

Національна академія наук України
Інститут електродинаміки

РОЗІСКУЛОВ СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 6.3.01121

**ВЗАЄМОЗАЛЕЖНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ У КОЛАХ
ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК З КЕРОВАНИМИ
НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ КОМУТАТОРАМИ**

Спеціальність 05.09.05 – теоретична електротехніка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі електроживлення технологічних систем Інституту електродинаміки НАН України, м. Київ.

Науковий керівник: – доктор технічних наук, доцент
Щерба Максим Анатолійович,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського" МОН України,
доцент кафедри теоретичної електротехніки.

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор
Резинкіна Марина Михайлівна,
Національного технічного університету
"Харківський політехнічний інститут" МОН України
завідувачка кафедри теоретичних основ електротехніки;

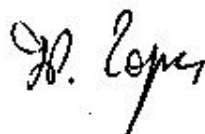
– кандидат технічних наук
Петриченко Сергій Вікторович,
Інституту імпульсних процесів і технологій
НАН України, м. Миколаїв
провідний науковий співробітник
відділу імпульсних електротехнічних систем.

Захист дисертації відбудеться "28" 04 2021 р. об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.187.0 в Інституті електродинаміки НАН України за адресою: 03057, Київ-57, пр. Перемоги, 56, тел. 366-26-45.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту електродинаміки НАН України за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий "25" 03 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю.М. Гориславець

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сучасний етап інтенсивного розвитку імпульсної електротехніки базується на удосконаленні електророзрядних установок з проміжними накопичувальними конденсаторами, що забезпечують отримання у навантаженні найбільших імпульсних потужностей і швидкостей наростання струму, які неможливо реалізувати при використанні інших накопичувачів (електроіндукційних, електрохімічних і т.п.). Тривалий час дослідження електромагнітних процесів у колах таких електророзрядних установок спрощувались, так як у більшості випадків накопичувальні конденсатори розряджали повністю і перехідні процеси в колах їх заряду і розряду аналізували, як незалежні. Суттєві результати з дослідження перехідних процесів у колах електророзрядних установок з ємнісними накопичувачами енергії отримали такі відомі вчені, як Лазаренко Б.Р., Золотих Б.Н., Юткін Л.О., Шидловський А.К., Волков І.В., Пентегов І.В., Отто М.Ш., Калеко Д.М., Щерба А.А., Супруновська Н.І. Вовченко О.І., Шидловська Н.А., Захарченко С.М., T. Lane, J. Priestly, A.E. Berkowitz, W. Ishibashi, J. Reinhard та інші.

У роботах Щерби А.А. і Супруновської Н.І. показано, що введення додаткових розрядних кіл дозволяє реалізовувати регульовані додатні та від'ємні зворотні зв'язки за напругою, отримувати в електророзрядних установках (ЕРУ) коефіцієнт корисної дії більше 90 % та підвищувати їхню вихідну напругу більше 1 кВ. Але перехідні процеси в колах таких установок стають взаємозв'язаними, що ускладнює методи їх дослідження та визначення оптимальних режимних параметрів.

Обґрунтування вибору теми дослідження. На даний час виникла потреба в розвитку теорії взаємозалежних перехідних процесів підвищення та спадання струму в колі навантаження ЕРУ, зокрема удосконалення методів регулювання таких динамічних параметрів, як швидкість наростання розрядного струму в навантаженні та змінення імпульсної потужності. Збільшення таких параметрів спрямовано на отримання дисперсних порошків при об'ємному електроіскровому диспергуванні шару металевих гранул у рідинах між електродами.

Попередні дослідження, проведені в Інституті електродинаміки НАН України за участю автора дисертації, показали можливість підвищення вказаних динамічних параметрів на основі використання в колах ЕРУ повністю керованих напівпровідникових комутаторів, низькочастотних електричних фільтрів та узгодженого змінення структури кола навантаження під час протікання в ньому перехідних процесів. Проте проведення експериментальних досліджень в указаному напрямку є дуже затратним, а теоретичні дослідження обмежувались відсутністю фізико-математичних підходів і моделей, необхідних для аналізу взаємозв'язаних процесів, виникаючих в різних вітках ЕРУ з накопичувальними конденсаторами і керованими напівпровідниковими комутаторами. Важливо було також урахувати можливе узгоджене змінення структури електричного навантаження та змінення перехідних процесів при примусовому обмеженні параметрів розрядного струму.

Тому розвиток теорії взаємозалежних перехідних процесів змінення струму в колі навантаження ЕРУ з керованими напівпровідниковими комутаторами і накопичувальними конденсаторами та урахуванням змінення структури електричного кола під час їхнього розряду на навантаження і процесів регулювання параметрів розрядного струму є актуальним науковим завданням.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є розвиток теорії взаємозалежних перехідних процесів підвищення і спадання струму в колі навантаження електророзрядних установок з керованими напівпровідниковими комутаторами шляхом удосконалення методів розрахунку і регулювання таких процесів з урахуванням змінення структури кола та динамічних параметрів розрядного струму.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні задачі:

- обґрунтувати доцільність розвитку теорії взаємозалежних перехідних процесів у колі навантаження електророзрядних установок з керованими напівпровідниковими комутаторами в напрямку урахування змінення структури цього кола при наростанні та спаданні імпульсного струму у навантаженні;

- розвинути метод аналізу взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струмів у колі змінної структури електророзрядних установок для визначення граничних значень цих струмів;

- розробити методи зменшення тривалості перехідних процесів наростання і спадання струмів розряду накопичувальних конденсаторів шляхом введення в їхні кола керованих напівпровідникових комутаторів струму та узгодженого змінення структури цих кіл під час спадання струму;

- визначити умови підвищення узгодженості формувача розрядних імпульсних струмів у технологічному навантаженні за рахунок включення в коло навантаження послідовних електричних фільтрів низької частоти та сучасних силових кабелів у якості коаксіальних конструкцій;

- розробити диференційну схему заміщення сучасної радіально-неоднорідної полімерної ізоляції силових коаксіальних кабелів для аналізу процесів її деградації при дії уніполярних імпульсів струму частотою до 1000 імп/с;

- створити експериментальні електророзрядні установки на основі джерел незмінної напруги з вихідним конденсатором великої ємності та керованими напівпровідниковими комутаторами у колі навантаження для формування в ньому аперіодичних розрядних струмів з регульованими динамічними параметрами;

- визначити енергетичну і технологічну доцільності використання електророзрядних установок з підвищеними динамічними параметрами для реалізації технологій об'ємної електроіскрової обробки шару металевих гранул у рідких середовищах з отриманням порошків підвищеної дисперсності.

Об'єктом досліджень є розрядні кола формувачів розрядних струмів керованої тривалості у технологічному навантаженні, які використовують сучасні керовані напівпровідникові комутатори для регулювання параметрів струмів з часом.

Предметом досліджень виступають взаємозалежні перехідні процеси наростання і спадання струму в колах навантаження електророзрядних установок з накопичувальними конденсаторами, керованими напівпровідниковими комутаторами та розрядними колами змінної структури.

Методи дослідження. Вирішення поставлених у роботі задач ґрунтується на фундаментальних положеннях теоретичної електротехніки, теорії перехідних процесів у лінійних електричних колах, математики, моделювання. Результати, отримані з використанням аналітичних методів та комп'ютерного моделювання, підтверджені їх порівнянням і збіжністю з результатами, отриманими під час фізичних експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше аналітично і експериментально обґрунтовано підвищення швидкості наростання струму та імпульсної потужності у колі навантаження електророзрядних установок при одночасному примусовому обмеженні тривалості наростання в ньому струму та зменшенні його добротності.

2. Удосконалено метод аналізу взаємозалежних перехідних процесів у колах змінної структури електророзрядних установок шляхом отримання і рішення різницевого рівняння для циклічних процесів наростання та спадання струму в навантаженні, його моделювання еквівалентним активним опором і визначення та регулювання граничних і часових інтервалів відповідно до заданих динамічних характеристик імпульсних струмів у навантаженні.

3. Розвинуто метод підвищення динамічних характеристик розрядного струму в навантаженні електророзрядних установок введенням в їхні розрядні кола керованих напівпровідникових комутаторів струму та алгоритмів узгодженого змінення структури цих кіл під час спадання струму у навантаженні, зокрема при підключенні до них заряджених накопичувальних конденсаторів, що може зменшувати тривалість фронту спадання імпульсного струму більше, ніж у 10 разів.

4. Вперше для визначення ефективності введення в коло навантаження електророзрядних установок сучасних коаксіальних кабелів з полімерною ізоляцією розроблено її диференційну схему заміщення та математичну модель, які забезпечують аналіз перехідних процесів в об'ємі ізоляції з урахуванням впливу на них процесів абсорбції її вільних зарядів.

5. Розроблено новий метод змінення характеру перехідних процесів у колі навантаження електророзрядних установок шляхом введення в це коло послідовних електричних фільтрів низької частоти та коаксіальних кабелів, реактивні розподілені параметри яких являються складовою частиною вказаних фільтрів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці методик для розрахунку взаємозалежних перехідних процесів у колах електророзрядних установок з накопичувальними конденсаторами та керованими напівпровідниковими комутаторами у всій часовій області змінення електричного опору їхнього навантаження. Зокрема, розроблено методики розрахунку тривалості перехідних процесів, включаючи тривалості наростання у навантаженні розрядного струму та його спадання до моменту включення батареї заряджених конденсаторів. Розроблено рекомендації для розрахунку перехідних процесів незначної тривалості у колах електророзрядних установок з сучасними повністю керованими (транзисторними) комутаторами.

