

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

На правах рукопису



Ягуп Валерій Григорович

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ СИГНАЛЬНИХ ГРАФІВ
(ТЕОРІЯ, МЕТОДИ, АЛГОРИТМИ ТА ЇХ КОМП'ЮТЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ)

Спеціальність: 05.09.12 -

Напівпровідникові перетворювачі електроенергії

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового
ступеня доктора технічних наук

Київ - 1997



00751728 (U)

Дисертація є рукопис

АВ 37.093

- Роботу виконано в Українській інженерно-педагогічній академії, м. Харків.

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор, Заслужений працівник вищої школи України ДОЛБНЯ Віктор Тимофійович

Офіційні опоненти:

Доктор технічних наук, професор ЖУЙКОВ Валерій Якович

Доктор технічних наук, професор МОСТОВЯК Іван Васильович

Доктор технічних наук, професор НОВОСЕЛЬЦЕВ Олександр Вікторович

Провідна організація - НДІ ВО ХЕМЗ, м. Харків, Міністерство машинобудування, військово-промислового комплексу і конверсії України

Захист відбудеться "26" 03 1997 р. о "11" годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.98.02 при Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 252680, Київ, 57, пр. Перемоги, 56

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України

Автореферат розісланий "25" 02 1997 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук

В.С.Федій

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність і ступінь дослідження тематики роботи. Вентильні перетворювачі набули широкого застосування для перетворювання параметрів електричної енергії ще на початку нашого століття. З появою силових напівпровідникових приладів силові напівпровідникові перетворювачі (СНП) стали майже обов'язковими елементами електротехнічного обладнання різноманітних галузей промисловості - енергетики, транспорту, металургії, машинобудування та приладобудування. Велике значення має використання СНП у зв'язку з існуючою в Україні складною економічною, ресурсною і екологічною ситуацією, завдяки чому неможливим є подальший екстенсивний шлях розвитку виробництва електроенергії. СНП здійснюють перетворювання параметрів більш ніж 30% всієї електричної енергії і дають основу реалізації енергозберігаючих технологій. Особливу актуальність в свою чергу набувають питання поглиблення досліджень та прискорення проектування СНП, що обумовлюється широким спектром функціональних призначень СНП, складними законами керування і тенденцією інтелектуалізації перетворювачів, зростаючою кількістю схемотехнічних рішень в енергетичній електроніці, різноманітністю елементів обладнання, багатьма критеріями оцінки якості роботи СНП. Все це дозволяє обґрунтовано віднести СНП до числа складних технічних пристроїв.

Як складна динамічна система СНП характеризується якостями багатомірності та багатопозиційності, істотно ускладнюючими його дослідження і проектування. Наявність великої кількості реактивних елементів призводить до необхідності складання і розв'язання систем диференціальних рівнянь високого порядку на значних часових інтервалах. Наявність істотно нелінійних напівпровідникових елементів потребує врахування можливості виникнення у системі величезної кількості робочих станів, які характеризуються різноманітними комбінаціями відкритих та закритих тиристорів і діодів. Змінення в еквівалентній схемі СНП, що виникають при змінах станів нелінійних елементів, викликають появу в структурі некоректних топологічних ситуацій (НТС). Це істотно ускладнює процедури складання і розв'язання систем диференціальних рівнянь, що набувають якості жорсткості. В процесі функціонування перетворювача і відпрацьовування ним законів керування і режимів виникають нетривіальні проблеми з визначенням не тільки станів нелінійних елементів, а також і послідовностей змін цими станами один одного. Виникнення та існування тих чи інших типів режимів визначається як законами надходження керуючих імпульсів системи керування, так і параметрами силової схеми СНП та розподілом енергій між реактивними елементами. Ці труднощі збільшуються при необхідності обліку аномалій в системах енергоживлення СНП, впливів на СНП з боку системи керування і навантаження, процесів у фізичних структурах силових напівпровідникових приладів. Необхідність подолання цих труднощів диктується надзвичайною уразливістю СНП завдяки підви-

шеній чутливості високовартісних силових напівпровідникових приладів навіть до незначних перевантажень, бо вони призводять до виходу приладів із ладу з подальшими аваріями в системних масштабах. Не можна при цьому не враховувати постійне зростання цін на обладнання, що застосовується в СНП, - високоякісну електротехнічну сталь, намотувальний провід, конденсаторне обладнання. Виключно важливими постають також питання електромагнітної сумісності та впливу СНП на мережі, які живлять перетворювачі, особливо у зв'язку з підвищенням вимог до споживачів електричної енергії та збільшенням тарифів на неї. Нарешті, вихід із ладу СНП може призвести до значних збитків, якщо перетворювач постачає електроенергією відповідальні об'єкти - приводи прокатних станів, сталеплавильні агрегати, апаратуру контролю екологічно небезпечних об'єктів. Названі проблеми надають надзвичайної актуальності питанням всебічного вивчення та дослідження електромагнітних процесів в СНП ще на стадії їх проектування. Зважаючи на високу складність цих процесів, докладне дослідження їх неможливе без застосування ЕОМ. При цьому на ЕОМ доцільно покласти не стільки функції потужного обчислювального пристрою, скільки функції високоінтелектуального імітатора, здатного відтворювати всю багатостатність перехідних та квазіусталених режимів (КУР), що супроводять роботу СНП при будь-якій структурі силового ланцюгу та складній логіці роботи системи керування.

В розвиток методів аналізу процесів в СНП значний внесок зробили такі видатні вчені, як Папалексі М.Д., Мілях О.М., Нейман Л.Р., Чиженко І.М., Шидловський А.К., Лабунцов В.О., Толстов Ю.Г., Руденко В.С., Сенько В.І., Поссе О.В., Долбня В.Т., Шипілло В.П., Мерабішвілі П.Ф. Питанням моделювання процесів в СНП на ЕОМ прив'язані праці Волкова І.В., Жуйкова В.Я., Шлапака В.А., Брона Л.П., Діжура Д.І., Конєва Ф.Б., Мустафи Г.М., Міхалевич Г.О., а також закордонних спеціалістів - Hingorani N.G., Nay J.L., Revankar G.N., Foch H., Hasumi P., Kassakian J.G. Питання застосування ЕОМ для аналізу електромагнітних процесів в СНП з певною увагою розглядалися на всесоюзних та республіканських конференціях і семінарах в період 1970-1995 р.р., в роботі яких приймав участь і дисертант. Розробки тематики проводилися відповідно до Координаційних планів науково-дослідних робіт по комплексним проблемам "Перетворення параметрів електричної енергії" (1976-1980 рр. - п. 01.03.03) та "Наукові основи електроенергетики" (1981-1985 рр. - п. 1.9.6.2.2.7 та 1986-1990 рр. - п. 1.9.2.2.1.1.2) НАН України, де також велику увагу приділялось дослідженню динаміки електроенергетичних систем з напівпровідниковими перетворювачами електроенергії.

Предмет і об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження дисертації є напівпровідникові перетворювачі електроенергії, предмет дослідження складають електромагнітні процеси, що супроводять перехідні та квазіусталені режими роботи перетворювачів електроенергії в нормальних та аварійних ситуаціях при різноманітних навантаженнях та законах керування.

Методологія і методи дослідження предмету і об'єкта. В основу методології дослідження електромагнітних процесів в перетворювачах електроенергії покладено розгляд вентильного перетворювача як складної кусково-лінійної неавтономної динамічної системи для перетворення параметрів електричної енергії згідно топології силової схеми та законів керування вентилями та комутаторами. Для розв'язання поставлених завдань в дисертаційній роботі були застосовані: методи топологічного аналізу електричних ланцюгів; методи теорії сигнальних графів (СГ) Мейсона; метод припасовування; теорія розривних функцій; апарат різницевих рівнянь і z -перетворення; метод змінних стану; методи комбінаторної математики; методи чисельного інтегрування систем диференціальних рівнянь; методи структурного програмування та імітаційного моделювання.

Мета і основні завдання наукового дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка ефективних методів дослідження електромагнітних процесів в перетворювачах електроенергії на основі використання сигнальних графів та застосування сучасних персональних комп'ютерів з метою прискорення і підвищення якості розробки та проектування перетворювачів завдяки одержанню повного обсягу інформації про особливості протікання динамічних процесів, що супроводять роботу перетворювачів при нормальних і аварійних режимах. Виходячи із поставленої мети в дисертації вирішувалися такі завдання:

- теоретичне обґрунтування та розробка методики застосування апарату сигнальних графів для аналізу ланцюгів, що містять електричні вентиля;
- розробка раціональної структури імітаційної моделі (ІМ) силового напівпровідникового перетворювача електроенергії довільної топологічної структури;
- розробка алгоритмів формування і перетворення узагальненого сигнального графу вентильного перетворювача для отримання графів окремих станів та їх обробки з метою формування рівнянь електромагнітних процесів;
- розробка методів та алгоритмів чисельного розв'язання рівнянь електромагнітних процесів із урахуванням можливих різноманітних форм їх подання;
- розробка методів та алгоритмів швидкого знаходження параметрів квазіусталених режимів в перетворювачах із довільною структурою силової схеми і різноманітними алгоритмами керування тиристорами;
- розробка методів підвищення надійності і швидкодії імітаційних моделей СНП;
- реалізація розроблених моделей на персональних комп'ютерах, їх налагодження та тестування і обробка інформації, що отримується під час постановки машинних експериментів з ІМ СНП різноманітного функціонального призначення.

Обґрунтування теоретичної і практичної цінності дослідження. Використання наукових положень, обґрунтованих в дисертаційній роботі, послужило теоретичною основою розробки методів, алгоритмів і програм імітації електромагнітних процесів в перетворювачах електроенергії, які мають такі переваги:

- наглядність, економічність і простота роботи процедур формування і перетво-

- висока точність і стійкість процедур чисельного розв'язання рівнянь динаміки на основі часових сигнальних графів окремих станів перетворювачів;
- високий ступінь універсальності алгоритмів і програм імітації процесів в напівпровідникових перетворювачах електроенергії із різноманітною топологічною структурою і функціональним призначенням;
- висока надійність роботи імітаційних моделей напівпровідникових перетворювачів щодо виявлення типу режиму схеми перетворювача незалежно від топології перетворювача, законів керування тиристорами та початкових умов змінних стану;
- широкі можливості використання різноманітних методів чисельного інтегрування рівнянь динаміки на єдиній методологічній і алгоритмічній основі;
- висока точність і малі витрати часу при визначенні параметрів квазіусталених режимів завдяки запропонованим методам, в тому числі і в перетворювачах із слабо демпфованими коливальними системами;
- простота впровадження інтерактивного режиму роботи з пакетом прикладних програм для імітації електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах електроенергії, яка забезпечує можливості відтворення, вивчення і інформаційної обробки різноманітних нормальних та аварійних режимів в перетворювачах з довільними топологією і законами керування.

Наукова новизна дослідження. Запропонований в дисертації новий напрямок в розв'язанні проблеми дослідження електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах електроенергії базується на широкому застосуванні теорії сигнальних графів. У розвиток цього напрямку автором розроблено теоретичні основи використання сигнальних графів для аналізу перетворювальних систем, які містять керовані та некеровані електричні вентиля. При цьому вперше запропоновано методіку автоматизованого формування та перетворювання узагальненого сигнального графу СНП для отримання графів окремих станів, а також ефективні алгоритми для реалізації цих процедур. Розроблено ефективний алгоритм для одночасного знаходження всіх необхідних передач СГ СНП. Новизна міститься в розробленій раціональній структурі алгоритму імітації перетворювачів, де передбачається при перемиканнях вентилів здійснювати псевдорух системи в просторі стану при нульових значеннях часової вибірки. Це забезпечує адекватну відробку перемикань високих порядків, коли перемикання одного вентиля викликає перемикання другого чи кількох других вентилів. Завдяки запропонованому заходу скорочується машинний час на непродуктивне використання процедур формування рівнянь динаміки. Розроблено метод чисельного розв'язання рівнянь динаміки СНП на основі часових СГ окремих станів, які одержуються з операторних графів шляхом нескладних перетворень. Оригінальними є алгоритми формування рівнянь стану, в тому числі при наявності в схемі

перетворювача взаємно-зв'язаних індуктивностей, а також при виникненні некоректних топологічних ситуацій в еквівалентних схемах станів СНП. Вперше запропоновано метод макромодельовання СНП і розроблено алгоритми для чисельного визначення параметрів макромоделі методами одного та кількох періодів, що дозволяє на один-два порядки знизити витрати машинного часу і підвищити точність визначення параметрів КУР СНП. Показано зв'язок з-перетворення та якобіану з параметрами макромоделі, що дає змогу комбінувати використання відповідних методів під час дослідження і прискорює знаходження розв'язання для КУР. Вперше в імітаційних моделях СНП виявлено виникнення режимів, що ско-взають, теоретично обґрунтовані умови їх появи і дані рекомендації по їх уникненню. Виявлена якість негрубості моделей перетворювачів на основі керованих комутаторів. Перелічені запропоновані вперше теоретичні ідеї, методи та алгоритми реалізовані на персональних комп'ютерах в оригінальному пакеті програм, призначеному для імітації електромагнітних процесів в СНП електричної енергії з довільною топологічною структурою та різноманітними законами керування.

Рівень реалізації наукових розробок. Результати теоретичних досліджень та розробок були використані при створенні пакету прикладних програм СІМПАТ, впровадженого для практичного застосування промисловими підприємствами, проектними організаціями та вищими навчальними закладами і використаного під час проведення дослідних та проектних робіт при розробці перетворювачів різноманітного функціонального призначення, а також для підготовки аспірантів та студентів.

