

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Розіскулов Сергій Сергійович

УДК 621.3.011

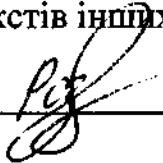
ДИСЕРТАЦІЯ

Взаємозалежні перехідні процеси у колах електророзрядних установок з керованими напівпровідниковими комутаторами

05.09.05 "Теоретична електротехніка"

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



С.С. Розіскулов

Науковий керівник Щерба Максим Анатолійович, доктор технічних наук

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Розіскулов С.С. Взаємозалежні перехідні процеси у колах електророзрядних установок з керованими напівпровідниковими комутаторами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

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

У дисертації взаємозалежними названі такі перехідні процеси, початкові умови кожного з яких (крім першого) залежать від кінцевих умов попереднього, а їхні кінцеві умови (крім останнього) залежать від початкових умов наступного процесу.

Загальна тривалість повторюваності (періоду, загального циклу) взаємозалежних перехідних процесів, що досліджуються у дисертаційній роботі, є сумою тривалостей 3 перехідних процесів: наростання струму у навантаженні від мінімального до максимального, його спадання до допустимого та відсутності струму у навантаженні з його протіканням в електричному колі, до якого не входить навантаження.

Змінення алгоритму керування комутаторами, електричного опору навантаження та умов протікання струму в колі, до якого воно не входить, змінює кінцеві умови відповідного перехідного процесу і початкові умови наступного процесу.

Запропонований підхід дозволяє проводити дискретизацію неперервного перехідного процесу, вводити дискретно змінні початкові та кінцеві умови, оцінювати величину похибки при розрахунках таких перехідних процесів чисельними методами та отримувати умови стійкості такого методу розрахунку та доцільності його використання для побудови алгоритмів керування комутаторами.

У роботі теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що збільшення величини ємності накопичувальних конденсаторів електророзрядних установок з одночасним примусовим обмеженням тривалості та/або величини струму розряду їхніх накопичувальних конденсаторів на навантаження призводить до підвищення динамічних характеристик таких установок (зокрема швидкості наростання струму та імпульсної потужності у їх навантаженні).

Загальний характер перехідних процесів у електричному колі навантаження стає більш аперіодичним, що є позитивним, оскільки призводить до зменшення частки накопичення енергії в індуктивності кола навантаження. Але загальна тривалість струмів у навантаженні значно збільшується, що вимагає розробки додаткових методів зменшення тривалості спадання імпульсних струмів і небажаних втрат електроенергії. З метою зменшення загальної тривалості розрядних імпульсних струмів в навантаженні електророзрядних установок було застосовано примусове обмеження тривалості їх передніх фронтів за допомогою сучасних напівпровідникових силових електричних комутаторів струму, а саме біполярних транзисторів з ізолюваним затвором (IGBT). Це дозволило значно обмежити тривалість розрядних струмів з одночасним збереженням їх динамічних та енергетичних показників.

У роботі підтверджено доцільність використання силових високовольтних коаксіальних кабелів з твердою полімерною ізоляцією в якості з'єднувальних довгих провідників між електророзрядними установками та їх електричним навантаженням. Це дозволяє значно покращити динамічні, енергетичні та часові характеристики розрядних імпульсів струму в електричному навантаженні та (або) значно віддалити його від електророзрядної установки в порівнянні зі з'єднувальними провідниками типу "вита пара", які застосовуються найчастіше.

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, енергетичні та часові характеристики розрядних імпульсів струму в елек-

тричному навантаженні. Крім цього, застосування таких фільтрів змінює характер протікання перехідних процесів в розрядному колі електророзрядних установок – з аперіодичного він може ставати коливальним, при якому тривалість розрядних імпульсів струму стає жорстко заданою і рівною подвоєному часу відпирання силових напівпровідникових комутаторів струму.

За результатами проведених досліджень встановлено, що найбільш доцільним є використання фільтрів низької частоти третього порядку. В порівнянні з фільтрами другого порядку вони мають більший коефіцієнт передачі за напругою, а в порівнянні з фільтрами четвертого порядку більш просту реалізацію та потребують значно меншої ємності конденсаторів.

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. При цьому, енергію магнітного поля, накопичену на розподіленій індуктивності розрядного кола, можливо частково повертати в джерело електричної енергії (тобто в накопичувальний конденсатор) або використовувати для формування переднього фронту наступного імпульсу струму, покращуючи енергетичні та динамічні характеристики електророзрядних установок.

Аналітично визначено оптимальний діапазон напруги на шунтувальній ємності для забезпечення найбільшої ефективності рекуперації електричної енергії, накопиченої на розподіленій індуктивності розрядного кола електророзрядної установки при примусовому обмеженні тривалості заднього фронту імпульсних струмів в її електричному навантаженні.

Експериментально підтверджено можливість використання енергії магнітного поля, накопиченої на розподіленій індуктивності розрядного кола електророзрядної установки при проходженні в ньому переднього фронту імпульсного струму. При цьому вдалося значно зменшити тривалість задніх фронтів імпульсних струмів у електричному навантаженні електророзрядної установки (приблизно в 20 разів),

суттєво збільшити максимальне значення імпульсних струмів (у 1,6 рази), пікову та середню імпульсні потужності, а також збільшити швидкість наростання струму по передньому фронту майже у 9 разів.

Таким чином, у дисертації розвинуто метод аналізу взаємозалежних перехідних процесів у колах змінної структури електророзрядних установок в частині отримання та рішення різницевих рівнянь для циклічних процесів наростання і 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.

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).

Визначено причини появи радіальної неоднорідності електроізоляційного матеріалу силових високовольтних коаксіальних кабелів. Вперше розроблено диференціальну 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 оцінювати загальну надійність і залишковий ресурс полімерної ізоляції силових кабелів при їх використанні в якості коаксіальних провідників у колі навантаження електророзрядних установок.

Результати роботи використано при виконанні НДР в Інституті електродинаміки НАН України та реалізації отриманих результатів в Інституті розвитку територіальних громад України (м. Київ), ТОВ "Голденсидс" та Інституті газу НАН України і в навчальному процесі кафедри теоретичної електротехніки НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського".

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

Список публікацій здобувача

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 (Особистий внесок – брав участь в розробці електричної принципової схеми, комп'ютерному моделюванні роботи схеми та обробці отриманих результатів комп'ютерного моделювання).

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 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання режимів роботи електричної схеми електророзрядної установки, розвиток методу аналізу взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струмів у колах змінної структури).

3. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Розіскулов С.С., Перетятко Ю.В. Особенности повышения скорости нарастания токов в нагрузке полупроводниковых электроразрядных установок. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 47. С. 77–85 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання режимів електричної схеми електроустановки, розвиток методу аналізу взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струмів у колах змінної структури).

4. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Розіскулов С.С., Белецкий О.А. Метод регулирования и стабилизации динамических параметров разрядных токов накопительных конденсаторов. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 38. С.145–155 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів у колах принципової схеми електророзрядних установок, визначення умов ефективного підвищення їхніх динамічних характеристик, як швидкість наростання їх вихідних струмів та імпульсна потужність у навантаженні).

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 (Особистий внесок – комп'ютерне мо-

делювання режимів електричної принципової схеми, визначення умов ефективного підвищення таких динамічних характеристик електророзрядних установок, як швидкість наростання їх вихідних струмів та імпульсна потужність у навантаженні).

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 (Особистий внесок – удосконалення методу підвищення динамічних характеристик струму у навантаженні введенням керованих напівпровідникових комутаторів струму).

7. Щерба М.А., Розіскулов С.С., Васильєва О.В. Закономерности распределения плотности электрического тока в канале водного триинга в зависимости от его конфигурации. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 37. С.77–81 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання, аналіз та верифікація отриманих результатів моделювання).

8. Щерба М.А., Розіскулов С.С., Васильєва О.В. Зависимость возмущений электрического поля в диэлектрике от дисперсности близко расположенных водных микровключений. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 17–19 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання, аналіз та верифікація отриманих результатів моделювання).

9. Розіскулов С.С. Расчет радиально неоднородного электрического поля в полимерной изоляции силовых высоковольтных коаксиальных кабелей. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 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 (Особистий внесок – аналіз та моделювання перехідних процесів у радіально неоднорідній ізоляції силових коаксіальних кабелів).

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*. 2019. Вип. 53. С.75–79 (Особистий внесок – удосконалення методу підвищення динамічних характеристик струму у навантаженні введенням керованих напівпровідникових комутаторів струму).

12. Щерба А.А., Розіскулов 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. Темат. вип. "Силова електроніка та енерго-ефективність"*. 2012. Ч.1. С. 64–70 (Особистий внесок – аналіз перехідних процесів у неоднорідній ізоляції кабелів, розробка диференційної схеми заміщення і моделей ізоляції кабелів).

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 конфе-*

ренції студентів та аспірантів, Київ, 27-29 квітня 2010 р. / М-во освіти і науки України, ПФФ, 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-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Київ 24 листопада 2010 р. / М-во освіти і науки України, ПФФ, НТУУ «КПІ». 2010. С. 67.

ABSTRACT

Roziskulov S.S. Interdependent transients in circuits of electric discharge installations with controlled semiconductor switches. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

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 forcedly limited and fully controlled semiconductor switches are used.

In the dissertation, such transients are called interdependent, the initial conditions of each of which (except for the first process) depend on the final conditions of the previous one, and their final conditions (except for the last one) depend on the initial conditions of the next process.

The total duration of repetition (period, total cycle) of interdependent transients studied in the dissertation is the sum of the durations of 3 transients: the increase of current in the load from minimum to maximum, its decrease to the allowable and no current in the load during its flow in the circuit, which does not include the load.

The final conditions of the corresponding transient process and the initial conditions of the next process change due to changes in both the control algorithm of the switches and the electrical load resistance and current flow conditions in the circuit, which does not include this resistance.

The proposed approach allows to discretize a continuous transient process, introduce discrete variable initial and final conditions, estimate the magnitude of error in the calculation of such transients by numerical methods and obtain conditions for the stability of this calculation method and the feasibility of its use to develop switch control algorithms.

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 installations (in particular, the rate of current rise and pulse power in the load).

The general nature of transient processes in the load circuit becomes more aperiodic, which is positive, since it leads to a decrease in the share of energy accumulation in the inductance of the load circuit. But the total duration of the currents in the load increases significantly, which requires the development of additional methods to reduce the duration of the drop in impulse currents and unwanted losses of electric power. In order to reduce the total duration of the discharge pulse currents in the load of electric discharge installations, a forced limitation of the duration of their leading edges was applied using modern semiconductor power electrical current switches, namely, insulated gate bipolar transistors (IGBTs). This made it possible to limit significantly the duration of the discharge currents and at the same time preserve their dynamic and energy performance.

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. This allows to significantly improve the dynamic, energy and time characteristics of the discharge current pulses in the electric load and (or) significantly move it away from the electric discharge installation in comparison with the connecting conductors of the "twisted pair" type, which are most often used.

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. In addition, the use of such filters changes the nature of transients in the discharge circuit of electric discharge installations from aperiodic transients to an oscillatory one, in which the duration of the discharge current

pulses becomes strictly specified and equal to the doubled time of unlocking the power current switches.

According to the results of the studies carried out, it was found that the most expedient is the use of third-order low-frequency filters. Compared to second-order filters, they have a higher voltage transfer coefficient, and compared to fourth-order filters, they are simpler to implement and require significantly less capacitor capacitance.

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. In this case, the energy of the magnetic field accumulated on the distributed inductance of the discharge circuit can be partially returned to the source of electrical energy (i.e. to the storage capacitor) or used to form the leading edge of the next current pulse, improving the energy and dynamic characteristics of the electric discharge installations.

The optimal range of voltage across the shunt capacitors is analytically determined to ensure the highest efficiency of recuperation of electrical energy accumulated on the distributed inductance of the discharge circuit of an electric discharge installation with a forced limitation of the duration of the trailing edge of pulse currents in its electrical load.

The possibility of using the energy of the magnetic field accumulated on the distributed inductance of the discharge circuit of the electric discharge installation when the leading edge of the pulse current passes through it has been experimentally confirmed. At the same time, it was possible to significantly reduce the duration of the trailing edges of pulse currents in the electrical load of the electric discharge installation (by about 20 times), significantly increase the maximum value of pulse currents (1.6 times), peak and average pulse powers, and also increase the rate of rise of the leading edge current by almost 9 times.

Thus, the dissertation developed a method for analyzing interdependent transient processes in circuits of variable structure of electric discharge installations in terms of obtaining and solving difference equations for cyclic processes of increasing and decreasing current in the load, modeling the load with an equivalent active resistance and

determining and regulating the limit and time intervals in accordance with given dynamic characteristics of impulse currents in the load.

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 reasons for the appearance of radial inhomogeneity of the electrical insulating material of power high-voltage coaxial cables are determined. 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.