У нелінійному навантаженні створених електророзрядних установок потужністю до 1 кВт реалізовано розрядно-імпульсні струми величиною до 1 кА тривалістю 1–10 мкс, причому тривалість їхнього переднього фронту складала від 75% до 30%. Результати використано для створення транзисторних електророзрядних установок потужністю до 5 кВт, частотою розрядних імпульсів до 20 кГц, амплітудою розрядних струмів до 1 кА та їх тривалістю від 1 до 10 мкс.

Результати роботи було використано при виконанні НДР в Інститутах НАН України (електродинаміки, газу та імпульсних процесів і технологій), Інституті розвитку територіальних громад України, заводі "Південкабель" (м. Харків) та навчальному процесі кафедри теоретичної електротехніки НТУУ "Київський полі-

технічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Особистий внесок здобувача. Всі теоретичні й практичні результати отримані автором дисертації особисто. У роботах, виданих у співавторстві, автору належить: у роботах [1–3] – розвиток методу аналізу взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струмів у колах змінної структури електророзрядних установок; [4, 5] – визначення умов ефективного підвищення таких динамічних характеристик електророзрядних установок, як швидкість наростання їх струмів та імпульсної потужності у навантаженні; [6, 11] – удосконалення методу підвищення динамічних характеристик струму в навантаженні; [7–10,12] – аналіз перехідних процесів у радіально неоднорідній ізоляції коаксіальних кабелів та розробка диференційної схеми заміщення і моделей ізоляції кабелів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались і підтримані на Міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК): "Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні" (м. Київ, 2009, 2010); "Фізика імпульсних розрядів у конденсованих середовищах" (м. Миколаїв, 2013 р.); "Силова електроніка і енергоефективність" (м. Алушта 2013 р.); "Проблеми сучасної електротехніки" (м. Київ, 2014, 2016, 2020 р.)

Публікації. За результатами дисертації здобувачем опубліковано 18 наукових праць, у тому числі 12 статей у наукових фахових виданнях України, з яких 6 публікацій відображено в міжнародній науково-метричній базі Scopus. Опубліковано матеріали доповідей на 6 науково-технічних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційну роботу викладено на 270 сторінках машинописного тексту. Вона складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 11 додатків. Обсяг основного тексту становить 165 сторінок. Робота ілюстрована 14 таблицями та 106 рисунками. Список використаних джерел містить 192 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано доцільність та актуальність роботи, відзначено зв'язок роботи з науковими програмами та планами, сформульовано мету та задачі дослідження, викладено наукову новизну, практичне значення результатів роботи, зазначено особистий внесок здобувача в друкованих працях, наведено відомості про апробацію отриманих результатів і публікації.

У **першому розділі** проведено аналіз літературних джерел із застосування накопичувачів електромагнітної енергії в колах електророзрядних установок (ЕРУ). Розглянуто різні типи таких накопичувачів і області їх застосування. Відзначено, що на даний час у колах різних імпульсних навантажень найбільше використовуються ємнісні накопичувачі енергії. Проведено порівняння перехідних процесів у колах заряду і розряду накопичувачів таких ЕРУ і Показано труднощі розрахунку таких процесів у колах ЕРУ з нелінійним технологічним навантаженням.

Виконано аналіз розробленої в Інституті електродинаміки НАН України (м. Київ) концепції проектування ЕРУ з напівпровідниковими комутаторами для об'ємного електроіскрового диспергування металевих гранул в діелектричній рідині. Показано, що концепція базується на виявленій залежності ефективного опору електроіскрового навантаження, добротності розрядного контуру ємнісного накопичува-

ча енергії і напруги його перезаряду від величини напруги попереднього заряду і на введенні зворотного зв'язку за напругою. В результаті критичного аналізу відомих публікацій обґрунтовано актуальність розвитку теорії взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струму в колі навантаження ЕРУ з керованими напівпровідниковими комутаторами і накопичувальними конденсаторами, зокрема важливість урахування змінення структури їхнього розрядного кола та процесів регулювання динамічних параметрів струму в навантаженні.

У другому розділі визначено особливості та закономірності змінення вихідних струмів напівпровідникових ЕРУ з накопичувальним конденсатором в залежності від його ємності та умов обмеження тривалості струмів. Аналітично доведено, що для довільного режиму (коливального та аперіодичного) розряду конденсатора збільшення його ємності при незмінних інших параметрах розрядного кола приводить до збільшення величини вихідного струму в будь-який фіксований момент часу (t_{fix}), менший за момент часу (t_{max}), що відповідає максимальній величині цього струму. Запропоновано регулювати основні вихідні динамічні характеристики ЕРУ з накопичувальними конденсаторами (зокрема збільшувати швидкість наростання та/або зменшувати тривалість їх розрядних імпульсних струмів у навантаженні) шляхом збільшення ємності конденсатора, порівняно з ємністю, достатньою для ре-

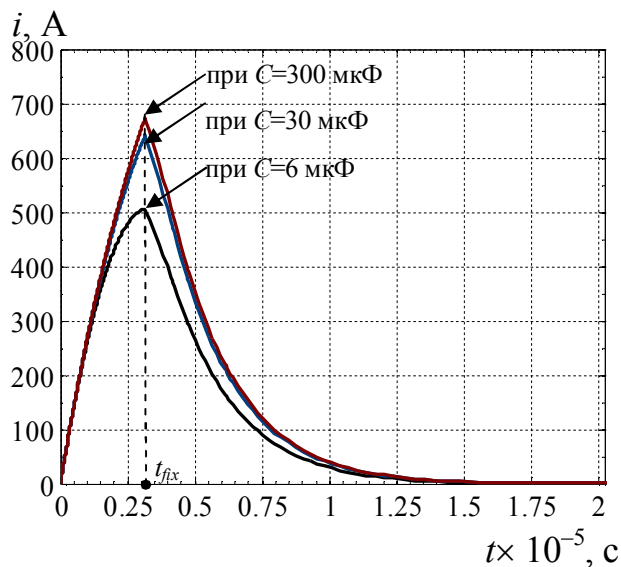


Рис. 1. Осцилограми струму у навантаженні

імпульсів струму в навантаженні ЕРУ. Встановлено їх суттєвий вплив на вказані показники, особливо у випадках їх значної довжини та незначної вихідної індуктивності ЕРУ.

Експериментально доведено, що за сукупністю характеристик найбільш доцільними для електричного з'єднання ЕРУ з навантаженням є сучасні силові коаксіальні кабелі з полімерною ізоляцією на напругу 6-10 кВ. Вони мають велику електричну міцність ізоляції і незначну ємність при прийнятій індуктивності та ефективному перерізі струмопровідних жил.

Запропоновано новий метод підвищення динамічних параметрів струму в колах навантаження ЕРУ шляхом включення в них пасивних послідовних електричних

реалізації потрібного технологічного режиму, і примусового переривання струму в навантаженні. Обґрунтовано, що цей підхід є доцільним для підвищення продуктивності ЕРУ, орієнтованих на виробництво нанодисперсних іскроерозійних порошків.

На рис. 1 представлено криві, які відображають змінення розрядного струму у навантаженні при трьох значеннях ємності конденсатора: $C = 6; 30; 300$ мкФ і перериванні цього струму при $t_{fix} = 3,15$ мкс.

Проведено аналіз впливу таких типів з'єднувальних провідників, як "вита пара", коаксіальний кабель і літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил, на динамічні показники розрядних

фільтрів низької частоти другого – четвертого порядків, в яких реактивні параметри з'єднувальних провідників є частиною цих фільтрів. Розроблено методику розрахунку ємнісних елементів даних фільтрів для отримання максимально можливого коефіцієнту передачі за напругою між ЕРУ та їх навантаженням.

На рис. 2 наведено спрощені електричні принципи схеми пасивних послідовних електричних фільтрів низької частоти другого - четвертого порядків.

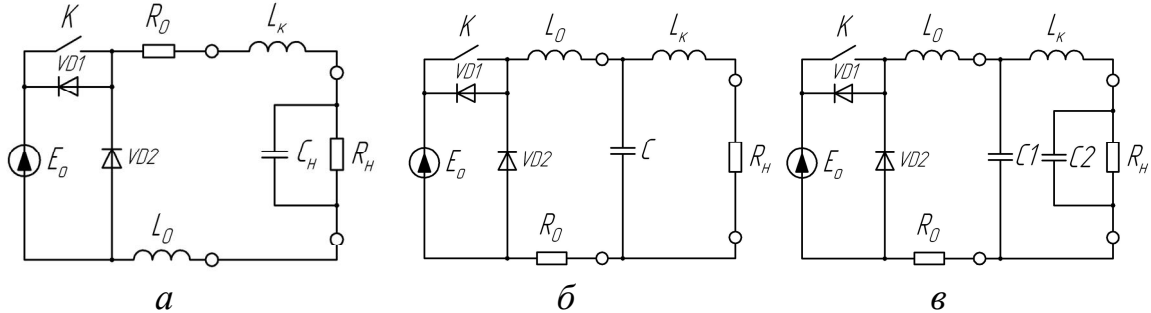


Рис. 2. Електричні принципи схеми пасивних послідовних електричних фільтрів низької частоти другого – *a*, третього – *б* та четвертого – *в* порядків

У наведених схемах E_0 – джерело опорної напруги ЕРУ, R_0 та L_0 – відповідно його внутрішній опір та індуктивність, K - силовий напівпровідниковий повністю керований електричний комутатор, L_K – індуктивність з'єднувальних провідників, R_H – опір електричного навантаження, C_H , C , $C1$ і $C2$ - ємнісні елементи фільтрів, $VD1$ та $VD2$ – зворотні напівпровідникові діоди.