Апробація результатів наукових досліджень. Основні положення та результати досліджень докладалися і обговорювалися на: Наукових семінарах АН України "Питання теорії, розробки та дослідження вентильних перетворювачів", м. Харків, 1972-1990 р.р.; Всесоюзній науково-технічній конференції "Сучасні завдання перетворювальної техніки", м. Київ, 1975 р.; П'ятій всесоюзній конференції з теорії і методів розрахунку нелінійних електричних ланцюгів та систем", м. Ташкент, 1975 р.; Республіканському семінарі "Математичне і програмне забезпечення цифрового моделювання вентильних перетворювачів", м. Київ, 1978 р.; Всесоюзній науково-технічній конференції "Розробка і промислове застосування напівпровідникових перетворювачів частоти в машинобудуванні", м. Уфа, 1977р.; II Всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми перетворювальної техніки", м. Київ, 1979 р.; VIII Всесоюзній науково-технічній конференції з проблем автоматизованого електроприводу, силових напівпровідникових приладів і перетворювальної техніки на їх основі", м. Москва, 1979 р.; II Всесоюзній науково-технічній конференції "Застосування в технологічних процесах машинобудівного виробництва напівпровідникових перетворювачів частоти", м. Уфа, 1980 р.; Конференції молодих вчених "Актуальні прикладні проблеми електро-техніки та енергетики", м. Харків, 1982 р.; 5 Всесоюзній нараді з автоматизації

проектування електротехнічних пристроїв, м. Таллін, 1983 р.; III Всесоюзній науково-технічний конференції "Проблеми перетворювальної техніки", м. Київ, 1983 р.; Галузевий науково-технічний нараді "Застосування обчислювальної техніки для досліджень і автоматизації проектування перетворювачів", м. Москва, 1984 р.; II Всесоюзній науково-технічний конференції "Проблеми нелінійної електротехніки", м. Київ, 1984 р.; Республіканській науково-технічний конференції "Електромеханіка і електроніка", м.Тбілісі, 1984 р.; III Всесоюзній науково-технічний нараді "Проблеми електромагнітної сумісності силових напівпровідникових перетворювачів", м. Таллін, 1986 р.; IV Всесоюзній науково-технічний конференції "Проблеми перетворювальної техніки", м. Київ, 1987 р.; Всесоюзному науково-технічному семінарі "Автоматизація проектування в енергетиці та електротехніці", м. Новочеркаськ, 1987 р.; V Всесоюзній науково-технічний конференції "Проблеми перетворювальної техніки", м. Київ, 1991 р.; Науковому семінарі АН України "Напівпровідникові перетворювачі в пристроях промислової електроніки", м. Київ, 1990 р.; Науковому семінарі АН України "Електричні ланцюги з джерелами вентильними елементами", м. Київ, 1990 р.; Науковому семінарі АН України "Оптимізація напівпровідникових пристроїв перетворювальної техніки", м. Київ, 1985, 1986, 1992 р.р.; Міжнародній конференції "Контроль і керування в технічних системах", м. Вінниця, 1995 р.

Публікація результатів наукових досліджень. За темою дисертації опубліковано 72 наукові роботи, серед них 1 монографія (10 д.а.), 2 навчальних посібники, 43 - у виданнях центральних журналів і науково-технічних збірниках, 3 - зареєстровано в фонді алгоритмів та програм України. Із цих робіт 35 опубліковано без співавторів, а в решті робіт автору належать основні ідеї щодо наукового напрямку дисертації.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, 8 глав, закінчення, списку літератури. Загальний обсяг роботи складає 297 сторінок основного тексту, 143 сторінок ілюстрацій, 18 сторінок списку літератури.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі проведено обсяг проблем, пов'язаних із розрахунками електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах електричної енергії. Обґрунтовано актуальність питань, яким присвячена дисертаційна робота, перелічені методи дослідження, наукова та практична новизна, реалізація результатів роботи, апробація, публікації і структура дисертації.

У першій главі проведено теоретичне обґрунтування структури імітаційної моделі вентильного перетворювача довільної топології. Розглянуто особливості поведінки вентильного перетворювача як об'єкту імітаційного моделювання. Як складна система СНП може бути підданий структуризації, при цьому його декомпозиція природним чином виділяє силову частину і систему керування. Основний інтерес з точки зору енергетичних процесів уявляє силову частину. Дослідження

електромагнітних процесів в ній постачають необхідну інформацію для проектування як силового обладнання, так і системи керування. Тому при вивченні процесів у силовій частині раціональним є функціональний підхід до подання впливу системи керування на силову частину. Декомпозиція силової частини СНП дозволяє виділити набір елементів, що складають саму систему перетворювання параметрів електричної енергії. Виходячи із рівня, достатнього для адекватного подання електромагнітних процесів у силовій частині СНП, елементи слід вважати зосередженими завдяки відносно низькому частотному діапазону їх функціонування. Присутні в перетворювальній схемі ємності та індуктивності уявляють собою пристрої для демпфування електричних поштовхів і фільтрації електричної енергії, її передачі через електромагнітне поле. Їх наявність призводить до необхідності використання при описі процесів у СНП систем звичайних диференціальних рівнянь і до інтерпретації СНП як динамічної системи. Нелінійні напівпровідникові елементи, як тиристори, діоди, транзистори, диністори, стабілітрони і т.п., виконують важливі функції перетворювання електричної енергії завдяки керуванню положеннями зображуваних точок на їх в.а.х. Істотна нелінійність останніх призводить до вельми швидких переходів зображуваної точки від однієї області в.а.х. до другої, що можна трактувати як перемикання внутрішніх станів нелінійних елементів, які розглядаються далі як кусково-лінійні елементи (КЛЕ). Така ідеалізація зберігає адекватність ІМ, оскільки реально діючі рівні напруг живлення і струмів навантаження в СНП на декілька порядків перевищують залишкові напруги і струми нелінійних елементів. Цей підхід, запропонований М.Д. Папалексі, став основоположним при розв'язанні завдань аналізу електромагнітних процесів у СНП. В свою чергу, він призводить до інтерпретації СНП як кусково-лінійної системи з наступними вимогами забезпечення зшивання рішень. Резистори в ІМ СНП відображують процеси необоротного споживання електричної енергії в навантаженні та інших елементах, що супроводиться тепловідведенням. Завдяки наявності резистивних елементів усталоється баланс енергій в системі перетворювання в цілому при періодичних керуваннях перетворювальними нелінійними елементами, сама система набуває якості дисипативності, і в ній можуть існувати квазіусталені режими. Джерела напруги і струму в ІМ СНП відтворюють подачу енергії на СНП від енергетичних пристроїв, в тому числі від живлюючої мережі. Обмеженість потужності джерел моделюється введенням відповідних внутрішніх імпедансів. Наявність джерел в ІМ СНП призводить до появи у правих частинах систем звичайних диференціальних рівнянь математичних функцій, що явно залежать від часу за законами задаючих величин джерел струму і напруги, і це надає системі якість неавтономності.

Таким чином, при розробці структури моделі СНП може бути класифікований як кусково-лінійна неавтономна дисипативна динамічна система, що призначена для перетворювання параметрів електричної енергії. Слід відмітити також, що

вплив системи керування призводить до прояву якостей, що характерні для подільного моделювання. В СНП як подія може розглядатися зміна стану тиристора під впливом керуючого імпульсу (істотна подія) або подача керуючого імпульсу, що не призводить до перемикавання тиристора (неістотна подія). Значне ускладнення у функціонуванні ІМ СНП викликане тією обставиною, що істотні події в такій системі можуть відбуватися і без впливу з боку системи керування, оскільки перемикавання станів таких перетворювальних нелінійних елементів, як діоди, можуть відбуватися під впливом змін внутрішніх енергетичних станів реактивних елементів внаслідок вільного або вимушеного руху динамічної системи. Важливим елементом ідеалізації є припущення про те, що процеси перемикавання нелінійних елементів відбуваються миттєво, і впливи мікропроцесів у фізичних структурах на певних етапах дослідження не враховуються.

Сукупність станів нелінійних елементів визначає стан СНП. Функціонування ІМ СНП можна подати як рух зображуючої точки в багатовимірному фазовому просторі змінних стану (ЗС) $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$. Цей простір можна уявити розподіленням на ряд областей W_i , кожна з яких відповідає можливим станам $S_1, S_2, \dots, S_m$ для СНП. Перетворювач переходить із стану S_k до стану S_h внаслідок перемикавання окремих вентилів і керованих комутаторів, що відповідає переходу зображуючої точки із однієї області W_k фазового простору до другої W_h . Цей перехід здійснюється при перетині зображуючою точкою системи деякої гіперповерхні S_{kh} , що розподіляє області фазового простору. В кожній із областей W_i СНП описується системою диференціальних рівнянь такого вигляду

$$\frac{dz_k}{dt} = \sum_{s=1}^n B_{ks}^{(i)} z_s + F_k^{(i)}(t),$$

де $k = 1, 2, \dots, n$; B_{ks} - постійні коефіцієнти, що визначаються параметрами схеми заміщення СНП і станом КЛЕ; $F_k(t)$ - неперервні функції часу, які відтворюють вплив з боку джерел електричної енергії. При влученні зображуючої точки на поверхню перемикавання для продовження руху необхідно в загальному випадку задати умови зміни значень ЗС при "проколенні" цієї поверхні:

$$z(t_{kh} + 0) = \chi[z(t_{kh} - 0), t],$$

де $z(t_{kh} + 0)$ та $z(t_{kh} - 0)$ - значення змінних в момент часу безпосередньо до перемикавання та після нього, а χ - нелінійна в загальному випадку функція, що дозволяє зв'язати вищезгадані значення змінних для відповідного перемикавання.

При відсутності НТС в структурі СНП ці умови стрибків перетворюються в умови неперервності ЗС. Це дозволяє продовжити імітацію руху системи в наступній області W_h . Умови перемикавання СНП визначаються умовами перемикавання нелінійних елементів, зокрема, для діодів і тиристорів умови вмикання полягають в досягненні струмом відкритого нелінійного елемента нуля при його спаді. Дуальною

є умова вмикання діоду, що полягає у досягненні напругою закритого діоду нуля при її зростанні. Умови вмикання ідеального тиристора поєднують необхідності наявності на керуючому електроді імпульсу і позитивної напруги між анодом і катодом тиристора. Ці умови покладено в основу розроблених алгоритмів контролю станів діодів і тиристорів в процесі руху системи. Точність досягнення умов перемикачів визначається зонами комутації, які задають припустимі межі похибок $\delta i, \delta u, \delta t$ за струмом, напругою і часом відповідно. Після проколення гіперповерхні перемикачів потрібно визначити новий стан КЛЕ в межах заданих похибок. З цією метою при ІМ СНП кожний раз при виникненні ситуації, в якій стан КЛЕ невідомий, запропоновано здійснювати нульові переміщення, доки новий стан не стане стійким. Запропоновані принципи побудови ІМ СНП істотно підвищують надійність її роботи.

Для кожного виникаючого стійкого стану з урахуванням параметрів СНП встановлюється повний розрахунковий крок Δt , з яким ведеться моделювання руху системи. Крок повинен бути досить малим, аби забезпечити необхідне інформаційне уявлення характеру руху системи, а крім того забезпечити стійкість і точність розв'язання обраним чисельним методом інтегрування системи диференціальних рівнянь, що і дає інформацію про поведінку ЗС. Подальший рух здійснюється на основі концепції дозволеного кроку, яка полягає у обчисленні на кожному кроці вентильних величин і сигналів системи керування з метою контролю можливостей перемикачів КЛЕ всередині цього кроку. При відсутності перемикачів крок вважається дозволеним. При виникненні ознак перемикачів крок вважається забороненим, і за допомогою спеціальних процедур забезпечується обчислення мінімально скороченого дозволеного кроку, що підводить зображуючу точку до поверхні перемикачів. Далі здійснюється проколення поверхні перемикачів при достатньо малому часовому кроці $\Delta t < \delta t$ із забезпеченням обмежень, які задані областями δi та δu . Запропонована структура алгоритму ІМ СНП, що передбачає відпрацювання основних ситуацій моделювання: розрахунок траєкторії для незмінної структури, підведення зображуючої точки до поверхні перемикачів, проколення її, відпрацювання всіх можливих перемикачів КЛЕ, визначення нового стану, продовження руху системи.

