

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Петков Олександр Олександрович

УДК 621.313:62.192

**УДОСКОНАЛЕННЯ РОЗРЯДНИХ КІЛ ГЕНЕРАТОРІВ ВЕЛИКИХ
ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ З УРАХУВАННЯМ КРИТЕРІЇВ ЇХ НАДІЙНОСТІ**

Спеціальність 05.09.13 – Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2004

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Нескородов Геннадій Федорович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
доцент кафедри інженерної електрофізики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кононов Борис Тимофійович,
Харківський військовий університет
Міністерства оборони України,
професор кафедри електропостачання;

кандидат технічних наук
Жекул Василь Григорович
Інститут імпульсних процесів і технологій
Національної академії наук України, м. Миколаїв,
старший науковий співробітник.

Провідна установа Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ

Захист відбудеться "07" жовтня 2004 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 "04" вересня 2004 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Марков В.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом, поряд із традиційними галузями застосування генераторів великих імпульсів струму (ГВІС), посилено розширюється їхнє використання в випробувальних комплексах, які призначені для створення різних впливів, зв'язаних із протіканням імпульсів струму. Це в першу чергу зв'язано з розвитком аерокосмічної техніки і забезпеченням її безпечної експлуатації; перевіркою працездатності технологічної апаратури, яка забезпечує життєдіяльність великих промислових центрів і об'єктів підвищеної екологічної небезпеки; необхідністю контролю працездатності промислової і побутової техніки, а також мікропроцесорних пристроїв, функціонування яких критичне до впливу на них електромагнітних факторів, які виникають у результаті електромагнітних проявів природних процесів і штучних процесів, викликаних діяльністю людини.

У перерахованих галузях найбільш широке поширення отримали ГВІС, які формують імпульси струму з тривалістю фронту від 10^{-7} с до 10^{-5} с, тривалістю імпульсу від 10^{-5} с до 10^{-2} с і амплітудою від одиниць до сотень кілоампер. Постійне розширення сфери застосування ГВІС і діапазону характеристик імпульсів струму, які генеруються за допомогою ГВІС, визначає зростаючий інтерес до питань їхньої надійності, що, у загальному випадку, полягає в забезпеченні генерування імпульсу струму з необхідними характеристиками протягом усього терміну служби ГВІС. Недостатня надійність ГВІС має ряд наслідків при їхньому застосуванні. З огляду на специфіку використання ГВІС у якості основних можна виділити наступні наслідки: обмеження областей застосування ГВІС; зниження ефективності наукових досліджень і ефективності застосування нових прогресивних технологій і випробувань; уповільнення темпів реалізації нових технічних ідей.

Відмова ГВІС в випробувальних комплексах приводить до: порушення працездатності справних об'єктів; визнання несправних об'єктів придатними до експлуатації, повного зриву експериментів при комплексних багатofакторних випробуваннях складних об'єктів, що в цілому призводить до зростання матеріальних і часових витрат на проведення випробувань і експериментів.

Результати налагодження і дослідної експлуатації показують, що більш ніж 50% усіх відмов ГВІС зв'язані з такими функціональними блоками як батарея накопичувальних конденсаторів і блоки формуючих компонентів, які входять до складу розрядного кола ГВІС.

Оптимальне проектування зазначених функціональних блоків розрядного кола дозволить підвищити працездатність ГВІС у цілому. Одним з основних інструментів проектування ГВІС є математичні моделі розрядних кіл, і від їхньої повноти залежить якість проектних рішень.

Аналіз публікацій, зв'язаних із предметом досліджень, свідчить, що в даний час не розроблені на достатньому ступені питання, зв'язані зі зміною працездатності ГВІС і забезпеченням ста-

більності характеристик імпульсів струму в процесі ек-

плуатації: питання зміни параметрів функціональних блоків розрядного кола ГВІС у процесі експлуатації; питання моделювання параметричної надійності розрядного кола ГВІС у процесі експлуатації; питання оптимізації розрядного кола ГВІС за критеріями надійності.

Описаними обставинами і визначається актуальність обраної теми, яка підсилюється ще тим, що входження України в міжнародні торгові організації викликає необхідність сертифікації електронної і електротехнічної продукції, яка поставляється на зовнішній ринок, що не можливо без модернізації існуючих і створення нових випробувальних комплексів, які включають у себе ГВІС.

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" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" по госпдоговірній і бюджетній тематиці.

Теоретичні розробки були використані при виконанні держбюджетної теми Міністерства освіти і науки України, реєстраційний номер 0198U000359 "Комплекс устаткування і методика для нового методу діагностики будь-яких видів пристроїв, що заземлюють" (1998 - 2000 р.р.). При виконанні роботи безпосередньо здобувачем виконано: обґрунтування надійності устаткування комплексу; вибір методики й аналіз результатів польових випробувань устаткування комплексу.

Теоретичні розробки й експериментальні дослідження, наведені в дисертаційній роботі, були використані при проектуванні ряду установок, спорудження яких передбачалося вказівками директивних органів колишнього СРСР відповідно до договорів: "Разработка, исследования и шеф-монтаж и наладка стендов емкостных накопителей энергии №1 и №2" (1981 - 1988 р.р.), "Разработка, исследование, шеф-монтаж и ввод в эксплуатацию комплекса установок "Эфес"" (1983 – 1992 р.р.), а також госпдоговірними темами: "Разработка, изготовление, шеф-монтаж и наладка установок для испытания единичных нелинейных рабочих резисторов" (1996 р.) и "Разработка технического проекта "Испытательные установки для комплектования высоковольтной лаборатории" (2003 р.) та при модернізації установок випробувальної бази НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ", визнаної національним надбанням. При виконанні робіт з цих договорів безпосередньо здобувачем виконано: обґрунтування надійності експлуатації компонентів, встановлених у розрядних колах установок.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка удосконалених моделей функціонування розрядних кіл ГВІС з урахуванням критеріїв їх надійності.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні основні задачі:

1. Розробка деградаційних моделей вихідних параметрів функціональних блоків, що входять у розрядне коло, які враховують надійність вхідних компонентів, схему їхнього з'єднання, спосіб організації процесу експлуатації.