Для даних фільтрів було визначено передавальні функції, за допомогою яких було отримано їхні фазочастотні та амплітудно-фазові характеристики.

$$k_{U_1}(j\omega) = \frac{R}{j\omega L + R}, k_{U_2}(j\omega) = \frac{R}{R - \omega^2 RLC + j\omega L}, k_{U_{3,4}}(j\omega) = \left(1 - \frac{j\omega L_0}{Z_{H_{3,4}}(\omega)}\right) \left(1 - \frac{j\omega L_K}{Z_{P_{3,4}}(\omega)}\right). \quad (1)$$

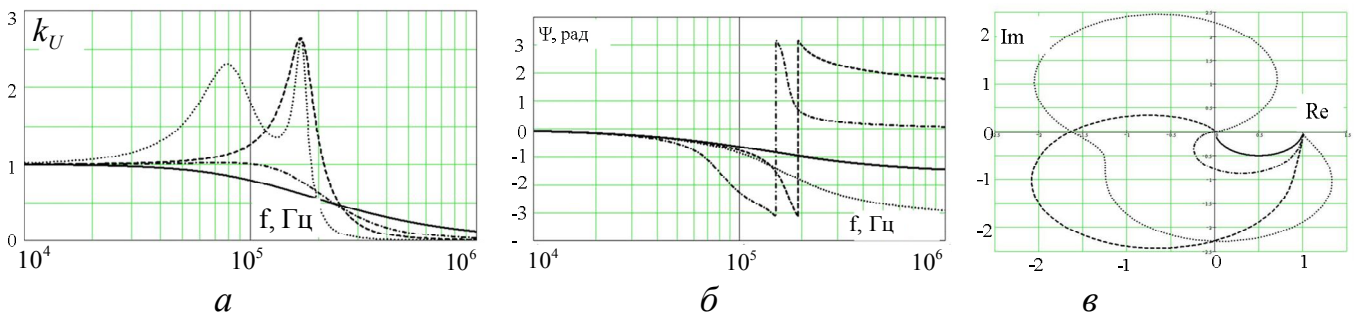


Рис. 3. Амплітудно-частотні залежності – *a*; фазочастотні характеристики – *б* та амплітудно-фазові характеристики – *в* фільтрів низької частоти 1-го – суцільна лінія, 2-го – штрих-пунктирна лінія, 3-го – штрихова лінія та 4-го – пунктирна лінія порядків

Аналітично встановлено та експериментально підтверджено доцільність використання цих фільтрів для покращення динамічних, енергетичних і часових параметрів імпульсних струмів у колі навантаження ЕРУ. У таблиці 1 наведено експериментально отримані приведені (до фільтру 1-го порядку) параметри імпульсних струмів у резистивному навантаженні ЕРУ. Розбіжність розрахунків за отриманими аналітичними виразами, з експериментальними результатами була не більшою 5-10 %. Встановлено, що найбільш доцільним є використання фільтру третього поряд-

ку. Порівняно з фільтром другого порядку він має більший коефіцієнт передачі за напругою, а порівняно з фільтром четвертого порядку є більш простим в реалізації і потребує значно меншої загальної ємності конденсаторів.

Таблиця 1

Приведені параметри імпульсів струму в навантаженні

Порядок фільтру	Приведена амплітуда струму	Приведена швидкість наростання струму	Приведена тривалість імпульсу	Приведена максимальна імпульсна потужність	Приведена середня імпульсна потужність
2	1,215	1,348	0,824	1,476	1,477
3	1,561	1,721	1,028	2,436	2,503
4	1,589	1,680	0,958	2,524	2,731

Для підтвердження доцільності застосування пасивних послідовних електричних фільтрів низької частоти було проведено ряд фізичних експериментів з реальним електроіскровим навантаженням. На рис. 4 наведено осцилограми розрядних імпульсів струму в електроіскровому навантаженні для випадків застосування та відсутності фільтру низької частоти третього порядку.

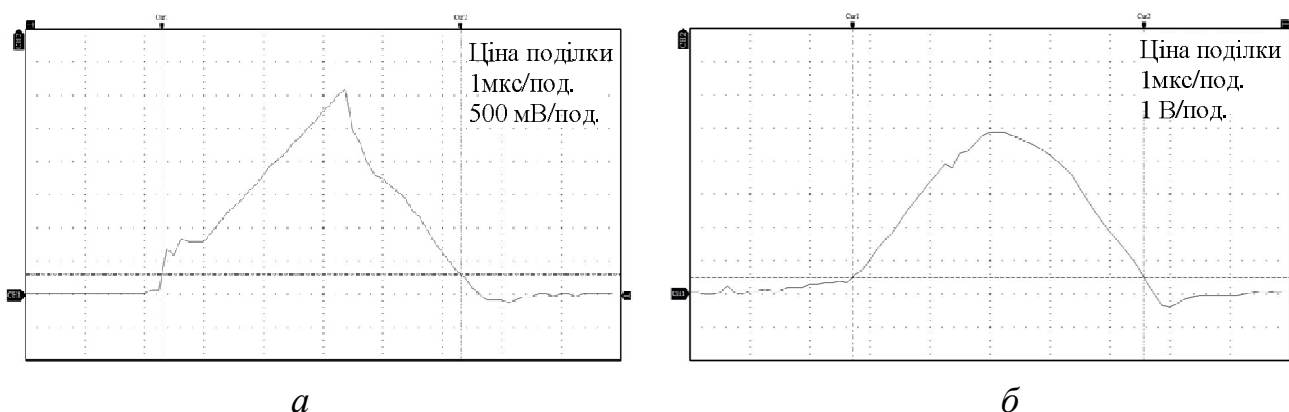


Рис. 4. Осцилограма імпульсів струму в електроіскровому навантаженні *а* - без та *б* - з використанням фільтру третього порядку (1 В відповідає 100 А)

З наведених на рис. 4 осцилограм видно, що введення фільтру третього порядку викликає зменшення тривалості та зростання амплітуди розрядних струмів. Їхня загальна тривалість зменшувалась від 5,02 до 4,85 мкс (на 3,5 %), амплітуда збільшувалась від 311 до 485 А (в 1,56 рази), середня швидкість наростання струму – від 101 до 211 А/мкс (в 2,09 рази), а пікова та середня імпульсна потужності збільшувались в 2,43 та 1,67 рази відповідно. При цьому змінення імпульсних струмів в електроіскровому навантаженні набували гармонічного характеру.

Таким чином, виникла можливість в електроіскровому навантаженні отримувати імпульсні струму строго заданої тривалості, яка відповідає періоду коливаний, рівному подвоєній тривалості відпирання силового напівпровідникового комутатора *К*.

У третьому розділі обґрунтовано доцільність використання в якості з'єднувальних провідників між ЕРУ та їх навантаженням сучасних коаксіальних кабелів з полімерною ізоляцією. Під час експлуатації таких кабелів, внаслідок тривалого впливу ряду негативних експлуатаційних чинників відбувається поступова деграда-

ція їхньої електроізоляції. Причому із-за нерівномірності впливу різних експлуатаційних чинників старіння її об'єму протікає з різними швидкостями і з часом вона стає неоднорідною (в радіальному напрямках). Так як неоднорідна електроізоляція має абсорбційні властивості, то для якісної оцінки ступеня її деградації доцільно використати методи типу: вимірювання струму релаксації, вимірювання та аналізу зворотної напруги, вимірювання тангенса кута діелектричних втрат тощо.

Коаксіальний кабель з радіально неоднорідною електричною ізоляцією подався у вигляді циліндричного конденсатора довжиною l з внутрішнім і зовнішнім радіусами обкладинок r_1 та r_2 , у якого відносна діелектрична проникність ε та питома електрична провідність γ його електроізоляційного матеріалу є радіальними функціями $\varepsilon(r)$ і $\gamma(r)$ відповідно. Електрична схема заміщення такої ізоляції розглядалась у вигляді n послідовно з'єднаних конденсаторів електричною ємністю C_i з реальним діелектриком товщиною dr та відповідним йому активним опором R_i .

На рис. 5 наведено поперечний переріз коаксіального кабелю з радіальною неоднорідністю електрофізичних властивостей електроізоляції та схему її заміщення.