У другій главі розглядаються питання застосування теорії сигнальних графів для формування і розв'язання рівнянь динаміки протягом інтервалів незмінності станів кусково-лінійних елементів. Виходячи із складу елементів перетворювачів, складені їх компонентні сигнальні граfi. Для реактивних елементів компонентні граfi містять додаткові одиничні вітки із вузлів, що враховують ненульові початкові умови, які відзеркалюють накопичування цими елементами електричної енергії. Компонентні граfi двополюсників в ІМ СНП подаються як в імпедансній, так і в адмітансній формах. Для КЛЕ визначено поняття відповідної форми його уявлення, яке пов'язано з таким конкретним станом КЛЕ, при якому пара-

метр компонентної вітки СГ можна дорівняти нулю. В топологічному плані ця операція адекватна виключенню компонентної вітки СГ відповідного КЛЕ. З метою формалізації процесу формування СГ СНП його доцільно складати у формі основного графу. Для цього потрібно попередньо вибрати дерево СНП, для чого встановлено пріоритет, згідно з яким в дерево крім джерел напруги і конденсаторів повинні бути включені відкриті діоди, тиристори і керовані комутатори. До складу зв'язків крім джерел струму та індуктивностей повинні бути включені закриті діоди, тиристори та керовані комутатори. Після цього формування СГ СНП призводиться до формування компонентних графів віток у імпедансній формі, зв'язків - у адмітансній формі, а також одиничних віток, які відзеркалюють топологічні рівняння для напруг зв'язків та струмів віток відповідно до структури фундаментальних контурів та перетинів. Поняття відповідної форми розповсюджено на узагальнений СГ СНП, що співвідноситься до такої ситуації, при якій компонентні графи всіх КЛЕ подані у формі, відповідний стану, що розглядається. Для отримання СГ СНП конкретного стану при цьому досить виключити СГ всіх КЛЕ, що подані у відповідній формі. При зміні стану КЛЕ узагальнений СГ повинен бути приведений до форми, що відповідає новому стану. Приведення СГ до потрібної форми запропоновано здійснювати за допомогою інверсії контура, що містить компонентну вітку КЛЕ, стан якого зазнав зміни. При одночасному перемиканні кількох КЛЕ оптимальною є інверсія такого контуру, в якому міститься найбільша кількість компонентних віток КЛЕ, які змінили свій стан. Запропоноване перетворення дозволяє запобігти необхідності переформування дерева і сигнального графу СНП і досягти економії машинного часу. Невід'ємним при моделюванні СНП є питання про виникнення НТС. Їх можна виявити ще на етапі формування дерева, коли не вдається сформуувати нормальне дерево через наявність особливих ємнісних контурів або індуктивних перетинів. Стосовно СНП поняття НТС конкретизовані так: до неособливого ємнісного контуру повинні входити лише джерела напруги, конденсатори та відкриті КЛЕ, а до індуктивних перетинів - лише джерела струму, індуктивності та закриті КЛЕ. Типовими є ситуації вироджень внаслідок перемикань КЛЕ, що призводить до труднощів не тільки у формуванні рівнянь, але і в розв'язанні їх. Причиною НТС є ідеалізація елементів СНП, при якій вважають, що джерела енергії та КЛЕ мають нульові імпеданси та адмітанси. Введення ненульових їх величин збільшує розмір моделі та уповільнює її функціонування. Запропоновано оптимальну стратегію введення мінімально необхідної кількості розв'язуючих резисторів під час виявлення кожного виродженого стану КЛЕ СНП. Величини розв'язуючих резисторів запропоновано визначати автоматично в залежності від показника, який названо ступенем розв'язку. Він дорівнює кількості десяткових порядків, на яке відрізняється опір розв'язуючого резистору від максимального або мінімального опорів резисторів початкової схеми СНП. Запропоновано алгоритм формування СГ СНП

при наявності у ньому взаємно-зв'язаних індуктивностей, що є досить розповсюдженим випадком в схемах СНП. В загальному випадку для системи індуктивностей, магнітні зв'язки яких характеризуються коефіцієнтами зв'язків k_{jk} , обчислюються взаємні індуктивності M_{jk} . Об'єднавши пов'язані індуктивності в окремий багатополюсник і склавши компонентні операторні рівняння, можна дійти до простої методики урахування магнітних зв'язків у операторному графі. Насамперед формуються підграфи зв'язаних індуктивностей у імідансній формі, потім вони доповнюються вітками із передачами pM_{jk} та M_{jk} , виходячими із вузлів операторних струмів індуктивностей та вузлів-джерел, що відбивають початковий струм k -тої індуктивності і направлені у вузол напруги j -ої індуктивності. Приведення одержаного підграфу до потрібної адмітансної форми здійснюється інверсією віток pL_{jk} для кожної із зв'язаних індуктивностей. Нарешті, показано, що запропоновані форми одержання сигнальних графів СНП та їх перетворювання наочно відображаються у формі матричного сигнального графу, вузли якого уявляють собою вектори струмів та напруг на елементах перетворювача, а передачі віток - відповідні матриці коефіцієнтів згідно з компонентними та топологічними матричними рівняннями.

Наведені теоретичні положення обумовлюють такий алгоритм функціонування імітаційної моделі СНП, побудованої на основі використання СГ:

1. Ввести початкову інформацію про схему СНП.
2. $t_{\Sigma} := t_n$; $S_1 := S_n$.
3. Формування дерева і узагальненого СГ СНП.
4. $S_0 := S_1$; $\Delta t := 0$.
5. Приведення СГ до відповідної форми; якщо СГ не може бути приведений до відповідної форми, перейти на 3.
6. Виключити вентильні та реактивні вітки СГ.
7. Визначити передачі у вузли вентильних величин із джерел.
8. Визначити вентильні величини наприкінці кроку Δt .
9. Звернення до процедури контролю станів нелінійних елементів.
10. Якщо крок заборонений, то зменшити його і перейти до 17.
11. Переміщення зображуючої точки ($IW_0 := IW_1$; $VW_0 := VW_1$; $t_{\Sigma} := t_{\Sigma} + \Delta t$).
12. Якщо $t_{\Sigma} > t_k$, то перейти до 20.
13. Якщо $S_1 \neq S_0$, то перейти до 4.
14. Якщо $\Delta t > 0$, то перейти до 18.
15. Відродити реактивні вітки сигнального графу.
16. $\Delta t := \Delta t_p$.
17. Визначити передачі у вузли величин змінних стану із джерел.
18. Обчислити значення змінних стану наприкінці кроку Δt .
19. Перейти до 7.
20. Зупинитися.

Наведений алгоритм показав високу надійність і швидкодію при імітації електромагнітних процесів в СНП різноманітного призначення.

Третя глава присвячена розробці алгоритмів та програм для формування і обробки сигнальних графів СНП. Кодування графів здійснюється списочним шляхом, що забезпечує економічність за витратами пам'яті та машинного часу у порівнянні із застосуванням матриць. При цьому в масиви записується інформація про кожну вітку графу, яка вказує коди початкового та кінцевого вузлів, передачу вітки без урахування операторної частини, а також ознаку наявності оператора p в передачі вітки. Фундаментальним алгоритмом, необхідним для забезпечення і подальших процедур, є алгоритм пошуку контурів сигнального графу СНП. Він заснований на пошуку в глибину можливих сукупностей віток сигнального графу, що утворюють контури із заданою базовою віткою. В ролі базової вітки використовуються послідовно всі вітки графу, після чого базова вітка виключається із розгляду. В процесі пошуку сукупностей віток, що утворюють контури, виключаються такі, що призводять до тупикових ситуацій, і це забезпечує виключення повторень контурів і продовження пошуку при потраплянні до вузлів-стоків. Алгоритм реалізовано у вигляді процедури з високою надійністю та швидкодією. На основі цієї процедури розроблено алгоритм визначення контурів вищих порядків, які утворюються сукупностями елементарних контурів, що не торкаються один одного. Кожний із попередньо знайдених елементарних контурів приймається за базовий і після визначення всіх контурів вищих порядків виключається із розгляду. З базовим контуром порівнюються всі наступні елементарні контури у послідовності їх розташування в масивах інформації, що накопичується при попередньому визначенні елементарних контурів. Якщо знаходиться хоча б один загальний вузол, що належить базовому і порівняному контурам, останній не враховується, і в ролі порівняного приймається наступний елементарний контур. Отриманий таким чином контур другого порядку далі зіставляється із наступним елементарним контуром, внаслідок чого може бути знайдено контур наступного порядку і т. д. Процедура закінчує роботу після вичерпання списку всіх елементарних контурів і дає інформацію про кількість та номери елементарних контурів, що утворюють контур вищого порядку, а також обчислює передачу контура вищого порядку перемноженням передач елементарних контурів, що утворюють його.

Розроблено алгоритм формування дерева СНП із контролем некоректних топологічних ситуацій і автоматичним введенням мінімально необхідної кількості розв'язуючих резисторів. На відміну від алгоритмів, заснованих на формальних перетвореннях топологічних матриць, запропонований алгоритм базується на обробці списку реквізитів орграфу СНП, із якого у заданому пріоритеті витягаються ребра і розміщуються в списку віток. Після кожної операції поповнення списку віток наступним ребром утворений таким чином підграф контролюється

на утворення контуру за допомогою процедури визначення елементарного контуру. Якщо останнє ребро належить до множини ребер, що згідно з пріоритетом повинні включатися в дерево, і при цьому утворюється контур, то послідовно з цим ребром вводиться розв'язуючий резистор з малим опором, і він потрапляє далі до складу зв'язків. Якщо ребро повинно належати до зв'язків, і при цьому не утворюється контур, то паралельно ребру вмикається розв'язуючий резистор з великим опором, і він потрапляє далі до складу віток. Вихід із процедури здійснюється після вичерпання списку ребер і списку пріоритетів елементів СНП.

Для формування узагальненого СГ СНП розроблено алгоритм, який використовує інформацію про розподіл ребер на вітки та зв'язки, а також про кількість віток у системі особливих контурів. На першому етапі здійснюється формування компонентних підграфів елементів СНП згідно із взірцями, причому підграфи віток формуються в імпедансній, а підграфи зв'язків - в адмітансній формі. Далі формується підграф, утворений лише вітками, які послідовно доповнюються кожним зв'язком. За допомогою процедури пошуку елементарних контурів визначається структура кожного особливого контуру, на основі чого формується підграф СГ, що відзеркалює топологічні рівняння для напруг зв'язків, які виражаються за допомогою напруг віток. Для відображення структури особливих перетинів струми віток виражаються за допомогою одиничних передач шляхом дзеркального відбиття одиничних віток, які сформовані на попередньому кроці. Інформація про сформований СГ містить коди початкового та кінцевого вузлів, величину передачі вітки без урахування операторної частини і ознаку наявності операторної частини передачі. Запропонований алгоритм приведення узагальненого СГ СНП до відповідної діючому стану форми здійснює пошук контуру, що містить максимальну кількість підграфів КЛЕ, які змінюють свої стани. На цій підмножині віток здійснюється інверсія. Знайдений контур є оптимальним, оскільки містить найбільшу кількість підграфів КЛЕ, що повинні бути проінверсовані. Процедура інверсії контуру спочатку визначає структуру віток, які будуть перенесені, після чого напрямки і передачі інверсованих віток змінюються на зворотні. Вітки, що переносяться, далі змінюють коди лише кінцевих вузлів, а їх передачі повинні бути поділені на передачі відповідних інверсованих віток із зворотнім знаком. Приведені до відповідної форми підграфи КЛЕ усуваються із підмножини віток СГ, на якій шукаються контури для інверсії. Процедура закінчує роботу після приведення всіх підграфів КЛЕ до відповідної форми. СГ для конкретного стану перетворювача отримується після усунення всіх приведених до відповідної форми підграфів КЛЕ. Для формування характеристичного поліному розроблено алгоритм, заснований на пошуку в СГ всіх елементарних контурів і контурів вищих порядків і сортуванні їх за сумарним показником операторного множника передачі. Характеристичний поліном обчислюється як визначник СГ конкретного стану СНП. Розв'язання характеристичного рівняння дає змогу об-

числити власні частоти і сталі часу для конкретного стану СНП і призначити часову вибірку для інтегрування системи диференціальних рівнянь.

Важливим питанням при реалізації сигнально-графових моделей є визначення передач СГ на ЕОМ, тому що кількість передач, необхідних для визначення в процесі ІМ, може бути досить велика і залежить від кількості ЗС, джерел електричної енергії і КЛЕ. Розроблено алгоритм, заснований на введенні сингулярної вітки, що направлена із вузла-стока у вузол-джерело, завдяки чому одержуємо сингулярний граф з нульовим визначником. Це дає змогу замінити визначення передач згідно з формулою Мейсона визначенням лише контурів всіх порядків сингулярного графу. Показано, що цей алгоритм раціонально застосовувати тільки у випадках використання операторних виразів для струмів і напруг в перетворювачі. Для визначення передач часового сигнального графу або графу без урахування оператора p розроблено ефективний алгоритм на базі еквівалентних перетворень СГ СНП. Запропоноване перетворення СГ базується на псевдоусуненні залежного вузла СГ і дозволяє привести СГ із багатьма джерелами та залежними вузлами до форми двудольного графу. Таким чином можна одночасно обчислити всі необхідні передачі СГ СНП, в тому числі передачі у вузли ЗС і ненульові величини КЛЕ. Запропонований алгоритм відрізняється високою надійністю і надзвичайно малими витратами машинного часу у порівнянні з алгоритмом, заснованим на введенні сингулярної вітки.

Четверта глава присвячена розробці методів формування та розв'язання рівнянь динаміки СНП для конкретних станів. Застосування СГ в операторній формі дає змогу отримати операторні зображення необхідних електричних величин. Для цієї мети повинна бути використана процедура визначення передачі СГ за допомогою сингулярної вітки. Вона дозволяє отримати аналітичні вирази для зображень у вигляді масивів коефіцієнтів поліномів чисельника та знаменника. Після знаходження коренів і застосування теореми розкладення можуть бути отримані оригінали, через які здійснюється розрахунок необхідних для моделювання електричних величин. Такий підхід, як показали дослідження, характеризується великою трудоемністю, і пошуки шляхів подолання цих труднощів призвели до розробки методу часових графів. Він обґрунтовується на розгляді зображення шуканої реакції у вигляді:

$$R(p, t_{\Sigma}) = \sum_{j=1}^n Q_j(p, t_{\Sigma}) \frac{\sum_k P_{jk}(p) \Delta_{jk}(p)}{\Delta(p)},$$

де $Q_j(p, t)$ - сигнали у вузлах -джерелах СГ СНП; $\Delta(p)$ - визначник графу; $P_{jk}(p)$ - передачі шляхів від джерела $Q_j(p, t)$ в залежний вузол $R(p, t)$; $\Delta_{jk}(p)$ - алгебраїчні доповнення, що відповідають шляхам $P_{jk}(p)$. Виділивши в цьому ви-

разі групи величин, які не залежать від часу; одержимо:

$$R(p, t_{\Sigma}) = \sum_{j=1}^n Q_j(p, t_{\Sigma}) \Phi_j(p),$$

де

$$\Phi_j(p) = \frac{\sum_k P_{jk}(p) \Delta_{jk}(p)}{\Delta(p)}$$

Таким чином $\Phi_j(p)$ є функціями лише оператора p та параметрів схеми, вони не залежать від t і можуть бути трактовані як системні функції. Скористуємося співвідношенням, запропонованим С.С.Хухриковим для наближеного визначення величини оригіналу,

$$x[(m+1)\tau] = (-1)^m \frac{1}{m! \tau^{m+1}} \left[\frac{d^m X(p)}{dp^m} \right]_{p=\frac{1}{\tau}},$$