2. Розробка методики аналізу параметричної надійності розрядного кола ГВІС і проведення дослідження взаємозв'язку статистичного розподілу вхідних параметрів елементів розрядного кола і вихідних параметрів імпульсу струму, який формується за допомогою ГВІС.

3. Побудова деградаційних моделей параметрів компонентів розрядного кола в специфічних режимах, характерних для експлуатації ГВІС.

4. Розробка процедури оптимізації розрядного кола ГВІС при критеріях відмов типу "відмова компонента" і "ухил параметра".

Об'єкт дослідження – генератори великих імпульсів струму на базі ємнісних накопичувачів енергії.

Предмет дослідження – здатність розрядного кола ГВІС з багатокомпонентними функціональними блоками формувати, з обумовленою надійністю протягом зазначеного періоду експлуатації, імпульс струму з вихідними параметрами, заданими у визначених межах, при мінімальній кількості встановлених компонентів.

Методи досліджень. Перехідні процеси в схемах розрядного кола ГВІС досліджувалися методами теорії електричних кіл при використанні чисельних методів рішення диференціальних рівнянь. Розробка і дослідження деградаційних моделей проводилася з використанням методів теорії імовірностей: апарата числових характеристик розподілу випадкових величин і лінеаризації функцій випадкових величин. При дослідженні працездатності розрядного кола ГВІС і її оптимізації – методи теорії надійності, методи статистичного моделювання і методи пошуку екстремумів функцій. При розробці моделей компонентів розрядного кола – експериментальні методи техніки високих напруг, статистичні методи обробки даних, метод найменших квадратів.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі теоретичних і експериментальних досліджень з використанням критеріїв надійності типових компонентів (конденсаторів, резисторів, котушок індуктивності) розрядних кіл ГВІС удосконалена їхня структура, яка визначається кількістю і способом з'єднання компонентів, з метою стабілізації вихідних амплітудно-часових характеристик імпульсу струму в наперед заданих границях протягом необхідного періоду експлуатації.

У результаті реалізації такого підходу для удосконалення розрядних кіл ГВІС отримані:

- аналітичні вирази числових характеристик розподілу параметрів функціональних блоків, особливістю яких є можливість урахування ресурсних характеристик компонентів і способу проведення заміни компонентів;

- аналітичні вирази числових характеристик розподілу вихідних параметрів імпульсу струму (тривалості фронту й імпульсу, амплітуди, інтегралу дії та заряду) для схеми ГВІС типу RLC, які дозволяють враховувати числові характеристики розподілів параметрів функціональних блоків розрядного кола;

- встановлений кількісний зв'язок між імовірністю безвідмовної роботи, відхиленнями вхідних (параметри компонентів) і вихідних параметрів ГВІС (параметри

імпульсу струму), що дозволяє прогнозувати надійність ГВІС у процесі експлуатації;

- отримані аналітичні співвідношення для вибору оптимальної кількості конденсаторів, встановлюваних у батарею накопичувальних конденсаторів, які відрізняються тим, що забезпечують, при заданому рівні надійності, вибір мінімальної кількості конденсаторів необхідних на весь період експлуатації ГВІС.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено методику моделювання параметричної надійності розрядного кола ГВІС, яка дозволяє визначати терміни проведення профілактичних і ремонтних робіт, необхідних для підтримки ГВІС у працездатному стані в продовж заданого періоду експлуатації.

Розроблено програму чисельного розрахунку на ЕОМ числових характеристик розподілу вихідних параметрів імпульсу струму для схем подвійний ГВІС, і ГВІС із блоком загострення, використання якої дозволяє знизити витрати на проектування.

Отримано номограму для визначення мінімальної кількості послідовно включених накопичувальних конденсаторів ГВІС з урахуванням їх ймовірнісних характеристик.

Визначена мінімальна кількість конденсаторів (20 одиниць), яка дозволяє отримати достовірні результати з розрахунку параметричних характеристик конденсаторної батареї.

Отримано експериментальні залежності зміни основних параметрів найбільш часто застосовуваних на практиці компонентів (резисторів, конденсаторів) від кількості циклів розряду в не типових режимах експлуатації.

Сформований банк даних випробувань і експлуатації компонентів (більш ніж $9 \cdot 10^3$ компонентів, загальний наробіток більш ніж $1 \cdot 10^8$ циклів навантаження), запропонована методика моделювання показників надійності компонентів за даними банку.

Запропоновано класифікацію режимів експлуатації ГВІС у залежності від вимог до надійності формування імпульсу струму і критеріїв відмови ГВІС; розроблено методику визначення показників надійності в цих режимах.

