

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ПЕТКОВ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.319.53 : 621.3.011.7

СИНТЕЗ РОЗРЯДНИХ КІЛ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ
ФОРМУВАННЯ ВЕЛИКИХ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ З НОРМОВАНИМИ
ПАРАМЕТРАМИ

Спеціальність 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті "Молнія" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Харків

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Кравченко Володимир Іванович,
Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут "Молнія" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут", директор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Щерба Анатолій Андрійович,
Інститут електродинаміки НАН України (м. Київ),
завідувач відділу електроживлення технологічних систем

доктор технічних наук, професор
Вовченко Олександр Іванович,
Інститут імпульсних процесів і технологій
Національної академії наук України (м. Миколаїв),
директор

доктор технічних наук, доцент
Золотарьов Володимир Михайлович,
ПАТ "Завод "Південкабель" (м. Харків), директор

Захист відбудеться "28" березня 2013 р. о 12 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "18" лютого 2013 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.Ю. Юр'єва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Постійне розширення сфери застосування ємнісних накопичувачів енергії та діапазону амплітудно-часових характеристик імпульсів, які генеруються ними, визначає зростаючий інтерес до питань оптимального проектування високовольтних імпульсних пристроїв й, зокрема, синтезу їхніх розрядних кіл, який, у загальному випадку, полягає в забезпеченні формування імпульсів з необхідними амплітудно-часовими характеристиками.

Питання синтезу розрядних кіл є основними при розробці й створенні високовольтних імпульсних пристроїв, що відображено в першу чергу в національних та міжнародних нормативних документах, які регламентують вимоги стійкості технічних засобів до імпульсних електромагнітних впливів.

Значні результати в дослідженні ємнісних накопичувачів енергії та створених на їх базі високовольтних імпульсних пристроїв отримали В.С. Комельков, А. Vondenbuch, Б.Е. Фрідман, М.І. Баранов, В.М. Михайлов; в розробці елементів ємнісних накопичувачів енергії – Г.С. Кучинский, В.В. Рудаков; в дослідженні технологічного застосування ємнісних накопичувачів енергії – О.І. Вовченко, К.В. Дубовенко, В.І. Кравченко, А.А. Щерба та ін. Виконані ними дослідження показали, що для подальшого розширення застосування ємнісних накопичувачів енергії необхідне вирішення науково-прикладної проблеми розвитку теорії синтезу їх розрядних кіл.

Розширення галузей і обсягу використання високовольтних імпульсних випробувальних пристроїв, які споруджуються на базі ємнісних накопичувачів енергії, рухається по шляху постійного зростання вимог до амплітудно-часових значень характеристик формованих імпульсних впливів, і стабільності їхнього багаторазового відтворення. Виконання зазначених вимог викликає перспективність розробки ряду завдань пов'язаних з наявністю в розрядних колах нелінійних елементів, розробкою схем формування, з урахуванням критеріїв надійності.

Наявність протиріччя між значним об'ємом теоретичних даних з синтезу електричних кіл в цілому та обмеженістю теоретичних даних з синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії для формування великих імпульсних струмів з нормованими параметрами, а також унікальністю випробувальних установок та необхідністю проведення достатнього обсягу експериментальних досліджень визначає перспективність розвитку методів синтезу розрядних кіл та охоплення ними множини схемних рішень високовольтних імпульсних пристроїв.

Комплексне розв'язання питань синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії представляє собою актуальну науково-прикладну проблему, яка визначила напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася в рамках наукових досліджень, проведених у науково-дослідному і проектно-конструкторському інституті (НДПКІ) "Молнія" НТУ "ХП". Здобувач як відповідальний виконавець брав участь у виконанні держбюджетних НДР МОНмолодьспорт України: "Розробка концепції моніторингу електромагнітної обстановки на електроенергооб'єктах України для забезпечення їх електромагнітної сумісності і стійкості" (ДР № 0104U000444, 2004 – 2006 рр.); "Розробка розрахунко-

во-експериментальних методів дослідження електромагнітних завад на електроенергооб'єктах України при імітації грозових впливів" (ДР № 0108U010892, 2009 – 2010 рр.); "Розробка експериментальних та теоретичних методів забезпечення блискавкозахисту об'єктів електроенергетики при змінених екологічних та технологічних факторах" (ДР № 0110U007358, 2011 – 2012 рр.) та господарсько-договірних тем: "Разработка, изготовление и ввод в эксплуатацию установки для проведения испытаний нелинейных металлооксидных резисторов импульсами грозового тока" (ТОВ НВП "ЕС Полімер", м. Артемівськ, 2005 – 2006 рр.); "Разработка и создание генератора импульсных токов" (ТОВ "Донгаолинтекс", м. Маріуполь, 2010 р.); "Розробка, виготовлення та введення в експлуатацію установки для проведення випробувань металоксидних варисторів нормованими імпульсами струму" (ТОВ "Промсервіс", м. Чернігів, 2011 – 2012 рр.) та при модернізації установок випробувальної бази НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ". При проведенні робіт з цих договорів безпосередньо здобувачем виконувалося обґрунтування схемних рішень та вибір елементів, встановлених у розрядних колах ємнісних накопичувачів енергії.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є подальший розвиток теорії синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії для формування великих імпульсних струмів з нормованими параметрами на основі розробки узагальнених підходів і математичних моделей, які враховують спосіб описання імпульсів струму й практичну спрямованість процедури синтезу високовольтних пристроїв формуючих випробувальні впливи із граничними характеристиками.

Для досягнення вищезазначеної мети поставлені задачі:

1. Виконати аналіз методів синтезу розрядних кіл високовольтних імпульсних пристроїв з урахуванням особливостей описання імпульсів, що формуються в них.
2. Сформувати комплекс принципів синтезу ємнісних накопичувачів енергії та формалізувати описання структури їх розрядних кіл та формованих ними імпульсів.
3. Розробити методи синтезу розрядних кіл універсальних високовольтних імпульсних пристроїв загального призначення та математичні моделі визначення параметрів елементів імпульсних пристроїв зі спеціальною структурою.
4. Провести експериментальні та теоретичні дослідження впливу нелінійних компонентів на параметри формованого імпульсу струму та розробити методи синтезу розрядних кіл, які містять у своєму складі в якості комутатора і навантаження нелінійні елементи.
5. Розвинути методи аналізу програмованого розряду ємнісних накопичувачів енергії та синтезу програми їхньої комутації при роботі на лінійне, параметричне й нелінійне навантаження.
6. Розробити метод синтезу розрядних кіл високовольтних імпульсних пристроїв при комбінованому способі завдання імпульсних впливів, характерних для грозової діяльності.

Об'єкт дослідження – перехідні процеси в розрядних колах високовольтних імпульсних пристроїв на базі ємнісних накопичувачів енергії.

Предмет дослідження – методи синтезу розрядних кіл високовольтних імпульсних пристроїв, призначених для формування з потрібною точністю імпульсів струму й напруги з заданими амплітудно-часовими параметрами.

Методи досліджень. При проведенні досліджень, результати яких узагальнюються в роботі, використовувалися методи: перехідні процеси в розрядних колах високовольтних імпульсних пристроїв досліджувалися методами теорії електричних кіл та теорії подібності; для синтезу розрядних кіл при аналітичному завданні імпульсного впливу й кіл зі змінною структурою використаний операторний методу розрахунку електричних кіл; для вирішення завдань апроксимації імпульсних впливів, оптимізації й синтезу випробувальних пристроїв з урахуванням критеріїв надійності застосовувалися методи нелінійного програмування, методи теорії надійності, методи теорії ймовірностей, методи статистичного моделювання й методи пошуку екстремумів функцій; при розробці моделей компонентів розрядного кола застосовувалися експериментальні методи техніки високих напруг. Порівняння результатів, отриманих з розрахункових моделей, з експериментальними результатами виконувалося методами статистичної обробки даних. Експерименти проводилися на обладнанні замовників (ТОВ НВП "ES Полімер", м. Артемівськ; ТОВ "Донгаолінтекс", м. Маріуполь; ТОВ "Промсервіс", м. Чернігів) в режимі пусконаладжувальних робіт та дослідної експлуатації високовольтних пристроїв.

Наукова новизна отриманих результатів. Основним науковим результатом є подальший розвиток теорії синтезу лінійних і нелінійних розрядних кіл одно- і багатоконтурних високовольтних імпульсних пристроїв при різних способах нормування форми імпульсів великих струмів і високих напруг, який полягає у:

1. Розробленні узагальненої наукової концепції синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії на основі використання методів ієрархічності, доцільності й описання форми розрядних імпульсів, а також розроблених та удосконалених в роботі методів синтезу і моделей визначення параметрів елементів розрядних кіл.

2. Вперше розробленому методі структурного синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії, в якому повна алгоритмізація процедури синтезу виконується за рахунок використання символічно формалізованого описання структури розрядних кіл та форми розрядних імпульсів струму (або напруги) у навантаженні.

3. Вперше запропонованому методі визначення параметрів розрядного кола при нечіткому завданні амплітудно-часових параметрів розрядного імпульсу та інтегралу дії струму або заряду, що забезпечує оцінку електродинамічної й електротермічної стійкості об'єктів при впливі на них розряду блискавки та уточнює режими можливих випробувань.

4. Подальшому розвитку методу огинаючої максимальних значень параметрів розрядних імпульсів для синтезу розрядних кіл, які використовують послідовне підключення декількох ємнісних накопичувачів енергії на одне навантаження для формування розрядних струмів із заданими крутизною наростання та струмів з квазіпостійною вершиною при випробуваннях систем захисту від перенапруг.

5. Подальшому розвитку методу безрозмірних аналогів для синтезу розрядних пристроїв, які формують імпульси струму з довільним набором нормованих амплітудно-часових параметрів для випробувальних та дослідницьких цілей.

6. Вперше розроблених математичних моделях визначення параметрів елементів у розрядних колах двох ємнісних накопичувачів енергії, включених на одне навантаження, при формуванні імпульсів розрядного струму спеціальних форм (з монотонними зростанням і спадом його значень, що є характерним для випробуваль-

них впливів) та синтезу пристроїв з одним і двома ємнісними накопичувачами енергії для формування параметрів імпульсу, які можуть бути визначені аналітично.

Практичне значення отриманих результатів для високовольтної імпульсної техніки:

- розроблені методики та отриманні співвідношення для проведення параметричного синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії дозволять розширити можливості процесу проектування випробувальних високовольтних імпульсних пристроїв за рахунок розширення діапазону амплітудно-часових характеристик формованих імпульсів струму й напруги, та підвищити ефективність діагностики стану елементів розрядних кіл шляхом урахування зміни параметрів експериментальних імпульсів струму в навантаженні;

- статистичне дослідження впливу елементів розрядного кола на формований імпульс забезпечить можливість прогнозування надійності функціонування високовольтних імпульсних пристроїв за рахунок визначення їх параметричної надійності та впровадження схем захисту;

- досліджені режими спільної роботи ємнісних накопичувачів енергії реалізують підвищення функціональних можливостей існуючих випробувальних комплексів шляхом розширення спектру формованих імпульсів та типів навантажень;

- сформований банк даних структур розрядних кіл високовольтних імпульсних пристроїв забезпечить оптимальність їх конструкції за рахунок розглядання багатоваріантності схемних рішень в процес проектування розрядних кіл.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на ТОВ НВП "ЕС Полімер" (м. Артемівськ), ТОВ "Донгаолинтекс" (м. Маріуполь), ТОВ "Промсервіс" (м. Чернігів), при модернізації випробувальних установок експериментальної бази НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ" та в навчальний процес НТУ "ХПІ" та ЗНТУ.

Особистий внесок здобувача в наукові і практичні положення, що виносяться на захист:

- отримані співвідношення для визначення параметрів розрядного кола ємнісних накопичувачів енергії в разі їх розрядження на активно-індуктивне і ємнісне навантаження при завданні імпульсу розрядного струму (напруги) експонентним поліномом довільного ступеня та довільним набором контрольованих амплітудно-часових параметрів при представленні математичної моделі спрацьовування комутатора східчастою й спадаючою експонентною функцією;

- визначені параметри розрядного кола генератора імпульсів струму споруджуваного на базі двох ємнісних накопичувачів енергії для розрахункових областей, у яких формується імпульс струму, з формами, характерними для випробувальних імпульсів;

- розроблені алгоритми апроксимації імпульсних впливів експонентним поліномом при різних вихідних даних з урахуванням можливості фізичної реалізації елементів розрядного кола та вибору параметрів розрядного кола високовольтних імпульсних пристроїв методом невизначених коефіцієнтів;

- формалізовані описання структур розрядних кіл високовольтних імпульсних пристроїв та виведені співвідношення для описання сформованих ними імпульсів струму і напруги;

– отримані співвідношення й розроблені алгоритми для визначення допусків елементів розрядного кола ємнісних накопичувачів енергії при різних варіантах вихідних даних та статистичних характеристик часу наростання імпульсу струму;

– отримані аналітичні співвідношення для розрахунків програмованої комутації подібних ємнісних накопичувачів енергії та розроблено алгоритм синтезу програми їх комутації; розроблено алгоритм вибору параметрів розрядного кола генератора імпульсів напруги методом базової схеми;

– отримані аналітичні співвідношення, які зв'язують амплітудно-часові параметри, інтеграл дії струму (заряду) та параметри аналітичного описання імпульсу струму, а також отримані співвідношення, що визначають межі зміни часових параметрів залежно від інтеграла дії струму (заряду) й максимального значення струму імпульсу;

– отримані масштабні коефіцієнти й співвідношення для визначення величини додаткових елементів при модифікації багатоконтурних випробувальних пристроїв.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися й обговорювалися на: Всеукраїнських науково-технічних конференціях "Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів" (м. Кременчук, 2005, 2007, 2009 рр.); Міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми сучасної електротехніки"(ПСЕ) (м. Київ, 2006, 2008, 2010 рр.); Міжнародних науково-технічних конференціях "Физические и компьютерные технологии" (м. Харків, 2006, 2009 рр.); International Conference on Grounding and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects (GROUND'2006 & 2nd LPE) (м. Масейо – Бразилія, 2006 р.); XIII Міжнародній науковій школі-семінарі "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах" (м. Миколаїв, 2007 р.); Міжнародних симпозиумах "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. (SIEMA)" (м. Харків, 2007, 2008, 2009 рр.); Міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків, 2008, 2009 рр.); Десятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности (ЭМС-2008) (м. Санкт-Петербург, 2008 р.); Міжнародному радіоелектронному форумі "Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку" (Міжнародна конференція "Електромагнітна сумісність") (м. Харків, 2008 р.); Міжнародної наукової конференції "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах" (м. Миколаїв, 2009 р.); Всеукраїнській науково-технічній конференції "Практичні аспекти сумісності електромагнітної та блискавкозахисту" (м. Харків, 2010 р.); науково-технічних нарадах НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ" (м. Харків, 2005 – 2012 рр.).

Публікації. Результати роботи відображені в 42 публікаціях, серед них 32 статей в фахових наукових виданнях України, 10 – у матеріалах науково-технічних конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 428 сторінок, з них 15 рисунків та 3 таблиці на 18 окремих сторінках, список використаних джерел з 240 найменувань на 32 сторінках, 9 додатків на 74 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, зазначено її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і задачі досліджень, показано наукову новизну і практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан проблеми синтезу розрядних кіл високовольтних імпульсних пристроїв (ВІП), що споруджуються з використанням ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ). Проведено аналіз математичних моделей визначення параметрів елементів і схемних рішень розрядного кола. Визначено особливості описання імпульсних електромагнітних впливів, які генеруються за допомогою ВІП.