The results of the work were used in the implementation of research work at the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine and Institute of the Development of Territorial Communities of Ukraine (Kiev), "Goldenseeds" LLC and Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine as well as in the educational process of the Department of Theoretical Electrical Engineering of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

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

З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК, ФОРМУЮЧИХ У НАВАНТАЖЕННІ СТРУМИ НЕКЕРОВАНОЇ ТРИВАЛОСТІ	26
1.1 Перехідні процеси в колах заряду та розряду ємнісних накопичувачів енергії без використання напівпровідни- кових комутаторів струму	26
1.2 Зменшення втрат електроенергії в електророзрядних установках при використанні в їх колах напівпровідни- кових комутаторів для формування коливальних пере- хідних процесів	29
1.3 Перехідні процеси в колах напівпровідникових елект- ророзрядних установок з накопичувальними конденса- торами та регульованим зворотним зв'язком за напру- гою.....	33
Висновки до розділу 1.....	38
РОЗДІЛ 2 ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМУ В НАВАНТАЖЕННІ РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНИХ УСТАНОВОК.....	42
2.1 Підвищення динамічних характеристик струму керованої тривалості у навантаженні шляхом збільшення елек- тричної ємності накопичувальних конденсаторів елек- тророзрядних уставок.....	42
2.2 Покращення електродинамічних характеристик розря- дних імпульсних струмів в навантаженні електророзря- дних установок шляхом зменшення індуктивності роз- рядного кола.....	53

2.3	Підвищення динамічних характеристик імпульсних струмів в навантаженні електророзрядних установок шляхом використання в їх колах електричних фільтрів низької частоти.....	61
	Висновки до розділу 2.....	90
	РОЗДІЛ 3 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В РАДІАЛЬНО НЕОДНОРІДНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ.....	92
3.1	Використання сучасних силових кабелів у колі навантаження електророзрядних установок.....	92
3.2	Розробка диференційної схеми заміщення радіально неоднорідної ізоляції.....	94
3.3	Перехідні процеси в радіально неоднорідній ізоляції коаксіального кабелю.....	99
	Висновки до розділу 3.....	111
	РОЗДІЛ 4 ВЗАЄМОЗАЛЕЖНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ.....	112
4.1	Перехідні процеси в колах електророзрядних установок з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту імпульсних струмів.....	112
4.2	Енергетичний аналіз перехідних процесів при примусовому обмеженні тривалості задніх фронтів імпульсних струмів.....	118
4.3	Перехідні процеси в колах електророзрядних установок з шунтувальними ланцюгами рекуперації електроенергії.....	121
4.4	Підвищення динамічних характеристик розрядних імпульсних струмів шляхом використання енергії магнітного поля розрядного кола.....	142
	Висновки до розділу 4.....	170

Загальні ВИСНОВКИ.....	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дицїї.....	195
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів роботи.....	200
ДОДАТОК В Аналіз характеру електроіскрового навантаження при негармонійному електричному розряді з керованою тривалістю переднього фронту.....	206
ДОДАТОК Г Визначення вихідних електричних параметрів формувача розрядних імпульсів.....	216
ДОДАТОК Д Розрахунок погонної індуктивності з'єднувальних провідників.....	219
ДОДАТОК Е Розрахунок активного опору та ефективного перерізу з'єднувальних провідників.....	222
ДОДАТОК Ж Осцилограми імпульсних струмів в безіндукційному резистивному навантажені.....	225
ДОДАТОК И Вимірювання індуктивності технологічної камери.....	230
ДОДАТОК К Перехідні процеси в радіально неоднорідній електричній ізоляції силових високовольтних коаксіальних кабелів....	232
ДОДАТОК Л Перехідні процеси в колах електророзрядних установок з ємнісними шунтувальними ланками.....	250
ДОДАТОК М Електророзрядні установки.....	269

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ДОН – джерело опорної напруги;
ЕІН – електроіскрове навантаження;
ЕК – електричний ключ;
ЕН – електричне навантаження;
ЕРУ – електророзрядна установка;
ЄНЕ – ємнісний накопичувач енергії;
ЗП – з'єднувальний провідник;
ІЕД – Інституті електродинаміки;
ІС – імпульсний струм;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
МЕП – міжелектродний проміжок;
НК – накопичувальний конденсатор;
НП – напівпровідниковий;
НЧ – низька частота;
ОЕІД – об'ємне електроіскрове диспергування;
ППЕФ – пасивний послідовний електричний фільтр;
РНЕІ – радіально неоднорідна електрична ізоляція;
СВКК – силовий високовольтний коаксіальний кабель;
ТПІ – тверда полімерна ізоляція;
ФПН – формувач постійної напруги;
ФРІ – формувач розрядних імпульсів.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасний етап інтенсивного розвитку імпульсної електротехніки базується на удосконаленні електророзрядних установок (ЕРУ) з проміжними накопичувальними конденсаторами (НК), які забезпечують отримання у електричному навантаженні (ЕН) найбільших імпульсних потужностей і швидкостей наростання струму, які неможливо реалізувати при використанні інших накопичувачів (електроіндукційних, електрохімічних і т.п.) [1-7]. Тривалий час дослідження електромагнітних процесів у колах таких ЕРУ спрощувались, так як у більшості випадків НК розряджали повністю і перехідні процеси в колах їх заряду і розряду аналізували, як незалежні [8-24]. Суттєві результати з дослідження таких перехідних процесів у колах ЕРУ з ємнісними накопичувачами енергії (ЄНЕ) отримали такі відомі вчені, як Лазаренко Б.Р. та Н.І., Золотих Б.Н., Юткін Л.О., Шидловський А.К., Волков І.В., Пентегов І.В., Отто М.Ш., Щерба А.А., Вовченко О.І., Супруновська Н.І., Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Калеко Д.М., T. Lane, J. Priestly, A.E. Berkowitz, W. Ishibashi, J. Reinhard, та інші [1-7, 12-14, 24-72].

У роботах Щерби А.А. і Супруновської Н.І. [74-78] показано, що використання додаткових електричних кіл дозволяє реалізовувати регульовані додатні та від'ємні зворотні зв'язки за напругою, що забезпечує отримання в ЕРУ коефіцієнту корисної дії (ККД) більше 90% та можливість підвищувати напругу на навантаженні до 1 кВ і більше. Але в колах таких ЕРУ перехідні процеси стають взаємозв'язаними, що ускладнює їх аналіз та визначення оптимальних параметрів [78, 79].

На даний час в Україні та світі зростає потреба отримання дрібнодисперсних порошків і колоїдних розчинів різних металів та їх хімічних сполук [80-94]. Це вимагає подальшого збільшення таких динамічних параметрів, як імпульсна потужність і швидкість наростання розрядного струму в навантаженні ЕРУ, спрямованих на реалізацію технологічних процесів об'ємного електроіскрового диспергування шару металевих гранул у рідинах між електродами [95-99]. Попередні дослідження, проведені в Інституті електродинаміки (ІЕД) НАН України за участю автора дисертації, показали можливість підвищення вказаних динамічних характеристик на основі використання в ЕРУ повністю керованих напівпровідникових комутаторів,

включення в розрядні кола низькочастотних електричних фільтрів та узгодженого змінення структури електричного кола навантаження під час протікання розрядних струмів [100]. Проте проведення в указаному перспективному напрямку експериментальних досліджень є дуже затратним, а теоретичні дослідження обмежувались відсутністю фізико-математичних підходів і моделей для аналізу взаємозв'язаних перехідних процесів, виникаючих в різних вітках кола навантаження 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 тема розвиток теорії взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струму в колі навантаження ЕРУ з керованими напівпровідниковими комутаторами і НК для урахування змінення структури електричного кола під час їхнього розряду на навантаження та процесів регулювання параметрів розрядного струму. є актуальним науковим завданням.