де $X(p)$ - зображення функції $x(t)$, - величина часової вибірки. Для першої ординати при $m=0$:

$$x(\tau) = \frac{1}{\tau} [X(p)]_{p=\frac{1}{\tau}} = [pX(p)]_{p=\frac{1}{\tau}}$$

Для обчислення наступних ординат можна не запобігати до диференціювання зображення, а досить зсунути початок відліку часу в кінець попереднього розрахункового кроку. При цьому змінюються лише значення сигналів вузлів джерел. Для їх визначення в задачі величини джерел енергії досить підставити нове значення модельного часу, а у вузли, які відзеркалюють ненульові початкові умови реактивних елементів, заслати значення змінних стану наприкінці попереднього розрахункового кроку. Для реалізації цього методу запропоновано користуватися часовим сигнальним графом перетворювача, який можна одержати із операторного графу перетворюваннями, що здійснюються домноженням зображень сигналів вузлів-джерел на оператор p з наступною заміною його у всьому операторному графі на величину, зворотню часовій вибірці τ . Розрахунок динамічного процесу згідно з методом часових сигнальних графів може бути поданий такою рекурентною формулою:

$$R(t_{\Sigma}^{(v+1)}) = \sum_{i=1}^n Q_i(\tau, t_{\Sigma}^{(v)}) \Phi_i(\tau),$$

де

$$t_{\Sigma}^{(\nu+1)} = t_{\Sigma}^{(\nu)} + \tau.$$

Розроблена методика дозволяє безпосередньо за часовим СГ одержати розрахункові вирази для чисельного визначення дискрет змінних стану в ІМ СНП. Третій спосіб подання рівнянь динаміки, що його дає узагальнений СГ СНП, робить можливим отримання рівнянь згідно з методом змінних стану в матричному вигляді $\dot{X} = AX + BQ$, де X - вектор ЗС, Q - вектор задаючих величин джерел енергії, A і B - матриці коефіцієнтів зв'язку. В матричному варіанті автоматичне формування матриць A і B здійснюється за досить громіздкими алгоритмами. Використання СГ дозволило створити витончений та економічний алгоритм обчислення елементів матриць коефіцієнтів. Для цього достатньо в компонентних операторних підграфах замінити вітки з передачами $1/pC$ і $1/pL$ сукупностями двох віток з передачами $1/C$, $1/L$ і $1/p$. Виділені таким чином вітки з передачами $1/p$ відзеркалюють математичні операції інтегрування. Початкові вузли цих віток інтеграторів відповідають похідним від ЗС, що відображені кінцевими вузлами. Таким чином, СГ конкретного стану СНП може бути інтерпретований як обчислювальна структура, що реалізована суматорами, підсилювачами та інтеграторами. Суматори відзеркалюються в СГ одиничними вітками, що відповідають топологічним рівнянням. Підсилювачі відповідають компонентним віткам елементів, що не містять оператора p , а інтегратори - віткам з передачами $1/p$. Для обчислення елементів матриць метода ЗС необхідно перетворити подану систему в систему з нульовою пам'яттю. Цьому на графі відповідає виключення віток інтеграторів. Шукані елементи матриць зв'язку визначаються як передачі з вузлів-джерел СГ у вузли похідних від ЗС. Розглянуто випадки виникнення НТС у структурі еквівалентної схеми СНП, які обумовлені появою через комутації КЛЕ ємнісних контурів та індуктивних перетинів в орграфі. При виникненні НТС метод СГ дозволяє розв'язати завдання формування рівнянь стану з надлишковими елементами, якими виступають ємнісні зв'язки та індуктивні вітки. Ці надлишкові елементи в СГ відображені компонентними підграфами, що містять вітки з передачами pC і pL . Раціональним є розщеплення таких віток на дві з передачами C , L і p . Останні відзеркалюють вітки-диференціатори, кількість яких визначається кількістю надлишкових ЗС. У системі з послідовно з'єднаними інтеграторами і диференціаторами можна зробити редукцію розмірності вектора змінних стану. Запропоноване для цього перетворення СГ полягає у зсуві передачі p в напрямку, протилежному напрямку вітки диференціатора, на одиничні компонентні вітки. На них далі можна виділити похідні від ЗС і задаючих величин джерел енергії. Надлишкові ЗС при цьому автоматично виключаються, що відповідає матричному рівнянню $\dot{X} = AX + BQ + N\dot{Q}$, де $\dot{Q}$ - вектор похідних задаючих величин джерел енергії, а N - матриця коефіцієнтів зв'язку. Елементи останньої матриці обчислюються далі як передачі з вузлів похідних задаючих величин джерел у вузли, що

відзеркалюють похідні ЗС. Розроблений сигнально-графовий метод виключення залежних ЗС є простим для реалізації на ЕОМ і потребує лише перенумерації кодів вузлів, шуканих за ознакою наявності вітки з передачею p . Запропоновані перетворення наочні і легко контролюються на відміну від вельми громіздких і малоекономічних матричних перетворень, що необхідні в цьому випадку. Розглянуто питання стійкості і точності методів чисельного розв'язання рівнянь за допомогою часових СГ. Показано, що метод часових СГ уявляє собою А-стійкий однокроковий метод, що забезпечує стійкість чисельного розв'язання при будь-якому співвідношенні часової вибірки та найбільшої власної частоти і мінімальної сталої часу еквівалентної схеми. За допомогою СГ наочно відзеркалюються обчислювальні структури відомих методів інтегрування систем диференціальних рівнянь у нормалізованій формі. Показано, що розгляд такого СГ, побудованого для методу Рунге-Кутта четвертого порядку, дозволяє проаналізувати стійкість метода, а крім того безпосередньо за структурою цього СГ легко скласти програму на алгоритмічній мові у вигляді окремого програмного модулю. Практичне застосування для ІМ СНП методів Рунге-Кутта обмежено відносно великими витратами машинного часу завдяки багатократному обчисленню похідних на кожному кроці, а також нестійкістю метода, яка проявляється в схемах СНП при виникненні некоректних топологічних ситуацій. Більш швидкодіючими є процедури, що реалізують системні методи інтегрування систем диференціальних рівнянь. Відповідна процедура розроблена на основі використання СГ СНП, приведеного до форми метода ЗС шляхом виключення віток інтеграторів. Ця процедура реалізує паралельне обчислення матричної експоненти та інтеграла від експоненціалу в матричному вигляді:

$$x(t) = e^{A(t-t_0)}x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)}BQ(\tau)d\tau$$

при поданні їх із наперед заданими точністю або кількістю членів ряду, що дозволяє впливати на точність ІМ СНП. Для вирішення проблеми повільної збіжності рядів при виникненні явища жорсткості в алгоритм розв'язання системним методом закладено можливість оцінки максимального кроку, який забезпечує збіжність, з подальшим використанням рекурентних формул подвоєння кроку для обчислення матричної експоненти та інтеграла від експоненціалу. Оскільки жорсткість системи диференціальних рівнянь в ІМ СНП для подання окремих станів є скоріше правилом, ніж винятком, уявляється перспективним також застосування розкладання Паде для обчислення матричної експоненти та інтеграла, оскільки при цьому забезпечується А-стійкість обчислювальної процедури. Запропоновано сигнально-графове подання розкладання Паде, за допомогою якого можна легко знайти коефіцієнти розкладання для будь-яких співвідношень ступе-

ней поліномів чисельника та знаменника розкладання розміру $[L/M]$. Одержано алгоритм побудови графу Коутса, що уявляє собою коефіцієнти чисельника і знаменника у вигляді вузлів СГ Коутса. Для визначення шуканих коефіцієнтів за топологічною формулою доцільно перетворити цей граф до форми СГ Мейсона, для чого достатньо збільшити передачі всіх петель СГ Коутса на одиницю. Це еквівалентно виключенню петель на вузлах коефіцієнтів чисельника розкладання та домноження передач всіх віток, що направлені у вузли коефіцієнтів знаменника, на величину, що визначається L -м коефіцієнтом ступеневого розкладання. За цим алгоритмом складено програму, що автоматично обчислює коефіцієнти розкладання Паде заданого порядку. На цій основі створені процедури для чисельного моделювання динамічних процесів окремих станів СНП, яка відзначається високою точністю та A -стійкістю.

У п'ятій главі вирішуються проблеми, пов'язані з визначенням параметрів КУР СНП. Труднощі виходу ІМ СНП до КУР шляхом відтворювання перехідних процесів, що попереджують КУР, обумовлені необхідністю імітації при цьому великої кількості періодів перехідного процесу. Особливо це характерно для схем з високою добротністю з коливальним характером гладкої складової, а також при експоненціальному характері її, коли значення ЗС повільно наближаються до траскторії КУР. При використанні методу усталення для знаходження КУР зростають похибки, що накопичуються при імітації великої кількості періодів. Крім того, значні труднощі викликає визначення номеру періоду, з котрого встановлюється КУР, бо збіжність до розв'язання стає дуже повільною.

Для розрахунків КУР в СНП з незмінною тривалістю існування станів в перехідних процесах запропоновано метод макромоделювання на основі системи різницевих рівнянь, що описується виразом $X[k+1] = AX[k] + BQ$, где A і B - матриці коефіцієнтів різницевої макромоделі, Q - вектор задаючих величин джерел. Використання макромоделі дозволяє прискорити обчислення КУР, виключивши обчислення ЗС усередині періодів і обмежившись лише обчисленнями значень ЗС на межах періодів. Запропоновано метод визначення параметрів макромоделі, який максимально використовує можливості ІМ СНП і базується на накопичуванні значень ЗС на межах кількох періодів перехідного процесу. Кількість періодів, протягом яких треба імітувати динамічний режим, визначається кількістю ЗС r та джерел енергії q і становить $(r+q+1)$. Використовуючи далі рівняння i -го рядка матричного рівняння та змінюючи n від $n=0$ до $n=r+q$, одержуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь, в якій невідомими є елементи i -го рядка матриць A і B , а коефіцієнтами при них - значення ЗС на межах проімітованих періодів. Застосовуючи цю процедуру послідовно для всіх рядків, одержимо значення всіх елементів макромоделі. Для визначення параметрів КУР приймемо $n \rightarrow \infty$ і $X[n+1]=X[n]=X[\infty]$, що призводить до такого матричного рівняння щодо обчислення значень ЗС на межах періодів у КУР.

$$X[\infty] = [1 - A]^{-1} B Q$$

На прикладі автономного інвертору струму (рис.1) наведено використання макромоделі на основі методу кількох періодів; після розрахунків 4 періодів перехідного процесу (рис.2) забезпечується знаходження параметрів макромоделі. Для параметрів інвертору $L_1=1$; $L_2=40$; $C_1=0.1068$; $R_1=18.87$; $f=0.5$ параметри макромоделі становлять: $A_{11}=0.60478$, $A_{12}=0.19181$, $A_{13}=0.41899$, $A_{21}=-0.02136$, $A_{22}=0.45540$, $A_{23}=2.91180$, $A_{31}=0.00093$, $A_{32}=-0.07258$, $A_{33}=0.84054$, $B_1=0.081655$; $B_2=0.079480$; $B_3=0.046951$, і параметри КУР: $V_{C1}=52.38910$; $I_{L1}=50.05173$; $I_{L2}=7.008181$. Недоліком методу кількох періодів є накопичення похибок визначення ЗС на межах періодів при імітації перехідного процесу. Ці похибки істотно зменшуються у запропонованому методі одного періоду, що ілюструється рис.3. Макромодель подана сигнальним графом для одного періода, всередині якого СНП працює зі зміною станів КЛЕ $S_1, S_2, \dots, S_m$, в моменти часу $t_1, t_2, \dots, t_m=T$. Вузлам СГ відповідають дискретні значення ЗС у подані моменти часу і джерела енергії. Параметри макромоделі одержуються шляхом прогону ІМ протягом одного періоду при дезактивації сигналів у всіх вузлах-джерелах, крім одного, в якому задається одиничний сигнал. Надавши $X_1(0)=1$, отримаємо коефіцієнти $A_{11}=X_1$; $A_{21}=X_2$; ..., $A_{m1}=X_m$, які дорівнюють значенням ЗС наприкінці періоду. Таким чином, матриці A і B макромоделі заповнюються по стовпцям, причому виключається передача накопичених похибок від періоду до періоду і зникає необхідність у розв'язанні систем рівнянь для визначення параметрів макромоделі. У ІМ СНП необхідно при цьому примусово фіксувати режим її функціонування за призначеним типом режиму, замінивши усі діоди та тиристори керованими комутаторами і виключивши таким чином можливості порушення типу режиму через дезактивацію джерел. Показана можливість реалізації методу одного періоду без дезактивації джерел, коли сумарний внесок всіх джерел енергії BQ визначається попередньо у вигляді вектору реакцій макромоделі при прогоні ІМ з дезактивацією початкових умов всіх ЗС. Виходячи з цієї інформації, далі здійснюємо прогон ІМ з послідовним завданням одиничних сигналів у вузлах-джерелах ЗС та визначенням відповідних елементів матриці A . Методи одного періоду на один-два порядки підвищують точність визначення параметрів КУР у порівнянні з методом кількох періодів. Знайдені за їх допомогою для розглянутого вище випадку параметри КУР становлять: $V_{C1}=53.49853$; $I_{L1}=50.0000085$; $I_{L2}=6.88465$.