Аналіз показав наявність ряду методів параметричного синтезу розрядних кіл ЄНЕ: методу безрозмірних аналогів при завданні імпульсного впливу набором амплітудно-часових параметрів (АЧП); методу оптимального синтезу, що використовує в якості математичної моделі розрядного кола системи диференційних рівнянь (СДР); методів, що використовують явні аналітичні залежності, які зв'язують характеристики імпульсного впливу з параметрами елементів схеми розрядного кола, і явні й неявні аналітичні залежності, які зв'язують параметри елементів розрядного кола з характеристиками імпульсного впливу; комбіновані й спеціальні методи синтезу. В основному наявні методи висвітлюють питання синтезу розрядних кіл заново споруджуваних ВІП.

Установлено, що основним істотним протиріччям в області параметричного синтезу розрядних кіл ЄНЕ є недостатність узагальненого підходу, який поєднував би всі складові параметричного синтезу в процесі практичного використання.

Виявлено ряд методів структурного синтезу розрядних кіл ЄНЕ: метод аналогів, метод експертної оцінки, а також загальних методів синтезу електричних кіл, заснованих на структурах множини кіл, використанні частотних та часових характеристик, комбінаторному підході. Однак на практиці здебільше використовуються методи, орієнтовані на визначення схемного рішення за допомогою спеціалістів-експертів в галузі високовольтної імпульсної техніки.

Установлено, що в області структурного синтезу розрядних кіл ЄНЕ використовуються в основному методи експертної оцінки, аналогів та рекомендацій нормативних документів при відсутності адаптації методів структурного синтезу електричних кіл для структурного синтезу розрядних кіл ЄНЕ.

На підставі аналізу сучасних методів синтезу й зроблених висновків сформульовані проблеми, які визначили перспективність подальшого розвитку теорії синтезу розрядних кіл ЄНЕ, що забезпечать процес проектування сучасними методами та спираються на практичну потребу:

- провести систематизацію принципів синтезу розрядних кіл ЄНЕ виходячи із практики розробки й створення випробувальних пристроїв;
- розвинути теоретичні основи й розробити, на базі формалізації структури випробувальних установок і описання імпульсних впливів, метод структурного синтезу розрядних кіл ЄНЕ та розвинути теоретичні основи методів параметричного синтезу розрядних кіл ЄНЕ, які враховують спосіб описання імпульсного впливу, допуску на елементи розрядного кола та надійність роботи ВІП в цілому;

- розробити й удосконалити методи синтезу розрядних кіл ВІП загального призначення, які забезпечують урахування способу описання імпульсного впливу та оптимальність проектних рішень розрядного кола;
- провести експериментальні дослідження нелінійних компонентів розрядного кола й розробити методи синтезу розрядних кіл, які містять нелінійні елементи;
- розробити метод синтезу розрядних кіл випробувальних пристроїв зі змінною структурою при роботі на лінійне, параметричне й нелінійне навантаження та метод синтезу розрядних кіл ЄНЕ при завданні імпульсного впливу комбінованим способом, характерним для імпульсних електромагнітних впливів грозової діяльності.

В другому розділі розвинено теоретичні основи та принципи синтезу розрядних кіл ЄНЕ.

Сформульовано комплекс основних принципів синтезу розрядних кіл ЄНЕ, який включає: принцип ієрархічності (рис.1); принцип урахування способу описання імпульсних впливів; принцип урахування практичної спрямованості (розробка нового або модифікація діючого ВІП); принцип оптимальності.

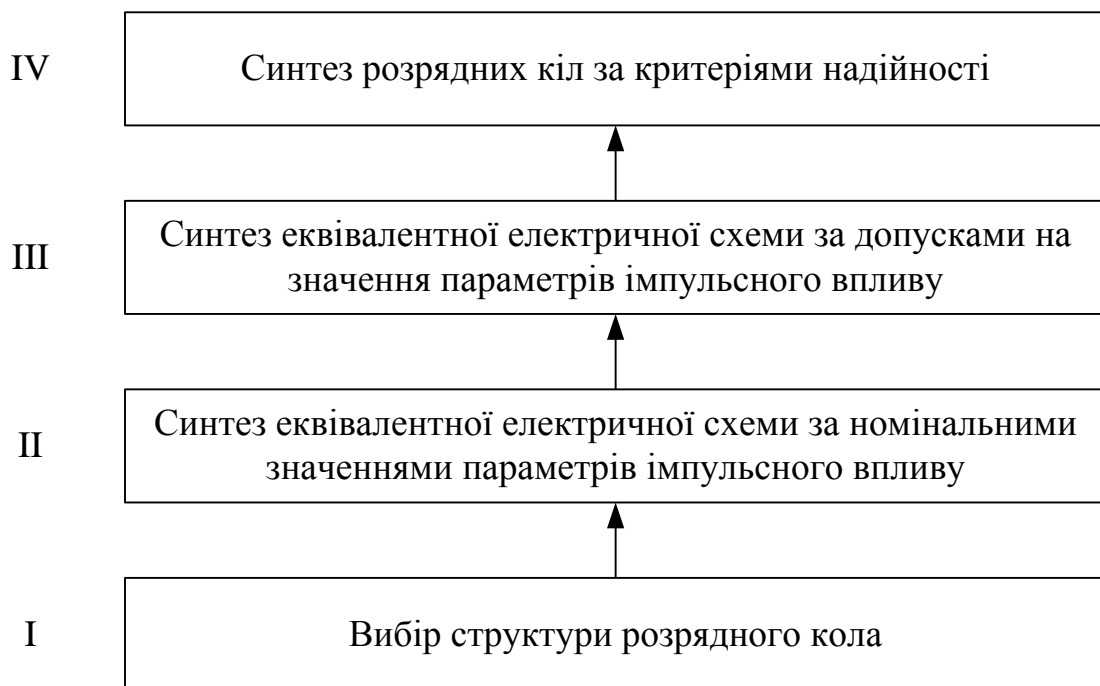


Рисунок 1 – Рівні ієрархічної структури синтезу розрядних кіл ЄНЕ

Запропоновано метод структурного синтезу розрядного кола ЄНЕ (рівень I), який базується на зіставленні $F \Rightarrow A$: символічної формалізації описання структури розрядного кола A з символічною формалізацією описання імпульсного впливу F , що уможливорює комп'ютерну обробку. У процесі формалізації описання проведена класифікація розрядних кіл ВІП й імпульсних впливів, заданих АЧП і аналітичним виразом, яка містить: кількість ЄНЕ, кількість контурів, властивості комутаторів, вид навантаження (для розрядних кіл); полярність, кількість екстремумів та переходів через нуль (для імпульсів, заданих АЧП); особливості операторного перетво-

рення (для імпульсів, заданих аналітичним виразом). Сформовано банки даних, що дозволяють проводити структурний синтез розрядного кола ЄНЕ при описанні імпульсних впливів як набором контрольованих АЧП, так і аналітичним виразом.

Виконано класифікацію методів параметричного синтезу еквівалентних електричних схем розрядних кіл ЄНЕ за номінальними значеннями параметрів імпульсу (рівень II). Виявлено три класи методів: методи, що використовують багатоваріантні розрахунки часових залежностей імпульсних впливів (вирішення прямої задачі); методи, що використовують явну залежність вихідних параметрів імпульсного впливу від параметрів елементів розрядного кола; методи, які використовують безпосереднє визначення параметрів елементів розрядного кола в залежності від параметрів імпульсного впливу.

На базі теорії подібності запропоновано метод синтезу паралельної роботи декількох ЄНЕ на загальне активно-індуктивне навантаження при завданні імпульсного впливу контрольованими АЧП (рис. 2). Вихідними даними для використання методу є наявність відомих варіантів співставлення параметрів схеми та АЧП формованого при них імпульсу струму. Для схеми при зміні параметрів навантаження R_H , L_H та АЧП імпульсу струму визначені коефіцієнти подібності, які дозволяють змінити параметри ЄНЕ $U_{01} - U_{0n}$, $R_1 - R_n$, $L_1 - L_n$, $C_1 - C_n$, та співвідношення для розрахунку значень параметрів додаткових елементів R_D , L_D в колі навантаження.

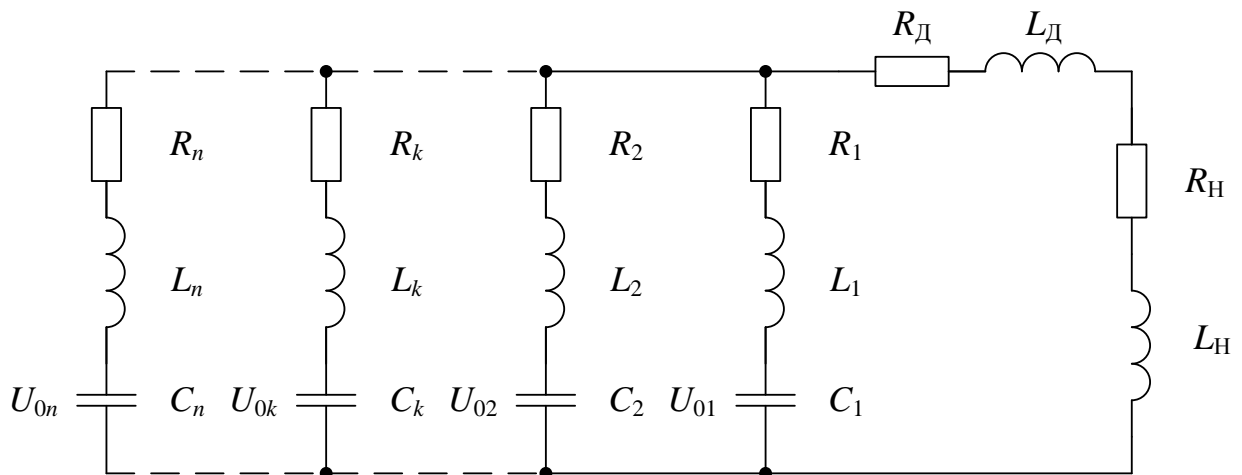


Рисунок 2 – Еквівалентна схема ВІП з паралельними ЄНЕ

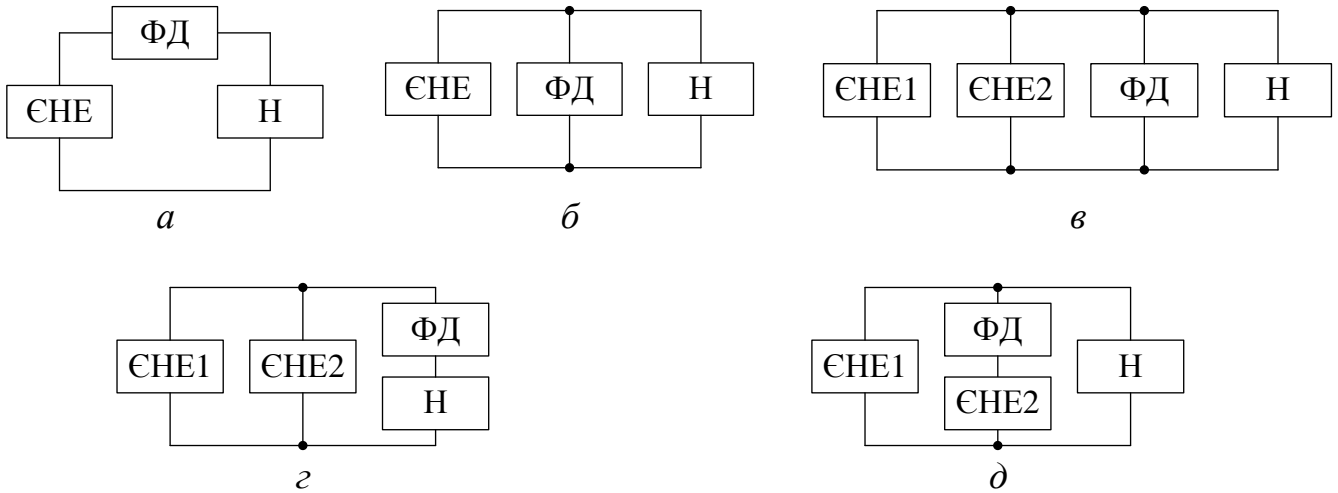
Розвинено метод формуючого двополюсника (ФД) для синтезу розрядного кола ВІП, які забезпечують вибір еквівалентних параметрів розрядного кола для різних форм імпульсу струму, заданих аналітичним виразом

$$P_{FD} = \Phi(P_E, P_H, P_I), \quad (1)$$

де P_{FD} – параметри елементів ФД; P_E – параметри елементів ВІП; P_H – параметри елементів навантаження; P_I – параметри імпульсу струму (напруги).

Визначено формуючі можливості схемних рішень ВІП з одним і двома ЄНЕ (рис. 3) відносно коефіцієнта q операторного зображення імпульсу струму

$$i_H(p) = \frac{\sum_{k=0}^{m-q} p^k A_k}{\sum_{k=0}^m p^k B_k} \text{ та складу навантаження.}$$



ЄНЕ, ЄНЕ1, ЄНЕ2 – ємнісні накопичувачі енергії; ФД – формуючий двополіусник; Н – навантаження

Рисунок 3 – Структурні схеми розрядних кіл ВІП

Проведено урахування впливу нелінійності комутатора для структурної схем з одним ЄНЕ та ФД, який включений паралельно навантаженню (рис. 3б).

Для використання методу ФД розроблено метод апроксимації імпульсних впливів на базі випадкового пошуку глобального екстремуму (рис. 4).

Запропоновано алгоритм мінімізації відхилень експериментальних даних від апроксимуючої залежності і співвідношення для визначення границь області пошуку (блок 6) коефіцієнтів апроксимуючого експонентного полінома

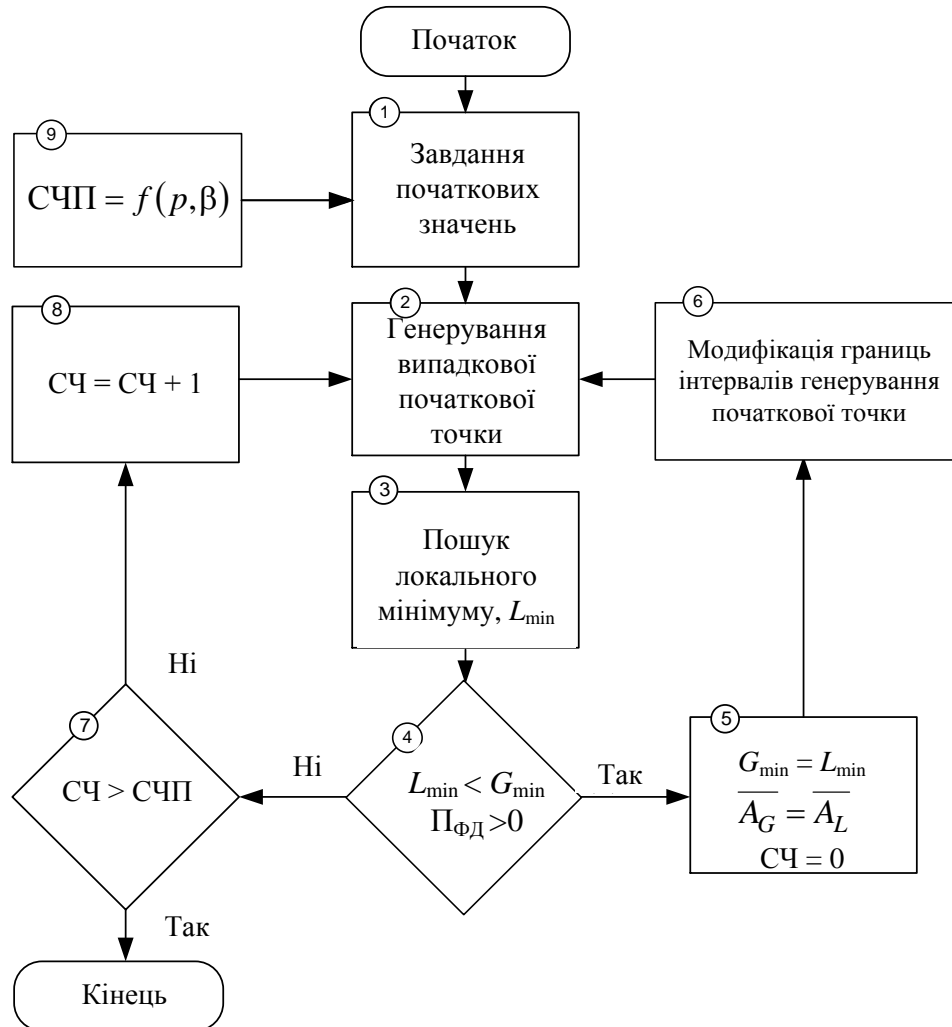
$$f(t) = \sum_{k=1}^n A_k e^{-\beta_k} \sin(\omega_k t - \varphi_k) \text{ з одночасним контролем фізичної реалізуємості елементів ФД (блок 4) та вірогідності знаходження глобального мінімуму (блок 9).}$$

Розроблено метод визначення допусків одноконтурного ВІП, який базується на аналітичному описанні контрольованих АЧП (рис. 1, рівень III). Виведено співвідношення для визначення допусків контрольованих параметрів імпульсу струму. Визначено коефіцієнти системи лінійних рівнянь, яка описує взаємозв'язок допусків параметрів елементів розрядного кола з допусками вихідних параметрів імпульсу струму. Сформульовано завдання вибору допусків елементів розрядного кола у вигляді задачі оптимізації, описані варіанти її рішення. Проаналізовано варіант детермінованого завдання вибору допусків елементів розрядного кола. Досліджено взаємозв'язок допусків при зміні співвідношення параметрів елементів розрядного кола в діапазоні $2 \leq R/\sqrt{L/C} \leq 30$.