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

Дисертаційні дослідження проводилися згідно планів держбюджетних фундаментальних НДР "Імроз" (№ ДР 0112U008204) та "Елкаб" (№ ДР 0117U007713), виконаних за рішеннями Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України (протоколи №14 від 25.09.2012 та №14 від 04.07.2017), і прикладних НДР: "Елста-П" (№ ДР 0112U008328), "Інтерм-П" (№ ДР 0115U004397) та "Елтерм-П" (№ ДР 0119U001212), виконаних у 2012–2021 рр. за рішеннями Вченої ради Інституту електродинаміки НАН України.

У НДР "Імроз" та "Елкаб" здобувач був відповідальним виконавцем робіт з аналізу взаємозалежних перехідних процесів у колах напівпровідникових ЕРУ з НК і керованими комутаторами, які змінювали характер виникаючих перехідних процесів. У НДР "Елста-П", "Інтерм-П" та "Елтерм-П" він визначав узгоджені змінення структури кола навантаження ЕРУ під час розряду НК на навантаження та умови примусового обмеження параметрів розрядного струму для підвищення динамічних характеристик ЕРУ з напівкерованими та керованими напівпровідниковими комутаторами.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розвиток теорії взаємозалежних перехідних процесів підвищення і спадання струму в колі навантаження електро-розрядних 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 техноло-

гій 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 завдань здійснювалося з використанням методів теорії перехідних процесів у лінійних електричних колах: класичного методу аналізу перехідних процесів – для розв'язку диференціальних рівнянь з постійними параметрами, якими було описано електромагнітний стан кола навантаження електророзрядної установки; операторний метод аналізу перехідних процесів – для визначення струмів і напруг у розрядному колі змінної структури електророзрядної установки; метод різницевого рівнянь – для визначення електричних характеристик (максимальних значень імпульсних струмів) для повторюваних взаємозалежних перехідних процесів у колі навантаження ЕРУ. Використовувалася теорія синтезу електричних кіл – для оптимізації параметрів елементів розрядного кола ЕРУ та отримання максимального значення коефіцієнту передачі за напругою при заданій тривалості розрядних імпульсів у навантаженні; теорія електричних фільтрів та передавальних функцій електричних кіл – для цілеспрямованого змінення характеру перехідних процесів у розрядному колі ЕРУ. Застосовувалися методи математичного моделювання – для розрахунку і візуалізації перехідних процесів в колах ЕРУ.

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 різницевих рівнянь 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. Зок-

рема, 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 політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Особистий внесок здобувача.

Безпосередньо автором здійснено:

- інформаційний пошук та аналіз літературних даних за темою дисертації;
- за результатами огляду науково-технічної літератури та наукових праць проведено аналіз існуючих методів і засобів підвищення динамічних, енергетичних та часових характеристик імпульсних струмів в технологічному навантаженні ЕРУ;
- проаналізовано вплив параметрів розрядного кола на характер протікання перехідних процесів у ньому, а саме ємності накопичувального конденсатора, індуктивності розрядного кола, часу відпирання силових напівпровідникових комутаторів струму;
- розроблено методику підвищення динамічних, енергетичних та часових характеристик імпульсних струмів в технологічному навантаженні ЕРУ шляхом зменшення добротності розрядного кола та примусового обмеження тривалості передніх фронтів імпульсних струмів напівпровідниковими комутаторами струму;

– розроблено методику підвищення коефіцієнту передачі за напругою між ЕРУ та його електричним навантаженням шляхом використання пасивних послідовних електричних фільтрів низької частоти другого - четвертого порядків, яка дозволяє значно покращити динамічні, енергетичні та часові характеристики імпульсних струмів в технологічному навантаженні ЕРУ при незначних конструктивних змінах в їх розрядних колах;

– розроблено диференційну схему заміщення та математичну модель радіально неоднорідної твердої полімерної ізоляції силових високовольтних коаксіальних кабелів;

– за допомогою розроблених диференційної схеми заміщення та математичної моделі радіально неоднорідної електроізоляції проведено аналіз перехідних процесів, що протікають безпосередньо в шарах такої ізоляції, детально розглянуті процеси абсорбції та десорбції вільного електричного заряду такою ізоляцією;

– розроблено методику скорочення тривалості задніх фронтів імпульсних струмів у навантаженні ЕРУ шляхом узгодженого змінення структури розрядного кола шляхом шунтуванням навантаження ЕРУ додатковими ланцюгами;

– проведений аналіз взаємозалежних перехідних процесів, що протікають в розрядних колах ЕРУ змінної структури, за результатами якого визначено енергоефективність їх роботи;

– розроблені методи підвищення енергоефективності роботи ЕРУ зі зміною структурою розрядного кола шляхом використання енергії магнітного поля, накопиченої на розподіленій індуктивності розрядного кола ЕРУ під час протікання в ньому передніх фронтів імпульсних струмів для формування передніх фронтів наступних імпульсів струму або рекуперації цієї енергії в накопичувальну ємність формувача опорної напруги;

– участь у проведенні експериментальних досліджень, обробці та аналізі отриманих результатів фізичних експериментів.

Співавторами наукових праць є науковий керівник та науковці, спільно з якими проводились дослідження, а саме Щерба М.А., Щерба А.А., Супруновська Н.І. Перетятко Ю.В., Михайленко В.В.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і творчий доробок.

Постановка мети та завдань проведені разом з науковим керівником. Наукові та практичні результати, які висвітлено у дисертаційній роботі, одержано здобувачем особисто під керівництвом д.т.н. Щерби М.А.

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.)

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 270 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 11 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 165 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 14 таблицями та 106 рисунками. Список використаних джерел містить 192 найменування, з них 156 кирилицею та 36 латиницею.