Результати дисертаційної роботи були використані при виконанні робіт з наступних тем: "Комплекс устаткування і методика для нового методу діагностики будь-яких видів пристроїв, що заземлюють" (план наукових робіт МОН України); "Разработка, исследования и шеф-монтаж и наладка стендов емкостных накопителей энергии №1 и №2" (Военный инженерно-технический университет, м. Санкт-Петербург); "Разработка, исследование, шеф-монтаж и ввод в эксплуатацию комплекса установок "Эфес""; (Научно-исследовательский центр 26 ЦНИИ МО РФ, м. Санкт-Петербург); "Разработка, изготовление, шеф-монтаж и наладка установок для испытания единичных нелинейных рабочих резисторов" (Научно-дослідний інститут високих напруг, м. Слов'янськ); "Разработка технического проекта "Испытательные установки для комплектования высоковольтной лабораторий" (ТОВ НВП "ES

Полімер", м. Артемівськ) та при модернізації випробувальних установок експериментальної бази НДПКІ "Молнія" (НТУ "ХПІ", м. Харків).

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

- побудовані деградаційні моделі вихідних параметрів функціональних блоків розрядного кола ГВІС, які враховують вплив схеми з'єднання компонентів, зміни величини параметрів компонентів і ступінь безвідмовності їхньої роботи в процесі експлуатації, а також спосіб організації процесу експлуатації;

- проведена класифікація режимів роботи ГВІС у залежності від вимог до надійності формування імпульсу струму і критеріїв відмов ГВІС;

- виведені формули для вибору оптимальної кількості конденсаторів, встановлюваних у батареї накопичувальних конденсаторів, що забезпечує, при заданому рівні надійності, мінімальна кількість конденсаторів, необхідних для забезпечення працездатності ГВІС протягом усього терміну служби;

- розроблений алгоритм моделювання показників надійності компонентів, які входять у розрядне коло ГВІС, за даними банку результатів випробувань і експлуатації.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися й обговорювалися на:

Всесоюзній науково-технічній конференції "Создание комплексов электроэнергетического оборудования высоковольтной, преобразовательной, силовоточной и полупроводниковой техники", м. Москва, 1989р.

Всесоюзній науково-технічній конференції "Вопросы обеспечения стойкости радиоэлектронных средств к воздействию электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения", м. Харків, 1991р.

Міжнародних науково-технічних конференціях "Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве", м. Харків, 2001, 2002 р.

Науково-технічних нарадах НДПКІ "Молнія" і кафедрі інженерної електрофізики НТУ "ХПІ", м. Харків, 1995 - 2004 рр.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 9 наукових статтях, серед яких 7 – особисто, 2 - у співавторстві. З них 4 - у спеціалізованих наукових журналах, 3 – у спеціалізованих збірниках наукових праць, 1 – у працях науково - технічних конференцій, 1 – депонована.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи складає 205 сторінок, 22 ілюстрації по тексту і 24 ілюстрацій на 22 сторінках, 13 таблиць по тексту і 6 таблиць на 7 сторінках, 104 найменування літературних джерел на 12 сторінках, 6 додатків на 38 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, зазначений її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовані мета і задачі досліджень, показані наукова новизна і практичні результати, отримані в роботі.

У першому розділі проведено огляд, аналіз і класифікація математичних моделей функціонування розрядного кола ГВІС - залежностей, що відбивають причинно-наслідкові зв'язки в розрядному колі в процесі перетворення енергії електричного поля, що запасється в батареї накопичувальних конденсаторів, виражені у виді математичних співвідношень, графічних об'єктів і наборів числових даних.

Аналіз показав доцільність проведення класифікації моделей по трьох ознаках, що характеризує процес функціонування розрядного кола ГВІС: об'єктам моделювання (вихідні параметри імпульсу струму, перехідні процеси в розрядному колі, елементи розрядного кола ГВІС, функціональні блоки розрядного кола, компоненти розрядного кола ГВІС), ступеня деталізації процесів моделювання (детерміновані моделі, статистичні моделі, деградаційні моделі, стохастичні моделі) і галузям використання моделей (рішення прямої задачі, рішення зворотної задачі, рішення оптимізаційної задачі).

Проведено аналіз етапів розробки і взаємозв'язку математичних моделей функціонування розрядного кола ГВІС.

Приведено результати аналізу відмов у структурі ГВІС, проведеного за результатами налагодження і дослідної експлуатації 18 найбільш великих високовольтних випробувальних комплексів і окремих ГВІС, розроблених у науково-дослідному і проектно-конструкторському інституті "Молнія" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Показано, що більш ніж 50% усіх відмов ГВІС (52% - раптових і 55% - параметричних) приходиться на батарею накопичувальних конденсаторів і блоки формуючих компонентів, що входять до складу розрядного кола ГВІС. Проведений аналіз стану питання дозволив сформулювати мету роботи і поставити задачі дослідження.

В другому розділі розроблені деградаційні моделі вихідних параметрів функціональних блоків розрядного кола ГВІС з великою енергією, що складається з ряду функціональних блоків (рис. 1), кожний з яких містить велику кількість однотипних компонентів.

Дискретний режим функціонування розрядного кола ГВІС і особливості відмов компонентів приводять до ситуації коли, незважаючи на відмову окремих компонентів, функціональні блоки на момент генерування наступного імпульсу струму є фізично справними пристроями, але з можливо зміненими вихідними параметрами. Зміна вихідних параметрів у процесі експлуатації описується деградаційними моделями – сукупністю математичних співвідношень, які визначають зміну розподілу величин параметрів функціональних блоків у залежності від схеми з'єднання

компонентів, зміни величин параметрів компонентів, ступеня безвідмовності їхньої роботи в процесі експлуатації і способу організації процесу експлуатації.