Розв'язано завдання вибору допусків елементів розрядного кола у вигляді задачі оптимізації, описані варіанти її рішення. Проаналізовано варіант детермінованого завдання вибору допусків елементів розрядного кола. Досліджено взаємозв'язок допусків при зміні співвідношення параметрів елементів розрядного кола в діапазоні $2 \leq R/\sqrt{L/C} \leq 30$.

Розв'язаний метод визначення показників параметричної надійності за допомогою числових характеристик розподілу контрольованих АЧП імпульсного впливу

ву. Виведено співвідношення для визначення числових характеристик розподілу контрольованих АЧП імпульсу струму одноконтурних ВІП при співвідношенні параметрів $2 \leq R/\sqrt{L/C} \leq 30$, що, у комплексі з відомими даними, забезпечує розрахунок числових характеристик будь-яких аперіодичних імпульсів струму.



G_{\min} – значення глобального мінімуму; L_{\min} – значення локального мінімуму; $\overline{A_G}$ – набір коефіцієнтів, відповідних G_{\min} ; $\overline{A_L}$ – набір коефіцієнтів, відповідних L_{\min} ; СЧ – значення лічильника кількості визначень L_{\min} , які не змінюють G_{\min} ; СЧП – граничне значення СЧ в поточному процесі обчислень; П_{ФД} – параметри формулюючого двополюсника

Рисунок 4 – Блок-схема програми

Показано необхідність аналізу аварійних режимів при синтезі розрядного кола ЄНЕ з урахуванням критеріїв надійності як фактора, що забезпечує коректування структури розрядного кола, визначеного на стадії структурного синтезу.

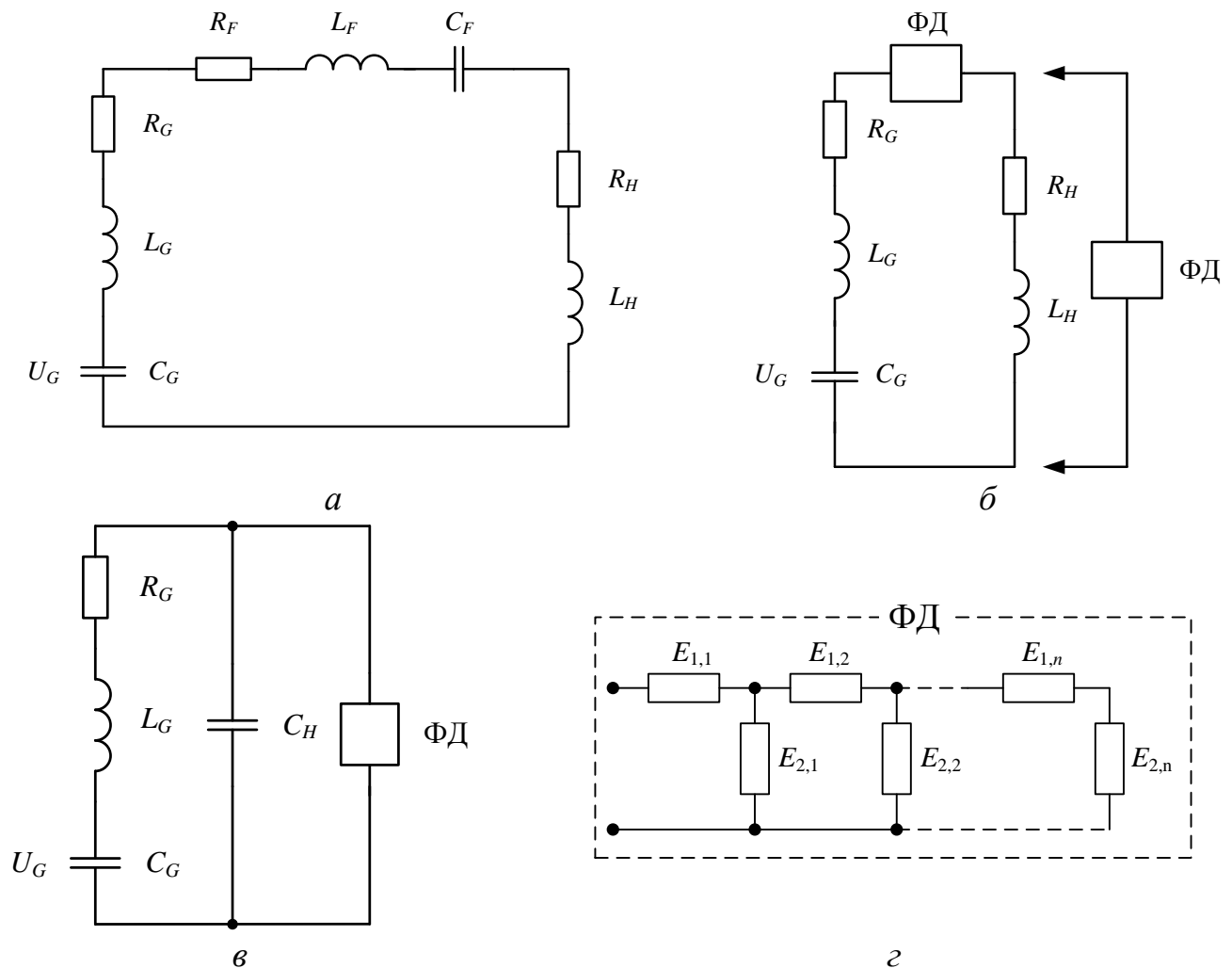
У третьому розділі досліджено синтез розрядних кіл ВІП загального призначення, для яких виконуються вимоги: структура розрядних кіл не змінюється за час перебігу перехідного процесу; комутатори являють собою ідеальні ключі; наванта-

ження може бути представлено RLC -колом або його окремими складовими; вихідним параметром ВП є імпульс струму або напруги.

Розвинений синтез розрядного кола одноконтурних ВП (рис. 5а) методом безрозмірних аналогів, що забезпечило вибір еквівалентних параметрів розрядного кола при будь-яких наборах АЧП формованого імпульсу струму

$$\Pi = f(I_{\max}, T_{\text{іаδ}}, T_{\text{δδ}}), \quad (2)$$

де Π – набір параметрів $\{U_G, C_G, R_G, L_G, R_F, L_F, C_F\}$; $I_{\max}, T_{\text{іаδ}}, T_{\text{δδ}}$ – АЧП імпульсу струму (відповідно, максимальне значення, час, який характеризує наростання та час, який характеризує тривалість імпульсу).



U_G, C_G, L_G, R_G – напруга зарядки, ємність, індуктивність, активний опір ЄНЕ відповідно; L_F, R_F, C_F – індуктивність, активний опір, ємність формуючих елементів відповідно; L_H, R_H – індуктивність, активний опір навантаження відповідно; ФД – формуючий двополіусник; $E_{1,1} - E_{1,n}$ – подовжні елементи ФД; $E_{2,1} - E_{2,n}$ – поперечні елементи ФД

Рисунок 5 – Еквівалентні схеми одноконтурного ВП та ВП з ФД

Для аналітичного описання імпульсу струму отримані наступні співвідношення

$$\Pi = \varphi(\mathbf{K}_\Phi), \quad (3)$$

де \mathbf{K}_Φ – набір коефіцієнтів форми імпульсу струму: аперіодичної форми $\{I_m, \beta_1, \beta_2\}$; коливальної загасаючої форми $\{I_m, \beta, \omega\}$.

Розроблено метод ФД для синтезу розрядного кола ВІП з одним ЄНЕ (рис. 5б,г), що забезпечує вибір еквівалентних параметрів розрядного кола для різних форм імпульсу струму, заданих аналітичним виразом, операторне зображення

$$i(p) = \frac{\sum_{k=0}^{m-2} p^k A_k}{\sum_{k=0}^m p^k B_k}.$$

У процесі розробки методу ФД: визначена структура подовжніх та поперечних елементів ФД $E_{1,1} - E_{1,n}$ та $E_{2,1} - E_{2,n}$; виведені аналітичні співвідношення для їх визначення; отримані співвідношення для визначення коефіцієнтів операторного виразу (за Лапласом) спеціальних форм імпульсів, які описують імпульсні дестабілізуючі фактори, що відтворюються у розрядних колах ЄНЕ.

Для одноконтурних ВІП та ВІП з ФД проведено постановку задач урахування практичної спрямованості синтезу розрядного кола (спорудження нового ВІП, або модифікація діючого ВІП) та їх оптимізації. Запропоновані алгоритми і розроблені програми їх реалізації.

У результаті комплексного дослідження паралельної роботи двох ЄНЕ на загальне RL -навантаження (рис. 2 при значеннях $n = 2, R_d = 0, L_d = 0$), визначені області зміни співвідношень між параметрами схеми розрядного кола, усередині яких імпульс струму в навантаженні має одну з характерних форм (рис. 6).

Для області монотонності імпульсів струму (область I): отримано описання границь області; виведені співвідношення для визначення АЧП на границі (т.1–т.2–т.3) й усередині області виходячи з параметрів розрядного кола; показана можливість оптимізації вибору параметрів розрядного кола за рахунок багатозначної залежності відношення АЧП від цих параметрів; показано, що за інших рівних умов енергетично вигідно використовувати режими експлуатації на нижній границі області монотонності (т.1–т.3).

Отримано описання границь імпульсів з коливальною формою (рис. 7): ліній імпульсів із квазіпостійною вершиною (т.4–т.5), лінії імпульсів мінімальної амплітуди коливань (т.3–т.6) і лінії позитивності коливальних імпульсів струму (т.7–т.8).

Установлено аналітичний зв'язок коефіцієнтів операторного зображення імпульсу струму $I_H(p) = (p^2 A_2 + p A_1 + A_0) / (p^4 B_4 + p^3 B_3 + p^2 B_2 + p B_1 + B_0)$ з параметрами схеми розрядного кола паралельної роботи двох ЄНЕ на загальне RL -навантаження у вигляді $\{A_i\} = F(U_{01}, U_{02}, R_1, R_2, L_1, L_2, C_1, C_2)$, при $i = 0, \dots, 2$; $\{B_j\} = \Phi(R_1, R_2, R_f, L_1, L_2, L_f, C_1, C_2)$, при $j = 0, \dots, 4$.

У четвертому розділі проаналізовано синтез розрядних кіл ЄНЕ з нелінійними елементами.

Досліджено вплив параметрів вольт-часової характеристики комутатора на перехідні процеси в розрядному колі ВІП. Виведено аналітичні вирази, що описують форму імпульсу струму при експонентній апроксимації вольт-часової характеристики комутатора виду $u(t) = U_G e^{-Q t}$, $t > 0$ (рис. 8а):

$$\begin{aligned} i_H(t) &= \Phi_1\{Q, U_G, C_G, R_G, L_G, C_H, L_H, R_H\}; \\ u_H(t) &= u_{R_H}(t) + u_{L_H}(t) + u_{C_H}(t) = \Phi_2\{Q, U_G, C_G, R_G, L_G, C_H, L_H, R_H\}. \end{aligned} \quad (4)$$

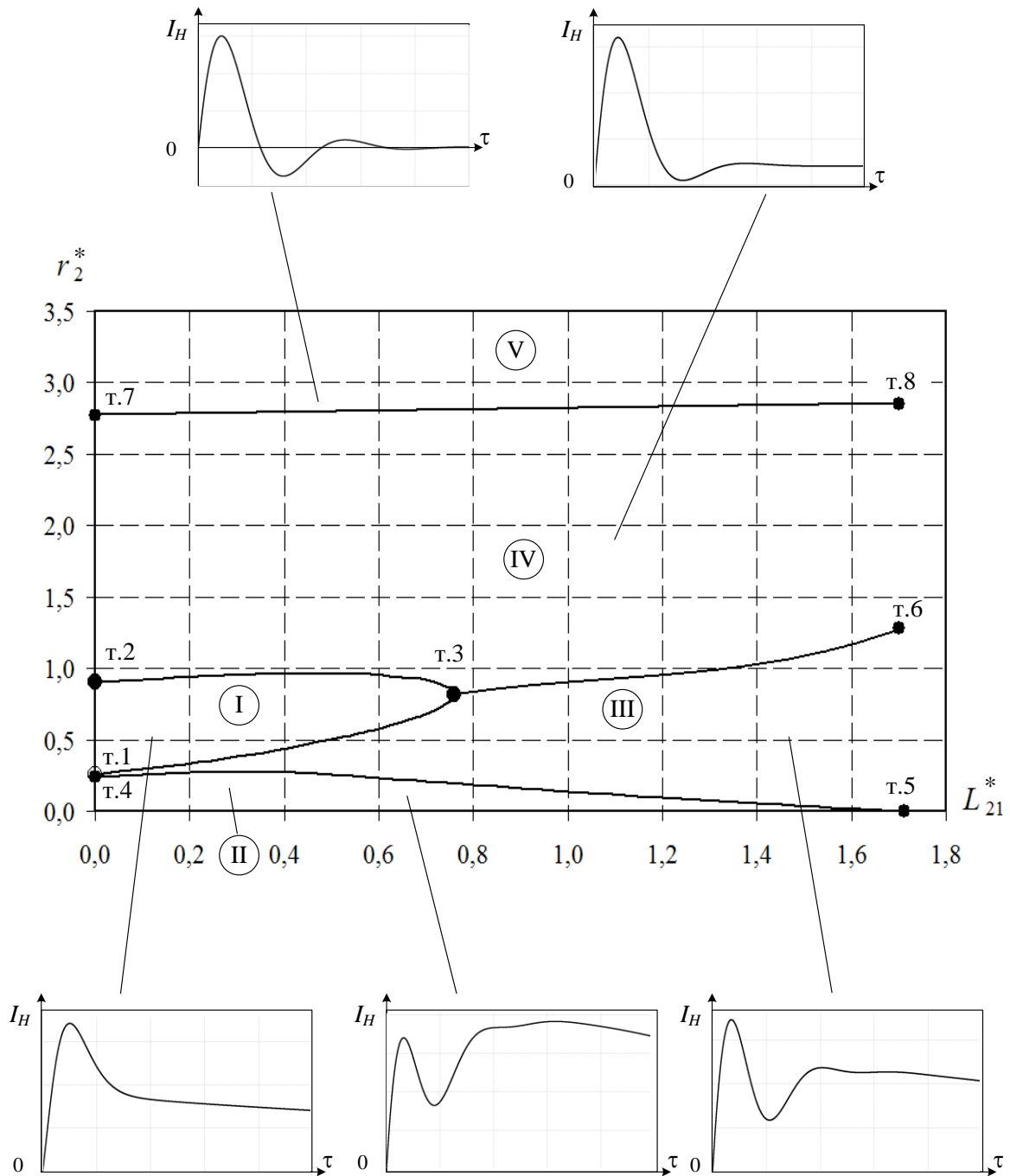


Рисунок 6 – Стилзовані форми імпульсів струму в різних областях при паралельній роботі двох СНЕ

Для синтезу розрядних кіл які формують на ємнісному навантаженні імпульс напруги $u(p) = \sum_{k=0}^{m-3} p^k A_k / \sum_{k=0}^m p^k B_k$ адаптовано метод ФД (рис. 5в,з). Виведено співвідношення для визначення його елементів $E_{1,1} - E_{1,n}$ та $E_{2,1} - E_{2,n}$.