РОЗДІЛ 1

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК, ФОРМУЮЧИХ У НАВАНТАЖЕННІ СТРУМИ НЕКЕРОВАНОЇ ТРИВАЛОСТІ

1.1 Перехідні процеси в колах заряду та розряду ємнісних накопичувачів енергії без використання напівпровідникових комутаторів струму

В імпульсних електротехнологіях використовуються накопичувачі, що віддають накопичену енергію у вигляді імпульсу електричної енергії – електричного розряду. Це ємнісні та індуктивні накопичувачі енергії, ударні та електрохімічні генератори [13, 101-103]. Вибір того чи іншого способу накопичення електричної енергії визначається типом, параметрами і умовами роботи перетворювачів і вимог, що пред'являються до установок в цілому.

Електрохімічні генератори представляють собою пристрої, в яких енергія накопичується і зберігається у вигляді хімічної енергії, а віддається у вигляді електричної. Це, в основному, різні електроакумулятори, розраховані на роботу в імпульсному режимі. Їх застосування виправдане при великих тривалостях і порівняно малих значеннях імпульсних струмів [28, 56, 104, 105].

В ударних генераторах енергія накопичується у вигляді кінетичної енергії ротора і спеціальних маховиків, а віддається у вигляді потужних імпульсів струму [20, 28, 106]. Використання ударних генераторів доцільно тоді, коли потрібні тривалості імпульсів струму від сотих часток секунди до десятків секунд і віддача в навантаження за час одного напівперіоду понад 10 МДж [21, 107]. Недоліком ударних генераторів є те, що віддача накопиченої енергії за один напівперіод струму становить лише незначну частину всієї накопиченої енергії (загальмувати повністю ротор за час тривалості одного напівперіоду струму практично неможливо). Для збільшення частки енергії, що передається навантаженню, практикують спільну роботу ударного генератора з допоміжною батареєю конденсаторів [20, 21]. Однак, незважаючи на можливість отримання великих імпульсних потужностей, застосування ударних ге-

нераторів обмежене складністю комутацій і виникненням перенапруг, а також низьким ККД при роботі на низькоомне навантаження [108].

В індуктивних накопичувачах енергія запасється у вигляді енергії магнітного поля. Індуктивні накопичувачі енергії можуть бути як зі сталлю, так і без неї [27, 109], з обмоткою із звичайного провідного матеріалу та із надпровідників. Індуктивні накопичувачі енергії можуть застосовуватися при великому діапазоні тривалостей імпульсів струму і величин накопичених енергій. Широкому поширенню індуктивних накопичувачів перешкоджають певні труднощі, пов'язані з комутацією струму і захистом від аварійних режимів, складністю тривалого зберігання і стабілізації енергії накопичувача в режимі очікування, а також з великою масою і габаритами [28, 103, 108,]. Застосування індуктивних накопичувачів енергії доцільно при тривалості розрядних імпульсів більше 6 мс [56, 110], а при накопичуваній енергії більше 0,5 МДж доцільніше використовувати надпровідникові накопичувачі [108, 111].

Кращі показники імпульсної потужності і допустимого струму короткого замикання, віднесені до об'єму, маси і вартості, мають в даний час ємнісні накопичувачі енергії, найбільш широко застосовувані в джерелах живлення різних імпульсних навантажень [56, 57, 63, 103, 107, 108, 110, 112-120]. Цьому сприяє можливість заряду із жорстким дозуванням, тривалим зберіганням і віддачею енергії конденсатора в навантаження з втратами у багато разів меншими, ніж при використанні інших типів накопичувачів. Батарей конденсаторів використовуються для отримання імпульсів струму найрізноманітнішої тривалості і енергії – від десятків джоулів до десятків і навіть сотень мегаджоулів [56, 103, 114, 121, 122].

До переваг ємнісних накопичувачів енергії, що зумовили їхнє широке поширення, слід віднести простоту здійснення комутацій при заряді і розряді батареї конденсаторів і можливість жорсткого дозування накопиченої енергії за допомогою стабілізації рівня напруги заряду конденсаторів.

У зв'язку з розвитком імпульсної електроенергетики і виникненням нових вимог, обумовлених необхідністю поліпшення експлуатаційних і енергетичних характеристик зарядних пристроїв ємнісних накопичувачів енергії (підвищенням ККД, зменшенням часу заряду, зменшенням потужності, споживаної від мережі при заря-

ді, і т. д.), з'явилася велика кількість зарядних пристроїв, що відрізняються один від одного, як схемними рішеннями, так і процесами, які в них відбуваються [101].

Для різних технологічних установок і процесів використовуються різні способи заряду ємнісних накопичувачів. Відомі три способи заряду накопичувальних конденсаторів: при постійному струмі, при незмінній потужності і заряд від джерела постійної напруги. Заряд конденсаторів від джерел струму може бути реалізований при дуже високому ККД (теоретично близькому до 100%). В Інституті електродинаміки НАН України розроблено низку схем на основі індуктивно-ємнісних перетворювачів (ІЄП) [55, 56, 123]. Але частота проходження імпульсів на виході ІЄП не може бути вищою за частоту живильної мережі.

Заряд накопичувальних конденсаторів може також здійснюватися від мережі з постійною потужністю. Основними перевагами такого заряду є: мінімально можливі втрати у вхідних ланцюгах перетворювача, високий коефіцієнт використання первинного джерела, усунення впливу пульсацій енергоспоживання навантаженням на режими інших споживачів, підключених до загальної мережі живлення [28, 103, 124]. Основним недоліком заряду накопичувальних конденсаторів при незмінній потужності є відсутність простих і ефективних схем.

Найбільшого поширення набув спосіб заряду накопичувальних конденсаторів від формувача постійної напруги (ФПН) через струмообмежувальні елементи. Схеми, які використовують для обмеження струму безіндуктивні резистивні елементи, дуже прості, але мають низький ККД, тому їх використання обмежене малопотужними лабораторними установками. У потужних промислових системах і комплексах зазвичай використовують реактивні струмообмежувальні елементи – дроселі або конденсатори [28, 103, 107, 108, 125]. Схеми перетворювача з дроселем, що обмежує струм заряду конденсатора, і керованими комутаторами (тиристорами) у зарядному і розрядному колах конденсатора з успіхом застосовуються для електроживлення установок диспергування металів іскровими розрядами в шарі гранул [122, 126-131]. Для установок об'ємного іскроерозійного диспергування металевих гранул у рідині найбільш простим і енергетично обґрунтованим є заряд накопичувального конденсатора від ФПН і його розряд з невеликим перезарядом (не більше 30% від

величини напруги заряду) на електроіскрове навантаження (ЕІН) з використанням при цьому в зарядному і розрядному колах тиристорних комутаторів [108, 122, 128, 129-131].

При використанні ємнісних накопичувачів енергії актуальною є проблема підвищення динамічних характеристик (насамперед швидкості наростання і спадання струмів) їх розрядних ланцюгів.

