для спрощення системи регулювання частоти у вигляді другої незалежної змінної доцільно прийняти параметр магнітного струму АД, бо одержання сигналу зворотнього зв'язку по цьому параметру не представляє технічних труднощів. Показано також, що насичення магнітного кола тягових АД істотно впливає на залежність електромагнітного моменту, зміщуючи екстремум цієї функції в область більш низьких відносних значень магнітного потоку. Вплив насичення АД на характеристики ТЕП усуваються введенням в канал регулювання магнітного потоку спеціального нелінійного блоку з характеристикою $\Phi = F(I_1)$, розрахованої із умов:

$$I_1 = I_0 \sqrt{1 + \frac{x_{OH}}{I_0(1 + \tau_2) \left| \frac{\partial x_{OH}}{\partial I_0} \right| + x_{OH}}} \quad (12)$$

де I_0 - струм намагнічуючого контуру;

x_{OH} - індуктивний опір контура, що намагнічує, при базовій частоті.

Це дозволяє в перших двох зонах (відповідно при $I_1 = \text{const}$ та при $P_1 = \text{const}$) регулювати ТЕП по оптимальним законам, що близькі до закону мінімальних втрат.

В третій зоні регулювання (режим ослаблення поля), що необхідна для розширення швидкісного діапазону локомотива, тягові АД регулюються по закону $U_1 = I_1$ при $P_1 = \text{const}$. Це означає, що жорстко задані три координати і що поточний стан тягових АД визначено уже в просторі трьох незалежних змінних. Тому оптимізація ТЕП в наданому режимі неможлива.

Розроблена методика розрахунку тягових і регулювальних характеристик автономного локомотива з локомотива при автоматичному обліком насичення тягових АД. Особливість цієї методики в тому, що вона відслідковує процес роботи регулятора та автоматично ураховує граничні режими зміни законів регулювання.

Результати експериментальних досліджень САК ТЕП змінного

струму на аналоговому обчислювальному комплексі, на стендах та на реальному тепловозі підтвердили основні теоретичні висновки, одержані автором, і підтвердили ефективність запропонованого принципу оптимізації систем асинхронного ТЕП.

В роботі також показані перспективність і раціональні шляхи подальшого удосконалення САК ТЕП автономних локомотивів на базі мікропроцесорних засобів, приведені основні результати опрацювання і експериментальних досліджень мікропроцесорної САК ТЕП пасажирського тепловозу ТЕП70 N283.

В И С Н О В К И

В дисертації комплексно з єдиних методологічних позицій вирішена науково-технічна проблема підвищення ефективності автономних локомотивів шляхом удосконалення їх електричних передач на базі досягнень перетворювальної техніки. Показано, що застосування тиристорних перетворювачів надає ТЕП нові системні властивості, що дозволяє підвищити значення експлуатаційного ККД і коефіцієнту тяги локомотива, підвищити надійність і знизити число відмов тягового електрообладнання, реалізувати більш ефективні алгоритми управління, вирішити завдання комплексної автоматизації автономного локомотива, знизити загальні витрати на обслуговування і ремонт.

Основні наукові результати, висновки і рекомендації :

1. Установлено, що електропередача змінно-постійного струму з некерованими В та ТЕД послідовного збудження, що використовується на вітчизняних тепловозах, обмежує можливість підвищення ефективності ТЕП сучасних тепловозів. Показано, що застосування тиристорних перетворювачів з нетрадиційною структурною побудовою замість некерованих В знімає ці обмеження і дозволяє :

- підвищити на (6...10) % коефіцієнт тяги тепловозу шляхом переводу буксуючих ТЕД в режим квазінезалежного збудження;
- реалізувати режим повільного ослаблення ТЕД і підвищити середньоексплуатаційний ККД електропередачі в зоні високих швидкостей руху на (1...1,5) %;
- поліпшити статичні та динамічні характеристики електропередачі тепловозу в режимі електричного гальмування за рахунок застосування тиристорного збудження ТЕД і виключення з контуру регулювання тягового СГ;
- підвищити протиаварійні властивості електропередачі за рахунок реалізації швидкодіючого "сіткового" захисту;
- звести до мінімуму кількість силової контактної апаратури.