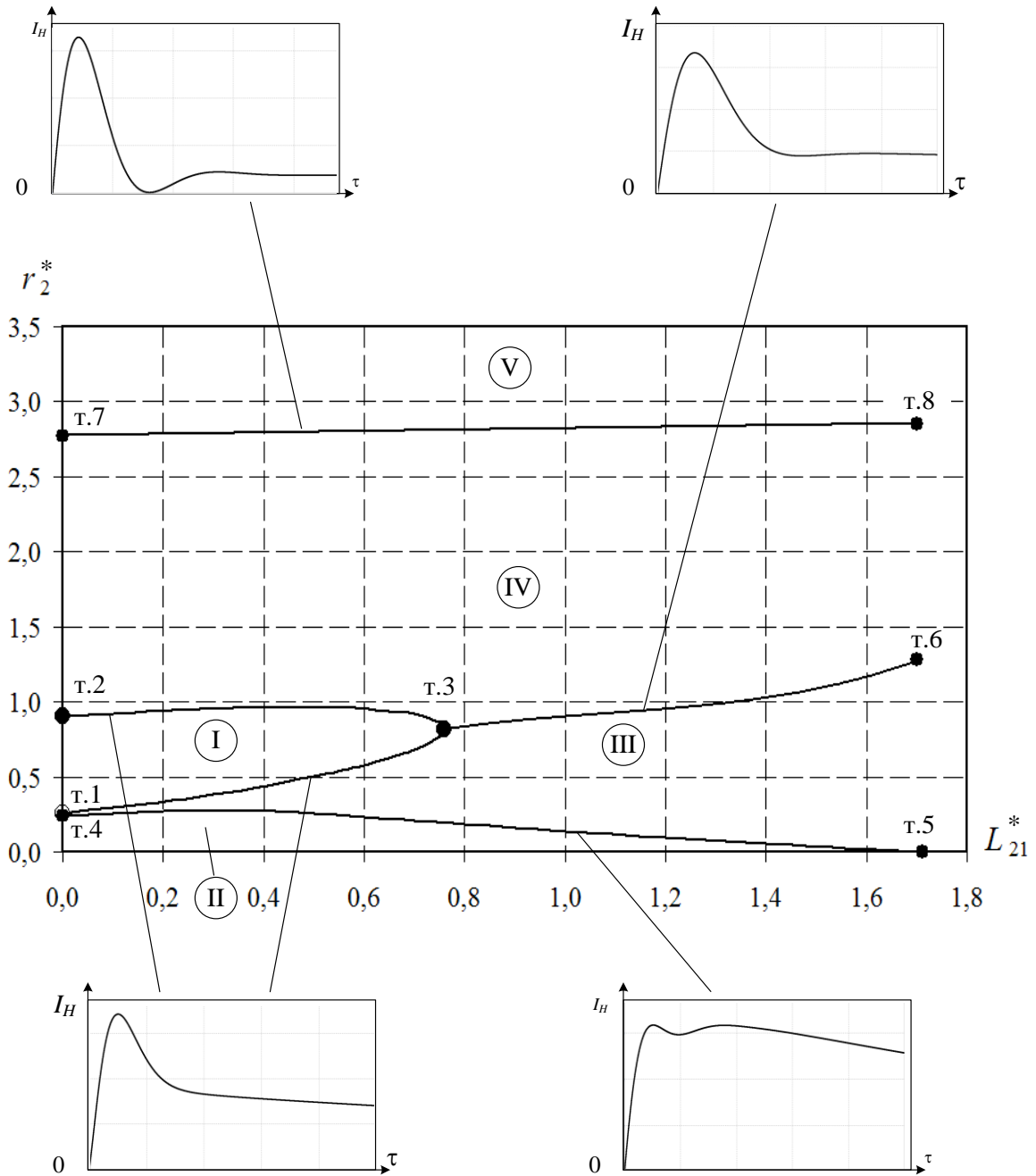
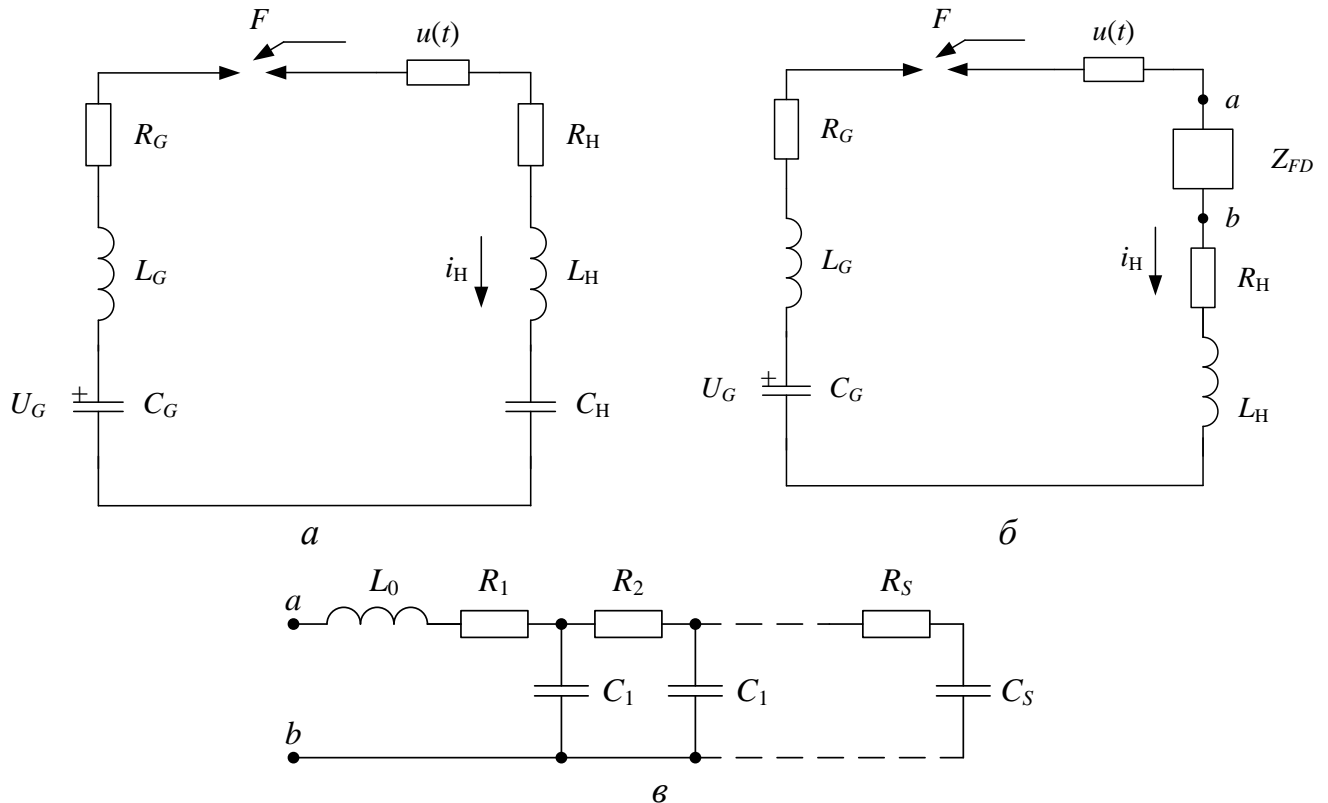


Рисунок 7 – Стилзовані форми імпульсів струму на границях областей при паралельній роботі двох ЄНЕ

Одержав подальший розвиток метод невизначених коефіцієнтів для синтезу роботи ЄНЕ на комплексне R/RC навантаження виду паралельно з'єднаних R та RC кіл. Розроблено методику визначення величини елементів розрядного кола.

Запропоновано метод базової схеми для синтезу розрядного кола ВПІ, що формує на ємнісному навантаженні імпульс напруги. Розроблено загальну постановку задачі постійного ускладнення розрядного кола та методику її покрокового розв'язання. Для формування аперіодичного імпульсу напруги на границі монотонності отримано: вираз, що зв'язує величини параметрів елементів розрядного кола ГН; співвідношення для визначення АЧП аперіодичного імпульсу напруги.



U_G, C_G, L_G, R_G – напруга зарядки, ємність, індуктивність, активний опір ВПІ відповідно; C_H, L_H, R_H – напруга зарядки, ємність, індуктивність, активний опір навантаження відповідно; F – ідеальний розрядник; $u(t)$ – нелінійний елемент; Z_{FD} – операторний опір ФД; $L_0, R_1, \dots, R_S, C_1, \dots, C_S$ – елементи ФД
Рисунок 8 – Еквівалентні схеми розрядних кіл ЄНЕ з нелінійністю комутатора

Визначено границі співвідношення параметрів елементів розрядного кола й постійної спаду напруги на комутаторі Q , при яких комутатор впливає на час наростання й максимальне значення імпульсу струму.

Так для відносного часу наростання імпульсу струму $\tau_{H(0,1;0,9)}^* = T_{H(0,1;0,9)} / \sqrt{LC}$ при $q^* \geq 3,7r^{*0,76}$, де $q^* = Q\sqrt{LC}$; $r^* = R/\sqrt{L/C}$; $R = R_G + R_H$; $L = L_G + L_H$; $C = C_H / (1 + C_G/C_H)$ значення коефіцієнта впливу на час наростання знаходиться в інтервалі $1 < K_1 = \tau_{H(0,1;0,9)}^*(q^*) / \tau_{H(0,1;0,9)}^*(\infty) < 1,3$.

Для максимального нормованого значення струму $I^*(\tau^*) = i(t)\sqrt{L/C}/U_G$ при $q^* \geq 2,7$ значення коефіцієнта впливу на максимальне значення імпульсу струму знаходиться в інтервалі $0,9 < K_2 = I_{\max}^*(q^*) / I_{\max}^*(\infty) < 1$.

На базі методу ФД розроблена методика вибору параметрів розрядного кола з урахуванням вольт-часової характеристики комутатора (рис. 8б).

Визначено співвідношення для вибору кількості s й величини параметрів елементів ФД. При формуванні в навантаженні імпульсу струму з операторним зображенням

виду $i(p) = \sum_{k=0}^{m-3} p^k A_k / \sum_{k=0}^m p^k B_k$, $m \geq 3$ кількість ланцюгів ФД (рис. 8в) дорівнює

$s = m - 1$. Для розрахунку параметрів ФД виведені узагальнені співвідношення

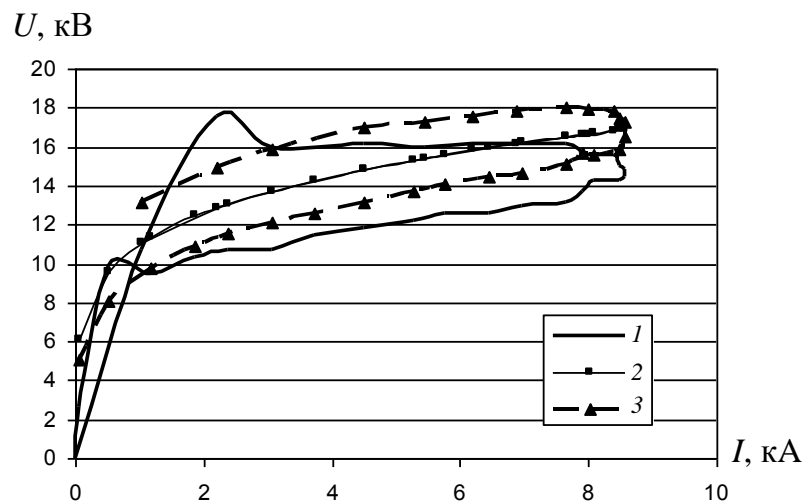
$$\{L_0, R_i, C_i\} = \bar{\Phi}(A_k, B_k, Q, U_G, C_G, R_G, L_G, R_H, L_H). \quad (5)$$

Отримані умови для варіанту $m = 3$, при яких імпульс струму завжди може бути сформований, принаймні, шляхом вибору величини напруги зарядки ЄНЕ:

$$B_2 - QB_3 > 0; B_1 - QB_2 + Q^2 B_3 > 0; QB_1 - Q^2 B_2 + Q^3 B_3 - B_0 > 0, \quad (6)$$

де B_0, B_1, B_2, B_3 , – коефіцієнти операторного зображення струму; Q – постійна часу спаду напруги на комутаторі.

Досліджено вольт-амперні характеристики (ВАХ) нелінійних резисторів. Експериментально отримано динамічні ВАХ металооксидних варисторів серії FNR, нелінійних резисторів фірми EPCOS (рис. 9), металооксидних резисторів серії 119201 (виробництво Китаю) і нелінійних резисторів, якими комплектуються обмежувачі перенапруг типу PBC-33 і PBC-110. Установлено, що урахування петлеобразного характеру динамічної ВАХ при її апроксимації дозволяє знизити похибку обчислення її значень у середньому в 2 рази.