Застосування ємнісних накопичувачів електричної енергії з одного боку дозволяє реалізувати в навантаженні більшу імпульсну потужність, і з іншого боку виключити вплив стохастичних змін його електричного опору на режими живильної електричної мережі. В такому випадку в колах заряду конденсатора виникають детерміновані перехідні електричні процеси, для дослідження яких можливо застосувати аналітичні методи.

1.2 Зменшення втрат електроенергії в електророзрядних установках при використанні в їх колах напівпровідникових комутаторів для формування коливальних перехідних процесів

У технологічних електророзрядних установках на напруги до 1000 В як комутатори зазвичай використовуються тиристори, які вибираються за середнім значенням струму і величинам прямої і зворотної напруг. Потім визначається максимальний струм, який може протікати через тиристор в найнесприятливіших умовах (перший напівперіод), швидкість його наростання, допустима швидкість наростання напруги на тиристорі в закритому стані і проводиться перевірка приладу за всіма показниками. Працездатність напівпровідникових вентилів залежить від температури їх структури. Максимальна температура залежить не тільки від середнього значення струму, але і від характеру його зміни в часі. Тому для перевірки теплового режиму роботи вентиля необхідно знати, строго кажучи, закон зміни струму, що протікає через вентиль, в часі. Але навіть при простих законах зміни струму такі розрахунки досить складні [8, 22, 132-135] і здійснюються за так званими перехідними тепловими опорами – функціями часу з використанням методу накладання.

При аналізі перехідних процесів в розрядних колах розрахунком теплових режимів напівпровідникових вентилів зазвичай нехтують.

Інше важливе допущення, яке істотно спрощує аналіз пристроїв з реактивними опорами в колі змінного струму, полягає в тому, що перехідні явища, що виникають в момент включення пристрою, враховуються не завжди точно. Зазвичай приймають також, що тиристор включається миттєво, змінюючи свій опір від нескінченно великого значення до нуля (тобто нехтують втратами в тиристорі, як в закритому, так і у відкритому його стані).

Однією з основних електродинамічних проблем удосконалення формувачів імпульсних струмів для електророзрядних установок є підвищення їх динамічних характеристик: швидкості наростання струмів та зменшення їх тривалості у технологічному навантаженні, оскільки при цьому зростає їхній силовий вплив на навантаження. Зважаючи на те, що активна потужність, яка виділяється у навантаженні, є прямо пропорційною величині його активного опору й квадратичному значенню розрядного (імпульсного) струму, то підвищення силового впливу на технологічне навантаження, по суті, досягається формуванням у ньому великих імпульсних струмів малої тривалості. Зокрема, в установках об'ємного електроіскрового диспергування (ОЕІД) металів і сплавів у діелектричній рідині збільшенням швидкості наростання розрядних струмів і зменшенням їхньої тривалості можливо зменшувати розміри отримуваних дисперсних іскроерозійних частинок [5, 6, 136, 137].

Електричний опір технологічного навантаження зазвичай є істотно нелінійним, тому аналітичні дослідження перехідних процесів в розрядному колі при розряді конденсатора на таке навантаження пов'язані з великими труднощами через складність точного математичного опису всіх електрофізичних процесів. У роботах [17, 138-143] розглянуто аналітичні рішення перехідних процесів в розрядному колі конденсатора з використанням різних апроксимацій для нелінійного опору ЕН.

Зміна електричного опору технологічного навантаження і відповідно режимів розряду на нього накопичувального конденсатора може відбуватися випадковим чином, що ускладнює застосування аналітичних методів. Тому оцінка меж зміни величини електричного опору навантаження зазвичай здійснюється експериментально і

спрямована на виявлення закономірностей цієї зміни та визначення характеру зв'язку між електричними і технологічними параметрами.

Для оцінки середньостатистичних імпульсних електричних характеристик (імпульсної потужності, тривалості розрядного імпульсу, максимального струму, швидкостей наростання і убування розрядного струму і ін.) використовують різні моделі електричного опору технологічного навантаження. Так в установках електроіскрового диспергування металів часто приймають допущення, що електричний опір навантаження є незмінним протягом тривалості одного розрядного імпульсу, але може стрибкоподібно змінити своє значення в наступному розрядному імпульсі (від імпульсу до імпульсу) [5]. У більшості випадків такий опір визначається за формулою:

$$R_{H0} = \int_0^{\tau_{PI}} i^2(t) R_H(t) dt / \int_0^{\tau_{PI}} i^2(t) dt,$$

де R_{H0} – електричний опір навантаження, незмінний протягом тривалості одного розрядного імпульсу τ_{PI} ; $R_H(t)$ – опір навантаження, який змінюється протягом тривалості одного розрядного імпульсу τ_{PI} ; $i(t)$ – струм в розрядному колі.

При цьому вважається, що величина такого незмінного опору залежить від величини напруги заряду робочого конденсатора ємністю C .

У роботах, пов'язаних з аналізом електричних характеристик розрядів у воді [23, 137, 144-146], робиться спроба поділу їх на малопотужні і потужні (потужними називаються розряди, що мають великий рівень енергії, що запасається). Поділ розрядів за енергетичним принципом не завжди виправдовує себе. Так, при розряді у воді конденсаторної батареї ємністю $0,15 \cdot 10^{-5}$ Ф, зарядженої до напруги 40 кВ, і при індуктивності розрядного кола $0,4 \cdot 10^{-6}$ Г максимальна швидкість виділення енергії може скласти $0,25 \cdot 10^9$ Вт. Таку ж швидкість виділення енергії забезпечує розряд з ємністю $C = 10^{-4}$ Ф; $L = 2 \cdot 10^{-6}$ Г; $U_0 = 1,5 \cdot 10^4$ В, хоча запасена енергія у розрядів, сформованих цими параметрами, на два порядки вище попередніх [147].

Для розв'язку системи рівнянь, яка описує динаміку розрядів, необхідно застосовувати чисельні методи. Такий розв'язок можливий при заданому наборі параметрів, що визначають співвідношення елементів ємнісного накопичувача енергії з на-

вантаженням, і відомих початкових умовах. Однак при цьому неможливо заздалегідь передбачити характер поведінки основних електричних і гідродинамічних характеристик, проаналізувати вплив на процес того чи іншого набору параметрів, вирішити оптимізаційні завдання. При розробці і створенні електровибухових пристроїв, а також систем їх автоматичного керування необхідне знання їх електричних і гідродинамічних характеристик. На перший план тут виступають завдання, пов'язані з рішенням перехідного процесу і знаходженням критеріїв, що дозволяють систематизувати класи розрядів [148]. Одним з таких узагальнених параметрів в теорії лінійних кіл є, наприклад, відношення активного опору кола до характеристичного опору – $R/\sqrt{L/C}$. Деякі автори [18, 149, 150], намагаючись перенести досвід з розрахунку лінійних кіл на рішення перехідного процесу в RLC -колі з іскровим розрядом, прагнули знайти якийсь постійний еквівалент для мінливого в процесі розряду опору. Однак знайдений еквівалент, будучи функцією параметрів кола, виключає можливість будь-якої класифікації режимів розряду. Тому видається дуже важливим знайти (навіть на шкоду точності) такі математичні прийоми, за допомогою яких можна було б отримати рішення перехідного процесу в умовах існуючої нелінійності, представивши нелінійний активний елемент як функцію електричних параметрів (струму або напруги). Отримані різні апроксимувальні вирази для опору як функції струму розряду і часу для своєї реалізації в перехідному процесі вимагають виділення додаткових постійних, що визначаються режимом розряду [52].