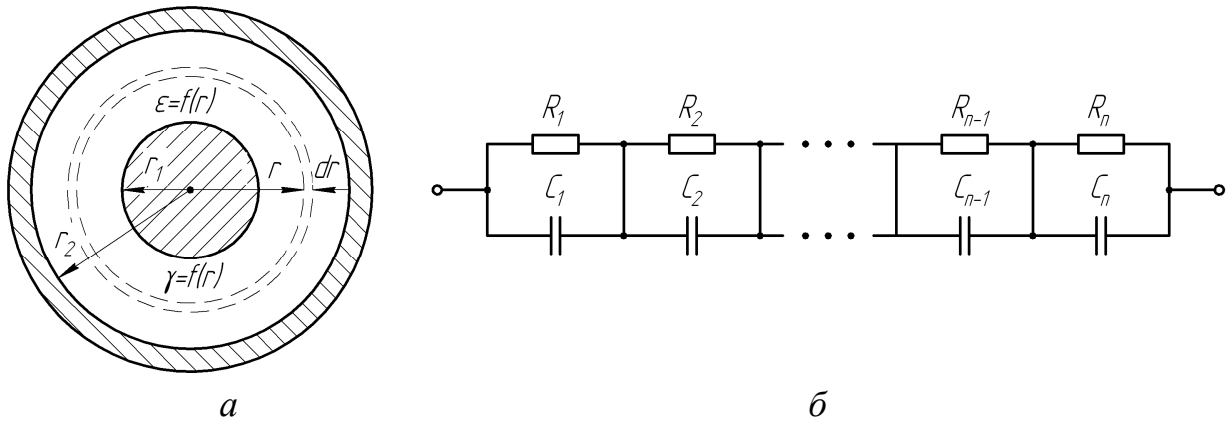


Рис. 5. Поперечний переріз коаксіального кабелю з радіальною неоднорідністю електрофізичних властивостей електричної ізоляції - *a* та схема її заміщення *б*

Наведена на рис. 5 схема заміщення радіально неоднорідної ізоляції являє собою ємнісно-резистивний подільник. На даній схемі ємність конденсаторів та активний опір резисторів відповідають ємності та активному опору відповідних шарів електричної ізоляції. Конструктивна (геометрична) ємність кабелю визначалась, як еквівалентна ємність n послідовно з'єднаних конденсаторів, а загальний опір струмам витoku такої ізоляції як еквівалентний опір n послідовно з'єднаних резисторів.

У випадку значної кількості послідовно з'єднаних елементів схеми заміщення ($n \rightarrow \infty$) товщина елементарного шару електроізоляційного матеріалу між обкладками конденсаторів стає незначною ($dr \rightarrow 0$). Площі обкладинок конденсаторів стають майже рівними, електричне поле між ними майже однорідним, а електрофізичні властивості ізоляції майже сталими величинами. В даному випадку еквівалентні ємність і активний опір ізоляції струмам витoku кабелю визначались, як

$$C = \lim_{dr \rightarrow 0} \left(\sum_{r=r_1, dr}^{r_2} \frac{dr}{\varepsilon_0 \varepsilon(r) S(r)} \right)^{-1} = \left(\int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon(r) S(r)} dr \right)^{-1} = \frac{2\pi l \varepsilon_0 \varepsilon_e}{v}, \quad R = \lim_{dr \rightarrow 0} \sum_{r=r_1, dr}^{r_2} \frac{dr}{S(r) \gamma(r)} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{S(r) \gamma(r)} dr = \frac{v}{2\pi l \gamma_e}, \quad (2)$$

де $v = \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)$, $\varepsilon_e = v / \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\varepsilon(r) r} dr$, $\gamma_e = v / \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\gamma(r) r} dr$ – відповідно конструктивна стала,

еквівалентна відносна діелектрична проникність та еквівалентна питома провідність ізоляції кабелю, $S(r) = 2\pi rl$ – площа циліндричної поверхні радіусом r .

Приймалось, що при подачі на струмопровідні жили такого кабелю постійної напруги величиною U (при $t = 0$) його геометрична ємність практично миттєво зарядиться, а на жилах з'являється вільний електричний розподілений заряд q_0 . Під дією електричного поля, викликаного наявністю цього заряду, в електричній ізоляції кабелю встановиться початкова напруженість електричного поля

$$E_0(r) = \frac{q_0}{dC(r)dr} = \frac{U}{v} \cdot \frac{\varepsilon_e}{r\varepsilon(r)}, \quad (3)$$

яка визначається виключно діелектричними властивостями ізоляції кабелю, а саме функцією радіального розподілу відносної діелектричної проникності $\varepsilon(r)$. Одночасно зі встановленням електричного поля в кабельній ізоляції у напрямку його дії починає протікати електричний струм провідності, який у випадку неоднорідності електричної ізоляції є радіально нерівномірним, значення якого визначаються функціональними залежностями розподілу радіальних функцій початкової напруженості електричного поля і питомої електричної провідності ізоляції

$$i_0(r) = E_0(r)\gamma(r)S(r) = \frac{U_0 \cdot \varepsilon_e}{r \cdot v} \cdot \frac{\gamma(r)}{\varepsilon(r)} \cdot S(r). \quad (4)$$

Приймалось, що в електроізоляції виникає вимушений перехідний процес, який супроводжується протіканням радіально нерівномірного струму через її шари. Це викликає змінення напруженості електричного поля в шарах ізоляції та накопичення вільного об'ємного розподіленого електричного заряду – заряду абсорбції.

По закінченні даного перехідного процесу (при $t = \infty$) через усі елементарні шари електричної ізоляції кабелю протікає однаковий та незмінний в часі струм витoku I_e , величина якого визначається величинами прикладеної до електричної ізоляції постійної напруги U та її опору струмам витoku R . При цьому в ізоляції кабелю встановлюється радіальна напруженість електричного поля відмінна від тої, що була на початку перехідного процесу. Вона визначається спадами напруги на елементарних шарах ізоляції кабелю при протіканні через них струму витoku, тобто визначається функцією радіального розподілу питомої електричної провідності $\gamma(r)$

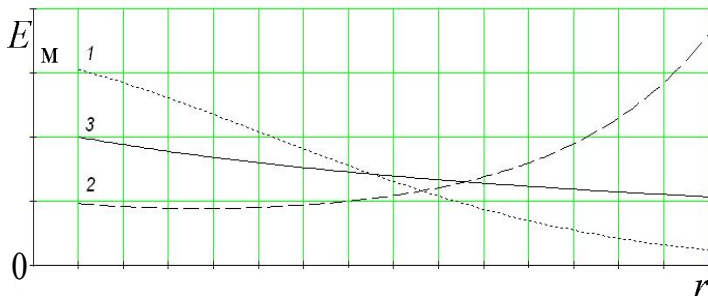


Рис. 6. Розподіл напруженості

1) та в кінці (крива 2) перехідного процесу у порівнянні з напруженістю електричного поля в еквівалентній однорідній ізоляції (крива 3).

$$E_\infty(r) = \frac{I_e \cdot dR(r)}{dr} = \frac{U_0}{rv} \cdot \frac{\gamma_e}{\gamma(r)}. \quad (5)$$

На рис. 6 наведено приклад якісного радіального розподілу напруженості електричного поля в ізоляції кабелю на початку (крива

Різниця між радіальними розподілами напруженості електричного поля на початку та в кінці даного перехідного процесу (дефект електричного поля) визначається наступною аналітичною залежністю

$$\Delta E(r) = E_0(r) - E_\infty(r) = \frac{U}{vr} \cdot \frac{\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r)}{\varepsilon(r) \gamma(r)} \quad (6)$$

та повною мірою характеризує дефектність електричного поля в ізоляції.

Саме наявність дефекту електричного поля викликає протікання абсорбційних струмів в шарах електроізоляційного матеріалу кабелю, що, в свою чергу, призводить до накопичення в його об'ємі вільного розподіленого електричного заряду абсорбції. Заряд абсорбції створює власне електричне поле, яке по закінченні перехідного процесу повністю компенсує наявний дефект електричного поля в електроізоляційному матеріалі. При цьому, на поверхнях елементарних шарів ізоляції окрім зв'язаного електричного заряду накопичується вільний електричний заряд

$$q_a(r) = -\Delta E(r) dC(r) dr = -\frac{U \varepsilon_0}{rv} \frac{\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r)}{\gamma(r)} S(r), \quad (7)$$

з поверхневою та об'ємною густинами

$$\sigma_a(r) = -\frac{U \varepsilon_0}{rv} \frac{\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r)}{\gamma(r)}, \quad \rho_a(r) = \text{div}[\varepsilon_0 \varepsilon(r) \Delta E(r)] = -\frac{\varepsilon_0 \gamma_e U}{rv} \frac{d}{dr} \left[\frac{\varepsilon(r)}{\gamma(r)} \right]. \quad (8)$$

Після подачі на жили кабелю постійної напруги U і зарядження його ємності C в ізоляції кабелю починає протікати вимушений перехідний процес, який згідно обраної схеми заміщення представлявся як процес перезарядження елементарних конденсаторів через відповідні елементарні резистори, в яких енергія електричного поля перетворюється в теплову, а на елементарних конденсаторах відбувається накопичення вільного електричного заряду.