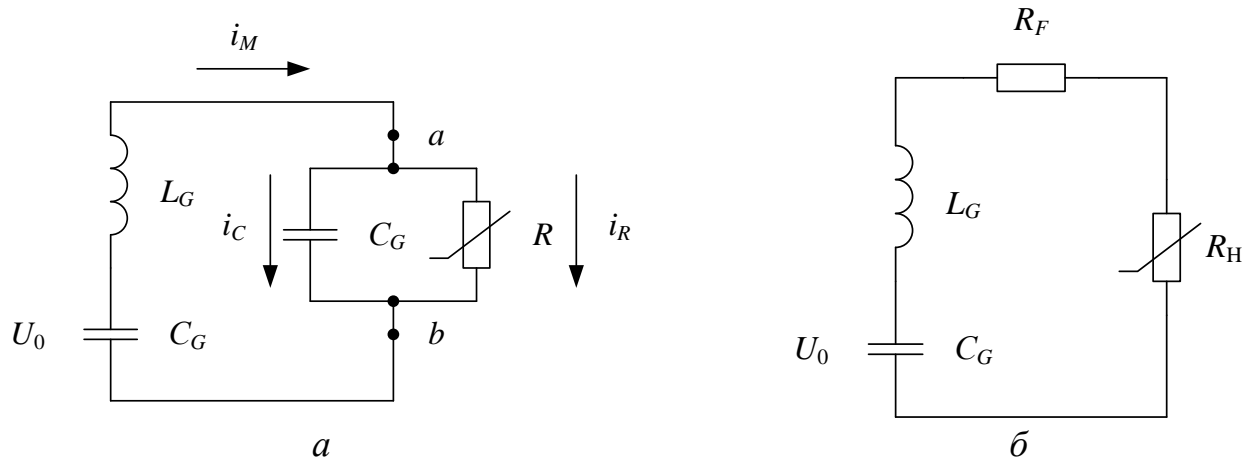


1 – експериментальна крива; 2 – апроксимуюча залежність $U = NI^\alpha$;

3 – апроксимуюча залежність $U = NI^\alpha + B(dI/dt)^\beta$

Рисунок 9 – ВАХ металооксидного варистора EPCOS при впливі імпульсу напруги 8/20 мкс

Досліджено розрахункову модель нелінійних резисторів обмежувачів напруги (рис. 10а). Показано, що модель забезпечує коректність розрахунків перехідних процесів в випробувальних схемах при $B^* = NU_0^{\alpha-1}(\sqrt{C_G/L_G})^\alpha < 3$ и $\beta < 0,8$ за умови, виконання співвідношень: $C_R/C_G \leq e^{-6,9e^{1,08\beta}}$ та $C_R/C_G \leq 1 \cdot 10^{-4} e^{-2,308 B^*}$.



U_0, C_G, L_G – напруга зарядки, ємність, індуктивність ЄНЕ відповідно; C_R, R – ємність, активний опір моделі відповідно; i_M, i_C, i_R – струми в гілках розрахункової схеми; a, b – зовнішні виводи нелінійного резистора; R_H – нелінійний резистор навантаження; R_F – формуючий резистор

Рисунок 10 – Розрахункові схеми розряду ЄНЕ на нелінійний резистор

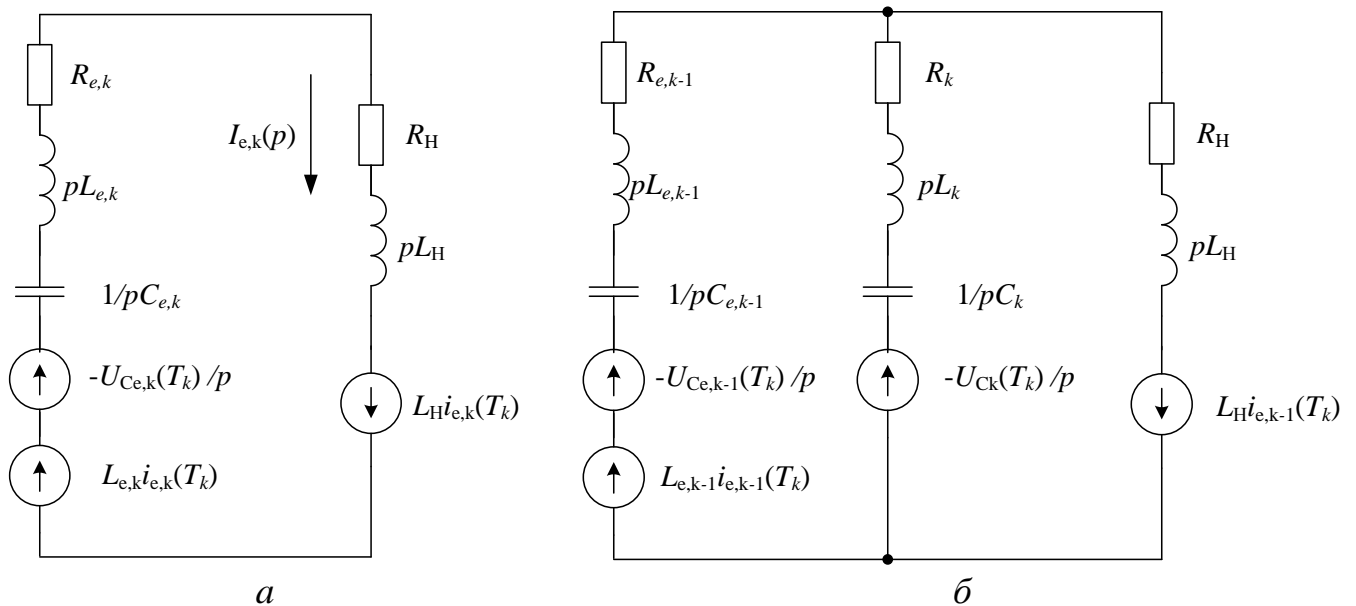
Виведено аналітичні вирази, які з похибкою не більш 5%, дозволяють визначити параметри, що характеризують наростання значень імпульсів струму, який протікає через нелінійний резистор і напруги на його виводах. Максимальне значення імпульсу струму $i_{\max} = F_1(U_0, L_G, C_G, \beta)$, максимальне значення імпульсу напруги $U_{\max} = F_2(U_0, \beta)$, час наростання значень імпульсів струму і напруги до максимального значення $T_{\max} = F_3(L_G, C_G, \beta)$.

Розроблено метод компенсації нелінійності для вибору параметрів елементів розрядного кола ВІП, що містить елемент із нелінійної ВАХ (рис. 10б). Метод заснований на зменшенні коефіцієнта варіації опору розрядного кола $V[R_F + R_H]^2$ й дозволяє використати для нелінійного навантаження методи синтезу лінійних розрядних кіл, та переводить задачу синтезу за номінальним значенням у задачу оптимального синтезу за допусками за рахунок варіації коефіцієнтів $\delta_M = M[R_F]/M[R_H]$ та $\delta_D = D[R_F]/D[R_H]$, де $M[\cdot]$ та $D[\cdot]$ – математичне очікування та дисперсія параметрів елементів схеми відповідно. Оптимальними є такі параметри схеми, при яких виконуються обмеження часу наростання значень імпульсу струму $T_{H(0,1;0,9)}$, часу спаду – $T_{C0,5}$ та максимального значення i_{\max} :

$$T_{H(0,1;0,9)} \in [T_{HH(0,1;0,9)}, T_{HB(0,1;0,9)}]; \quad T_{C0,5} \in [T_{CH0,5}, T_{CB0,5}]; \quad i_{\max} \in [i_{H\max}, i_{B\max}].$$

У п'ятому розділі викладені дослідження синтезу розрядних кіл ВІП зі змінною структурою.

На основі аналітичного дослідження перехідних процесів у схемах з одним та двома ЄНЕ (рис. 11) при початкових значеннях струму й напруги на елементах відмінних від нуля отримав подальший розвиток метод розрахунку програмованої комутації довільного числа ЄНЕ (рис. 12).



$R_{e,k}, L_{e,k}, C_{e,k}$ – еквівалентні активний опір, індуктивність, ємність гілки еквівалентного ЄНЕ відповідно; $U_{Ce,k}(T_k), i_{e,k}(T_k)$ – напруга зарядки еквівалентного ЄНЕ, струм у колі в момент комутації T_k відповідно; $R_{e,k-1}, L_{e,k-1}, C_{e,k-1}$ – еквівалентні активний опір, індуктивність, ємність гілки $k - 1$ – го еквівалентного ЄНЕ відповідно; $U_{Ce,k-1}(T_k), i_{e,k-1}(T_k)$ – напруга зарядки $k - 1$ – го еквівалентного ЄНЕ, струм у колі в момент комутації T_k відповідно; $R_k, L_k, C_k, U_{Ck}(T_k)$ – активний опір, індуктивність, ємність і напруга зарядки k – го ЄНЕ, який підключається відповідно.

Рисунок 11 – Операторні схеми з одним і двома ЄНЕ

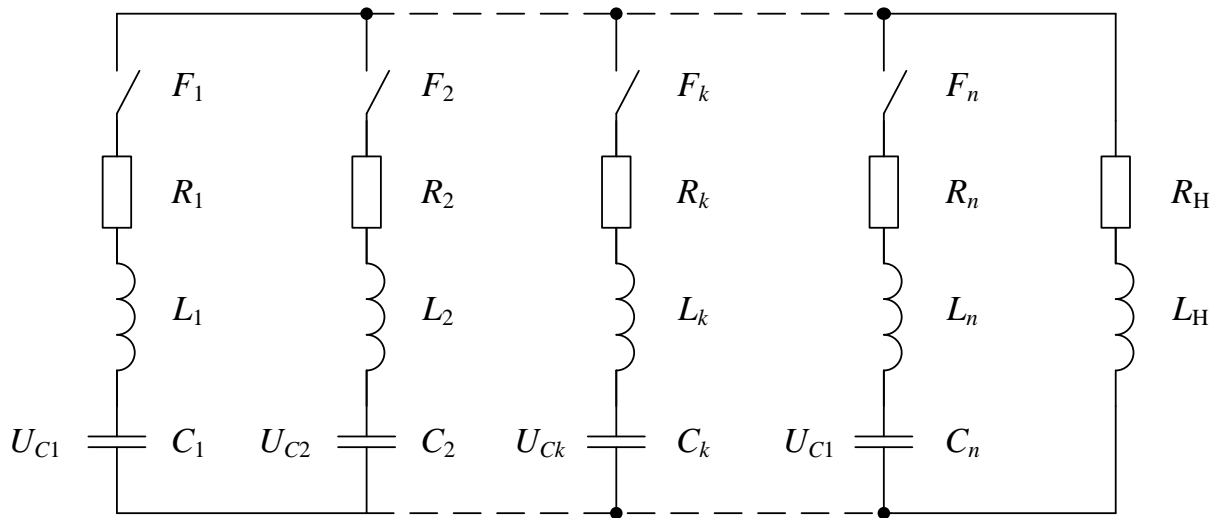
Виведено аналітичні співвідношення для розрахунку імпульсу струму в активно-індуктивному навантаженні при програмованому розряді на нього подібних ємнісних накопичувачів енергії, для яких виконуються умови $R_n/R_j = L_n/L_j = C_j/C_n$.

$$i_H(t) = F_1(t, U_{C1}, \dots, U_{Cn}, R_1, \dots, R_n, L_1, \dots, L_n, C_1, \dots, C_n, T_1, \dots, T_n). \quad (7)$$

Установлено, що залежно від кількості модулів в ЄНЕ, параметрів навантаження й модуля може мати місце різний характер струму в навантаженні. Причому по мірі підключення ЄНЕ збільшується ступінь загасання імпульсу струму.

Показано, що виведені співвідношення для лінійного RL -навантаження можуть бути використані для розрахунку програмованого розряду ЄНЕ на RL -навантаження, параметри якого змінюються в часі.

Обґрунтовано можливість оперативного регулювання форми імпульсу струму зміною напруги зарядки U_{Ci} та кількістю ЄНЕ ν , які підключаються до навантаження. На рис. 13а надані стилізовані форми імпульсу струму при однаковій напрузі зарядки й темпі підключення ЄНЕ – $\Delta\tau^* = \Delta T / \sqrt{LC'}$, де L' , C' – параметри модуля. Графік 1 представляє імпульс струму при одночасному включенні всіх п'яти ЄНЕ. Графік 2 показує зміну значень імпульсу струму для варіанта, коли кожний ЄНЕ містить три модулі $m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = m_5 = 3$, $\Delta\tau^* = 3,16$. Графік 3 ($m_1 = 5, m_2 = 4, m_3 = 3, m_4 = 2, m_5 = 1, \Delta\tau^* = 3,16$) і графік 4 ($m_1 = 1, m_2 = 2, m_3 = 3, m_4 = 4, m_5 = 5, \Delta\tau^* = 3,16$) ілюструють вплив порядку підключення ЄНЭ на форму імпульсу струму.



$R_1 - R_n, L_1 - L_n, C_1 - C_n, U_{C1} - U_{Cn}$ – активний опір, індуктивність, ємність, напруга зарядки ЄНЕ відповідно; R_H, L_H – активний опір, індуктивність навантаження відповідно; $F_1 - F_n$ – комутатори.

Рисунок 12 – Схема програмованої комутації ЄНЕ

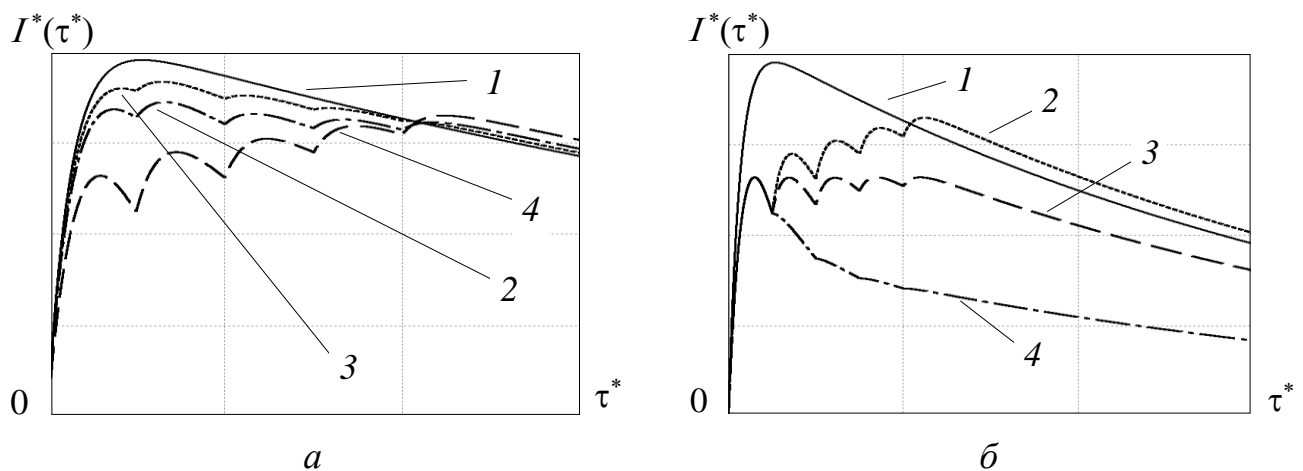


Рисунок 13 – Зміна форми імпульсу струму при програмованій комутації

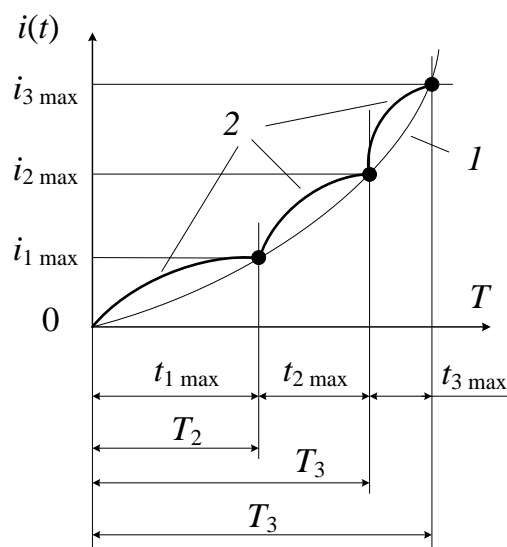
На рис. 13б представлені графіки при підключенні ЄНЕ з різною напругою зарядження для варіанта $m_1 = 1, m_2 = 2, m_3 = 3, m_4 = 4, m_5 = 5, \Delta\tau^* = 3,16$. Графік 1 – одночасне включення всіх п'яти ЄНЕ. Графік 2 побудований за умови, що відносні значення напруги зарядки ЄНЕ $U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = U_{C5} = 1, \Delta\tau^* = 3,16$. На графіку 3 показаний імпульс із квазіпостійною вершиною, отриманий вибором величини напруги зарядки ЄНЕ: $U_{C1} = 1; U_{C2} = 0,87; U_{C3} = 0,845; U_{C4} = 0,784; U_{C5} = 0,759; \Delta\tau^* = 3,16$. Максимальне значення кожного коливання на вершині однаково. Графік 4 відображає імпульс струму з монотонним наростанням і спадом значень при наступних значеннях напруг зарядки: $U_{C1} = 1; U_{C2} = 0,6; U_{C3} = 0,45; U_{C4} = 0,39; U_{C5} = 0,31, \Delta\tau^* = 3,16$.