У загальному випадку кожен функціональний блок має набір вихідних параметрів аналогічних, електричним властивостям, які проявляються компонентами при протіканні імпульсу струму – активним опором, індуктивністю і ємністю. Відповідно був розроблений ряд деградаційних моделей вихідних параметрів функціональних блоків у виді аналітичних виразів

Рис. 1. Структурна схема розрядного кола ГВІС.

БНК – батарея накопичувальних конденсаторів. СК – система комутації.

БФК – блок формуючих компонентів (резисторів, котушок індуктивності, конденсаторів). СЭ – система енергопроводов. К – колектор. Н – навантаження.

$$M[VP_{FB}(N_k)] = \varphi\{n_0, M[VP_1(N_k)], \theta_Z, \theta_S, \theta_E\}, \quad (1)$$

$$D[VP_{FB}(N_k)] = \psi\{n_0, M[VP_1(N_k)], D[VP_1(N_k)], \theta_Z, \theta_S, \theta_E\}, \quad (2)$$

де $M[VP_{FB}(N_k)], D[VP_{FB}(N_k)]$ – відповідно, математичне очікування (МО) і дисперсія вихідного параметра функціонального блоку;

$VP_{FB}(N_k), VP_1(N_k)$ – відповідно вихідний параметр функціонального блоку і компонента (активний опір, індуктивність, ємність);

N_k – кількість відпрацьованих циклів навантажень функціонального блоку на k -ом інтервалі експлуатації;

$M[VP_1(N_k)], D[VP_1(N_k)]$ - відповідно, МО і дисперсія вихідного параметра компонентів, які входять до складу функціонального блоку;

n_0 – загальна кількість компонентів у функціональному блоці;

θ_Z – параметр, що враховує закон розподілу відмов компонентів;

θ_S – параметр, що враховує схему з'єднання компонентів;

θ_E – параметр, що враховує спосіб організації процесу експлуатації.

Моделі виду (1) і (2) розроблені для варіанта відмов компонентів, що підкоряються експонентному розподілу і розподілу Вейбулла. Для обліку інших видів розподілу відмов компонентів запропонована загальна методика. Деградаційні моделі враховують спосіб організації процесу експлуатації, що складається з декількох етапів, на кожному з яких відпрацьовується визначена кількість циклів навантажень без проведення ремонтних робіт. Після закінчення етапу проводиться заміна компонентів, які відмовили. Даний сценарій процесу експлуатації є найбільш загальним і, варіювання кількості етапів і їхньої тривалості, дозволяє одержати всі можливі способи організації процесу експлуатації з обраної області.

У третьому розділі досліджена працездатність розрядного кола ГВІС. Описано загальну характеристику методики дослідження працездатності розрядного кола ГВІС за допомогою функції параметричної надійності, що відбиває імовірність того, що значення набору вихідних параметрів імпульсу струму по завершенню деякого часу експлуатації знаходяться у визначеному діапазоні.

Основними нормованими параметрами імпульсів струму, використовуваних при випробуванні устаткування, а також у технологічних і наукових цілях, є (варіанти імпульсів аперіодичної і коливальної форми приведені на рис. 2) I_{max} - максимальне значення струму в імпульсі, $di(t_0)/dt$ - похідна струму в момент t_0 .

а

б

Рис. 2. Параметри імпульсу струму аперіодичної (а) і коливальної форми (б).

Для імпульсу струму аперіодичної форми, додатково до описаного вище, найчастіше нормують: t_n - тривалість імпульсу і t_f - тривалість фронту імпульсу (варіант визначення див. рис. 2а); для імпульсу струму коливальної форми - ω - частоту коливань або T - період коливань (див. рис. 2б) і ступінь загасання коливань, який визначається по відношенню максимальних значень струму напівхвиль, зміщених на період. Нормують також інтегральні характеристики імпульсу струму: Q - заряд, який переноситься імпульсом струму та id - інтеграла дії.

Для дослідження параметричної надійності була розроблена загальна методика визначення числових характеристик розподілу вихідних параметрів імпульсу струму, а для розрядного кола типу RLC , яке найбільш часто зустрічається на практиці, побудовані моделі числових характеристик розподілу вихідних параметрів імпульсу струму:

$$M[VPI] = F\{M[R], M[L], M[C], M[U], D[R], D[L], D[C], D[U]\}, \quad (3)$$

$$D[VPI] = \Phi\{M[R], M[L], M[C], M[U], D[R], D[L], D[C], D[U]\}, \quad (4)$$

де $M[VPI], D[VPI]$ - відповідно МО і дисперсія вихідних параметрів імпульсу струму ($I_{\max}, t_n, t_f, Q, id$);

$M[R], M[L], M[C], M[U], D[R], D[L], D[C], D[U]$ - відповідно МО і дисперсія вихідних параметрів функціональних блоків (активного опору, індуктивності, ємності і зарядної напруги).

Дослідження працездатності розрядного кола ГВІС показало, що взаємозв'язок імовірності безвідмовної роботи розрядного кола в залежності від допусків на вхідні і вихідні параметри має вигляд, представлений на рис. 3а, а її зміна в процесі експлуатації – на рис. 3б.

а

б

Рис. 3. Залежність імовірності безвідмовної роботи від відхилень вхідних і вихідних параметрів (а) і її зміни в процесі експлуатації (б) за рахунок відмов накопичувальних конденсаторів.

Δ - відносне відхилення вхідних параметрів елементів; δ - відхилення вихідних параметрів імпульсу струму; 1 - $\Delta = 10\%$, $\delta = 10\%$; 2 - $\Delta = 10\%$,

$\delta = 15\%$; 3 - $\Delta = 15\%$, $\delta = 15\%$; 4 - $\Delta = 15\%$, $\delta = 20\%$; λ - інтенсивність відмов конденсаторів (1/імпульс); N – наробіток (імпульсів).