Внаслідок цього у зовнішньому колі протікає електричний струм, який є суперпозицією незмінного в часі струму витоку I_g і струму релаксації $i_p(t)$

$$i(t) = i_g + i_p e^{-\frac{t}{\tau}} = 2\pi l \frac{\gamma_e U_0}{v} \left[1 + \left(v \gamma_e \int_{r_1}^{r_2} \frac{(\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r))^2}{\varepsilon^2(r) \gamma(r) r} dr \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right]. \quad (9)$$

де $\tau = R_a C_a$ – постійна часу заряду абсорбційної ємності, R_a і C_a – відповідно абсорбційний опір та ємність ізоляції.

Струм релаксації підводить до кабелю електричну енергію, що витрачається на

теплові втрати в ізоляції при протіканні струмів абсорбції і на накопичення вільного заряду на його жилах. Ступінь старіння ізоляції оцінювався коефіцієнтом її неоднорідності $k = RC_a / R_a C$.

На рис. 7 наведено часові залежності струмів через ізоляцію кабелів з різним ступенем її неоднорідності. Внаслідок не-

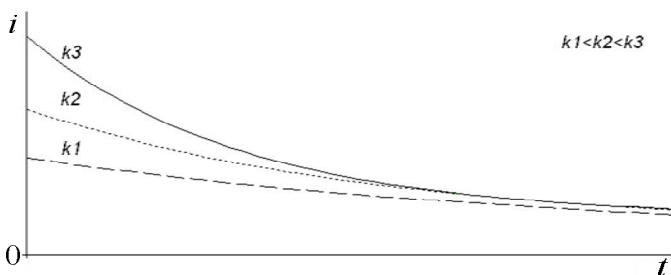


Рис. 7. Часові залежності струмів через ізоляцію кабелів

значної електричної провідності ізоляції кабелю абсорбційний заряд не встигає стекти при короткочасному розряді, а його електричне поле компенсує наявний дефект електричного поля в ізоляції в початковий момент перехідного процесу. Під дією електричного поля в ізоляції починають протікати струми провідності і в ній виникає вільний перехідний процес (процес розрядження елементарних ємностей через відповідні елементарні опори). На елементарних опорах виникає спад напруги, а між жилами кабелю виникає змінення в часі поверненої напруги $U_n(t)$, яка є алгебраїчною сумою цих напруг і може бути аналітично визначена через відомий дефект електричного поля ізоляції

$$U_n(t) = -\frac{U}{vr} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r)}{\varepsilon(r) \gamma(r)} e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr, \quad (10)$$

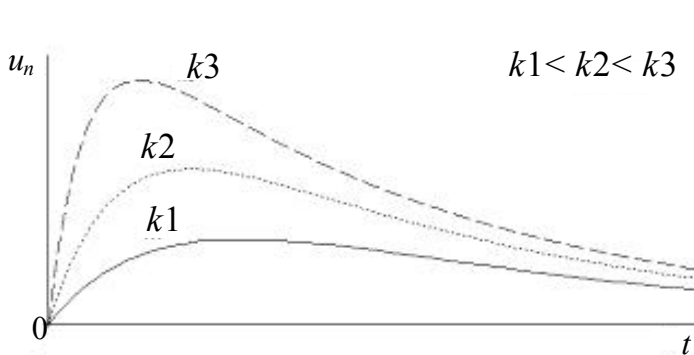


Рис 8. Часові залежності поверненої напруги

де $\tau(r) = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon(r)}{\gamma(r)}$ — постійна часу розряду елементарних ємностей через відповідні їм елементарні опори.

На рис. 8 наведено часові залежності поверненої напруги при різних ступенях неоднорідності ізоляції кабелю.

Вимірювання і аналіз часових залежностей струму релаксації та поверненої напруги дозволяє визначити

ступінь старіння ізоляції та виявити характер її неоднорідності.

Зростання початкового значення струму релаксації свідчить про збільшення неоднорідності електроізоляційного матеріалу, а збільшення струму витoku та зменшення постійної часу релаксації — про її суцільну деградацію.

Найбільш чутливими до неоднорідності електроізоляційного матеріалу є: максимальне значення поверненої напруги, час досягнення максимуму поверненої напруги, початкова швидкість наростання, постійна часу спадання поверненої напруги та коефіцієнт поляризації (p-Factor).

Четвертий розділ присвячено аналізу взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струмів у колах змінної структури ЕРУ при примусовому обмеженні їх тривалості. Розглянуто шляхи подальшого скорочення тривалості розрядних імпульсних струмів, та підвищення їх динамічних і енергетичних характеристик. Проведено аналіз енергоефективності даних установок.

Обмеження тривалості переднього фронту розрядних струмів у навантаженні ЕРУ здійснювалось введенням сучасних повністю керованих напівпровідникових комутаторів. При цьому задні фронти імпульсних струмів залишались відносно тривалими. Вони спадали в часі за аперіодичним законом з постійною часу релаксації, що визначалась загальними індуктивністю і активним опором розрядного кола ЕРУ.

На рис. 9 наведено принципову схему розрядного кола ЕРУ з узгодженим примусовим обмеженням тривалості задніх фронтів імпульсних струмів шунтуванням навантаження повністю керованими напівпровідниковими комутаторами.

На представленій схемі E_0 – джерело опорної напруги величиною U , R_0 та L_0 – вихідні опір та індуктивність кола навантаження ЕРУ, R_K та L_K – відповідно активний опір та індуктивність з'єднувальних провідників, R_H та L_H – відповідно активний опір та власна індуктивність навантаження, $K1$ та $K2$ – повністю керовані напівпровідникові комутатори, $VD1$ – $VD3$ – зворотні напівпровідникові діоди.

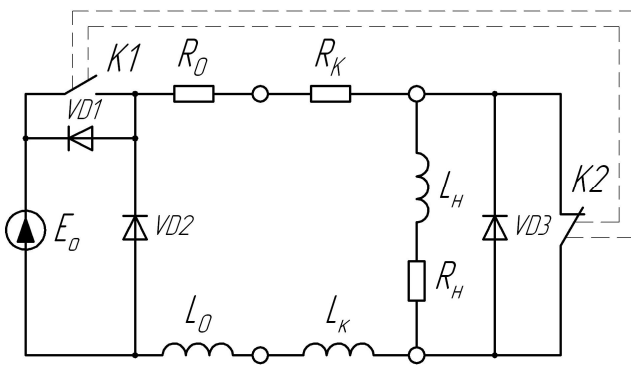


Рис. 9. Електрична принципова схема

У момент часу відпирання $K1$ ($K2$ – запирається) утворюється замкнуте електричне коло між джерелом електрорушійної сили та навантаженням. В колі навантаження починається вимушений перехідний електричний процес, а у всіх його елементах починає протікати електричний струм $i_n(t)$, що змінюється в часі за законом

$$i_n(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right), \quad (11)$$

де $\tau_n = \frac{L_0 + L_K + L_H}{R_0 + R_K + R_H}$ – постійна часу релаксації переднього фронту струму.

При ($t = t_i$) запирання $K1$ ($K2$ – відпирається) навантаження від'єднується від джерела E_0 і відбувається його шунтування електричним ключем $K2$. У розрядному колі починається новий вільний перехідний процес. Згідно закону комутації струм в індуктивному елементі стрибкоподібно не змінюється, тому початкове значення заднього фронту струму буде кінцевим значенням струму його переднього фронту. При цьому струм у навантаженні майже миттєво спаде до нуля, а струм розрядного кола повністю замкнеться через комутатор $K2$ і зворотній діод $VD2$. Враховуючи зазначене, часові залежності задніх фронтів струму визначаються рівнянням

$$i_{3H}(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{3H}}}, \quad i_{3K}(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{3K}}}, \quad (12)$$

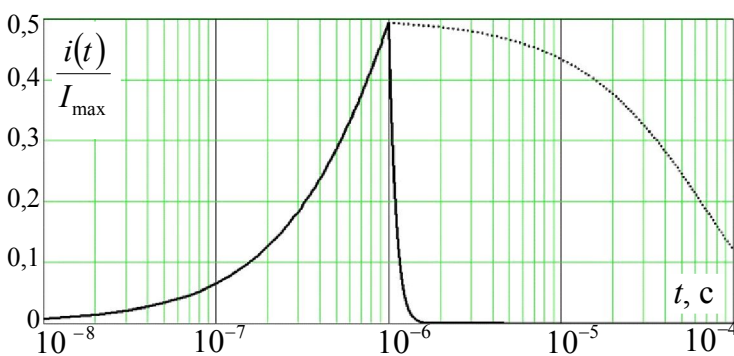


Рис. 10. Часові залежності струмів

де $\tau_{3K} = \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K}$, $\tau_{3H} = \frac{L_H}{R_H}$ – відповідно постійні часу релаксації задніх фронтів струму в розрядному колі та навантаженні, $R = R_0 + R_K + R_H$ – загальний опір розрядного кола. На рис. 10 наведено часові залежності струмів у навантаженні (суцільна лінія) та у колі навантаження ЕРУ (пунктирна лінія) отримані з залежностей (11)

та (12).