До того ж ряд виразів, наприклад з робіт [139, 151, 152], призводять до нескінченно великих значень для опору в момент $t = 0$, а також у вузлах струмової кривої [17, 153]. Початкові умови, які при розрядах у воді з підвищеною провідністю можуть відігравати суттєву роль, в даному випадку взагалі не враховуються або представлені тільки величиною початкового опору.

1.3 Перехідні процеси в колах напівпровідникових електророзрядних установок з накопичувальними конденсаторами та регульованим зворотним зв'язком за напругою

Явище електроерозії для отримання порошків металів досліджувалося ще в 40-х роках ХХ століття [27-29]. Однак дослідження обмежувались вивченням ерозії однієї пари електродів при проходженні імпульсів струму в проміжку між ними, заповненому лише діелектричної рідиною, що не дозволяло отримувати промислові обсяги порошків металів і їх з'єднань. Тому подальші дослідження розвивалися в напрямку розмірної електричної обробки металів по складному профілю і відповідно створення верстатів і їх джерел електроживлення.

Можливість створення високопродуктивної технології одержання дрібнодисперсних порошків металів і їх з'єднань виникла при дослідженні електроерозії в міжелектродному проміжку, заповненому шаром вільно дотичних шматочків (частіше гранул) металів, занурених в проточну діелектричну рідину [31-35, 37, 154-160].

Дослідження, проведені в Інституті електродинаміки ІЕД НАН України на ЕРУ для ОЕІД металів, довели існування багатоканального розряду, тобто безлічі мігруючих розрядних іскрових ланцюжків між електродами, при проходженні одного імпульсу струму. Існування багатоканального розряду дає можливість підвищити продуктивність порошкоутворення внаслідок виникнення ерозії не на одному, як при розмірній обробці, а на багатьох контактах при проходженні між електродами одного імпульсу струму.

В ІЕД НАН України був проведений експеримент, який доводить проходження в міжелектродному проміжку (МЕП) багатоканального розряду по паралельних ланцюжках, утворених дотичними гранулами [4]. В експерименті МЕП був розділений на два об'єми діелектричної перегородкою, встановленою перпендикулярно електродам. На рис. 1.1 приведені осцилограми загального струму, який формується перетворювачем, і струму в кожному з розділених об'ємів.

З отриманих осцилограм випливає, що для кожного моменту часу струм, що формується перетворювачем, являє собою суму струмів, що протікають через два розділених об'єми, тобто канали розряду існують одночасно в кожному з об'ємів. Причому, число каналів в кожному об'ємі не є постійним, як і не є постійним опір

каналів, оскільки криві струмів i_1 , i_2 через розділені об'єми сильно відрізняються і явно видно, що наростання струму в одному з об'ємів відповідає зменшенню струму в іншому об'ємі.

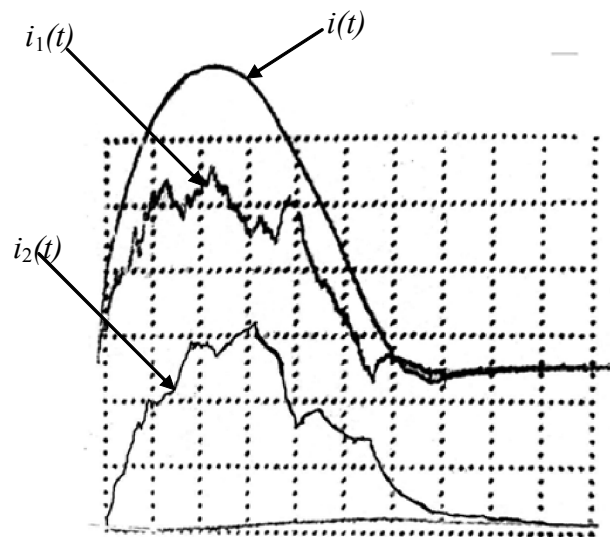


Рис. 1.1 Осцилограми інтегрального струму i та струмів i_1 , i_2 через розділені об'єми МЕП (ціна поділок: 850 А/под., 10 мкс/под.)

Особливістю більшості установок ОЕІД металів, електричним навантаженням яких є шар дотичних струмопровідних металевих гранул між електродами, зануреними в проточну діелектричну рідину, є незмінність величин індуктивності і ємності розрядного контуру [4, 37, 157]. У той же час активний електричний опір $R_n(t)$ шару струмопровідних гранул може змінюватися не тільки в процесі розряду накопичувального конденсатора, а й в проміжках між розрядами. Причому, як впливає з робіт [4, 32, 34, 159], навіть усереднене за час розрядного імпульсу значення активного опору такого навантаження може змінюватися випадковим чином. Середньостатистичне значення такого опору має обернено пропорційну залежність від напруги заряду накопичувального конденсатора. Властивість опору електроіскрового навантаження зменшуватися з підвищенням напруги заряду конденсатора, вперше було виявлено також в Інституті електродинаміки НАН України [4, 32-35, 159, 161-163].

На рис. 1.2 показано осцилограми зміни в часі падіння напруги $u(t)$ на МЕП і струму $i(t)$ в ньому при різних значеннях напруги попереднього заряду конденсатора, але незмінних параметрах розрядного контуру і ємності конденсатора. Було про-

ведено дві серії експериментів для двох різних значень ємності конденсатора ($C = 50$ мкФ на рис. 1.2 *а, б* та $C = 100$ мкФ на рис. 1.2 *в, г*). Напряга попереднього заряду конденсатора на рис. 1.2 *а* була меншою, ніж на рис. 1.2 *б* (в першій серії експериментів), таке ж співвідношення напруг було і для рис. 1.2 *в* і 1.2 *г* (у другій серії експериментів).