Таким чином, при тому самому модульному складі випробувальної установки, керуючи часом включення ЄНЕ, напругами зарядки ЄНЕ й кількістю модулів, можна формувати імпульси струму з АЧП, які змінюються в широкому діапазоні.

Для синтезу програми комутації подібних ЄНЕ запропонований метод огинаючої точок максимальних значень. Сутність методу полягає в тому, що задана форма імпульсу струму (або його ділянки) в навантаженні представляється як геометричне місце точок максимальних значень дійсного розрядного струму, що протікає в навантаженні після підключення k -го ЄНЕ (рис. 14), тобто

$$i_k(t_{k \max}) = i(T), \quad (8)$$

де $i_k(t_{k \max})$ – максимальне значення струму після підключення k -го ЄНЕ; $i(T)$ – задана форма імпульсу струму (огинаюча); $T = T_k + t_{k \max}$ – час від початку підключення першого модуля до максимального значення струму після підключення k -го ЄНЕ; T_k – момент підключення k -го накопичувача; $k = 1 \dots n$.



I – наростаюча ділянка огинаючої; 2 – дійсна крива імпульсу струму
Рисунок 14 – Формування наростаючої ділянки огинаючої

Показано можливість формування наростаючих ділянок огинаючої і її прямо-лінійних ділянок, паралельних осі часу.

Для варіанта формування лінійно наростаючого імпульсу струму $i_k(t_{k \max}) - bT = 0$, де b – тангенс кута нахилу огинаючої, з монотонним спадом значень згідно з критичним характером розряду (рис. 15а) отримані співвідношення, які для однакових ЄНЕ визначають його максимальне значення i_{\max} й час досягнення максимального значення T_{\max} :

$$i_{\max} = F_1(v, U_{C1}, L_e, C_e); \quad T_{\max} = F_2(v, L_e, C_e), \quad (9)$$

де $L_e = L_1/n + L_H$; $C_e = nC_1$.

Визначено коефіцієнти напруги зарядки $K_{zk} = U_{Ck}/U_{C1}$ й час комутації T_k кожного ЄНЕ.

Для варіанта формування імпульсу струму із квазіпостійною вершиною $i_k(t_{k \max}) - i_1(t_{1 \max}) = 0$, де $i_k(t_{k \max})$ та $i_1(t_{1 \max})$ – максимальне значення імпульсу струму після підключення k -го та 1-го ЄНЕ, отримано співвідношення для визначення характерних АЧП (рис. 15б):

$$T_{\tilde{O}\hat{A}} = T_{\tilde{O}\hat{A}}^* \sqrt{L_e C_e}; \quad i_{\max} = I_{\max}^* U_C \sqrt{C_e / L_e}, \quad (10)$$

де $T_{\tilde{O}\hat{A}}^* = \{T_{\tilde{E}\hat{I}\hat{A}}^*, T_{\tilde{E}0,9}^*, T_{\tilde{E}0,5}^*, T_{\tilde{E}0,1}^*\} = \bar{\Phi}(v)$; $I_{\max}^* = \varphi(v)$.

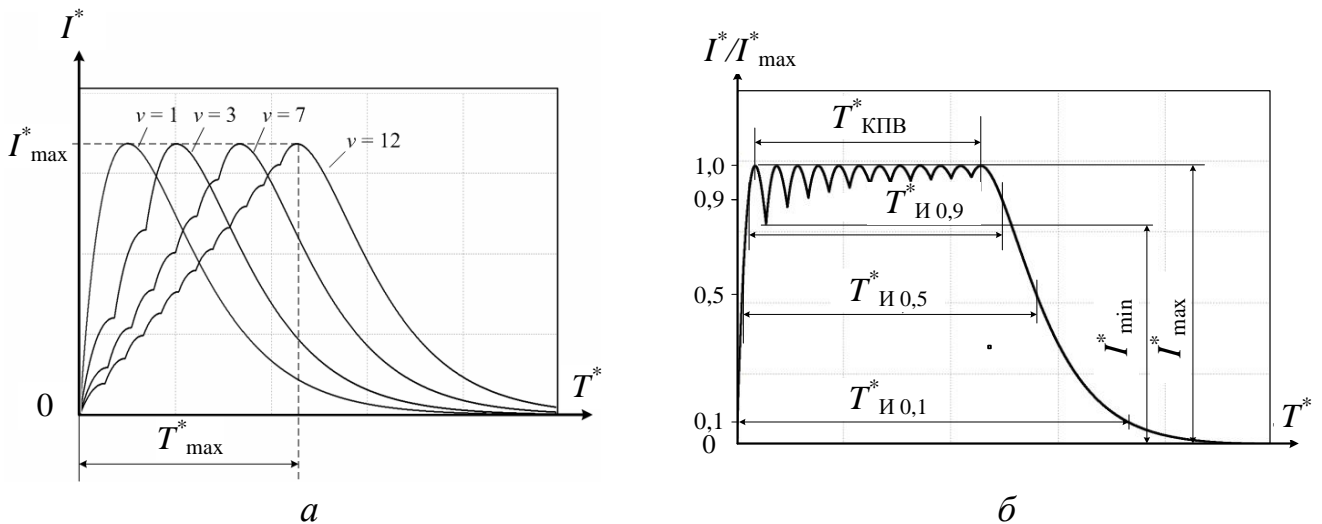


Рисунок 15 – Варіанти спеціальних імпульсів струму, які формуються при програмованому розряді

Визначено час зсуву моментів комутації кожного ЄНЕ $\Delta t_k = f(L_e, C_e, k)$. Показано можливість регулювання величини 1-го "провалу" I_{\min}^* (рис. 15б) зниженням напруги зарядки другого ЄНЕ.

Обґрунтовано можливість синтезу програми комутації програмованого розряду ЄНЕ на нелінійне навантаження шляхом її перетворення до параметричного виду.

У шостому розділі викладено синтез розрядних кіл ВПІ при комбінованому способі завдання імпульсних впливів, який характерний, в першу чергу, для випробування на стійкість технічних засобів до розрядів блискавки.

Проведено аналіз особливостей синтезу при комбінованому способі завдання формованих імпульсів АЧП (максимальним значенням струму i_{\max} , часом наростання t_1 і часом спаду його значень t_C) та інтегралом дії струму J_Z . Показано, що, поза залежністю від складу набору контрольованих АЧП, номінальне значення інтеграла дії однозначно пов'язане з відношенням номінальних значень конкретного набору АЧП імпульсу струму, що, в загальному випадку, ускладнює або унеможливує процедуру синтезу.

Для еквівалентної схеми ВПІ, яку можна представити RLC -колом показано, що при співвідношенні параметрів $R/\sqrt{L/C} \geq 1$, інтеграл дії струму, обчислений за час від нуля до часу спаду значень до $0,01 \cdot i_{\max} - J(T_{C0,01})$, з похибкою не більш 3 % збігається з повним інтегралом дії за весь час протікання імпульсу струму. Виявлений факт дозволив вивести співвідношення, що зв'язують часові параметри імпульсу струму (час наростання між рівнями $0,1 \cdot i_{\max}$ та $0,9 \cdot i_{\max} - T_{H(0,1;0,9)}$ та часу спаду до значень $0,01 \cdot i_{\max} - T_{C0,01}$) з інтегралом дії струму (зарядом Q), максимальним значенням струму і параметрами аналітичного описання імпульсу струму виду $i(t) = I_{nr} (e^{-\beta_1 t} - e^{-\beta_2 t})$:

$$T_{H(0,1;0,9)} = J \frac{\ln 9 \exp(-2A)N}{i_{\max}^2 B(\beta_2/\beta_1)}; \quad T_{H(0,1;0,9)} = \frac{Q \ln 9 \exp(-A)}{B i_{\max} \beta_2/\beta_1}; \quad (11)$$

$$T_{C0,01} = -J \frac{\ln 0,01}{i_{\max}^2} \exp(-2A)ND; \quad T_{C0,01} = -Q \frac{\ln 0,01}{i_{\max}} \exp(-A)D, \quad (12)$$

$$\text{де } A = \frac{\ln(\beta_2/\beta_1)}{\beta_2/\beta_1 - 1}; \quad B = 1 + 2,87(\beta_2/\beta_1)^{-0,67}; \quad D = 1 + 0,59(\beta_2/\beta_1)^{-0,86}; \quad N = 2 + \frac{2}{\beta_2/\beta_1}.$$

Отримано співвідношення, що визначають границі зміни часових параметрів імпульсу струму (здійсненні умови) залежно від інтеграла дії струму (таблиця 1) й заряду (таблиця 2) та максимального значення струму імпульсу:

$$J_1 \leq J \leq J_B; \quad i_1 \leq i_{\max} \leq i_B; \quad T_{H1} \leq T_{H(0,1;0,9)} \leq T_{HB}; \quad T_{CH} \leq T_{C0,01} \leq T_{CB}, \quad (13)$$

де індекс "Н" означає нижню границю інтервалу зміни параметра, "В" – верхню.

Запропоновано метод синтезу розрядного кола ЄНЕ при нечіткому завданні контрольованих АЧП імпульсу струму й інтеграла дії струму (або заряду), яке має місце при описанні складових повного імпульсу струму блискавки. Нечіткість завдання яких пов'язана з великими допусками на значення контрольованих АЧП ім-

пульсу струму й інтеграла дії струму (А- та D- складові) та заряду (С- складова). Для А- та D- складових задаються наступні інтервали зміни параметрів

Таблиця 1 – Граничні значення часових параметрів імпульсу струму в залежності від інтегралу дії

Позначення	Значення відношення постійних експонент	
	$\beta_2/\beta_1 \rightarrow 1$	$\beta_2/\beta_1 \rightarrow \infty$
$\lim T_{H(0,1;0,9)}$	$0,307 \frac{J}{i_{\max}^2}$	$\lim_{\beta_2 \rightarrow \infty} \frac{2,2}{\beta_2} = 0$
$\lim T_{C0,01}$	$3,85 \frac{J}{i_{\max}^2}$	$9,21 \frac{J}{i_{\max}^2}$

Таблиця 2 – Граничні значення часових параметрів імпульсу струму в залежності від заряду

Позначення	Значення відношення постійних експонент	
	$\beta_2/\beta_1 \rightarrow 1$	$\beta_2/\beta_1 \rightarrow \infty$
$\lim T_{H(0,1;0,9)}$	$0,209 \frac{Q}{i_{\max}}$	$\lim_{\beta_2 \rightarrow \infty} \frac{2,2}{\beta_2} = 0$
$\lim T_{C0,01}$	$2,69 \frac{Q}{i_{\max}}$	$4,61 \frac{Q}{i_{\max}}$

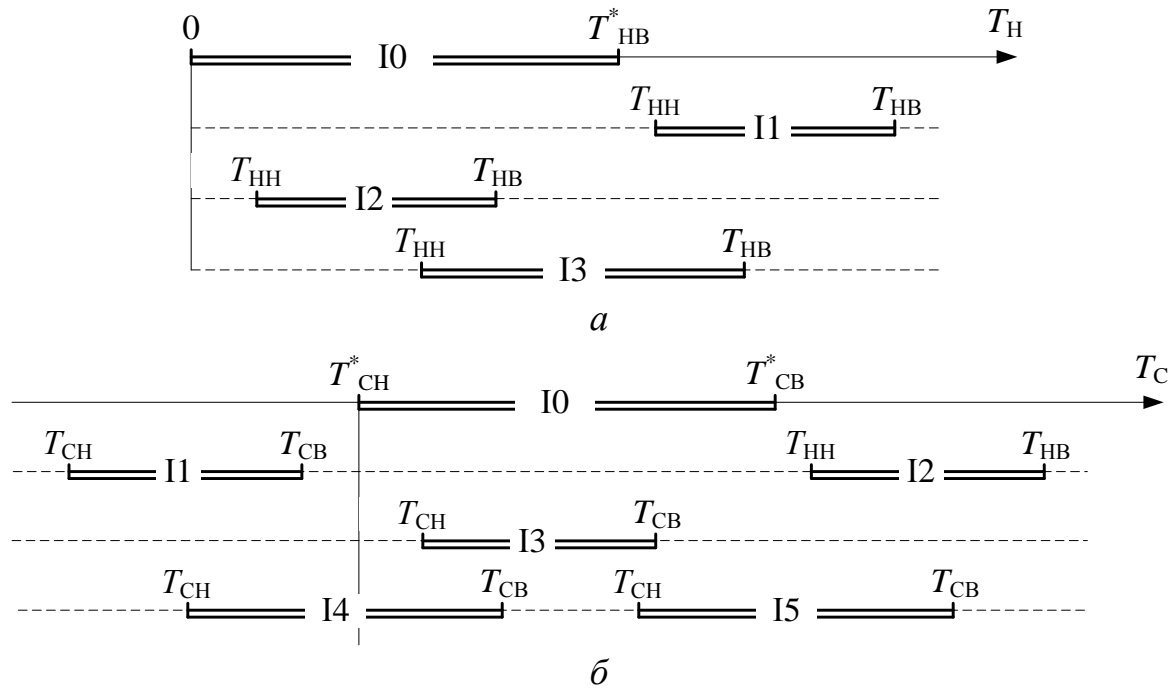
Сутність методу полягає у формуванні розрахункових інтервалів зміни часових параметрів імпульсу струму, які одночасно задовольняють заданим умовам та здійсненим умовам (рис. 16а, рис. 16б), а саме, розрахункові інтервали одночасно входять в якості підінтервалів (сумісні) у задані інтервали зміни часових параметрів (13) та здійсненні інтервали, границі яких визначаються за даними таблиці 1:

$$T_{HH}^* = 0 < T_{H(0,1;0,9)} < T_{HB}^* = 0,307 \frac{J_B}{i_H^2}; \quad T_{CH}^* = 3,85 \frac{J_H}{i_B^2} < T_{C0,01} < T_{CB}^* = 9,21 \frac{J_B}{i_H^2}. \quad (14)$$

Якщо для часу наростання мають місце варіанти розміщення (рис. 16а) І0–І2 та І0–І3, а для часу спаду (рис. 16б) І0–І3, І0–І4 та І0–І5, то границі розрахункових інтервалів визначаються за співвідношеннями:

$$\begin{aligned} T_{HHP} &= T_{HH}; & T_{HBP} &= \text{MIN}(T_{HB}, T_{HB}^*); \\ T_{CHP} &= \text{MAX}(T_{CH}, T_{CH}^*); & T_{CBP} &= \text{MIN}(T_{CB}, T_{CB}^*), \end{aligned} \quad (15)$$

де $\text{MIN}(\cdot)$ – функція, яка визначає найменше значення з аргументів; $\text{MAX}(\cdot)$ – функція, яка визначає найбільше значення з аргументів.



a – для часу наростання; *б* – для часу спаду;

I0 – здійснений інтервал; I1, I2, I3, I4, I5 – можливі варіанти розташування заданих інтервалів

Рисунок 16 – Варіанти взаємного розташування інтервалів

Виходячи з границь визначених розрахункових інтервалів для часових параметрів (15) шляхом рішення нелінійних рівнянь (11) та (12) відносно β_2/β_1 , визначаються границі зміни відношення постійних експонент β_2/β_1 для часу наростання та часу спаду. Можливе взаємне розташування інтервалів для β_2/β_1 показано на рис. 17.