Проведений аналіз роботи даної схеми показав її вкрай низьку енергоефективність. Результати даного аналізу наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати енергетичного аналізу роботи схеми

t_b мкс	$\frac{W_{B1}}{W}$	$\frac{W_{L1}}{W}$	$\frac{W_{H2}}{W}$	$\frac{W_{B2}}{W}$	η_1	η_2	η
1	0,0068	0,652	0,043	0,609	0,341	0,067	0,384
2	0,011	0,488	0,03	0,418	0,541	0,067	0,571
3	0,013	0,323	0,022	0,302	0,633	0,067	0,685

У даній таблиці W – енергія, яку віддає джерело в розрядне коло, W_{B1} і W_{B2} – відповідно енергія втрат в розрядному колі по передньому та задньому фронтам імпульсу струму, W_{L1} – енергія магнітного поля накопичена на загальній індуктивності розрядного кола, η , η_1 і η_2 – відповідно коефіцієнти корисної дії даної схеми загальний, по передньому і задньому фронтам струму. Для підвищення енергоефективності даної схеми було реалізовано рекуперацію електричної енергії, яка накопичується на розподіленій індуктивності розрядного кола.

На рис. 11 зображено електричну схему розрядного кола ЕРУ з обмеженням тривалості заднього фронту струму шляхом узгодженого шунтування навантаження та рекуперацією енергії магнітного поля, накопиченої на розподіленій індуктивності

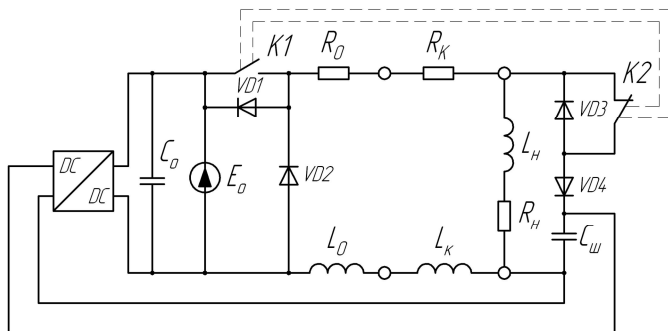


Рис. 11. Електрична принципова схема

розрядного кола.

У даній схемі, на відміну від схеми, наведеної на рис. 9, комутатор $K2$ шунтує навантаження через діод $VD4$ на конденсатор великої ємності $C_{ш}$. У момент часу розмикання $K1$ (замикання $K2$), навантаження від'єднується від джерела опорної напруги E_0 . Струм, що протікає в розрядному колі, згідно закону комутації не може стрибкоподібно змінитися, тому він продовжує циркулювати в розрядному

колi в тому ж напрямку, замикаючись через зворотній діод $VD2$. У момент часу замикання керованого $K2$ відбувається шунтування навантаження через $K2$ і $VD4$ ємністю $C_{ш}$, при цьому майже весь струм в розрядному колі замикається на неї.

Електрична енергія, накопичена електростатичним конденсатором $C_{ш}$, шляхом її перетворення за допомогою підвищувального перетворювача DC/DC повертається у накопичувальну ємність джерела опорної напруги.

Дане удосконалення схеми розрядного кола дозволяє забезпечити рекуперацією більшої частини енергії магнітного поля значно підвищити енергоефективність її роботи. Якщо встановити шунтувальний конденсатор $C_{ш}$ з великою електричною ємністю, а DC/DC перетворювач зробити зі зворотнім від'ємним зв'язком по вхідній напрузі, то напруга на ньому в усталеному режимі роботи стабілізується.

Проведений аналіз взаємозалежних перехідних процесів, що протікають в колах даної електричної схеми, дозволив отримати аналітичні залежності для струмів в її елементах

$$\begin{cases} i_{3H}(t) = \frac{U_{VD} + U_C}{R_H} + \frac{U}{R} \left(1 - \frac{R}{R_H} \frac{U_{VD} + U}{U} - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3H}}}, \\ i_{3K}(t) = \frac{U}{R} \left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_{VD} + U_C}{U} - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3K}}} - \frac{U_{VD} + U_C}{R_0 + R_K}, \\ i_C(t) = \frac{U}{R} \left(\left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_{VD} + U_C}{U} - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3K}}} - \left(1 - \frac{R}{R_H} \frac{U_{VD} + U}{U} - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3H}}} \right) - (U_{VD} + U_C) \frac{R}{R_0 R_H + R_H R_K} \end{cases} \quad (13)$$

де $i_{3H}(t)$, $i_{3K}(t)$ та $i_C(t)$ – відповідно часові залежності задніх фронтів струмів в навантаженні, розрядному колі та в шунтувальній ємності.

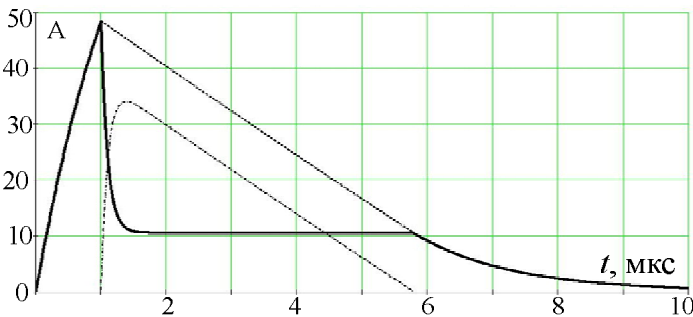


Рис. 12. Часові залежності

На рис. 12 наведено часові залежності струмів, отриманих з аналітичних залежностей (11) і (13). Струмам у навантаженні, розрядному колі та в шунтувальному ланцюгу відповідають суцільна, пунктирна та штрих-пунктирна лінії відповідно.

За результатами поведеного енергетичного аналізу роботи даної електричної схеми було встановлено, що при рівні напруги на шунтувальній ємності від $0,04 U$ до $0,1 U$ можливо досягти коефіцієнту корисної дії більше за $0,9$.

Для підтвердження достовірності результатів отриманих аналітичним методом і шляхом комп'ютерного моделювання було створену малопотужну фізичну установку, схема якої наведена на рис. 11.

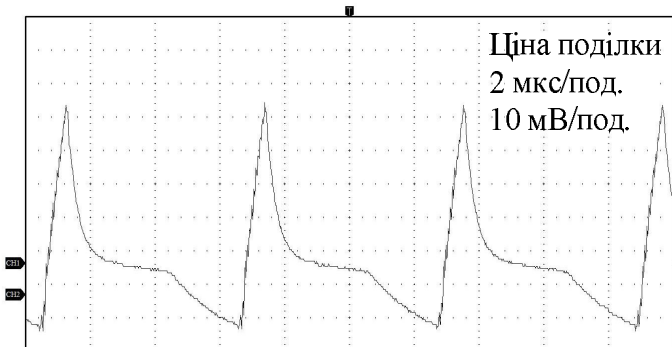


Рис. 13. Осцилограма імпульсів струму

На рис. 13 наведено осцилограму струму в навантаженні такої схеми. Розбіжність аналітичних розрахунків з експериментальними результатами складала не більше $6-9\%$, що свідчить про їх достовірність. Таким чином, підтверджено можливість примусового обмеження тривалості заднього фронту струму шляхом його узгодженого шунтування з одночасною рекуперацією енергії магнітного поля на розподіленій індуктивності розрядного кола ЕРУ.

Це дозволяє формувати імпульсні струми в навантаженні зі значною крутизною фронтів та їх загальною тривалістю близькою до заданої тривалості переднього

фронту. Наявність "полиці" струму в реальному електроіскровому навантаженні в міжімпульсний проміжок часу не є критичною.

При примусовому обмеженні тривалості заднього фронту імпульсів струму значна частина енергії залишається на розподіленій індуктивності елементів розрядного кола у вигляді енергії магнітного поля. Частина даної енергії в залежності від електричних параметрів розрядного кола та часу тривалості переднього фронту імпульсів струму може становити 0,5 – 0,9 від загальної. Дану енергію можна використати для покращення динамічних і енергетичних показників наступних імпульсів струму в навантаженні.

Постійна часу релаксації струму в розрядному колі по задньому фронту є значно більшою від постійної часу для його переднього фронту, тому у випадках, коли вона є значно більшою від безструмової паузи у навантаженні, накопичена на індуктивностях енергія магнітного поля буде частково передана у навантаження. Тоді комутація навантаження буде відбуватися з ненульовими початковими умовами за

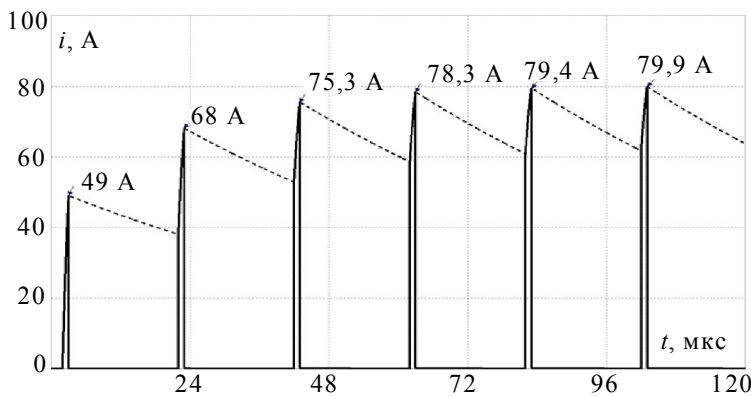


Рис. 14. Результати комп'ютерного моделювання

струмом у розрядному колі. Це дозволяє покращити енергоефективність схеми (рис. 9) і енергетичні та динамічні характеристики імпульсів струму.