Сигнально-графове подання макромоделі для методу кількох періодів дозволяє легко перейти від загальної макромоделі до часткової. Загальний СГ макромоделі у ролі вузлів містить значення ЗС на межах кількох періодів таким чином, що значення ЗС наприкінці n -го періоду можуть бути обчислені через значення ЗС на початку попереднього періоду, що відстоїть від останнього на r періодів. В частковій макромоделі вузлами-джерелами є межові значення лише однієї змінної, і це дозволяє отримати рекурентні формули для розрахунку подальших межових значень

цієї змінної через попередні межові значення цієї ж змінної. Таке подання корисне при використанні теорії різницевих рівнянь для аналітичного дослідження властивостей СНП як дискретної системи. Для одержання часткової макромоделі достатньо інверсувати в загальній макромоделі лише по одному шляху з вузлів-джерел інших змінних в залежні вузли межових значень змінної, що розглядається. На цій основі розроблено алгоритм, який дозволяє за допомогою ІМ перехідного процесу в СНП одержувати з-перетворення для певних ЗС, що дає змогу одержувати із з-форм усталені значення ЗС, а також значення дискрет на межах періодів шляхом ділення поліному чисельника на поліном знаменника. В загальному плані цей алгоритм є зв'язуючим між ІМ та дискретною моделлю СНП як елементом системи автоматичного керування, а запропонований спосіб дозволяє вдвічі зменшити витрати машинного часу у порівнянні з відомими методами одержання різницевих часткових моделей.

Особливий інтерес уявляють розрахунки КУР в слабкодемпфованих схемах зі змінюючимися від періода до періода моментами перемикачів. Це обумовлюється природньою комутацією вентилів, моменти якої зміщуються від періода до періоду. Така ситуація виникає при аналізі заряджувальних систем, при дослідженнях вузлів примусової комутації тиристорів і т.і., коли комутації порушують лінійні співвідношення у макромоделях. Для точного визначення параметрів КУР розроблено алгоритм, що базується на методі Ньютона-Рафсона і максимально використовує можливості застосування при цьому ІМ СНП. В ролі функціонала використовується вектор нев'язок, який визначається різницями значень ЗС на межах періоду. Матриця Якобі формується чисельно наданням в процесі ІМ малих приростів для кожної змінної стану, після чого досліджується чутливість функціоналу до збурення і заповнюється відповідний стовпець матриці Якобі. На основі оберненої матриці Якобі та нев'язок обчислюються поправки для кожної змінної і проводиться чергова ітерація. Для прискорення процесу розрахунку досліджено використання методу Бroyдена, згідно з яким кілька ітерацій можуть здійснюватися без перерахування елементів матриці Якобі та без її обернення. Для досягнення розв'язку необхідно забезпечити входження зображуючої точки у КУР, що можна здійснити без значних витрат часу шляхом прогону ІМ при зниженій точності інтегрування або за допомогою макромоделі. Встановлено зв'язок між матрицею Якобі і параметрами макромоделі на основі аналізу загальних співвідношень для знаходження параметрів КУР зазначеними методами. Доведено, що макромоделивання може трактуватися як використання методу Ньютона-Рафсона при умові, що в ролі нев'язки використані значення ЗС наприкінці першого періоду пуску перетворювача від нульових початкових умов. Встановлені співвідношення дозволяють сумісно використовувати обидва методи без спеціального обчислення матриці Якобі, але із застосуванням модифікації Бroyдена уточнювати розв'язання, економлячи таким чином машинний час і підвищуючи

точність.

У шостій главі розглядаються спеціальні питання, пов'язані з підвищенням точності, надійності, швидкодії та економічності ІМ СНП. Проаналізовані варіанти нормування параметрів СНП різних типів. Це зсуває розрахунковий діапазон ІМ в середню частину числового діапазону ЕОМ і сприяє виключенню переповнення розрядної сітки ЕОМ. Для розширення діапазону моделювання та підвищення точності рекомендується перехід на моделювання з подвійною точністю. Показано, що головними факторами, що впливають на точність і швидкість роботи ІМ СНП, є величини часової вибірки, допуски за струмом, напругою і часом на точність визначення моментів перемикань КЛЕ, а також величина ступеню розв'язку. Зменшення допусків на точність визначення моментів перемикань збільшує кількість розрахункових кроків, яке ІМ повинна подолати перед тим, як буде дозволено проколення поверхні перемикання. Додаткові витрати машинного часу обумовлені також необхідністю перерахування коефіцієнтів рекурентних формул, оскільки вони явно залежать від часової вибірки, що, однак, не стосується методів Рунге-Кутта, які не потребують таких перерахунків. Перевагу останнім можна віддавати при моделюванні СНП, що живляться від джерел синусоїдної напруги, оскільки в цьому випадку зменшується похибка через запізнення у збірочній моделі змінювань напруг джерел, яке має бути при використанні методів матричної експоненти або розкладання Паде. Збільшення ступеню розв'язку підсилює жорсткість систем диференціальних рівнянь для окремих станів схеми, що впливає на значення коренів характеристичного рівняння. Це в свою чергу потребує зменшення часової вибірки, особливо в разі використання не А-стійкого метода інтегрування. Практично ступінь розв'язку рекомендується призначати в діапазоні (3 ... 5).

Для графічного подання процесів крім використання часових діаграм наочне відображення можна одержати, побудувавши траєкторії руху зображуючої точки на площині ЗС, всіма яких є різноманітні сполучення ЗС. Особливо наочно відображаються таким чином КУР, яким відповідають замкнені траєкторії руху зображуючої точки. На основі такого розгляду вирішено завдання синтезу оптимального керування в схемі автономного інвертору, що призводить до процесів кінцевої тривалості в пускових режимах, а також в режимах перевodu керування на іншу частоту. На рис.4 зображено траєкторію процесу кінцевої тривалості на площині ЗС, яка забезпечує перевід однофазного інвертору струму (схема на рис.1 при параметрах: $L_1=10$; $C_1=0.1$; $R_1=10$ та при відсутності L_2) від періоду $T=1$ до періоду $T=0.9$ за 2 такти. При цьому ділянка A_2R уявляє собою траєкторію "поп'ятного" руху, що запропоновано обчислювати з від'ємним часовим кроком. Точка перетину траєкторії A_1R прямого руху для $T=1$ з траєкторією A_2R "поп'ятного" руху при $T=0.9$ дає точку розв'язання з тривалостями перехідних тактів керування $T_1=1.4967$, $T_2=1.17635$.

Важливим результатом досліджень з'явилося виявлення в ІМ СНП режимів, що сковзають. Суть відкритого явища можна проілюструвати на прикладі діодної схеми (рис.5), одержаної як частина схеми перетворювача постійного струму з двоступінчастою паралельно-ємнісною комутацією (тиристори зображені пунктиром, а активно-індуктивне навантаження замінено джерелом струму J). Процеси у схемі показані на площині ЗС (рис.6). При вмиканні перетворювача конденсатор заряджається через діод D_2 та активно-індуктивне навантаження і дозаряджається до напруги V_c , яка перевищує E (точка 1). Процес закриття тиристора T_1 починається відкриттям T_2 , і конденсатор починає перезаряджатися в коливальному контурі зі втратами, завдяки чому траєкторія зображуючої точки уявляє собою еліпс зі стійким фокусом у початку координат. В точці 2 струм індуктивності переходить з тиристора T_2 на діод D_2 , а в точці 3 – з тиристора T_1 на діод D_1 , оскільки виконується умова відкриття останнього. Траєкторія продовжує еліпс до точки 4, де D_1 вимикається, а вмикається D_3 . Лінія перемикання DF розподіляє площину ЗС на дві області ρ і ξ . В свою чергу лінія перемикання розподіляється точкою H на дві ділянки: HD є ділянкою виходу із області ρ і не є ділянкою виходу для області ξ , і таким чином HD уявляє собою трансверсалі: після виходу траєкторії в точці 4 із області ρ вона підходить до області ξ , в якій точка віддаляється від трансверсалі. Тоді далі при відкритті діодах D_2 і D_3 проходить дозаряд конденсатору по траєкторії 4-1, яка уявляє собою ділянку еліпсу зі стійким фокусом в точці E . Так проходить процес у високочастотному комутуючому контурі. При збільшенні опору R втрати у контурі збільшуються, і траєкторія проходить через точки 1'-2'-3', перетинаючи лінію перемикання на ділянці JH . Ця ділянка не є трансверсаллю, а уявляє собою ділянку сковзання, на що вказують стрілки напрямів руху, що визначаються розрахунками похідних ЗС в кожній точці площини ЗС. Це обумовлює рух угору по ділянці JH при влученні на неї зображуючої точки. Якби розрахунок моменту перемикання виконувався абсолютно точним методом і зображуюча точка влучила точно на лінію перемикання, то встановився б стан, коли відкритий тільки діод D_2 , і зображуюча точка рухалась би по лінії перемикання JH з подальшим досягненням точки 1'. Однак, завдяки неодмінному запізненню у визначенні моментів перемикання діодів, пов'язаного із чисельним розрахунком і заходом у зони від'ємних струмів для відкритого діоду і позитивних напруг для закритого діоду, при влученні на лінію JH траєкторія досягає положення точки 4', звідки вона виноситься до положення точки 5', далі 6' і т. д. Відбувається зигзагоподібний рух точки, яка коливається навколо лінії сковзання тим частіше, чим меншим вибрано розрахунковий крок, внаслідок цього стає істотно повільнішою робота ІМ СНП. Сковзання припиняються лише коли зображуюча точка досягає початку трансверсалі H . Дослідження показали, що введення розв'язуючих резисторів призводить до розширення зони, що відповідає стану, коли відкритий тільки D_2 . Ширина цієї зони тим більша, чим менший ступінь

розв'язку. При влученні в неї зображуючої точки траєкторія проходить по цій зоні без сковзання. Однак, для влучення в цю відносно вузьку зону необхідно завдати більш суворих вимог до величин допусків на визначення моментів перемикаць. Щоб мати змогу припинити сковзання, рекомендовано проводити розрахунки із змінними ступенем розв'язку і допусками на точність визначення моментів перемикаць КЛЕ.

В процесі дослідження ІМ СНП виявлено також явище високої чутливості параметрів КУР ІМ СНП до незначних змін часових параметрів керування на прикладі схеми інвертора з додатковою ємністю і керованими комутаторами (рис. 7), яка застосовується для індукційного нагріву металу. ІМ показує, що замкнені траєкторії, які відповідають КУР і задовольняють критеріям усталеного режиму в межах зазначеної похибки, можуть бути породжені при різноманітних сполученнях початкових умов ЗС. Практично такі значення можна виявити розрахунками КУР при введенні незначної (долі відсотку) асиметрії в параметри керування ключами. Це обґрунтовує необхідність дотримання високої точності у відпрацюванні моделлю законів керування, особливо щодо симетрії керування.

Для розширення можливостей розроблених ІМ СНП і розрахунків з їх допомогою СНП із замкненими системами керування введено поняття узагальненого керованого комутатора, умови перемикання якого подаються довільними залежностями від значень джерел і ЗС в схемі СНП на початку та наприкінці даного розрахункового кроку. З цією метою після кожного розрахункового кроку здійснюються обчислення умов відпрацювання узагальнених керованих комутаторів, що програмно організується завдяки модулю, який підключається у випадку необхідності до основної програми. Таким чином можна моделювати керуючі впливи на перетворювачі із замкненими системами керування, в яких закони керування залежать від енергетичного стану силової схеми.

Апарат СГ виявився вельми ефективним при моделюванні СНП з коректуючими ланцюгами в складі систем керування. Показано, що виходячи із вигляду передаточної функції коректуючої ланки, можна скласти її дискретний СГ, що містить інтегратори, кількість яких визначається порядком коректуючої ланки. Використовуючи графи ланок, а також такі математичні та логічні операції, як множення, підсумовування, обмеження і порівняння, можна скласти повний дискретний граф системи керування. Таким чином можна подати схему СНП повним узагальненим дискретним СГ. На кожному кроці одночасно із розрахунками процесів у графі силової схеми повинні розраховуватися і процеси в графі системи керування, де за змінні стану повинні прийматися також величини сигналів інтеграторів.

У сьомій главі розглянуті питання реалізації розроблених методів, алгоритмів і програм для створення пакету СІМПАТ, що призначений для дослідження на персональних комп'ютерах електромагнітних процесів в перетворювачах електрое-

нергії з довільною топологією силової схеми та різноманітними способами керування тиристорами і керованими комутаторами. Для проведення сеансу моделювання достатньо задати топологію силової схеми і закони керування. При моделюванні автоматично визначається тип перехідного або періодичного режиму, здійснюються необхідні перемикання, формування і перетворювання СГ, знаходження коефіцієнтів систем диференціальних рівнянь, їх інтегрування, а також накопичування інформації про електромагнітні процеси в перетворювачі. Перші версії пакету були релізовані на алгоритмічних мовах АЛГОЛ для ЕОМ БЭСМ-6 і PL/I для EC-1061, останні версії реалізовано в системі Turbo-Pascal для IBM-сумісних комп'ютерів із застосуванням принципів структурного програмування. Всі процедури зосереджені в 9 модулях, викликаюча програма забезпечує взаємодію процедур відповідно з алгоритмом ІМ СНП. Робота користувача починає в діалоговому режимі за допомогою системи меню. В пункті меню "Схема" містяться команди вводу інформації про топологію схеми СНП, параметри елементів і закони керування КЛЕ, команди нормування параметрів, виводу інформації про схему на екран і запис її у дисковий файл, передбачено також можливість зчитування інформації про схему із попередньо створеного файлу. В меню "Файли" задаються імена файлів для виводу протоколів моделювання, в які записуються величини дискрет ЗС, а також струмів і напруг КЛЕ наприкінці інформаційного кроку та при зміні станів СНП. В меню "Вивід" задають режими виводу інформації на екран комп'ютера і у файли. В меню "Змінювання" за допомогою низки команд можна змінювати параметри схеми, викликаючи різноманітні збурення (зкидання та накидання навантаження, к.з. і х.х., комутації КЛЕ і т.п.), змінювати крок і метод інтегрування. Можна задати момент призупинення моделювання, крім того моделювання можна припинити, коли потрібно, натиснувши "гарячий" клавиш, і увійти в головне меню, а після роботи в меню можна продовжити моделювання. Можна відновити сеанс моделювання без перезавпуску програми. В меню "Квазі" реалізовано прискорені методи виходу моделі на КУР на основі макромоделювання, за допомогою розрахунків матриці Якобі і методу Бroyдена, а також реалізується отримання z-форм. Пункт меню "Фур'є" дає можливість після досягнення КУР провести гармонічний аналіз будь-якої ЗС. Пункт меню "Графіки" дозволяє, не припиняючи сеансу моделювання, побудувати на екрані дисплею графіки електричних величин в процесі, що досліджується. Тут можна призначити зручний масштаб подання графіків і необхідні сполучення величин для виводу їх графіків на один екран. Одержані часові діаграми можна роздрукувати принтером у вигляді твердих копій або здійснити запам'ятовування образу екрану у файлі для подальшої демонстрації їх без повторювання ІМ. Пункт меню "Пуск" служить для пуску моделювання, а пункт "Вихід" здійснює закриття сеансу моделювання. Алгоритми контролю станів КЛЕ реалізовані в окремому модулі, текст якого може бути сгенерований у діалоговому режимі, вводячи при

цьому описи умов перемикачів нових КЛЕ. Подальша перекомпіляція програми автоматично включає у розгляд нові КЛЕ. Аналогічним чином можна ввести процедуру реалізації будь-яких нестандартних розрахунків, що будуть забезпечуватися викликаннями її після кожного дозволеного кроку інтегрування. В цілому, СІМПАТ як програмний продукт відкритий для будь-яких доповнень. В мінімальному обсязі пакет займає до 160 кБ дискового простору пам'яті. Обмеження за розмірами схеми СНП можуть бути зняті змінними в програмі константи, які визначають максимальні кількості елементів в схемі, що призводить до збільшення обсягу програми. Є варіант пакету для моделювання з подвійною точністю, що в свою чергу збільшує обсяг пам'яті та у 1.5-1.7 рази зменшує швидкість моделювання.