Якщо інтервали сумісні, то границі розрахункового інтервалу для β_2/β_1 , в якому виконуються усі задані вимоги (13), визначаються:

$$(\beta_2/\beta_1)_{PH} = \text{MAX}[(\beta_2/\beta_1)_{HH}, (\beta_2/\beta_1)_{CH}] ; (\beta_2/\beta_1)_{PB} = \text{MIN}[(\beta_2/\beta_1)_{HB}, (\beta_2/\beta_1)_{CB}] . \quad (16)$$

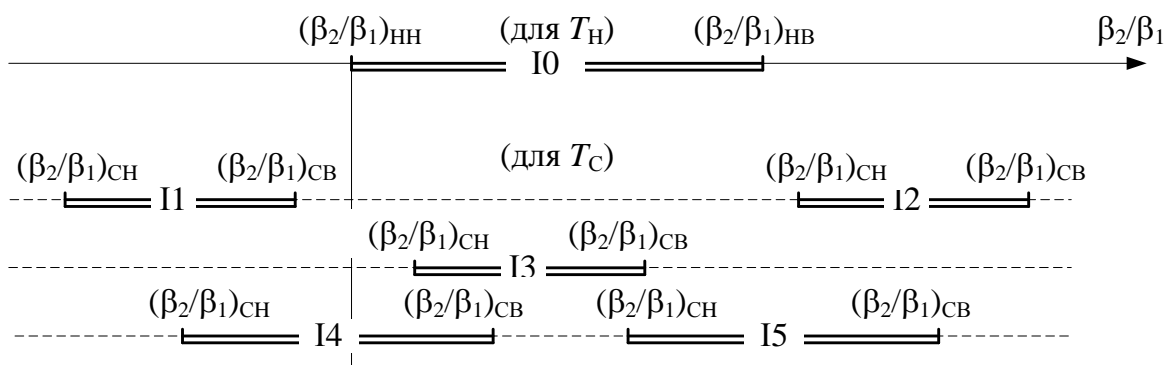
При прийнятому співвідношенні β_2/β_1 , проводиться вибір параметрів аналітичного описання імпульсу струму β_1 , β_2 та I_{nr} . Подальший вибір еквівалентних параметрів розрядного кола ЄНЕ при відомих параметрах аналітичного описання імпульсу струму може бути проведений з використанням методик, викладених вище.

При проектуванні ВІП, що формують імпульси, які супроводжують грозову діяльність, використовуються методи синтезу, розглянуті вище. Однак у силу різноманіття випробуваних технічних об'єктів і вимог до випробувальних впливів, виникає необхідність у розробці методів синтезу ряду спеціальних варіантів.

Одним з таких варіантів є синтез розрядного кола ВІП для формування імпульсу струму блискавки для варіанту, коли його перша похідна дорівнює нулю у початковий момент протікання струму в активному навантаженні (рис. 18а)

$$i(t) = \alpha_1 e^{\beta_1 t} + \alpha_2 e^{\beta_2 t} + \alpha_3 e^{\beta_3 t} \Leftrightarrow A_0 / (p^3 + B_2 p^2 + B_1 p + B_0), \quad (17)$$

де $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0$; $\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2 + \alpha_3\beta_3 = 0$.



I0 – інтервал виходячи з часу наростання; I1, I2, I3, I4, I5 – можливі інтервалів виходячи з часу спаду

Рисунок 17 – Варіанти взаємного розташування інтервалів для β_2/β_1

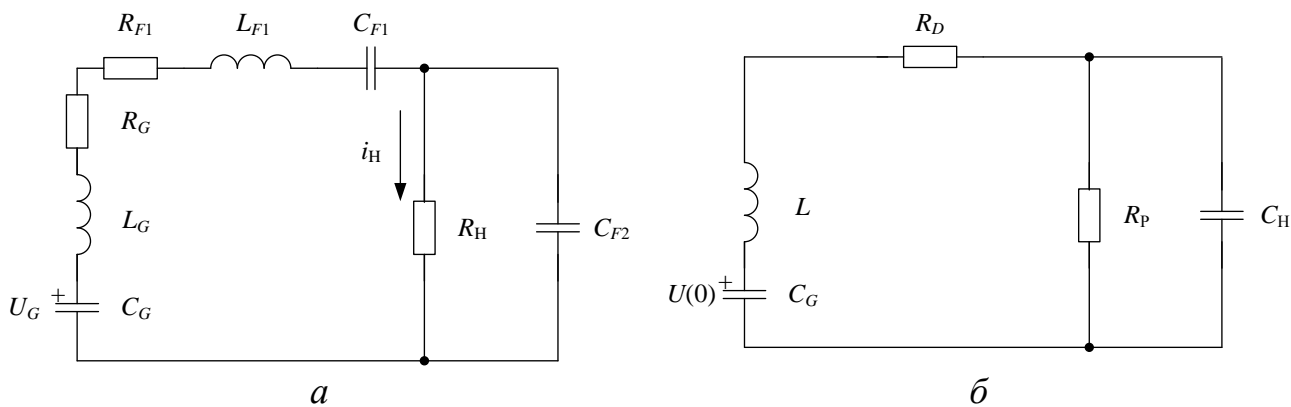


Рисунок 18 – Еквівалентні схеми формування

Показано, що умова формування такого імпульсу струму визначається співвідношенням, яке за інших рівних умов можна задовольнити вибором напруги зарядки U_G із нерівності

$$U_G B_2 / A_0 > L_G + L_{F_1} > U_G^2 B_0 / A_0 (U_G B_1 - A_0 R_H). \quad (18)$$

Отримані співвідношення для вибору параметрів формуючого чотириполосника

$$\{R_{F_1}, L_{F_1}, C_{F_1}, C_{F_2}\} = \bar{\Phi}(A_0, B_2, B_1, B_0, U_G, C_G, L_G, R_G, R_H). \quad (19)$$

У ряді випадків на практиці виникає необхідність переведення діючих ВІП, які створюють різні випробувальні імпульси, у режим формування імпульсів, характерних для грозової діяльності.

Так для проведення випробувань електричної міцності ізоляції бортового устаткування використовується імпульс напруги з часом наростання до максимального значення $T_{\max} = 1,2 \pm 0,24$ мкс і часом спаду до половини максимального зна-

чення $T_{C0,5} = 50 \pm 1$ мкс і різних максимальних значеннях напруги. При використанні існуючого ГН (рис. 18б), за умови, що ємність навантаження багато менше ємності ГН в ударі (що характерно при випробуванні ізоляції), визначені співвідношення для розрахунку параметрів розрядного кола ГН

$$\{R_D + R_P, L, U(0)\} = \bar{\Phi}(C_G, U_{\max}). \quad (20)$$

Для формування уніполярної А-складової імпульсу струму блискавки із часом наростання від рівня 0,1 до рівня 0,9 від максимального значення $T_{H(0,1;0,9)} = 50$ мкс і часом досягнення на спаді імпульсу рівня 0,01 від максимального значення $T_{C0,01} = 500$ мкс визначено співвідношення для розрахунку параметрів розрядного кола генератора імпульсів струму (рис. 17б, $C_H = 0$)

$$\{R_D + R_P, L, U(0), J\} = \bar{\Phi}(C_G, i_{\max}). \quad (21)$$

Повний імпульс струму розряду блискавки створюється з використанням комплексу випробувального обладнання, що складаються з декількох ЄНЕ, які працюють паралельно (рис. 2). Для варіанту використання трьох ЄНЕ побудовані математичні моделі контрольованих АЧП імпульсу струму в навантаженні вигляду

$$\{T_{\max}, i_{\max}, J, T_{H(0,1;0,9)}, T_{C0,5}, T_{C0,01}\} = \bar{\Phi}(U_{01}, C_1, R_1, L_1). \quad (22)$$

ВИСНОВКИ

Результати дисертації у сукупності є вирішенням науково-прикладної проблеми розвитку теорії синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії, призначених для формування великих імпульсних струмів з нормованими параметрами, та забезпечують сучасний рівень процесу проектування й дозволяють створювати більш досконалі високовольтні імпульсні пристрої й випробувальні комплекси на їхній базі.

У дисертаційній роботі:

1. Виконано аналіз методів синтезу розрядних кіл високовольтних імпульсних пристроїв. Виявлено зв'язок методів з особливостями описання випробувальних імпульсів та моделей елементів розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії. Встановлено наявність істотних протиріч в галузях параметричного та структурного синтезу розрядних кіл високовольтних імпульсних пристроїв. Сформовано напрямки подальших досліджень та удосконалення процедури синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії, а також випробувальних установок, споруджуваних на їх базі.

2. Сформульовано комплекс основних принципів синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії; запропоновано метод структурного синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії, який базується на символній формалізації описання структури розрядного кола й імпульсів струму й напруг; сформовані банки

даних, які дозволяють провадити структурний синтез (178 варіантів описання структур розрядних кіл та форм імпульсів). Отримали подальший розвиток теоретичні засади параметричного синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії при завданні імпульсу контрольованими амплітудно-часовими параметрами і аналітичним виразом. Це забезпечило універсальність і комплексність підходу до синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії незалежно від їх функціонального призначення та вихідних характеристик.

3. Одержав подальший розвиток синтез розрядного кола ємнісних накопичувачів енергії методом безрозмірних аналогів. Удосконалено метод визначення параметрів одноконтурних високовольтних імпульсних пристроїв при аналітичному завданні імпульсу струму. Розроблено метод формуючого дво полюсника для синтезу розрядного кола високовольтних імпульсних пристроїв з одним та двома ємнісними накопичувачами енергії. За результатами комплексного дослідження паралельної роботи двох ємнісних накопичувачів енергії на загальне RL -навантаження, встановлені області зміни співвідношень між параметрами схеми розрядного кола, усередині яких імпульс струму в навантаженні має одну з характерних форм. Побудовано математичні моделі визначення границь таких областей. Запропоновано метод базової схеми для синтезу розрядного кола високовольтних імпульсних пристроїв, що формує на ємнісному навантаженні імпульс напруги.

Результати досліджень доведено до інженерних методик, які суттєво розширюють можливості вибору еквівалентних параметрів розрядного кола високовольтних імпульсних пристроїв з одним та двома ємнісними накопичувачами енергії при завданні будь-яких наборів амплітудно-часових параметрів та аналітичному описанні імпульсу струму формованого в RL -навантаження, а також імпульсу напруги на ємнісному навантаженні, що в цілому оптимізує процес розробки та спорудження високовольтних імпульсних пристроїв.

4. Досліджено вплив параметрів вольт-часової характеристики комутатора на перехідні процеси в розрядному колі високовольтних імпульсних пристроїв. На базі методу формуючого дво полюсника проведено синтез розрядного кола з урахуванням вольт-часової характеристики комутатора. Експериментально отримані динамічні вольт-амперні характеристики нелінійних резисторів, які використовуються в обмежувачах напруги. Отримано взаємозв'язок параметрів моделі нелінійного резистора, що забезпечує коректність розрахунків перехідних процесів в випробувальних схемах. Запропоновано метод компенсації нелінійності для вибору параметрів елементів розрядного кола ємнісних накопичувачів енергії, що містить компонент із нелінійною вольт-амперною характеристикою.

Теоретичні розробки дозволили суттєво спростити процедури аналізу та синтезу ємнісних накопичувачів енергії з урахуванням нелінійного характеру елементів.

5. Одержав подальший розвиток метод розрахунку програмованої комутації ємнісних накопичувачів енергії, заснований на аналітичному дослідженні перехідних процесів у послідовному RLC -колі при початкових значеннях струму й напруги на елементах відмінних від нуля. Виведено аналітичні співвідношення для розрахунку імпульсу струму в активно-індуктивному навантаженні при програмованому розряді на неї подібних ємнісних накопичувачів енергії. Для синтезу програми комутації подібних ємнісних накопичувачів енергії розвинено метод огинаючої точок

максимальних значень, заснований на тім, що задана форма імпульсу струму (або його ділянка) в навантаженні представляється геометричним місцем точок максимальних значень дійсного розрядного струму, який суттєво спрощує формування спеціальних випробувальних імпульсів в розрядних колах високовольтних імпульсних пристроїв.

Результати досліджень дозволяють оперативно, без модифікації елементів розрядного кола регулювати форму імпульсу струму зміною значень напруги зарядження, кількості та часу комутації ємнісних накопичувачів енергії, які підключаються до навантаження. Проводити синтез розрядних кіл, які формують випробувальні лінійно наростаючі імпульси струму та імпульси струму з квазіпостійною вершиною при розряді декількох ємнісних накопичувачів енергії на лінійне та нелінійне навантаження.

6. Проведено аналіз особливостей синтезу при комбінованому способі завдання форми імпульсів. Запропоновано метод синтезу розрядного кола ємнісного накопичувача енергії традиційного виконання при нечіткому завданні контрольованих амплітудно-часових параметрів імпульсу струму й інтеграла дії струму (або заряду), виведені співвідношення, які зв'язують амплітудно-часові параметри, інтеграл дії (або заряд) і параметри аналітичного описання імпульсу струму. Отримано залежності, які визначають границі зміни часових параметрів при відомому інтегралі дії (або заряду) й максимальному значенні струму імпульсу. Визначено співвідношення для вибору параметрів розрядного кола високовольтних імпульсних пристроїв в спеціальних варіантах формування імпульсів струму й напруги.

Урахування результатів дослідження розширює можливості синтезу розрядних кіл як діючих високовольтних імпульсних пристроїв, так і таких, що споруджуються заново, для формування імпульсів струму та напруги, які супроводжують грозову діяльність.

7. Наведені в роботі результати використані при модернізації, розробці, створенні й уведенні в експлуатацію ряду високовольтних імпульсних пристроїв, які входять в випробувальні комплекси (НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ"; ТОВ НПП "ES Полімер", м. Артемівськ; ТОВ "Донгаолинтекс", м. Маріуполь; ТОВ "Промсервіс", м. Чернігів), та впроваджено у навчальний процес НТУ "ХПІ" та ЗНТУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи генератора импульсов тока при разряде на последовательную активно-индуктивную нагрузку / А.А. Петков // Электротехника. – 1990. – №10. – С. 35 – 36.

2. Петков О.О. Визначення параметрів двошарової моделі ґрунту за результатами вертикального електричного зондування, проведеного в районі розташування підстанцій / О.О. Петков, Д.Г. Коліушко, І.Ю. Лінк // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – №2. – С. 3 – 11. *Здобувачем розроблений алгоритм програми визначення параметрів двошарової моделі ґрунту методом глобальної мінімізації відхилень й проведені розрахунки.*

3. Петков А.А. Формирование испытательных импульсов тока сложной формы / А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2004. – Вип. 4. – С. 22 – 30.

4. Петков А.А. Расчет параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств, формирующих импульсы апериодической формы / А.А. Петков // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. – №1. – С. 65 – 69.

5. Петков А.А. Аппроксимация формы импульсных электромагнитных воздействий биэкспоненциальной функцией / А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2005. – Вип. 49. – С. 52 – 61.

6. Петков А.А. Минимизация энергии генераторов импульсов тока для испытаний объектов с широким интервалом изменения параметров / О.С. Недзельский, А.А. Петков // Вісник Харківського Національного технічного університету сільськогосподарства. – Харків : ЧП Червяк. – 2005. – Вип. 33. – С. 218 – 220. *Здобувачем виконана постановка задачі мінімізації енергії генераторів імпульсів струму із широкою зміною параметрів навантаження.*

7. Петков А.А. Формирование испытательного импульса тока в активно-индуктивной нагрузке / А.А. Петков // Електротехніка. – 2006. – №4. – С. 34 – 37.