Аналіз показує, що допуски на вхідні величини при імовірності безвідмовної роботи не перевищуючої величини 0,9 можуть бути обрані рівними допускам на вихідні параметри імпульсу струму. При необхідній імовірності безвідмовної роботи рівної 0,95 допуски на вхідні параметри функціональних блоків розрядного кола належні бути

зменшені в 1,2...1,3 рази в порівнянні з допусками на вихідні параметри імпульсу струму, а при імовірності безвідмовної роботи рівної 0,99 – у 1,7...2,1 рази. Якщо нормативні допуски на компоненти, використовувані в розрядному колі ГВІС, більше необхідних допусків на параметри імпульсу струму, то забезпечення параметричної надійності ГВІС у цьому випадку може бути зроблене шляхом фільтрації компонентів при вхідному контролі, що, природно, збільшує обсяг постачання компонентів. Розрахунки показують, що зменшення допуску в 1...2,1 рази спричиняє збільшення обсягу постачання компонентів у діапазоні в 1...1,2 рази. Зменшити обсяг постачання компонентів дозволяє індивідуальне настроювання функціональних блоків.

У четвертому розділі приведені результати оптимізації розрядного кола ГВІС з урахуванням критеріїв їхньої надійності.

Проблема оптимізації ГВІС з урахуванням критеріїв надійності сформульована в плані вибору значень параметрів багатокомпонентних функціональних блоків, які входять до розрядного кола: оптимальної кількості компонентів і схеми їх з'єднання. Метою оптимізації було забезпечення необхідного рівня надійності ГВІС при одночасній мінімізації витрат на його спорудження й експлуатацію. У розгляді вважалось, що розрядне коло оптимальне, якщо виконано оптимально кожен вхідний у неї функціональний блок. В якості показника витрат приймалася кількість компонентів функціональних блоків розрядного кола ГВІС, що обумовлено визначальним впливом кількості компонентів на інші вартісні показники спорудження й експлуатації ГВІС.

Усі режими роботи ГВІС були класифіковані відповідно до категорії відновлюємості: розрядне коло розглядалось як відновлюємий об'єкт і невідновлюємий об'єкт, і видам відмов: "відмова компонента" і "ухил параметра". Оптимізація була проведена для різних режимів роботи ГВІС відповідно до запропонованої класифікації.

Для ГВІС, що по роду свого використання є невідновлюємым об'єктом і критерії відмов ГВІС типу "відмова компонентів", вимоги до надійності кожного функціонального блоку мають вигляд

$$\lambda_T \geq \lambda_{ФБ} = F\{\lambda_1, n, P_{ФБ}, P_1, U, U_H, I, I_H\}, \quad (5)$$

де λ_T – необхідна інтенсивність відмов ГВІС;

$\lambda_{ФБ}$ – інтенсивність відмов функціонального блоку при заданому режимі експлуатації;

λ_1 – інтенсивність відмов компонентів при заданій формі імпульсу струму, що протікає;

n – кількість послідовно з'єднаних компонентів;

$P_{ФБ}, P_1$ – величина вихідного параметра відповідно функціонального блоку і компонента;

U, U_H – відповідно максимальна напруга на виводах функціонального блоку і номінальне значення напруги на компоненті;

I , I_H - відповідно максимальне значення струму, що протікає через функціональний блок і номінальне значення струму, що протікає через компонент.

Найменше ціле " n ", яке задовольняє нелінійному рівнянню (5) визначає мінімальну кількість компонентів S_U , встановлюваних у функціональному блоці, яка забезпечує необхідний рівень надійності. У загальному випадку рішення (5) проводиться чисельними методами, але для ряду варіантів функціональних залежностей розподілу відмов компонентів можливо аналітичне рішення і, зокрема, для блоків накопичувальних і формуючих конденсаторів.

Для ГВІС, що є відновлюємым об'єктом при критерії відмов ГВІС типу "відмова компонентів" і варіанту заміни компонентів, які відмовили, відразу після відмови, розглянута задача про оптимальну кількість установлених компонентів - S_U , які забезпечують (з урахуванням замін S_3) вихідні параметри функціонального блоку і найменшу кількість компонентів за весь період експлуатації - $S_\Sigma = S_U + S_3$. Аналіз показав, що при визначених співвідношеннях вхідних величин, S_Σ має мінімальне значення (рис. 4а крива S_Σ).

а

б

Рис. 4. Зміна характеристик оптимізації функціонального блоку при його розгляді як відновлюємого об'єкта.

Ціле " n ", найближче до n_{min} , забезпечує мінімальну кількість компонентів, необхідних для підтримки функціонального блоку в працездатному стані протягом усього періоду експлуатації, а " n ", обчислюване з (5), забезпечує необхідну надійність (інтенсивність відмов – рис. 4а крива $\lambda_{ФБ}$).

На практиці можливі наступні варіанти (рис. 4а):

1. необхідна інтенсивність відмов $\lambda_{T1} > \lambda_{ФБmin}$, у цьому випадку доцільно "завищити" надійність функціонального блоку (тобто доцільно прийняти $n = n_{min}$), що дозволить зменшити кількість компонентів, необхідних на весь період експлуатації;

2. необхідна інтенсивність відмов $\lambda_{T2} < \lambda_{ФБmin}$, у цьому випадку кількість послідовно з'єднаних компонентів визначається за рішенням (5), тобто $n = n_2$.