На рис. 14 наведено результат комп'ютерного моделювання електричної схеми, приведеної на рис. 9, в даному режимі. Суцільна лінія відповідає часовій залежності струму в навантаженні, пунктирна лінія – в розрядному колі. Проведений аналіз взаємозалежних перехідних процесів у колах змінної структури ЕРУ збігається з результатами відповідного комп'ютерного моделювання. Максимальні значення струмів в усталених режимах роботи схеми знаходились з використанням методу різницевих рівнянь.

Усталений режим роботи настає тоді, коли спад струму в розрядному колі за міжструмову паузу в навантаженні зрівняється з приростом струму в ньому під час проходження переднього фронту імпульсу струму

$$i_{\max} - i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} = \frac{U - R \cdot i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}}}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right). \quad (14)$$

Розв'язок даного рівняння відносно i_{\max} дозволяє отримати аналітичну залежність для визначення максимального значення імпульсів струму в навантаженні

$$i_{\max} = \frac{U}{R} \cdot \frac{1 - e^{-k_1}}{1 - e^{-k_2}}, \quad (15)$$

де $k_1 = \frac{R}{L} t_i$, $k_2 = \frac{R_0 + R_K}{L} T + \frac{R_H}{L} t_i$, T – міжімпульсний період.

Проведений аналіз перехідних процесів дозволяє стверджувати, що викорис-

тання енергії магнітного поля, накопиченої на розподіленій індуктивності розрядного кола ЕРУ, призводить до значного підвищення енергетичних та динамічних характеристик імпульсів струму в навантаженні, а саме: швидкості його наростання, максимального значення, середньої та пікової потужностей. Збільшення коефіцієнту заповнення викликає покращення зазначених вище показників з одночасним ростом енергоефективності роботи схеми.

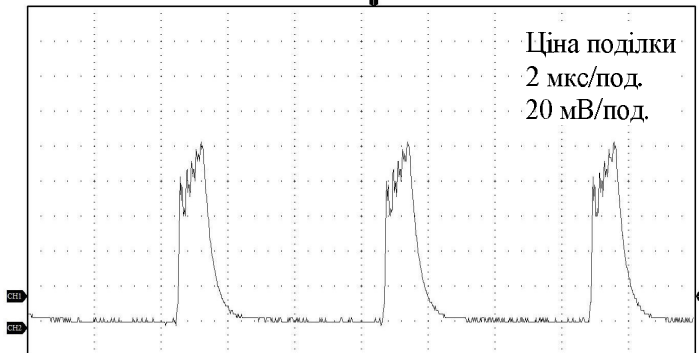


Рис. 15. Осцилограма імпульсів струму

Для підтвердження достовірності результатів, отриманих аналітичним методом та шляхом комп'ютерного моделювання, була побудована малопотужна фізична модель схеми, наведеної на рис. 9.

На рис. 15 наведено отриману осцилограму імпульсних струмів у навантаженні. Міжімпульсний проміжок часу становив 6,25 мкс при заданій тривалості переднього фронту

струму 0,878 мкс (коефіцієнт заповнення 0,14).

Застосування шунтувальної ланки зменшило загальну тривалість імпульсу струму від 4,4 до 1,13 мкс (тобто у 3,9 разів), збільшило амплітуду імпульсних струмів у 1,6 разів, максимальну імпульсну потужність у 2,6 разів, а швидкість наростання струму – майже у 9 разів.

У додатках наведено перелік праць дисертанта, акти впровадження наукових результатів та розрахунки, які доповнюють основну частину дисертації.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено важливе наукове завдання розвитку теорії взаємозалежних перехідних процесів змінення струму в колах електророзрядних установок з керованими напівпровідниковими комутаторами і накопичувальними конденсаторами шляхом удосконалення методів розрахунку і регулювання таких процесів з урахуванням змінення структури кола навантаження і динамічних параметрів розрядного струму. Отримані результати у своїй сукупності мають важливе значення для підвищення ефективності методів розрахунку взаємозалежних процесів у колах електророзрядних установок, що реалізують новітні технології.

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. На основі аналізу відомих наукових публікацій за темою дисертації обґрунтовано актуальність розвитку теорії взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струму в колі навантаження електророзрядних установок з керованими напівпровідниковими комутаторами і накопичувальними конденсаторами, зокрема важливість урахування швидких змінень структури їх розрядного кола та процесів регулювання динамічних параметрів струму в навантаженні.

2. Аналітично і експериментально обґрунтовано підвищення швидкості наростання струму та імпульсної потужності у колі навантаження електророзрядних установок при одночасному примусовому обмеженні тривалості наростання в ньому

струму та зменшенні його добротності, що створило наукову основу для удосконалення методів підвищення динамічних характеристик струмів у навантаженні.

3. Удосконалено метод аналізу взаємозалежних перехідних процесів у колах змінної структури електророзрядних установок шляхом отримання і рішення різницевого рівняння для циклічних процесів наростання та спадання струму в навантаженні, його моделювання еквівалентним активним опором і визначення та регулювання граничних і часових інтервалів відповідно до заданих динамічних характеристик імпульсних струмів у навантаженні. Це дозволяє отримувати тимчасово усталені граничні і часові інтервали розрядного імпульсного струму в навантаженні, за якими можна оцінювати ефективність самого методу, так і режимів електророзрядних установок.

4. Розвинуто метод підвищення динамічних характеристик розрядного струму в навантаженні електророзрядних установок введенням в їхні розрядні кола керованих напівпровідникових комутаторів струму та алгоритмів узгодженого змінення структури цих кіл під час спадання струму у навантаженні, зокрема при підключенні до них заряджених накопичувальних конденсаторів, що може зменшувати тривалість фронту спадання імпульсного струму більше, ніж у 10 разів.

5. Вперше для визначення ефективності введення в коло навантаження електророзрядних установок сучасних коаксіальних кабелів з полімерною ізоляцією розроблено її диференційну схему заміщення та математичну модель, які забезпечують аналізу перехідних процесів в об'ємі ізоляції з урахуванням впливу на них процесів абсорбції її вільних зарядів. Отримані результати за змінням характеру перехідних процесів у колі навантаження електророзрядних установок забезпечують оцінку їхньої надійності.

6. Розроблено новий метод змінення характеру перехідних процесів у колі навантаження електророзрядних установок шляхом введення в це коло послідовних електричних фільтрів низької частоти і коаксіальних кабелів, реактивні розподілені параметри яких являються складовою частиною вказаних фільтрів. Це забезпечує отримання струмів заданої тривалості в електроіскровому навантаженні та підвищення в декілька разів динамічних характеристик електророзрядних установок.

7. Розроблено методики розрахунку взаємозалежних перехідних процесів у колах електророзрядних установок з керованими напівпровідниковими комутаторами у всій області змінення електричного опору навантаження та визначено граничні динамічні характеристики струмів при різних усереднених опорах навантаження.

8. Обґрунтованість і вірогідність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджено узгодженням результатів теоретичних досліджень із результатами чисельних розрахунків, експериментальними даними й раніше отриманими результатами, відомими з літературних джерел.

9. Результати роботи з аналізу взаємозалежних перехідних процесів у колах змінної структури електророзрядних установок використано в Інститутах НАН України (електродинаміки, газу, імпульсних процесів і технологій), Інституті розвитку територіальних громад України, а також у навчальних процесах кафедри теоретичної електротехніки НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського).

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Suprunovska N.I., Shcherba M.A., Peretyatko Yu.V., Roziskulov S.S. Decrease of transients duration and improvement of dynamic characteristics of electrical discharge installations by changing the structure of their discharge circuit. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 15–18.
2. Супруновська Н.І., Перетятко Ю.В., Розіскулов С.С., Михайленко В.В., Чибеліс В.І., Олійник В.С. Регулювання параметрів біполярних імпульсних струмів у навантаженні напівпровідникових електророзрядних установок з накопичувальним конденсатором. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 39–46.
3. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Розискулов С.С., Перетятко Ю.В. Особенности повышения скорости нарастания токов в нагрузке полупроводниковых электроразрядных установок. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2017. Вип. 47. С. 77–85.
4. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Розискулов С.С., Белецкий О.А. Метод регулирования и стабилизации динамических параметров разрядных токов накопительных конденсаторов. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2014. Вип. 38. С. 145–155.
5. Roziskulov S.S., Maslak L.P., Peretyatko Yu.V., Bielkin S.V. Synthesis of three-loop circuits of semiconductor electric discharge installations with reservoir capacitor. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 18 – 21.
6. Розіскулов С.С., Михайленко В.В., Перетятко Ю.В. Змінення тривалості перехідних процесів розряду конденсатора для регулювання параметрів біполярних імпульсних струмів у навантаженні. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 41–43.
7. Щерба М.А., Розискулов С.С., Васильева О.В. Закономерности распределения плотности электрического тока в канале водного триинга в зависимости от его конфигурации. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2014. Вип. 37. С.77–81.
8. Щерба М.А., Розискулов С.С., Васильева О.В. Зависимость возмущений электрического поля в диэлектрике от дисперсности близко расположенных водных микровключений. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 17–19.
9. Розіскулов С.С. Расчет радиально неоднородного электрического поля в полимерной изоляции силовых высоковольтных коаксиальных кабелей. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2013. Вип. 34. С.90–93.
10. Розіскулов С.С., Михайлів В.І., Грабчук Б.Л. Перехідні електромагнітні процеси у неоднорідній електричній ізоляції високовольтних кабелів при її діагностиці методами вимірювання і аналізу струму релаксації та поверненої напруги. *Методи та прилади контролю якості*. 2013, №1 (30), С. 84–91.
11. Сенько В.І., Михайленко В.В., Розіскулов С.С., Бур'ян С.О., Чуняк Ю.М. Перехідні процеси в електричних колах напівпровідникових перетворювачів з дев'ятизонним регулюванням напруги на електротехнологічному навантаженні. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Київ, 2019. Вип. 53. С.75–79
12. Щерба А.А., Розискулов С.С. Переходные электромагнитные процессы в неоднородной электрической изоляции силовых высоковольтных коаксиальных кабелей с твердой полимерной изоляцией при ее диагностике методом измерения тока релаксации. *Технічна електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність"*. 2012. Ч.1. С. 64–70.