В тиристорному ТЕП збережені максимально відпрацьовані в умовах виробництва та експлуатації серійні тягові електричні машини, що дозволяє швидко та з мінімальними витратами впровадити якісно нову електропередачу на тепловозах, бо не вимагає перебування виробництва тягових електричних машин і докорінної реконструкції експлуатаційної та ремонтної бази.

2. Розроблена система енергопостачання власних потреб з само-збудженням СГЕ і тиристорними перетворювачами в ланцюгах збудження тягових генераторів. Розроблено та науково обгрунтований метод синтезу інваріантних СІФК. Метод заснований на принципі інтегрування у часовій області підінтегральної функції, яка входить у вираз для середнього значення випрямленої напруги КВ, і формування керуючого імпульсу шляхом відліку зовнішнього сигналу управління від кінцевого значення інтегралу, що запам'ятовується на попередньому активному інтервалі управління. Інваріантна СІФК формує лінійні і стабільні регульовальні характеристики КВ незалежно від зміни величин напруги і частоти живлячої змінної напруги. Показана ефективність застосування інваріантних СІФК і тиристорних КВ в системах самозбудження тепловозних СГ.

3. Проаналізовані режими роботи гібридного випрямляча, що є активною частиною тиристорного перетворювача в ТЕП змінно-постійного струму (в режимі електричного гальмування). Гібридний випрямляч складається з двох нульових трифазних тиристорних схем і живиться від двох трифазних зірок тягового СГ. Аналіз електромагнітних процесів виконаний для загального випадку, коли фазовий зсув між двома джерелами живлення КВ може приймати будь-які фіксовані значення на інтервалі $(0 \text{ J у } \text{J p/6})$. Досліджена робота гібридного КВ в некерованому, напівкерованому і керованому режимах, одержано математичний опис його регульовальних характеристик. Рекомендована робота гібридного КВ в режимі, що управляє, з несиметричним управлінням і з синхронізацією по ЕРС, що випереджає. Результати виконаних досліджень є новим науковим вкладом в теорію керованих випрямлячів.

4. З урахуванням специфіки автономних локомотивів досліджена система ТЕП з АІН та АД і розширено теоретичний базис для удосконалення таких систем. Установлена закономірність зміни межі статичної стійкості асинхронного ТЕП в залежності від виду економічної характеристики первинного двигуна при роботі локомотива в режимах повної і неповної потужності, що дозволяє уже на стадії проектування оптимізувати параметри ТЕП. Досліджені умови компенсації надмірної реактивної енергії в багатодвигунному ТЕП з джерелом живлення, що не має зворотньої провідності. Показано, що найбільш ефективним є спосіб синхронного управління тяговими блоками АІН-АД з рівномірним фіксованим фазовим зсувом між ними на інтервалі комутації поодинокого інвертора, що дозволяє тяговим АД обмінюватися надмірною реактивною енергією через шини ланки постійної напруги. Розроблена методика експериментальних досліджень асинхронного ТЕП та його складових частин на стендах і на тепловозі.

5. Виконано розширення аналітичного методу розрахунку кривих фазного струму АД в трифазній системі АІН-АД по двом складовим на випадок, коли кут включення головних тиристорів АІН може приймати будь-які фіксовані значення на інтервалі $[2\text{p}/3; \text{p}]$. Одержані вирази дозволяють розраховувати середні по модулю, діючі та миттєві

значення фазних струмів АД в квазістатичних режимах, а також пікові значення струмів на межах інтервалів та їх передаварійне значення. Погрішність розрахунків для класу завдань, зв'язаних з аналізом автономних систем ТЕП, не перевищує 5%.

6. На підставі аналізу тимчасових гармонік магнітного поля в повітряному зазорі багатофазних АД при живленні останніх несинусоїдальною напругою від АІН розроблені способи синтезу оптимальних кривих фазної напруги по заданому годографу вектора магнітного поля і показані обмеження, притаманні трифазним системам. Внаслідок зіставлення традиційних трифазних систем з іншими можливими варіантами для застосування в ТЕП рекомендовані двофазні системи АІН-АД, які дозволяють спростити силову схему локомотива та приблизно в два рази знизити додаткові втрати в АД. Виконано теоретичний аналіз електромагнітних процесів в двофазній системі АІН-АД при узагальненій двоступінчастій на півперіоді кривої фазної напруги і одержані аналітичні вирази, що дозволяють розраховувати всі необхідні параметри ТЕП. Крива фазної напруги оптимізована по максимуму складу її першої гармоніки в загальному діючому значенні при умові схемної простоти АІН.