Для батареї накопичувальних і формуючих конденсаторів було отримано аналітичний вираз для кількості послідовно з'єднаних конденсаторів, які доставляють мінімум S_{Σ} .

Для розрядного кола ГВІС при критерію відмов типу "ухил параметра", виходячи з граничного припустимого зменшення ємності була визначена мінімальна кількість послідовно з'єднаних конденсаторів у функціональному блоці n^* , що забезпечує необхідний рівень надійності, і мінімальна кількість послідовно з'єднаних конденсаторів n^{**} , яка забезпечує мінімальну сумарну кількість конденсаторів за весь період експлуатації ГВІС.

На рис. 4б наведені характерні криві зміни n^* і n^{**} у залежності від величини зменшення ємності

$$\delta = 100 \{M[C_B] - C_H\} / M[C_B] \%, \quad (6)$$

де $M[C_B]$ – МО ємності батареї конденсаторів;

C_H – нижнє значення ємності батареї накопичувальних конденсаторів.

Як видно з графіків:

- при $\delta < \delta^*$ число послідовно з'єднаних конденсаторів варто вибирати виходячи з величини n^* , при цьому забезпечується необхідний рівень надійності батареї накопичувальних конденсаторів;

- при $\delta > \delta^*$ число послідовно з'єднаних конденсаторів варто вибирати виходячи з величини n^{**} , при цьому забезпечується як необхідний рівень надійності, так і умова мінімальності сумарної кількості конденсаторів, необхідних на весь період експлуатації;

- при $\delta = \delta^*$ виконуються обидві умови, що дозволяє при проектуванні батареї конденсаторів призначати раціональні допуски на зміни ємності батареї накопичувальних конденсаторів.

У п'ятому розділі викладені результати експериментальних досліджень працездатності ряду компонентів розрядного кола ГВІС. Запропоновані деградаційні моделі зміни вихідних параметрів компонентів.

Досліджено працездатність об'ємних резисторів в імпульсних режимах роботи. Визначено граничні режими експлуатації резисторів типу ТВО-10.

Досліджено вплив енергії, яка виділяється, на характер відмовлень резисторів. Визначено показники надійності в імпульсних режимах експлуатації.

Досліджено працездатність комбінованих конденсаторів з металізованими обкладинками в коливальних режимах експлуатації. Показано, що конденсатори К75-40а при наробітку до $1 \cdot 10^4$ циклів заряд-розряд допускають надійну роботу в коливальних режимах. Експериментально встановлений взаємозв'язок енергії, що виділяється при пробі, і ступеня руйнування корпусу конденсатора (див. рис. 6 і табл. 1).

а б в

Рис. 6. Види руйнування конденсаторів.

а – деформування і розгерметизація корпусу; б – руйнування корпусу;

в – руйнування корпусу з загорянням пакета.

Таблиця 1 -

Імовірність руйнування корпусу конденсатора К75-40а

Вид руйнування, величина енергії, що виділяється при пробі	Границі імовірності	
	Рн	Рв
Деформування і розгерметизація корпусу при $W \geq 5,5$ кДж	0,78	0,95
Руйнування корпусу з динамічним впливом на сусідні компоненти при $W \geq 5,5$ кДж	0,16	0,48
Загоряння зруйнованого конденсатора при $W \geq 5,5$ кДж	0,28	0,58
Загоряння зруйнованого конденсатора при $W \geq 7,8$ кДж	0,35	0,78

Досліджено статистичний розподіл основних вихідних параметрів компонентів розрядного кола (8-ми типів високовольтних імпульсних конденсаторів і 3-х типів резисторів), побудовані моделі числових характеристик розподілу основних параметрів.

Сформовано банк даних результатів випробувань і експлуатації (обсягом більш ніж $1 \cdot 10^8$ компонент-циклів навантаження). Розроблено методику визначення зміни показників надійності компонентів при використанні банку даних.

ВИСНОВКИ

Дисертації містить результати удосконалення моделей функціонування розрядного кола ГВІС, досягнутого за рахунок розробки на основі теоретичних і експериментальних досліджень нових математичних моделей усіх рівнів ієрархічної структури розрядного кола: статистичних моделей компонентів, що входять у функціональні блоки розрядного кола; деградаційних моделей функціональних блоків; оптимізаційних моделей розрядного кола в цілому. Рішення поставленої задачі забезпечує сучасний рівень процесу проектування і дозволяє створювати більш досконалі ГВІС і випробувальні комплекси на їхній базі.

У дисертаційній роботі:

1. Запропоновано методику визначення числових характеристик розподілу вихідних параметрів функціональних блоків. Розроблені деградаційні моделі, що враховують схему з'єднання компонентів, зміну величини параметрів компонентів і ступеня їхньої безвідмовності в процесі експлуатації, спосіб організації процесу експлуатації. Запропоновано класифікацію видів відмов блоків формуючих компонентів у залежності від виду відмов одиничних компонентів і схем їхнього з'єднання. Показано, що для практичних цілей (похибка менш ніж 10%) співвідношення для визначення числових характеристик розподілу ємності батареї справедливі при кількості конденсаторів у ній $n \geq 20$.

2. Запропоновано методику дослідження працездатності розрядного кола генератора імпульсів струму з використанням апарата числових характеристик параметричного розподілу величин параметрів елементів.