Запропоновано методи тестування програмних комплексів для ІМ СНП з урахуванням основних аспектів їх функціонування, в тому числі необхідність відпрацювання перемикачів при спеціальних тестових керуючих сигналах, а також контроль точності метода інтегрування, що використовується. Запропоновані тестові вентильні схеми, що реалізують відомий кільцевий тест для тестування систем диференціальних рівнянь у сполученні із контролем станів багатовентильної схеми з чітко детермінованим типом режиму. Крім того запропоновано оригінальний спіральний тест, що на відміну від кільцевого тесту дає детерміноване зростання ЗС і реалізується за допомогою тиристорної схеми (рис.8). Для дослідження впливу кількостей елементів на характеристики роботи ІМ СНП запропоновані засоби збільшення розмірів схем шляхом еквівалентної заміни і наросування. В першому варіанті кожний елемент без зміни його параметру може бути замінений сукупністю декількох однотипних елементів, що дає змогу при ускладненні схеми зберегти еквівалентність електромагнітних процесів. У другому варіанті схема наросується сама на себе на один з її вузлів, завдяки чому подвоюється кількість всіх елементів і повністю зберігається еквівалентність електромагнітних процесів в обох підсхемах. Коефіцієнт наросування може бути при необхідності збільшений. Ці алгоритми легко реалізуються шляхом перетворень файлів, що описують початкові схеми.

У восьмій главі розглянуті приклади дослідження електромагнітних процесів у СНП на основі розроблених методів, алгоритмів і за допомогою створеного комплексу програм СІМПАТ. Моделювалося більш ніж 50 схем СНП різноманітного призначення, в тому числі за замовленнями промислових підприємств, а також запозичених з науково-технічної літератури. Головним завданням в науковому плані мети дисертації при цьому було апробувати комплекс, довести його здатність автоматично формувати і реалізовувати адекватні ІМ СНП і надавати досліднику необхідну інформацію про електромагнітні процеси в перетворювачах з високою точністю та з прийнятними витратами машинного часу. Із схем автономних інверторів моделювалися схеми однофазних автономних інверторів стру-

му, в яких розраховувалися процеси пуску, змінювання навантаження, аналізувалась комутаційна стійкість інвертора. Моделювалися також схеми інверторів для нагріву заготовок індукційним методом, особливістю процесів в яких є надзвичайно повільне згасання перехідних процесів, обумовлене складним характером схеми заміщення індуктору. Так, у схемі інвертора для нагріву з додатковою ємністю для Таллінського електротехнічного заводу перехідні процеси не скінчаються навіть після 200 періодів перехідного процесу пуску. Проблема знаходження КУР знайшла тут ефективне розв'язання за допомогою макромоделей, що дозволили на 2-3 порядки зменшити витрати машинного часу та підвищити точність дослідження навантажень на конденсаторне обладнання. Для трифазного інвертора струму досліджено пусковий процес і аварійний процес втрати керуючих імпульсів одним з тиристорів. В останньому випадку виявлено порушення типу квазіусталеного режиму, при якому спостерігаються шостикратне зростання струму вхідного дроселю у порівнянні з нормальним режимом, а також відповідне струмове перевантаження тиристорів. Завдяки накачці вхідного дроселю спостерігаються більш ніж двократне збільшення напруг на конденсаторах і трикратне збільшення амплітуд струмів у навантаженні, причому в цих струмах з'являються значні постійні складові. Досліджувалися також процеси у резонансних інверторах з подвоєнням частоти.

Складні комутаційні процеси спостерігалися при дослідженні тиристорних перетворювачів постійного струму з примусовою комутацією. Схеми з дво- і триступінчастою паралельно-ємнісною комутацією характеризуються нетривіальним типом перехідного режиму із складними перемиканнями тиристорів і діодів, які безпомилково відпрацьовувалися в процесі імітації. При зменшенні добротності комутуючого контуру і підвищенні ступеню розв'язку спостерігалось виникнення режимів, що сковзують. Моделювалися схеми перетворювачів постійного струму, що розглянуті в монографіях Руденка В.С., Глазенко Т.А., Долбні В.Т., Бірзнієкса Л.В., Гончарова Ю.П., Такеуті Т., завдяки чому доведено високий ступінь адекватності і надійності розроблених засобів імітації електромагнітних процесів в СНП.

На прикладах схем випрямлячів досліджено можливості програмного комплексу по визначенню КУР і гармонічному аналізу струмів і напруг цих перетворювачів. Використання схеми однофазного випрямляча з індуктивно-ємнісним фільтром (рис.9) з параметрами (за Ейпрілом), що обумовлюють слабе демпфування, дозволило апробувати всі розроблені методи знаходження параметрів КУР. Досягнена точність характеризується збігом 5-7 значущих цифр у значеннях ЗС на межах сусідніх періодів. На рис.10 показано відповідно процес пуску і прискореного виходу ІМ на КУР. Аналізувалися процеси у заряджувальних і компенсуючих випрямлячах, наведених у монографіях Чиженка І.М., Бердинських Г.С., Пентегова І.В. На прикладах трифазних керованих та некерованих випрямлячів при

ІМ спостерігалися досягнення режимів комутації низькими по 2, 3 і 4 вентилів, що супроводиться небажаним впливом на живлючу мережу кінцевої потужності. При цьому моделювання наочно висвітлює комутаційні провалини і викиди у вихідній напрузі джерел, які псуєть живлючу мережу і негативно впливають на решту споживачів. Схеми із взаємно-зв'язаними індуктивностями розглядалися на прикладах конверторів із секціонованими дроселями, трансформаторними схемами випрямлячів та інверторів, вентиляними схемами з симетруючими пристроями. Адекватне відображення процесів спостерігалось в схемах з трифазними трансформаторами, при формуванні ІМ яких були також перевірені процедури формування СГ СНП та визначення передач цього графу із урахуванням великої кількості магнітних зв'язків.

Моделювання перетворювачів постійного струму для вторинного живлення здійснювалося на основі узагальненого керованого комутатору. Були розглянуті базові схеми - підвищуючого, знижуючого і інвертуючого конверторів, а також схема перетворювача Кука, в якій досліджено вплив коефіцієнта зв'язку між обмотками секціонованого дроселю на динамічні властивості перетворювача. Як схема із замкнутою системою керування досліджувався перетворювач на повністю керованих тиристорах для живлення власних потреб трамваю (рис. 11,а), в якому використана ШІМ за допомогою трикутної еталонної напруги. В системі керування задіяно два контури автоматичного регулювання за струмом і напругою із введенням коректуючих пропорційно-інтегруючих ланок з обмеженням сигналів на їх виходах. Для коректуючих ланок виведені дискретні графі, що описують динамічні властивості і дозволяють здійснювати імітацію процесів як у силовій частині перетворювача, так і в системі керування одночасно на основі єдиного підходу і математичного апарату сигнальних графів. Дискретний СГ системи керування цим перетворювачем приведено на рис. 11,б. Відповідно до такого підходу напруги на виходах інтеграторів коректуючих ланок віднесено до додаткових змінних стану, а контроль їх поведінки здійснюється на кожному кроці інтегрування щодо сигналів на виходах обмежувачів і компараторів. Модель перетворювача реалізована у вигляді часткової моделі на основі використання розроблених процедур в ролі інтегрованого програмного середовища. Досліджувалися різноманітні динамічні процеси, що супроводять роботу перетворювача при вмиканні, коливаннях навантаження, стрибках живлючої напруги, при регулюванні напруги шляхом зміни співвідношення між тривалостями імпульсу та паузи. Експерименти довели, що модель адекватно відтворює зміни струмів і напруг як у силовій частині, так і в системі керування. Проведені дослідження були використані для перевірки концепції керування, дослідження стабілізуючих властивостей перетворювача, врахування впливу параметрів силової схеми та її топології на показники якості вихідної напруги. За даними машинних експериментів було здійснено налаштування системи керування, в тому числі і параметрів корек-

туючих ланок в ланцюгах зворотнього зв'язку системи керування, аби забезпечити стійку роботу і відсутність субгармонічних коливань. Особливу увагу викликали електромагнітні процеси при короткочасних відключеннях живлення завдяки відриву пантографу від контактного проводу, які часто виникають під час експлуатації. На рис. 12 і 13 наведено часові діаграми у силовій схемі і системі керування відповідно при перериванні живлення протягом 10 періодів із подальшим його відновленням. Як свідчать результати моделювання, при відриві пантографу стрімко відтинається струм у вхідному дроселі, і далі напруга на виході повільно спадає, підтримуючись лише за рахунок енергії фільтрового конденсатору. Напруга на виході інтегратору ланки регулювання за напругою досягає насичення і утримує позитивних значень навіть після відновлення живлення протягом 5 періодів. Відновлення живлючої напруги супроводиться шпарким зростанням струму вхідного дроселю, що має форму синусного імпульсу, амплітуда якого в 5.9 разів перевищує номінальне значення, а далі із входом системи керування до режиму широтно-імпульсного регулювання, струм дроселю повільно усталюється в процесі згасання коливань. Стабілізуюча дія системи керування призводить до швидкого усталення вихідної напруги протягом 8-10 періодів таким чином, що далі перевищення вихідної напруги не перевершує 10-12% від номінального значення напруги.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена теоретичному обґрунтуванню і розробці методів і алгоритмів дослідження складних електромагнітних процесів в силових напівпровідникових вентильних перетворювачах електроенергії на основі використання математичного апарату сигнальних графів та їх реалізації на сучасних професійних персональних комп'ютерах. Отримані в дисертації методи, алгоритми і комп'ютерні програми забезпечують розв'язання науково-технічної проблеми, що полягає в поглибленні досліджень процесів в схемах перетворювачів, і дозволяє знизити трудоемність досліджень, прискорити їх розрахунки, завдяки чому знайти більш раціональні проектні рішення та підвищити техніко-економічні показники перетворювачів і скоротити терміни проектування та впровадження перетворювачів. Основні результати можна сформулювати у такому вигляді.

1. Обґрунтовано застосування сигнальних графів для опису перетворювачів електроенергії в динамічних режимах, запропоновані методи, алгоритми та комп'ютерні програми для автоматичного формування рівнянь, що відзеркалюють вентильний перетворювач в сигнально-графовому вигляді.

2. Розроблені і теоретично обґрунтовані перетворення узагальненого сигнального графу перетворювача електроенергії для отримання графів окремих станів без переформування узагальненого сигнального графу.

3. Запропоновані і обґрунтовані сигнальні графи перетворювачів електроенергії

при наявності в них магнітно-зв'язаних індуктивностей, а також перетворення сигнальних графів станів при виникненні некоректних топологічних ситуацій в еквівалентних схемах заміщення перетворювача.

4. Розроблено структурну схему алгоритма для імітаційного моделювання вентильних перетворювачів електроенергії довільної топологічної структури, яка надійно забезпечує на основі процедур контролю станів кусково-лінійних елементів автоматичне визначення типу перехідного режиму.

5. Розроблено комплекс програмних засобів для реалізації запропонованих методів і алгоритмів, в тому числі для формування сигнальних графів перетворювачів і їх перетворень та визначення необхідних характеристик динамічного процесу, що відповідає стану кусково-лінійних елементів.

6. Запропоновані методи чисельного розв'язання рівнянь динаміки перетворювачів електроенергії за допомогою сигнальних графів на основі часових сигнальних графів, методів Рунге-Кутта, матричної експоненти і розкладання Паде, що дає можливість забезпечити зазначену точність і стійкість функціонування імітаційних моделей перетворювачів електроенергії.

7. Розроблені ефективні методи визначення параметрів квазіусталених режимів перетворювачів електроенергії за допомогою макромодельовання методами одного та кількох періодів, а також методів Ньютона-Рафсона і Бroyдена; встановлено зв'язок між матрицею Якобі та параметрами макромоделі перетворювача при розрахунках квазіусталених режимів, що дозволяє досягнути високої точності визначення параметрів квазіусталеного режиму перетворювача при істотній економії машинного часу і програмних засобів.

8. Виявлена можливість і досліджені механізми виникнення в імітаційних моделях вентильних перетворювачів режимів, що сковзають. Досліджено вплив на характер сковзань основних параметрів моделі перетворювача, в тому числі показників ступеню розв'язку і допусків за електричними величинами і часом на визначення моментів перемикаць кусково-лінійних елементів.