7. З метою підвищення умов безпеки руху локомотивів і розробки ефективних засобів захисту тягового електрообладнання виконані дослідження систем ТЕП в аварійних режимах. Як базова структура автономного ТЕП для дослідження обрана структура силової схеми тепловоза з тяговими блоками СГ-В та АІН-АД, що в найбільшій мірі відповідає вимогам подібності серійних і перспективних локомотивів. Принцип дії захистів блоку СГ-В при всіх видах аварійних станів (короткі замикання на стороні постійного і змінного струму, пробою довільного числа вентилів) заснований на виявленні моментів часу, коли потенціали всіх фаз будь-якої з трифазних обмоток тягового СГ одночасно приймають однакові значення. Робота захистів тягового блоку АІН-АД в аварійних режимах (некомутація плеч головних тиристорів АІН і двофазне перекидання інвертора) заснована на безупинному контролі стану тиристорів, виявленні і ідентифікації етапів виникнення та розвитку аварійного процесу, формуванні керуючого впливу на відповідні ступені захисту. Рекомендовані наступні ступені захисту тягового блоку АІН - АД: захист попереджувального типу від некоммутації головних тиристорів та швидкодіючий безударний захист, який спрацьовує в разі короткого замикання в інверторі. Запропоновані теоретичні способи розрахунку електромагнітних процесів при аваріях в системі АІН - АД. Результати розрахунків і експериментальні дослідження аварійних процесів показали можливість застосування єдиного виконавчого пристрою для зазначених ступенів захисту. Розроблені ефективні датчики для безупинного контролю за станом плеч АІН, необхідні для реалізації ефективних алгоритмів багаступінчатого захисту.

8. Для ТЕП автономних локомотивів з АД розроблена САК із змінною структурою, що містить два регулятори: РЗ та РЧ. РЗ забезпечує умови сумісної роботи дизеля і ТЕП. РЧ, що є підпорядкованим

по відношенню до РЗ, здійснює інваріантне тризонне управління частотою живлення тягових АД. Синтез РЧ заснований на результатах аналізу оптимальних законів частотного управління (у вигляді критерію оптимальності прийнята умова одержання максимально можливого моменту АД при заданому струмі статора). Розроблена оригінальна методика розрахунку тягових і регульовальних характеристик локомотива, яка відслідковує процес роботи САК і яка враховує нелінійність магнітного ланцюга АД та несинусоїдальність напруги живлення.

Показана доцільність мікропроцесорної реалізації управління всією електроенергетичною системою тепловозу.

9. Основні наукові результати реалізовані при утворенні і випробуваннях дослідних зразків тягового електрообладнання, при впровадженні на автономних локомотивах системи самозбуждення СГЕ, при утворенні та експлуатаційних випробуваннях тепловозів ТЕ120 з ТЕП змінного струму і ТЕП70 з мікропроцесорною системою управління. Впровадження підтверджуються актами про використання результатів наукової роботи автора в НДІ "Електроважмаш" (м. Харків), в ОАО ХК "Коломенський завод" (м. Коломна, Росія), в НВО "Електротехніка" (зараз підприємство ESTEL AS, м. Таллінн, Естонія).

Основні положення дисертації опубліковані в наступних роботах :

1. Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов /А.Д. Степанов, В.И. Андерс, В.А. Пречисский, Ю.И. Гусевский.- М.: Транспорт, 1982.- 255с.
2. Гусевский Ю.И. Способы и устройства формирования сигналов обратной связи в электропередачах тепловозов с асинхронными двигателями. Обзорная информация //Серия 10. Электрооборудование подъемно-транспортных средств. Тяговое и крановое электрооборудование. (Электровозы. Напольный электротранспорт", Информэлектро.- Москва.- 1983.- Вып.4.- С.1-40.
3. Гусевский Ю.И., Полтораки С.Н. Аварийные режимы и устройства защиты автономного тягового электропривода переменного тока. Обзорная информация. //Информэлектро "Тяговое и крановое электрооборудование. Электровозы. Напольный транспорт".- ТС - 10. Москва.- 1982.- С.1-20.
4. Алексеев В.М., Гусевский Ю.И., Мажинский М.В. Защита тепловозных генераторно-выпрямительных установок //Труды ВНИТИ "Исследование узлов и агрегатов тепловозов". - Коломна.- 1978. - Вып.47. - С.134-140.
5. Бурков А.Т., Гусевский Ю.И., Полтораки С.Н., Строков В.С. Анализ противоаварийных состояний в тяговом автономном инверторе напряжения методом двух составляющих // Труды ВНИТИ, Коломна, 1985.- Вып.61.- С.65-71.
6. Гусев П.В., Гусевский Ю.И., Дубровский А.В., Загарий Г.И., Мамонов А.В., Марченко В.С., Озерной Н.Ф., Полтораки С.Н. Микропроцессорный контроллер возбуждения агрегата тепловоза //Сборник научных трудов "Тепловозное и энергетическое электрооборудо-

- вание".- Харьков: НИИ завода "Электротяжмаш".- 1989.- Вып.1.- С.13-21.
- 7.Гусевский Ю.И. Выбор параметров кривой фазного напряжения двухфазного тягового блока АИН-АД: // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте.-1998.-N6.-С.
 - 8.Гусевский Ю.И. Инвариантное управление тиристорными выпрямителями при изменении напряжения и частоты источника питания: // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте.- 1997.- N3.- С.35-38.
 - 9.Гусевский Ю.И.Распределение магнитного потока в воздушном зазоре АД при несинусоидальном питании: // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1998. - N3. - С. 86-88.
 - 10.Гусевский Ю.И. Регулировочные характеристики гибридных тиристорных выпрямителей в управляемом режиме: // Информационно - управляющие системы на железнодорожном транспорте. - 1997.- N 5/6. - С.66-70.
 - 11.Гусевский Ю.И. Регулировочные характеристики полууправляемых гибридных выпрямителей, работающих в неуправляемом и полууправляемом режимах : // Информационно - управляющие системы на железнодорожном транспорте.- 1997.- N4.- С.70-75.
 - 12.Гусевский Ю.И.,Верхогляд В.Е.,Марченко В.С.,Носков В.И. Измерение тока на выходе автономных инверторов напряжения //ЭП "Преобразовательная техника".- 1974.- N11[58].- С.8-11.
 - 13.Гусевский Ю.И.,Зализняк В.П.,Носков В.И.,Капинус В.С.,Строков В.С. Вопросы моделирования системы инвертор напряжения-асинхронный двигатель-нагрузка в тяговом электроприводе тепловоза // Труды ВНИТИ "Исследование узлов и агрегатов тепловозов." -Коломна.- 1978.- Вып. 47.- С.125-133.
 - 14.Гусевский Ю.И., Иваненко В.И., Пимонов А.П.,Рогачев С.И.,Ткаченко А.Н. К вопросу о генераторном торможении асинхронного тягового двигателя при ограничении по магнитному потоку // Вестник ХПИ "Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий".- Харьков, 1983.- N206, вып.8.- С.29-31.
 - 15.Гусевский Ю.И.,Иваненко В.Н.,Рогачев С.И. Перспективы использования двухфазных асинхронных двигателей в тяговом электроприводе // Вестник Харьковского политехнического института.- 1987.- вып.247.- С.5-7.
 - 16.Гусевский Ю.И., Иванова В.Н. Исследование устойчивости системы регулирования генератора энергоснабжения тепловоза ТЭ120 //ЭП "Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование".- 1982. - N2[80].- С.4-6.
 - 17.Гусевский Ю.И., Иванова В.Н., Храменков С.А. Система энергоснабжения собственных нужд тепловоза ТЭ120 //Исследование электрических передач.- Труды ВНИТИ.-Коломна.- 1977.- Вып.45. -С.152-156.
 - 18.Гусевский Ю.И.,Мажинский М.В.,Капинус В.С.,Юликов В.М.Устройство для измерения токов автономного трехфазного тягового ин-