Досліджено параметричну надійність розрядного кола ГВІС, встановлено зв'язок між імовірністю безвідмовної роботи, відхиленнями вхідних параметрів елементів розрядного кола і відхиленнями вихідних параметрів імпульсу струму. Показано, що для забезпечення імовірності безвідмовної роботи, яка не перевищує величини 0,90, допуски на вхідні параметри елементів розрядного кола можуть бути прийняті рівними допускам на вихідні параметри імпульсу струму; для забезпечення імовірності безвідмовної роботи на рівні 0,95 допуски на вхідні параметри елементів розрядного кола повинні бути зменшені в 1,2...1,3 рази порівняно з допусками на вихідні параметри імпульсу струму, а при імовірності безвідмовної роботи на рівні 0,99 – в 1,7...2,1 рази.

Обґрунтовано необхідність індивідуального регулювання функціональних блоків розрядного кола в разі високих вимог що до безвідмовної роботи потужних ГВІС. Показано, що індивідуальне регулювання дозволяє зменшити постачання кількості компонентів у 1,2 рази.

3. Запропоновано методику оптимізації розрядного кола генератора імпульсів струму, що дозволяє мінімізувати витрати на спорудження й експлуатацію генератора імпульсів струму при заданому рівні надійності, відповідно до критеріїв відмов функціональних блоків типу: "відмова компонента" і "ухил параметра". При цьому генератор імпульсів струму розглядається як відновлюємий, так і невідновлюємий об'єкт. Проведено класифікацію режимів роботи ГВІС на основі вимог до моменту генерування імпульсу струму. Приведено зіставлення режимів роботи і категорій відновлюємості ГВІС.

4. Досліджено працездатність об'ємних резисторів в імпульсних режимах роботи, характерних для експлуатації генератора імпульсів струму. Зокрема показано, що для надійної тривалої експлуатації резистори ТВО-10 доцільно використовувати в розрядному колі ГВІС при середній потужності не вище 8,4 Вт, при цьому енергія, яка поглинається за один імпульс не повинна перевищувати 800 Дж. Виконані оцінки показників надійності резисторів у практичних режимах експлуатації.

Досліджено працездатність комбінованих конденсаторів з металізованими обкладинками в імпульсних режимах роботи, характерних для експлуатації генератора імпульсів струму. Показано, що комбіновані конденсатори допускають надійну роботу при коливальному розряді, а їхній пробій відбувається на стадії заряду, що погоджується з даними про пробій конденсаторів з паперово-масляною ізоляцією. Зокрема, конденсатори К75-40а допускають надійну роботу при наробітку до $1 \cdot 10^4$ циклів заряд-розряд і середнє значення імовірності пробою конденсаторів К75-40а на стадії заряду дорівнює 0,95. Експериментально встановлено, що для конденсаторів К75-40а необхідно обмежити енергію, що виділяється у випадку пробою конденсатора, до значень 5,5 кДж.

Сформовано банк результатів випробувань та експлуатації компонентів (обсягом більш ніж $9 \cdot 10^3$ компонентів, загальний наробіток $1 \cdot 10^8$ циклів навантаження). Запропоновано методику моделювання надійності компонентів за даними банку.

5. Наведені в роботі результати були використані при модернізації, розробці, створенні і введенні в експлуатацію ряду генераторів великих імпульсів струму, які входять в випробувальні комплекси (НДПКІ "Молнія" НТУ "ХП", м. Харків; Военный инженерно-технический университет, м. Санкт-Петербург; Научно-исследовательский центр 26 ЦНИИ МО РФ, м. Санкт-Петербург; Науково-дослідний інститут високих напруг, м. Слов'янськ; ТОВ НВП "ES Полімер", м. Артемівськ).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ З ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Петков А.А. Числовые характеристики распределения выходных параметров конденсаторной батареи генератора импульсов тока // Электротехника. - М., 1991. - №5. - С. 53-55.

2. Петков А.А. Учет критериев надежности при выборе количества накопительных конденсаторов в высоковольтном импульсном устройстве // Электротехника. - М., 1992. - №8-9. - С. 24-26.

3. Петков А.А. Расчет параметрической надежности генератора импульсов тока // Электротехника. - М., 1993. - №5. - С. 69-71.

4. Нескородов Г.Ф., Петков А.А. Надежность и режимы работы высоковольтных импульсных устройств // Надежность и контроль качества. - М., 1989. - №12. - С. 36-38.

Здобувачем виконано формулювання взаємозв'язку режимів роботи ГВІС з показниками надійності.

5. Петков А.А. Оценка надежности измерительных комплексов по результатам их безотказной эксплуатации // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". - Харків: НТУ "ХПІ". - 2003. - Т.1, №1. - С. 88 – 91.

6. Петков А.А. Моделирование показателей безотказности элементов разрядной цепи генераторов импульсов тока при внезапных и постепенных отказах // Труды Одесского государственного политехнического университета. – Одесса, - 2001. – Вып. 5. - С. 143 – 147.

7. Петков А.А. Внезапные отказы функциональных блоков разрядной цепи генератора импульсов тока // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства Мінагрополітики України. - Харків, - 2003. - Вип. 18. - С. 169 – 172.

8. Петков А.А. Повышение надежности разрядной цепи генератора импульсов тока // Труды 5-й международной научно-технической конференции "Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве" (28-29 мая 2002 года г. Харьков). – Харьков, - 2002. – С. 728 – 731.

9. Бутко М.В., Колиушко Г.М., Луцкова Л.А., Петков А.А. Исследование надежности резисторов ТВО-10 в импульсных режимах работы. - Харьков: Харьковский политехнический институт, 1989. - 10 с. Деп. в УкрНИИНТИ 04.10.89, №2132-Ук.89.

Здобувачем виконано: розробка дослідної установки, проведення експериментальних досліджень, обробка результатів методами математичної статистики.