9. Показано, що при певних параметрах імітаційних моделей перетворювачів електроенергії в них може проявлятися якість підвищеної чутливості параметрів квазіусталених режимів навіть до незначної зміни параметрів керування, що призводить до неоднозначності при чисельній ідентифікації квазіусталених режимів і свідчить про необхідність підвищення вимог до часової точності керування при комп'ютерному моделюванні перетворювачів електроенергії.

10. Розроблені методи для тестування імітаційних моделей перетворювачів і запропоновані тестові схеми, які забезпечують контроль роботи моделей перетворювачів щодо головних моментів, які складають методологічну основу їх побудови і функціонування.

11. Розроблено методіку імітаційного моделювання перетворювачів електроенергії із замкненими системами керування за допомогою узагальненого керовано-

го комутатора і сигнально-графового уявлення системи керування, в тому числі при наявності в ній коректуючих ланок.

12. Розроблені методи, алгоритми і програми апробовані при дослідженнях електромагнітних процесів в ряді схем перетворювачів різноманітного функціонального призначення при розгляді як нормальних, так і аномальних режимів. Результати застосування пакету програм СІМПАТ для імітаційного моделювання перетворювачів електроенергії засвідчили високі надійність, швидкодію і точність розроблених на основі сигнальних графів засобів комп'ютерного дослідження електромагнітних процесів в перетворювачах електроенергії, а також про його здатність одержувати інформацію про роботу перетворювачів, що не може бути отримана іншими засобами і методами. Результати виконаних в дисертаційній роботі теоретичних досліджень і практичних розробок знайшли застосування в ряді дослідних організацій, промислових підприємств, а також в учбових закладах України (НДІ ВО ХЕМЗ, ХТТУ, УПА, ХДАМГ, ХТУРЕ та інших).

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ягуп В.Г. Автоматизированный расчет тиристорных схем.- Харьков: Выща школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1986.- 160 с.
2. Ягуп В.Г. Расчет тиристорных преобразователей с применением сигнальных графов и вычислительных машин / Уч. пособие по плану Госкомиздата УССР.- Харьков: ХПИ, 1981.- 96 с.
3. Долбня В.Т., Чикотило И.И., Ягуп В.Г. Электронные цепи непрерывного и импульсного действия/ Уч. пособие с грифом Минвуза УССР.- Киев: Выща школа, 1979.- 335 с.
4. Ягуп В.Г. Алгоритм поиска контуров первого порядка в направленном графе/ Киев:Республик.фонд алгоритмов и программ.-Киев: ИК АН УССР.- Рег.№ 5567.
5. Ягуп В.Г., Лазарев Н.И. Программа вычисления коэффициентов ряда Фурье токов и напряжений тиристорных преобразователей/ Киев, Республик. фонд алгоритмов и программ.- Киев: ИК АН УССР.- Рег. № П007848 от 28.08.84.
6. Ягуп В.Г., Лазарев Н.И. Программа определения аналитических выражений тиристорных преобразователей в переходных режимах/ Киев, Республик. фонд алгоритмов и программ.- Киев: ИК АН УССР.- Рег. № П007849 от 28.08.84.
7. Долбня В.Т., Ягуп В.Г. Применение направленных графов при анализе переходных процессов в вентильных цепях.- В кн.: Повышение эффективности устройств преобразовательной техники.- Ч.3.- Киев: Наукова думка, 1972.- С. 65-74.
8. Долбня В.Т., Ягуп В.Г. Направленные графы вентильных схем и их преобразования для получения графов состояний.- В кн.: Электрооборудование и электрические машины.- Вып.1.- Харьков, 1973.- С. 114-117.
9. Долбня В.Т., Ягуп В.Г. К расчету переходных процессов в электрических цепях

с помощью направленных графов. - В кн.: Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок. - Вып.2. - Харьков, 1973. - С. 18-22.

10. Долбня В.Т., Ягуп В.Г., Ким Р. О приближенном нахождении значений временной функции, заданной операторным графом. - В кн.: Электротехника и электроника. - Вып.1. - Харьков, 1973. - С. 91-95.

11. Ягуп В.Г., Комиссарова Т.М., Арбитман Р.Н., Долбня Т.В. Расчет переходных процессов в параллельном инверторе с помощью направленных графов. - В кн.: Электротехника и электроника. - Вып. 2. - Харьков, 1974. - С. 54-58.

12. Долбня В.Т., Ягуп В.Г. Определение начального состояния вентильной схемы с помощью направленных графов. - В кн.: Электромашиностроение и автоматизация промышленных установок. - Вып.1. - Харьков, 1975. - С. 74-78.

13. Долбня В.Т., Ягуп В.Г. Применение направленных графов при анализе цепей, содержащих вентили. - В кн.: Преобразование параметров электрической энергии. - Киев: Наукова думка, 1975. - С.5-15.

14. Долбня В.Т., Ягуп В.Г. Электромагнитные процессы в схеме тиристорного прерывателя с параллельно-емкостной коммутацией. - В кн.: Современные задачи преобразовательной техники. - Ч.6. - Киев: Наукова думка, 1975. - С. 67-73.

15. Долбня В.Т., Ягуп В.Г. Об автоматизации расчетов на ЦВМ электромагнитных процессов в вентильных цепях на базе направленных графов. В кн.: Разработка и применение высокоэффективных устройств преобразовательной техники. - Киев: Наукова думка, 1976. - С. 119-121.

16. Долбня В.Т., Лазарев Н.И., Ягуп В.Г. О расчете на ЦВМ электромагнитных процессов в вентильных цепях, содержащих нелинейные индуктивности. В кн.: Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий. - Вып.2. - Харьков: 1977. - С.58-60.

17. Ягуп В.Г., Мотыль А.П. Машинный расчет электромагнитных процессов в инверторе, нагруженном на индуктор. В кн.: Методы и средства преобразования параметров электрической энергии. - Киев: Наукова думка, 1977. - С.101-103.

18. Ягуп В.Г., Лазарев Н.И. Представление управляющих сигналов при расчетах вентильных цепей на ЭЦВМ. - В кн.: Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий. - Вып.4. - Харьков, 1978. - С.71-73.

19. Ягуп В.Г. Особенности математического и программного обеспечения цифрового моделирования вентильных преобразователей с применением сигнальных графов. - В кн.: Математическое и программное обеспечение цифрового моделирования вентильных преобразователей. - ИЭД АН УССР. - Киев: 1978. - С.40-43.

20. Долбня В.Т., Ягуп В.Г. О составлении направленного графа вентильной схемы в рациональной форме. - В кн.: Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева металлов. - Уфа: 1978. - С. 36-38.

21. Ягуп В.Г. Машинный расчет переходных макропроцессов в тиристорных пре-

образователях.- В кн.: Проблемы преобразовательной техники.- Ч.4.- Киев: 1979.- С. 202-204.

22. Долбня В.Т. Ягуп В.Г. Реализация алгоритма поиска контуров в направленном графе вентильной схемы.- В кн.: Оптимизация полупроводниковых преобразовательных устройств.- Киев: Наукова думка, 1979.- С. 57-59.

23. Ягуп В.Г. Об ускорении машинного расчета переходного и квазиустановившихся процессов в преобразовательных схемах.- В кн.: Проблемы оптимизации полупроводниковых систем преобразования.- Вып.1.- Харьков, 1980.- С. 25-27.

24. Ягуп В.Г. Описание вентильных цепей при машинном анализе процессов в них.- В кн.: Современные проблемы преобразовательной техники.- Киев: Наукова думка.- С. 53-55.

25. Ягуп В.Г. Особенности анализа вентильных схем с вырождениями.- В кн.: Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий.- Вып.6.- Харьков, 1981.- С.62-64.

26. Ягуп В.Г. Способы сокращения затрат машинного времени при моделировании тиристорных преобразователей.- В кн.: Преобразовательная техника.- Вып.6.- Харьков, 1981.- С. 24-27.

27. Ягуп В.Г. О нормировании величин и параметров при имитационном моделировании преобразовательных схем.- В кн.: Преобразовательная техника.- Вып.6.- Харьков, 1981.- С. 70-72.

28. Ягуп В.Г. Определение расчетного шага при машинных расчетах преобразовательных систем.- В кн.: Методы и средства повышения эффективности устройств преобразовательной техники.- Киев: Наукова думка, 1981.- С. 9-11.

29. Ягуп В.Г. Сигнальные графы магнитно-связанных индуктивностей.- В кн.: Преобразовательная техника.- Вып.7.- Харьков, 1982.- С. 19-21.

30. Ягуп В.Г. Автоматизация построения макромоделей тиристорных преобразователей.- В кн.: Моделирование и оптимизация проектных решений в САПР.- Таллин, 1983.- С. 168-170.

31. Ягуп В.Г. Построение и использование макромоделей тиристорных преобразователей// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1983, N 4.- С. 78-83.

32. Ягуп В.Г. Некоторые методы повышения экономичности имитационных моделей тиристорных преобразователей.- В кн.: Процессы в устройствах преобразования параметров электрической энергии.- Киев: Наукова думка, 1983.- С. 122-124.

33. Ягуп В.Г. Сигнально-графовые методы формирования уравнений динамики тиристорных преобразователей.- В кн.: Проблемы преобразовательной техники.- Киев: Наукова думка, 1983.- Ч.3.- С. 47-48.

34. Ягуп В.Г. Лазарев Н.И. Машинный расчет процессов в тиристорных преобразователях с использованием обращения преобразования Лапласа.- В кн.: Проблемы преобразовательной техники.- Киев: Наукова думка, 1983.- Ч.7.- С. 3-6.

35. Ягуп В.Г. Формирование уравнений состояний преобразовательных схем с

помощью сигнальных графов.- В кн.: Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий.- Вып.8.-1983.- С. 57-59.

36. Ягуп В.Г. Повышение точности и экономичности машинных расчетов периодических режимов вентиляных схем// Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника.- Вып. 6 (164).- Москва, 1984.- С. 13-14.

37. Ягуп В.Г. О существовании нескольких периодических режимов в схеме преобразователя электрической энергии.- В кн.: Проблемы нелинейной электротехники.- Киев: Наукова думка, 1984.- С. 72-73.

38. Ягуп В.Г. Получение макромоделей тиристорного преобразователя методом одного периода.- В кн.: Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий.- Вып. 9.- Харьков, 1984.- С. 45-47.

39. Ягуп В.Г. Получение уравнений состояния электрических цепей с использованием сигнальных графов// Изв. вузов СССР. Энергетика.- 1985, №7.- С. 45-48.

40. Ягуп В.Г., Лазарев, Н.И.Шилина Л.В. Расчет с повышенной точностью на цифровой ЭВМ процессов в параллельном инверторе тока.- В кн.: Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий.- Вып. 10.- Харьков, 1985.- С. 40-43.

41. Ягуп В.Г., Лазарев Н.И., Шилина Л.В. Определение передачи сигнального графа вентиляной схемы методом эквивалентных преобразований.- В кн.: Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий.- Вып. 11.- Харьков, 1986.- С. 40-42.

42. Ягуп В.Г., Лазарев Н.И. Машинный анализ процессов в тиристорных компенсаторах реактивной мощности.- В кн.: Проблемы электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей.- Таллин, 1986.- С. 149-150.

43. Ягуп В.Г., Лазарев Н.И. Анализ на ЭВМ процессов генерирования высокочастотных помех в стабилизированном преобразователе постоянного напряжения.- В кн.: Проблемы электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей.- Таллин, 1986.- С. 32-33.

44. Ягуп В.Г., Заводчиков В.В. Сигнальный граф макромоделей тиристорного преобразователя.- В кн.: Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий.- Вып. 12.- Харьков, 1987.- С.36-38.

45. Ягуп В.Г., Архипенко Е.П. Оптимизация пускового режима инвертора на ЭВМ.- Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий.- Вып. 13.- Харьков, 1988.- С. 42-44.

46. Ягуп В.Г. Комбинированные алгоритмы расчета на ЭВМ периодических режимов тиристорных преобразователей.- В кн.: Проблемы преобразовательной техники.- Ч.5.- Киев, 1987.- С. 258-259.

47. Ягуп В.Г. Полирежимность электрических цепей с управляемыми коммутаторами // Электричество.- 1986, № 6.- С. 66-67.

48. Ягуп В.Г. Использование макромоделирования для расчета тепловых режи-

мов полупроводниковых вентиляей.- В кн.: Проблемы преобразовательной техники.- Ч.3.- Киев, 1991.- С. 207-208.

49. Ягуп В.Г. Моделирование тиристорных преобразователей на основе обобщенного управляемого коммутатора.- В кн.: Проблемы преобразовательной техники.- Ч.3.- Киев, 1991.- С. 209-210.

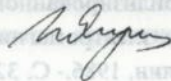
50. Ягуп В.Г. Эффективный алгоритм определения передач сигнального графа преобразовательной схемы // Изв. вузов СССР. Энергетика.- 1992, № 2.- С. 48-53.

51. Ягуп В.Г. Сигнальные графы разложения Паде // Электричество.- 1994, №5.- С. 60-62.

52. Ягуп В.Г. Оптимизация пусковых процессов полупроводниковых преобразователей электроэнергии с помощью имитационной модели.- В кн.: Контроль и управление в технических системах.- Винница, 1995.- С. 344-346.

Конкретний особистий внесок дисертанта у розробку наукових результатів, що виносяться на захист. Основні наукові положення, викладені у дисертації, розроблені особисто автором і опубліковані в монографії [1] дисертанта. В сумісних публікаціях: в роботі [3] до теми дисертації належить написаний автором розділ 12, в якому розглянуто аналіз діодних обмежувачів; в роботах [7, 8, 9, 13, 20] автором запропоновано складання сигнальних графів вентильних схем та їх перетворення; в [10, 11, 12, 14, 17] автором складені граfi перетворювачів і запропонована форма часових графів; в [18] автором запропоновано застосування розривних функцій для зображення керуючих сигналів; в [5, 6, 15, 16, 22, 34, 40, 41, 42, 43] автором розроблені структури основних алгоритмів; в [44] автором складені каскадні граfi та запропоновані їх перетворення; в [45] автором запропоновано для синтезу оптимальних пускових траєкторій використати обчислення із від'ємним часовим кроком.