- вертора //Труды ВНИТИ, Коломна 1985.- вып.61.- С.47-52.
- 19.Гусевский Ю.И., Носков В.И., Мажинский М.В., Калмыков В.С.Измерение магнитного потока тягового асинхронного электродвигателя // ЭП "Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование".- 1979.- N2[62].- С.14-17.
- 20.Гусевский Ю.И.,Полторак С.Н.,Мажинский М.В. Расчет фазных токов инвертора методом двух составляющих //ЭП "Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование".- Москва. Информэлектро.- 1984.- вып.6[96].- С.6-8.
- 21.Иваненко В.Н.,Рогачев С.И.,Пимонов А.П.,Гусевский Ю.И., Евзикова Э.Г. Пульсация электромагнитного момента при несинусоидальном питании асинхронного двигателя // Известия ВУЗ'ов "Электромеханика".- 1985.- N9.- С.46-51.
- 22.Зализняк В.П.,Капинус В.С.,Будницкий А.А.,Гусевский Ю.И.,Носков В.И. Исследование на АВМ электропередачи тепловоза ТЭ120 в режиме тяги //Труды ВНИТИ "Исследование узлов и агрегатов тепловозов".- Коломна.- 1978.- Вып.47.- С.148-153.
- 23.Полторак С.Н., Гусевский Ю.И. Датчики состояния тиристорных плеч тяговых преобразователей //Вопросы разработки и эксплуатации автономных статических преобразователей подвижного состава.- Харьков: Межвузовский сборник научных трудов.- 1990.- С.105-111.
- 24.А.с.411599 СССР, МКИ H02p 7/74, В 60L 11/08. Устройство для автоматического регулирования скорости многодвигательного электропривода переменного тока / Ю.И. Гусевский (СССР).- N177722158/24-7; Заявлено 07.12.71; Опубл. 15.01.74, Бюл.N2.
- 25.А.с.1203629 СССР, МКИ H 02H 7/122. Способ защиты автономного мостового тиристорного инвертора напряжения и устройство для его осуществления / Ю.И.Гусевский, С.Н.Полторак, А.Т.Бурков, Ю.П.Васильев,В.М.Федоров,О.И.Шатнев (СССР).- N37666954/24-07; Заявлено 06.07.84; Опубл. 07.01.86, Бюл.N1.
- 26.А.с.1294658 СССР, МКИ В 60L 15/20. Устройство для регулирования тепловозного асинхронного электропривода с преобразователем тока /Ю.И.Гусевский, С.Н.Полторак (СССР).-N3935103/25-11; Заявлено 30.07.85; Опубл. 07.03.87, Бюл.N9.

А Н О Т А Ц І Я

Гусевський Ю. І. Наукові основи створення ефективних систем тягового електроприводу з тиристорними перетворювачами для автономних локомотивів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.22.07 - "Рухомий склад залізниць та тяга поїздів".- Харківська державна академія залізничного транспорту, Харків, 1998.

Приведені основні результати робіт, зв'язаних з підвищенням

ефективності перспективних автономних локомотивів і таких, що модернізуються, за рахунок застосування тиристорних перетворювачів в системах тягового електроприводу. З єдиних методологічних позицій проаналізовані можливі варіанти побудови більш досконалих систем тягового електроприводу змінно - постійного та змінного струму з урахуванням специфіки їх застосування на автономних локомотивах. Показано, що застосування статичних перетворювачів надає тяговому електроприводу нові інтегративні властивості. Дано теоретичний аналіз робочих процесів в основних вузлах та в перспективних системах автономного тягового електроприводу в цілому, приведені результати експериментальних досліджень на імітаційних моделях, натурних стендах та на макетних і дослідних локомотивах. На підставі одержаних в роботі результатів дано рекомендації по утворенню ефективних систем автономного тягового електроприводу.

Ключові слова: автономний локомотив, тяговий електропривід, статичний перетворювач, керований випрямляч, автономний інвертор, тяговий електродвигун, система керування.

А Н Н О Т А Ц И Я

Гусевский Ю.И. Научные основы создания эффективных систем тягового электропривода с тиристорными преобразователями для автономных локомотивов. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.07 - "Подвижной состав железных дорог и тяга поездов". - Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 1998.

Приведены основные результаты работ, связанных с повышением эффективности модернизируемых и перспективных автономных локомотивов за счет применения тиристорных преобразователей в их системах тягового электропривода. С единых методологических позиций проанализированы возможные варианты построения более совершенных систем тягового электропривода переменного-постоянного и переменного тока с учетом специфики их применения на автономных локомотивах. Показано, что применение статических преобразователей придает тяговому электроприводу новые интегративные свойства. Дан теоретический анализ рабочих процессов в основных узлах и в перспективных системах автономного тягового электропривода в целом, приведены результаты экспериментальных исследований на имитационных моделях, натурных стендах и на макетных и опытных локомотивах. На основе полученных в работе результатов даны рекомендации по созданию эффективных систем автономного тягового электропривода.