Петков А.А. Удосконалення розрядних кіл генераторів великих імпульсних струмів з урахуванням критеріїв їх надійності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.09.13 - техніка сильних електричних і магнітних полів. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2004.

Дисертація присвячена удосконаленню розрядних кіл генераторів великих імпульсних струмів, яке забезпечує формування з необхідною надійністю протягом зазначеного періоду експлуатації імпульсу струму з вихідними параметрами, заданими у визначених границях, при мінімальній кількості встановлених компонентів.

У роботі отримані аналітичні вирази для числових характеристик розподілу вихідних параметрів функціональних блоків і імпульсу струму. Визначено кількісний зв'язок між імовірністю безвідмовної роботи, відхиленнями параметрів компонентів і вихідних параметрів імпульсу струму. Запропоновано співвідношення для вибору оптимальної кількості накопичувальних конденсаторів. Сформовано банк даних випробувань і експлуатації компонентів в імпульсних режимах.

Ключові слова: генератор великих імпульсних струмів, розрядне коло, оптимальна кількість компонентів функціонального блока, математична модель.

Петков А.А. Усовершенствование разрядных цепей генераторов больших импульсных токов с учетом критериев их надежности. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 - техника сильных электрических и магнитных полей. - Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2004.

Диссертация посвящена усовершенствованию разрядных цепей генераторов больших импульсных токов, обеспечивающему формирование с требуемой надежностью в течение необходимого периода эксплуатации импульса тока с выходными параметрами, заданными в определенных границах, при минимальном количестве установленных компонентов.

В работе получены аналитические выражения для числовых характеристик распределения выходных параметров функциональных блоков, которые учитывают как ресурсные характеристики компонентов, так и способ проведения замены отказавших компонентов.

Получены аналитические выражения для числовых характеристик выходных параметров импульса тока, которые учитывают числовые характеристики распределения параметров функциональных блоков разрядной цепи.

Определена количественная связь между вероятностью безотказной работы генератора импульсов тока, отклонениями параметров компонентов и выходных параметров импульса тока. Показано, что для обеспечения вероятности безотказной работы не превышающую величину 0,9, допуски на входные параметры элементов разрядного

контура могут быть приняты равными допускам на выходные параметры импульса тока; для обеспечения вероятности безотказной работы на уровне 0,95 допуски на входные параметры элементов разрядного контура должны быть уменьшены в 1,2...1,3 раза, а при вероятности безотказной работы равной 0,99 в 1,7...2,1 раза.

Предложены соотношения для выбора оптимального количества конденсаторов, устанавливаемых в батарее накопительных конденсаторов, которое обеспечивает при заданном уровне надежности минимальное количество конденсаторов за весь период эксплуатации генератора импульсов тока. Построена номограмма для определения минимального количества последовательно включенных накопительных конденсаторов в разрядной цепи генератора импульсов тока с учетом их вероятностных характеристик.

Обоснована целесообразность индивидуальной настройки функциональных блоков разрядной цепи генератора больших импульсов тока при высоких требованиях к их вероятности безотказной работы. Показано, что индивидуальная настройка в этом случае позволяет снизить количество поставляемых компонентов в 1,2 раза.

По результатам исследования разработана методика моделирования параметрической надежности разрядной цепи генератора больших импульсов тока, которая позволяет определять сроки проведения профилактических и ремонтных работ, необходимых для поддержания генератора импульсов тока в рабочем состоянии в течение заданного периода эксплуатации.

Предложена классификация режимов эксплуатации генераторов больших импульсов тока в зависимости от требований к надежности формирования импульса тока и критериев отказов генераторов больших импульсов тока. Разработана методика определения показателей надежности в этих режимах.

Получены экспериментальные зависимости изменения основных параметров наиболее часто используемых на практике резисторов и конденсаторов от количества циклов разряда в нетипичных режимах эксплуатации. Экспериментальные исследования показали, что конденсаторы с металлизированными допускают работу в колебательном режиме разряда, а пробой конденсаторов с металлизированными обкладками происходит на стадии заряда, что согласуется с данными о пробое конденсаторов с бумажно-масляным диэлектриком.

Сформирован банк данных испытаний и эксплуатации компонентов в импульсных режимах. Банк содержит данные испытаний более чем $9 \cdot 10^3$ компонентов общей наработкой более $1 \cdot 10^8$ циклов нагружения. Разработана методика моделирования надежности компонентов по данным банка.

Ключевые слова: генератор больших импульсных токов, разрядная цепь, оптимальное количество компонентов функционального блока, математическая модель.

Petkov A.A. Improvement of the discharge circuits of the generators of large pulse currents taking into consideration the criteria of their reliability. – Manuscript.

The thesis is for technical science candidate's degree, specialty 05.09.13 – the strong electric and magnetic fields engineering. – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, Kharkov, 2004.

This dissertation is devoted to the improvement of the discharge circuits embedded in the large pulse currents generators allowing thus for generating the current pulses with the output parameters prescribed within the specified bounds with required reliability during the specified period of operation using the minimum number of the installed components.

The analytical expressions used to derive the numerical characteristics of distribution of the output parameters of functional units and current pulse have been given. The quantitative relation between the probability of survival, the deviations in the component parameters and output parameters of the current pulse have been determined. The ratios for selection of the optimal amount of the storage capacitors have been proposed. A data bank of test and component operation in pulsed modes has been formed.

Key words: generator of large pulse currents, discharge circuit, optimal amount of components, mathematical model.

Відповідальний за випуск к.ф.- м.н. Ваврів Л.В.