13. Розіскулов С.С., Михайлів В.І., Грабчук Б.Л., Зямзіна Г.М. Неруйнівна діагностика ізоляції силових високовольтних кабелів методом поверненої напруги. *Погляд у майбутнє приладобудування: збірник тез доповідей II науково-практичної конференції студентів та аспірантів*, Київ, 10 квітня 2009 р. / М-во освіти і науки України, ПБФ, НТУУ «КПІ». – 2009 р. – с. 163.

14. Розіскулов С.С., Михайлів В.І., Середюк О.Є. Застосування електричного методу контролю для діагностування ізоляції силових високовольтних кабелів. *Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання: Збірник тез доповідей II науково-практичної конференції*, Івано-Франківськ, 25-26 листопада 2009 р. / М-во освіти і науки України, ФЕ і ІВТ ІФНТУНГ. – 2009. – с. 115.

15. Розіскулов С.С., Михайлів В.І., Грабчук Б.Л. Застосування методу поверненої напруги для діагностики силових високовольтних кабелів. *Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні: збірник тез доповідей V науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, Київ, 1 грудня 2009 р. / М-во освіти і науки України, ПБФ, НТУУ «КПІ». – 2009. – с. 59.

16. Розіскулов С.С., Зямзіна Г.М., Михайлів В.І. Удосконалення математичної моделі електричного контролю ізоляції силових високовольтних кабелів. *Погляд у майбутнє приладобудування: збірник тез доповідей III науково-практичної конференції студентів та аспірантів*, Київ, 27-29 квітня 2010 р. / М-во освіти і науки України, ПБФ, НТУУ «КПІ». – 2010. – с. 307.

17. Грабчук Б.Л., Михайлів В.І., Розіскулов С.С. Моделювання електромагнітних процесів у високовольтних кабелях при діагностиці методом поверненої напруги. *Комп'ютерні технології: наука і освіта: тези доповідей V Всеукраїнської науково-практичної конференції*, Київ, 2010 р. / Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна». – 2010. – С. 60-64.

18. Розіскулов С.С., Середюк О.Є., Михайлів В.І. Дослідження впливу експлуатаційних факторів на технічний стан ізоляції високовольтної кабельної лінії. *Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні: збірник тез доповідей VI науково-практична конференції студентів, аспірантів та молодих вчених*, Київ 24 листопада 2010 р. / М-во освіти і науки України, ПБФ, НТУУ «КПІ». – 2010. – с. 67.

АНОТАЦІЇ

Розіскулов С.С. Взаємозалежні перехідні процеси у колах електророзрядних установок з керованими напівпровідниковими комутаторами. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка. – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, 2021 р.

Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню взаємозалежних циклічно повторюваних перехідних процесів, що виникають у колах електророзрядних установок при примусовому обмеженні тривалості та/або величини струму розряду їхніх накопичувальних конденсаторів на навантаження та при використанні повністю керованих напівпровідникових комутаторів.

У роботі теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що збільшення величини ємності накопичувальних конденсаторів електророзрядних установок з одночасним примусовим обмеженням тривалості та/або величини стру-

му розряду їхніх накопичувальних конденсаторів на навантаження призводить до підвищення динамічних та характеристик електророзрядних установок (зокрема швидкості наростання струму та імпульсної потужності у їх навантаженні). Підтверджено доцільність використання силових високовольтних коаксіальних кабелів з твердою полімерною ізоляцією в якості з'єднувальних довгих провідників між електророзрядними установками та їх електричним навантаженням.

Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність використання пасивних послідовних електричних фільтрів низької частоти для підвищення коефіцієнту передачі за напругою між електророзрядними установками та їх електричним навантаженням. Застосування таких фільтрів з незначними конструктивними зміненнями розрядного кола електророзрядних установок значно покращує динамічні та енергетичні характеристики розрядних імпульсів струму в електричному навантаженні. Аналітично обґрунтовано та фізично підтверджено можливість примусового обмеження заднього фронту імпульсу струму в електричному навантаженні шляхом його узгодженого шунтування різними електричними ланками. Таке узгоджене змінення структури розрядного кола електророзрядних установок дозволяє значно скоротити тривалість заднього фронту імпульсів струму і, як наслідок, їх загальну тривалість.

Проведений у роботі енергетичний аналіз підтвердив, що представлені методи розрахунку та аналізу взаємозалежних перехідних процесів у колах змінної структури електророзрядних установок забезпечують підвищення енергоефективності та динамічних характеристик (зокрема швидкості наростання струму та імпульсної потужності у технологічному навантаженні електророзрядних установок). Дисертант вперше розробив диференційну схему заміщення, що враховує радіальну неоднорідність полімерної ізоляції сучасних коаксіальних кабелів, та створив математичну модель, яка дозволяє досліджувати перехідні процеси в об'ємі такої ізоляції з урахуванням виникаючих в ній процесів абсорбції та їх впливу на радіальну напруженість електричного поля. Отримані результати дають можливість оцінити загальну надійність і залишковий ресурс полімерної ізоляції силових кабелів при їх використанні в якості коаксіальних провідників у колі навантаження електророзрядних установок.

Ключові слова: *електророзрядні установки, електроіскрове навантаження, коаксіальні кабелі, електричні перехідні процеси, струм абсорбції, повернена напруга.*

Roziskulov S.S. Interdependent transients in circuits of electric discharge installations with controlled semiconductor switches. – Manuscript.

The thesis for a degree of candidate of technical sciences by speciality 05.09.05 – theoretical electrical engineering. – Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to a complex study of interdependent cyclically repeating transients that occur in the circuits of electric discharge installations, when the duration and/or magnitude of the load current during discharge of their reservoir capacitors is forcibly limited and fully controlled semiconductor switches are used.

In the dissertation work, it is theoretically substantiated and experimentally confirmed that an increase in the value of the capacity of the storage capacitors of the electric discharge installations with a simultaneous forced limitation of the duration and/or the

magnitude of the load current during discharge of their reservoir capacitors leads to an increase in the dynamic characteristics of the electric discharge installations (in particular, the rate of current rise and pulse power in the load). The dissertation confirms the expediency of using power high-voltage coaxial cables with solid polymer insulation as connecting long conductors between the electric discharge installations and their electrical load.

The expediency of using passive sequential low-frequency electric filters to increase the voltage transfer coefficient between electric discharge installations and their electrical load has been theoretically substantiated and experimentally confirmed. The use of such filters with insignificant design changes in the discharge circuit of the electric discharge installations significantly improves the dynamic and energy characteristics of the discharge current pulses in the electrical load. The possibility of forced limitation of the trailing edge of the current pulse in the electrical load by means of its coordinated shunting by various electrical links has been analytically substantiated and physically confirmed. Such a coordinated change in the structure of the discharge circuit of the electric discharge installations can significantly reduce the duration of the trailing edge of the current pulses and, as a consequence, their total duration.

The energy analysis carried out in the work confirmed that the presented methods of calculating and analyzing interdependent transient processes in the circuits of the variable structure of electric discharge installations provide an increase in energy efficiency and dynamic characteristics (in particular, the rate of current rise and pulse power in the technological load of electric discharge installations). The author of the dissertation was the first to develop a differential substitution scheme that takes into account the radial inhomogeneity of the polymer insulation of modern coaxial cables. He created a mathematical model that allows us to study the transients in the volume of such insulation, taking into account the resulting absorption processes and their impact on the radial electric field strength. The obtained results make it possible to evaluate the overall reliability and residual life of the polymer insulation of power cables when used as coaxial conductors in the load circuit of the electric discharge installations.

Key words: *electric discharge installations, electrical spark load, coaxial cables, electrical transients, absorption current, returned voltage.*

Підписано до друку 22.03.2021р. формат 60x84/16

Папір офсетний. умовно – друк аркушів 2,89.

Обл.-вид.аркуш 0,73. тираж 100. замов. 12.

Відділ оперативної поліграфії ІЕД НАН України

03057, Київ-57, проспект Перемоги. 56