8. Петков А.А. Формирование импульсов тока, сопровождающих грозовую деятельность / А.А. Петков, Д.Г. Колиушко // Технічна електродинаміка. – 2006. – Тем. вип., Ч.4. – С. 21 – 24. *Здобувачем виконана постановка задачі й виведені співвідношення для розрахунку схем формування імпульсів струму, які супроводжують грозову діяльність.*

9. Петков А.А. Исследование динамических вольт - амперных характеристик нелинейных резисторов ограничителей перенапряжения / О.С. Недзельский, А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2006. – Вип. 7. – С. 131 – 135. *Здобувачем виконана постановка задачі дослідження нелінійних резисторів обмежувачів перенапруги й проведена обробка експериментальних даних.*

10. Петков А.А. Выбор параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных испытательных устройств при различных способах задания контролируемых параметров испытательных импульсов / А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2006. – Вип. 17. – С. 105 – 111.

11. Петков А.А. Генерирование испытательных импульсов магнитного поля / А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2006. – Вип. 37. – С. 73 – 78.

12. Петков А.А. Формализация описания структур разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №1. – С. 73 – 77.

13. Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии / В.И. Кравченко, А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №6. – С. 70 – 75. *Здобувачем проведено отримання основних співвідношень для вибору параметрів розрядних кіл високовольтних імпульсних пристроїв і зроблені розрахунки.*

14. Петков А.А. Особенности применения методов синтеза электрических цепей при проектировании высоковольтных импульсных испытательных устройств /

А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2007. – Вип. 20. – С. 161 – 166.

15. Петков А.А. Разряд двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку / А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2007. – Вип. 34. – С. 79 – 85.

16. Петков А.А. Расчеты генератора импульсов высокого напряжения с использованием базовой схемы / А.А. Петков // Технічна електродинаміка. – 2008. – Тем. вип., Ч.6. – С. 82 – 87.

17. Петков А.А. Учет характеристик коммутаторов при анализе и синтезе разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №2. – С. 68 – 72.

18. Петков А.А. Расчет допусков разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – №6. – С. 68 – 71.

19. Петков А.А. Расчеты высоковольтного испытательного устройства для имитации токов, заданных интегралом действия / В.В. Кривущенко, А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2008. – Вип. 21. – С. 116 – 123. *Здобувачем виконана постановка задачі вибору параметрів випробувального пристрою для імітації струмів блискавки й проведений аналіз розрахункових даних.*

20. Петков А.А. Аппроксимация формы импульсных токов при задании контролируемых параметров и интеграла действия / А.А. Петков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2008. – Вип. 44. – С. 114 – 117.

21. Петков А.А. Особенности формирования испытательного импульса тока при его идентификации набором контролируемых параметров и интегралом действия / А.А. Петков // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – №2. – С. 31 – 37.

22. Петков А.А. Статистические характеристики распределения времени нарастания значений импульса тока высоковольтного испытательного устройства / А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №1. – С. 62 – 64.

23. Петков А.А. Формирование импульса тока с монотонным нарастанием и спадом значений при параллельной работе двух емкостных накопителей / А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №3. – С. 65 – 69.

24. Петков А.А. Переходные процессы при программируемой коммутации подобных емкостных накопителей энергии / А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №4. – С. 60 – 64.

25. Петков А.А. Формирование испытательного импульса напряжения на емкостной нагрузке / А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №5. – С. 63 – 66.

26. Петков А.А. Модификация параметров испытательных устройств при переводе их в новый режим эксплуатации / А.А. Петков // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – №6. – С. 63 – 66.

27. Петков А.А. Формирование апериодического импульса при разряде двух емкостных накопителей энергии на общую нагрузку / О. В. Олейник, А.А. Петков //

Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2009. – Вип. 11. – С. 141 – 148. *Здобувачем виконана постановка задачі дослідження паралельного розряду двох ємнісних накопичувачів енергії на загальне навантаження й проведений аналіз розрахункових даних.*

28. Петков А.А. Формирование испытательных импульсов тока при программируемом разряде подобных емкостных накопителей энергии / А.А. Петков // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – тем. вип., Ч.3. – С. 161 – 164.

29. Петков А.А. Повышение надежности работы генератора импульсов тока искусственной молнии / О.С. Недзельский, А.А. Петков, А.В. Пличко, Е.Г. Понуждаева // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2010. – №2. – С. 50 – 53. *Здобувачем виконана постановка задачі підвищення надійності генератора штучної блискавки й проведений аналіз розрахункових даних.*

30. Петков А.А. Формирование специальных импульсов тока при параллельной работе емкостных накопителей энергии / А.А. Петков // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2010. – №3. – С. 50 – 53.

31. Петков А.А. Применение метода неопределенных коэффициентов для синтеза разрядной цепи высоковольтного импульсного испытательного устройства / Петков А.А. // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2010. – Вип. 34. – С. 105 – 111.

32. Петков А.А. Программируемый разряд емкостных накопителей энергии на нелинейную нагрузку / А.А. Петков // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2012. – №21. – С. 205 – 211.

33. Петков А.А. Разряд емкостного накопителя энергии на R/RC нагрузку / А.А. Петков, Д.В. Винников // *Труды 5-й международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве" (28-29 мая 2002 года г. Харьков)*. – Харьков, – 2002. – С. 732 – 735. *Здобувачем виконана постановка задачі вибору параметрів накопичувача енергії при його розряді на комплексне навантаження й проведений аналіз розрахункових даних.*

34. Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // *Труды 12-й международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии" (7-8 июня 2006 года г. Харьков)*. – Харьков : ХНПК "ФЭД", 2006. – С. 224 – 226.

35. Petkov A.A. Modeling the Discharge Circuits of the Simulators of Thunderstorm Activity / A.A. Petkov, D.G. Koliushko // *International Conference on Grounding and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects (GROUND'2006 & 2nd LPE), November 26-29, 2006 - Maceió - Brazil*, <http://www.cpdee.ufmg.br/~LATER/2006/>. *Здобувачем виконана постановка задачі й виведені співвідношення для моделювання розрядних кіл імітаторів струмів грозової діяльності.*

36. Петков А.А. Структура высоковольтных устройств для имитации испытательных воздействий // *Материалы XIII Международной научной школы-семинара (21-25 августа 2007) "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах" / В.И. Кравченко, Г.М. Колиушко, А.А. Петков – Николаев : КП "Миколаївська обласна друкарня", 2007. – С. 126-127. Здобувачем проведена класифікація високовольтних імпульсних випробувальних пристроїв по функціональному призначенню.*

37. Петков А.А. Классификация разрядных цепей высоковольтных импульсных испытательных устройств / А.А. Петков // Тези доповідей 6-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції "Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів". – Кременчук : КДПУ, 2007. – С. 73.

38. Петков А.А. Корректировка параметров устройств для обеспечения амплитудно-временных характеристик некоторых импульсов, сопровождающих грозовую деятельность / Г.М. Колиушко, Д.Г. Колиушко, А.А. Петков // Сборник докладов десятой научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности (ЭМС-2008). – Санкт-Петербург, 2008. – С.237 – 240. *Здобувачем проведено отримання основних співвідношень для коректування значень параметрів елементів розрядного кола при експлуатації високовольтних імпульсних випробувальних пристроїв.*

39. Петков А.А. Расчетная модель нелинейных резисторов ограничителей перенапряжений / А.А. Петков // Сборник научных трудов 3-го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" МРФ-2008. Том VI. Международная конференция "Электромагнитная совместимость". – Харьков : АНПРЭ, ХНУРЭ. – 2008. – С.188 – 191.

40. Петков А.А. Взаимосвязь структуры высоковольтных импульсных устройств и формы генерируемых импульсов / В.И. Кравченко, Г.М. Колиушко, А.А. Петков // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах : междунар. науч. конф., 17–21 августа 2009 г. : тезисы докл. / Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины. – Николаев : КП "Миколаївська обласна друкарня", – 2009. – С. 119 – 120. *Здобувачем розроблена методика формалізації описання структури й імпульсного впливу, заданого набором амплітудно-часових параметрів.*

41. Петков А.А. Формирование ряда испытательных импульсов тока при параллельной работе двух емкостных накопителей энергии / А.А. Петков // Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів : тези наукових доповідей VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (Кременчук, КДУ ім. Михайла Остроградського, 2009 р.). – 2009. – С. 45 – 47.

42. Петков А.А. Анализ методов параметрического синтеза высоковольтных импульсных испытательных устройств // Физические и компьютерные технологии : труды 15-й Международной научно-технической конференции (Харьков, 2–3 декабря 2009г.). – 2009. – С. 480 – 483.

АНОТАЦІЇ

Петков О.О. Синтез розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії для формування великих імпульсних струмів з нормованими параметрами. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.09.13 – техніка сильних електричних і магнітних полів. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2012.

Дисертація присвячена синтезу розрядних кіл високовольтних імпульсних пристроїв на базі ємнісних накопичувачів енергії, які забезпечують формування з необхідною надійністю випробувальних імпульсів струму та напруги з вихідними

параметрами, заданими у визначених границях, що гарантують повторюваність результатів випробування технічних об'єктів.

У роботі містяться результати розробки нових і подальшого розвитку існуючих методів структурного й параметричного синтезу розрядних кіл ємнісних накопичувачів енергії, проведених на основі теоретичних і експериментальних досліджень різних схемних рішень випробувальних пристроїв при формуванні ними імпульсів струму й напруг, які описуються різними способами, та з урахуванням практичної спрямованості процедури синтезу й оптимальності схемного рішення.

Ключові слова: генератор, великі імпульсні струми, висока напруга, імітатор, ємнісний накопичувач енергії, нормування форми імпульсу, розрядне коло, синтез.

Petkov A.A. Synthesis of Discharge Circuits of Energy Capacitor Stores for Formation of Large Pulse Currents with Normalized Parameters. - Manuscript.

The Dissertation on competition of the Doctor of Technical Science degree on a specialty 05.09.13 - The strong electric and magnetic fields engineering. – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, Kharkiv, 2012.

The Dissertation is devoted to synthesis of discharge circuits of high-voltage pulse devices on the basis of energy capacitor stores which provide formation with necessary reliability of current test impulses and voltage with the output parameters set in certain borders which guarantee repeatability of test results of technical objects.

The work contains results of development new and the further development of existing methods of structural and parametrical synthesis of discharge circuits of energy capacitor stores lead on the basis of theoretical and experimental researches of various circuit decisions of test devices at formation by them of current impulses and voltage which are described by various method, and in view of a practical orientation of synthesis procedure and an optimality of the circuit decision.

Keywords: generator, large pulse currents, high voltage, simulator, the energy capacitor store, normalization of the impulse form, a discharge circuit, synthesis.

Петков А.А. Синтез разрядных цепей емкостных накопителей энергии для формирования больших импульсных токов с нормированными параметрами. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2012.

Диссертация содержит результаты разработки новых и дальнейшего развития существующих методов структурного и параметрического синтеза разрядных цепей высоковольтных импульсных устройств на базе емкостных накопителей энергии, которые проведены на основе теоретических и экспериментальных исследований различных схемных решений испытательных устройств при формировании ими импульсов тока и напряжений, описываемых различными способами, с учетом практической направленности процедуры синтеза и оптимальности схемного решения.

В работе сформулирован комплекс основных принципов синтеза разрядных цепей высоковольтных импульсных устройств, сооружаемых с использованием ем-

костных накопителей энергии. Предложен метод структурного синтеза их разрядных цепей, базирующийся на символьной формализации описания структуры разрядной цепи и формируемых импульсов тока и напряжений, разработаны банки данных, позволяющие производить структурный синтез. Развита методика параметрического синтеза разрядной цепи высоковольтных импульсных устройств при задании импульса контролируруемыми амплитудно-временными параметрами и аналитическим выражением. Разработаны методы аппроксимации импульсов тока и напряжения на базе случайного поиска глобального экстремума; определения допусков параметров элементов одноконтурного высоковольтного импульсного устройства; определения показателей параметрической надежности с помощью числовых характеристик распределения контролируемых амплитудно-временных параметров импульса.

Получил дальнейшее развитие метод синтеза разрядной цепи одноконтурных высоковольтных импульсных устройств методом безразмерных аналогов, который обеспечивает выбор эквивалентных параметров разрядной цепи при любых наборах амплитудно-временных параметров формируемого импульса тока. Усовершенствован метод формирующего двухполюсника для синтеза разрядной цепи высоковольтных импульсных устройств при аналитическом задании импульса тока. Исследована параллельная работа двух емкостных накопителей энергии на общую RL -нагрузку, установлены области изменения соотношений между параметрами схемы разрядной цепи, внутри которых импульс тока в нагрузке имеет одну из характерных форм. Построены математические модели границ областей. Установлена аналитическая связь коэффициентов операторного изображения импульса тока с параметрами схемы разрядной цепи параллельной работы двух емкостных накопителей энергии на общую RL -нагрузку. Предложен метод базовой схемы для синтеза разрядной цепи высоковольтного импульсного устройства, формирующего на емкостной нагрузке импульс напряжения.

Исследовано влияние параметров вольт-временной характеристики коммутатора на переходные процессы в разрядной цепи емкостных накопителей энергии. Экспериментально получены динамические вольт-амперные характеристики нелинейных резисторов. Получена взаимосвязь параметров модели нелинейного резистора, обеспечивающая корректность расчетов переходных процессов в испытательных схемах. Предложен метод компенсации нелинейности для выбора параметров элементов разрядной цепи высоковольтных импульсных устройств, содержащей компонент с нелинейной вольт-амперной характеристикой.

Усовершенствован метод расчета программируемой коммутации емкостных накопителей энергии, основанный на аналитическом исследовании переходных процессов в последовательной RLC -цепи при начальных значениях тока и напряжения на элементах отличных от нуля. Выведены аналитические соотношения для расчета импульса тока в активно-индуктивной нагрузке при программируемом разряде на нее подобных емкостных накопителей энергии. Предложен метод огибающей точек максимальных значений, основанный на том, что заданная форма импульса тока в нагрузке (или его участка) представляется геометрическим местом точек максимальных значений действительного разрядного тока, протекающего в нагрузке после подключения k -го емкостного накопителя энергии. Показана воз-

возможность формирования нарастающих участков огибающей и ее прямолинейных участков, параллельных оси времени. Обоснована возможность оперативного регулирования формы импульса тока изменением напряжения зарядки и количества емкостных накопителей энергии, подключаемых к нагрузке. Для варианта формирования линейно нарастающего импульса тока получены соотношения, определяющие его максимальное значение и время достижения максимального значения. Для варианта формирования импульса тока с квазипостоянной вершиной получены соотношения для определения характерных амплитудно-временных параметров. Обоснована возможность синтеза программы коммутации программируемого разряда емкостных накопителей энергии на нелинейную нагрузку путем ее преобразования к параметрическому виду.

Разработан метод синтеза разрядной цепи емкостных накопителей энергии при нечетком задании контролируемых амплитудно-временных параметров импульса тока и интеграла действия тока (или заряда). Выведены соотношения, связывающие амплитудно-временных параметров, интеграл действия тока (заряд) и параметры аналитического описания импульса тока. Получены соотношения, определяющие границы изменения временных параметров в зависимости от интеграла действия тока (или заряда) и максимального значения тока импульса. Получены соотношения для выбора параметров разрядной цепи высоковольтных импульсных устройств в специальных вариантах формирования импульсов тока и напряжения, сопровождающих грозовую деятельность.

Ключевые слова: генератор, большие импульсные токи, высокое напряжение, имитатор, емкостный накопитель энергии, нормирование формы импульса, разрядная цепь, синтез.

Мейер