Автор:



В. Г. Ягуп

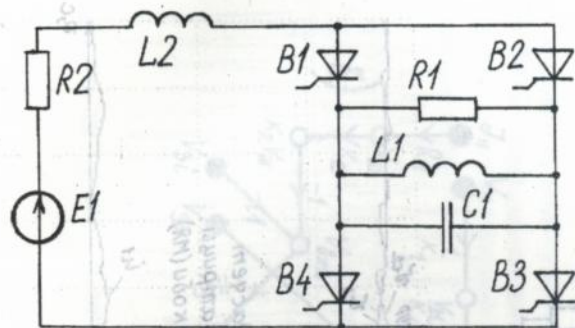


Рис. 1

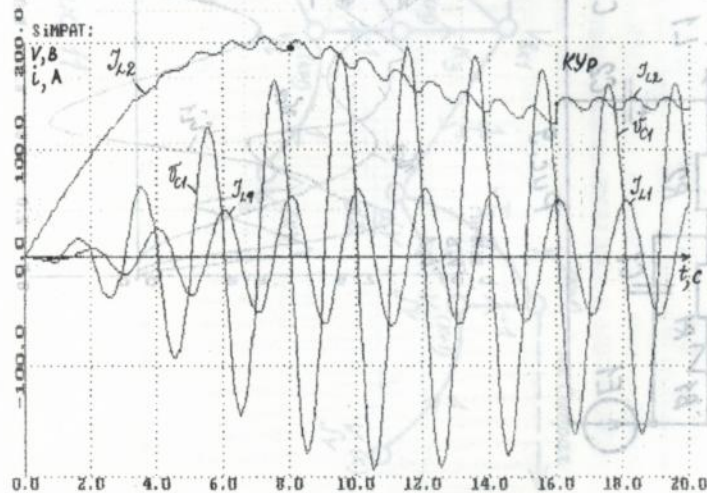


Рис. 2

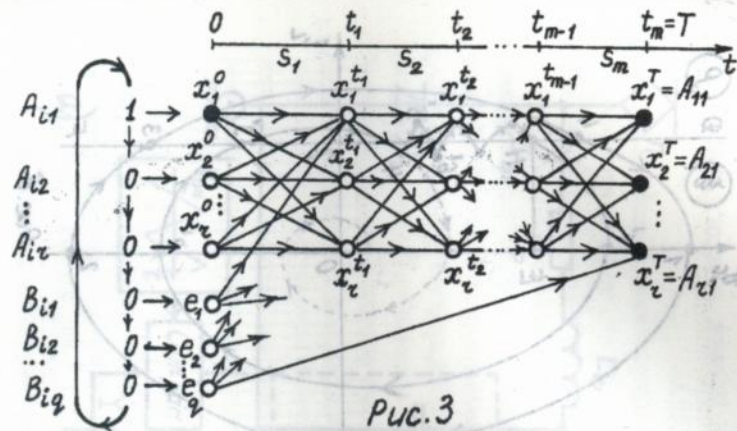


Рис. 3

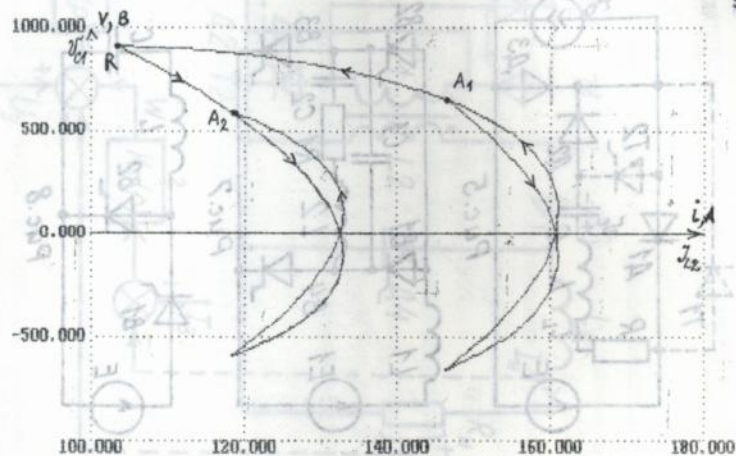
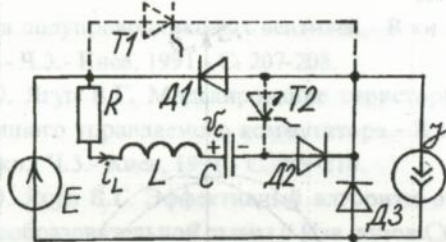
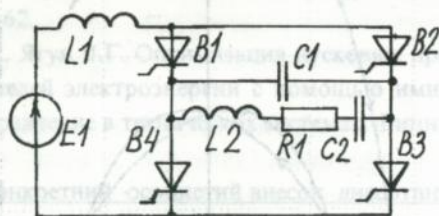


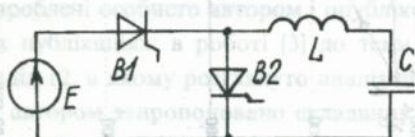
Рис. 4



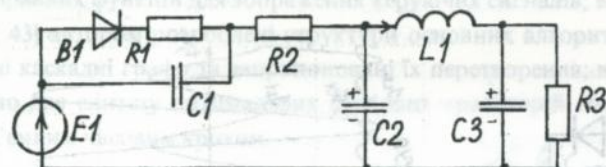
Puc.5



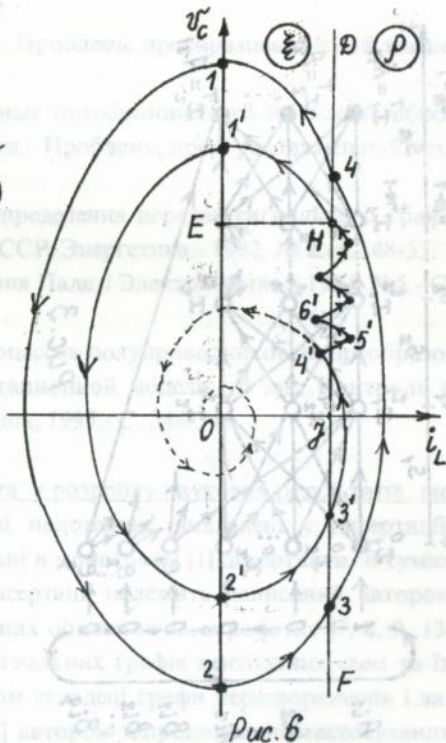
Puc.7



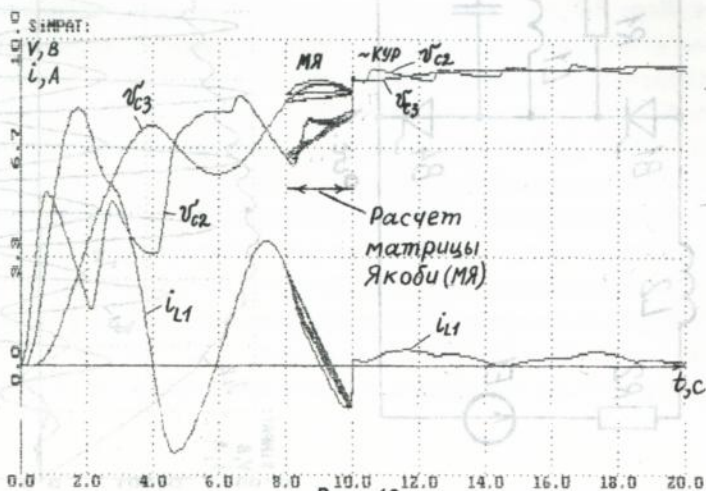
Puc.8



Puc.9



Puc.6



Puc.10

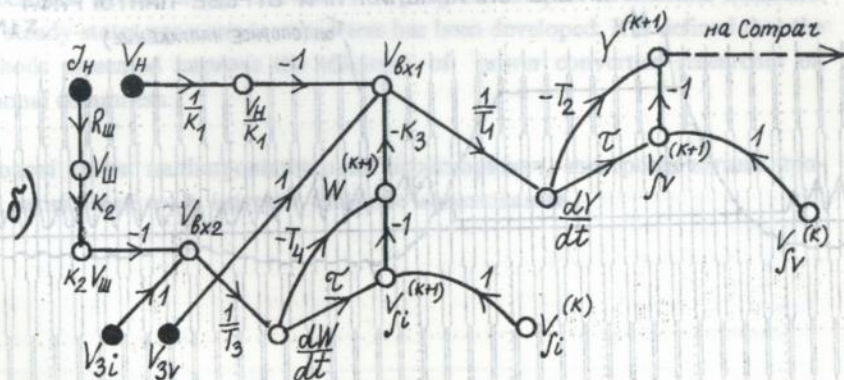


Рис. 11

ПРОЦЕССЫ В СИЛОВОЙ СХЕМЕ ПРИ ОТРЫВЕ ПАНТОГРАФА

SIMPAT

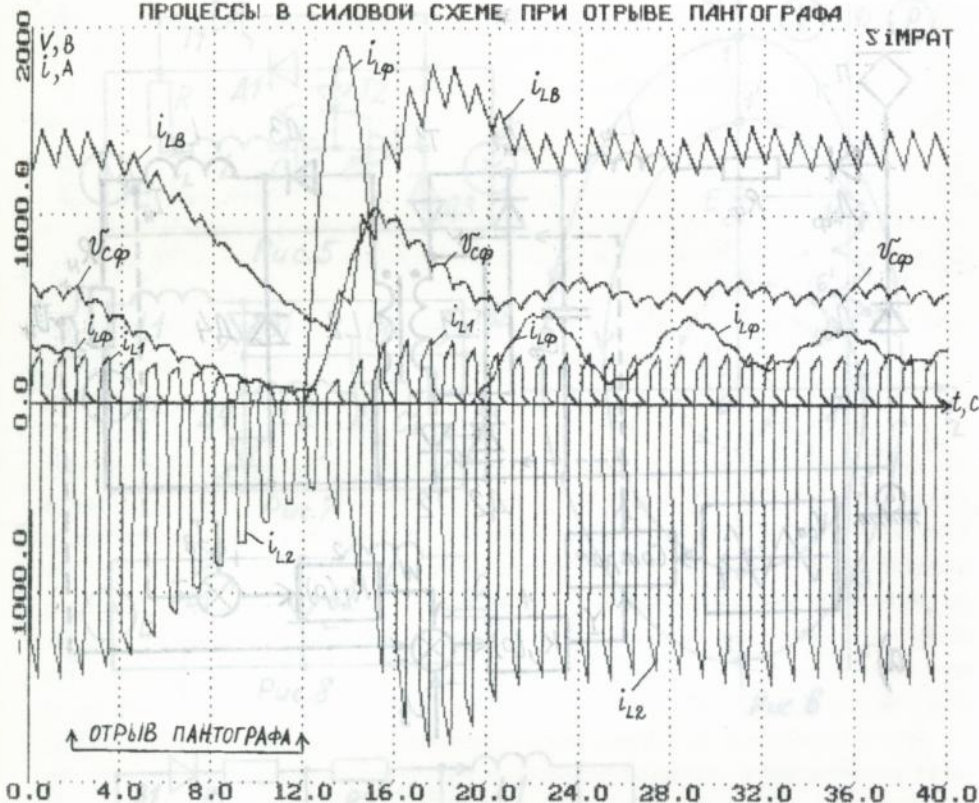


Рис. 12

ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ОТРЫВЕ ПАНТОГРАФА

SIMPAT



Рис. 13

АННОТАЦИЯ

Ягуп В.Г. Исследование электромагнитных процессов в преобразователях электроэнергии на основе сигнальных графов (теория, методы, алгоритмы и их компьютерная реализация).

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 - Полупроводниковые преобразователи электроэнергии, Институт электродинамики НАН Украины, Киев, 1997.

Защищается 52 научные работы, которые содержат результаты теоретических исследований и развития теории сигнальных графов для анализа электромагнитных процессов в преобразователях электрической энергии. Разработан программный комплекс для моделирования переходных и квазиустановившихся электромагнитных процессов в преобразователях. Предложенные методы повышают эффективность исследований силовых преобразователей электроэнергии с помощью персональных компьютеров.

SUMMARY

Yagup W.G. Research of electromagnetic processes in the electric energy converters in terms of signal-flow graphs (theory, methods, algorithms and their computer implementation).

The dissertation (manuscript) for the doctor's degree of technical sciences competition. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Electrodynamics, Kiev, 1997.

52 scientific works are being defended, which contain the results of theoretical research and signal-flow graphs development to analyse the electromagnetic processes in electric energy converters. A program complex to simulate transients and steady-states processes in converters has been developed. It is defined that the methods presented improve the efficiency of power converters researches on personal computers.

Ключові слова: напівпровідниковий перетворювач, електромагнітний процес, сигнальний граф, імітація, цифрове моделювання.

SUMMARY

Yagup W.G. Research of electromagetic processes in the electric energy converter in terms of signal-flow graphs (theory, algorithm and their computer implementation).
The dissertation (manuscript) for the doctor's degree of technical sciences composition. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Electrodynamics, Kiev, 1997.
32 scientific works are being defended, which contain the results of theoretical research and signal-flow graphs development to analyse the electromagetic processes in electric energy converter. A program complex to simulate transient and steady-state processes in converter has been developed. It is defined that the methods presented improve the efficiency of power converter research on personal computers.

Підп. до друку 21.02.97 г.

Формат А5.

Папір офсетний 75 г/м²

Ум.-друк. арк. 2,0

Тираж 120 прим.

Замовлення № 1396

ООО "Курсор", м. Харків, пр. Театральный 11/13, тел. (0572) 47-71-74

434947

AB 37.093

AB 37.093