Ключевые слова: автономный локомотив, тяговий електропривод, статический преобразователь, управляемый выпрямитель, автономный инвертор, тяговий електродвигатель, система управління.

A B S T R A C T

Gusevskiy Yu.I."Scientific basis for creating effective traction electric drive systems with thyristor converters for autonomous locomotives". - Manuscript.

A thesis for the academic degree of Doctor of Technical Sciences competition on the speciality 05.22.07 ("Railroads rolling stock and traction of train").-Kharkiv State Academy of Rail Transport, Kharkiv, 1998.

The main results of the work aimed at increasing efficiency of autonomous locomotives being modernized and designed by applying thyristor converters in their traction electric drive systems are given. Eventual versions of creating more efficient alternating and direct current traction electric drive systems (TED), considering specifics of their usage at autonomous locomotives have been analysed based on one methodological position. It has been shown that the employment of static converters provides TED with new integration properties. An analysis of operation processes in main units and in designed TED systems of autonomous locomotives is given. The results of simulation model experiments, on-site stand trials, dummy and experimental locomotives tests are presented.

Employment of thyristor rectifiers in alternating - direct current transmission makes it possible to preserve within the power circuit the commercial series-excitation direct-current tractive motors which are well developed under production and service condition. Compared with conventional systems, the tractive electric drive with thyristor converters has new favorable properties, such as:

- more efficient locomotive velocity regulation by means of gradual relaxation of tractive electric motor field ;
- locomotive thrust coefficient increase through realizing the principle of traction electric motors quasiseparate excitation by boxing;
- traction electric drive operating efficiency increase under electric braking condition.

The thesis proves that long-term tendencies of TED systems development are due only to the application of asynchronous traction electric motors (AD) and self - excited voltage invertors (SVI). For deeper estimation of possibility of employment of such systems at autonomous locomotives, additional research on TED systems with SVI and AD was necessary. The research has shown that conventional three-phase SVI - AD systems possess neither optimum energetic, nor mass - dimensions, qualities. Preference should be given to two-phase systems. Theoretical and experimental research on TED systems with two - phase SVI and AD has been carried out; their operating mode is optimized, principles of electromagnetic processes calculation are worked out, and application recommendations are presented.

The results of theoretical and experimental research on

automatic TED under emergency conditions are shown. Complex high-speed protection of synchronous tractive generator and rectifying installation is elaborated; it activates in cases of a breakdown of the arbitrary number of rectifiers or any kind of a short circuit on the input or output of the rectifier. SVI-AD traction unit eventual emergency conditions analysis permitted to understand the most frequent failure causes and stages of emergency process development. Principles of multistage shock-free protections versions are proposed. They work on the basis of continuous control of SVI thyristors arms current status, detection and identification of emergency process origin and development stages, working-out of control effect for appropriate protection cascade stage.

For TED with AD, a simple and effective system of automatic regulation is developed; the results of its trial are also given in the thesis. On the basis of the results obtained, recommendations for devising an effective autonomic traction electric drive are summarised.

Key words: autonomic locomotive, traction electric drive, static converter, regulated rectifier, self-excited invertors, tractive electric motor, control system.

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ТЯГОВОГО
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ТИРИСТОРНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ДЛЯ
АВТОНОМНИХ ЛОКОМОТИВІВ

ГУСЄВСЬКИЙ Юрій Ілліч

Відповідальний за випуск
к.т.н., доц. Поляков В.М.

Підписано до друку 25 03.99 р.

Формат паперу 60x80 1/16. Папір для розмножувальних апаратів

Друк офсетний. Умовних друк. арк. 2,0. Обл.- вид.арк. 2,25
Заказ N 194 Наклад 100 екз. Безплатно.

Видання ХарДАЗТ, 310050,м.Харків-50,пл. Фейєрбаха, 7
Друкарня ХарДАЗТ, 310050,м.Харків-50,пл. Фейєрбаха, 7