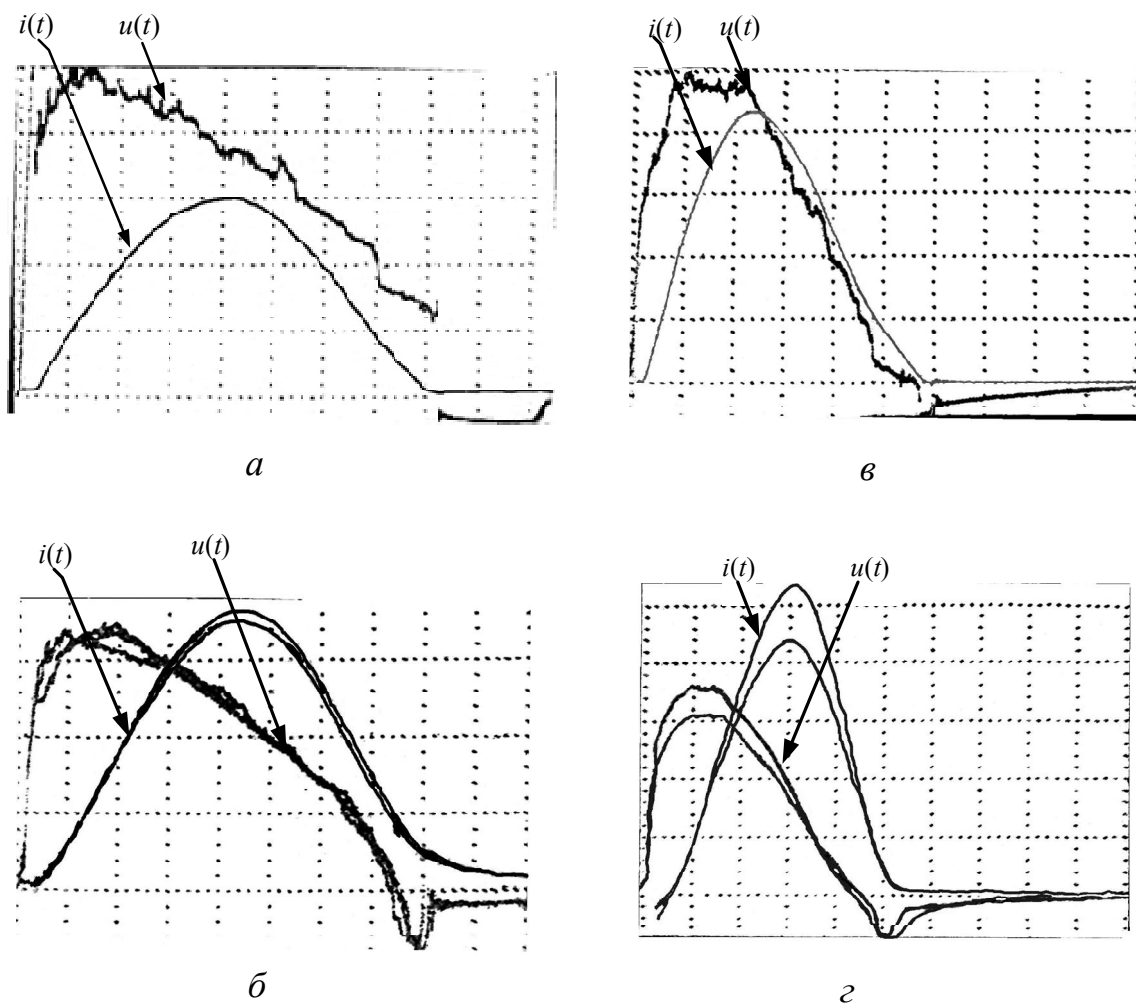


Рис. 1.2 Осцилограми струму $i(t)$ та напруг $u(t)$ на електроіскровому навантаженні: *а* – при ємності конденсатора $C = 50$ мкФ і ціні поділок: 20 В/под, 212 А/под, 5 мкс/под; *б* – при $C = 50$ мкФ і ціні поділок: 50 В/ под, 426 А/ под, 5 мкс/ под; *в* – при $C = 100$ мкФ і ціні поділок: 50 В/ под, 426 А/ под, 10 мкс/ под; *г* – при $C = 100$ мкФ і ціні поділок: 100 В/ под, 850 А/ под, 10 мкс/ под

При порівнянні рис. 1.2 *a* та 1.2 *б* (при $C = 50$ мкФ) видно, що з підвищенням напруги заряду конденсатора розряд стає більш коливальним: максимум розрядного струму зміщується вправо по осі часу, а його амплітуда збільшується. Падіння напруги на навантаженні також збільшується. Збільшення величини ємності конденсатора до $C = 100$ мкФ підтверджує виявлену функціональну залежність. Таким чином, можна зробити висновок, що з підвищенням напруги заряду конденсатора добротність розрядного контуру з іскроерозійних навантаженням збільшується.

Однак, як було зазначено вище, особливістю більшості установок ОЕІД металів, електричним навантаженням яких є шар дотичних струмопровідних металевих гранул між електродами, зануреними в проточну діелектричну рідину, є незмінність величин індуктивності і ємності розрядного контуру [4, 37, 157]. Отже, збільшення добротності контуру при підвищенні зарядної напруги конденсатора викликало зменшення активного опору шару гранул.

Виявлена залежність опору МЕР від величини зарядної напруги конденсатора дозволяє за зміною характеру розряду судити про відхилення поточного режиму від заданого і компенсувати це відхилення зміною зарядної напруги конденсатора.

Властивість установок ОЕІД металів змінювати опір розрядного кола зі зміною напруги заряду конденсатора є одним з їх основних властивостей, які знайшли практичне застосування і на її використанні базуються основні принципи їх побудови.

У роботах [4, 31, 37, 38, 135, 145, 154, 157, 164, 165] показано, що середньостатистичне значення електричного опору шару струмопровідних гранул за час тривалості одного іскророзрядного імпульсу змінюється нелінійно на кшталт U-подібної функції, аналогічно зміні електричного опору одного міжелектродного проміжку між двома електродами [28, 54, 166]. Причому значення цього опору за час тривалості одного іскророзрядного імпульсу змінюється таким чином, що при його закінченні величина електричного опору шару є в кілька разів більшою, ніж спочатку іскророзрядного процесу. Це може бути наслідком іскроерозійного руйнування струмопровідних містків між гранулами, що утворюються дотичними мікровиступами на цих гранулах. Дослідження підтвердили можливе збільшення опору шару гранул при їх низькій рухливості і високій швидкості винесення іскроерозійних порошоків із

зон іскрінь. У такому випадку за час іскророзрядного імпульсу гранули не встигають відновити електричні контакти, розірвані при електроіскровій ерозії. Тому опір шару гранул наприкінці розрядного струму може бути більше опору на його початку. В паузі між іскророзрядними імпульсами величина опору шару гранул зазвичай відновлюється.

Крива середнього статистичного значення електричного опору шару струмопровідних гранул за час тривалості одного іскророзрядного імпульсу зазвичай змінюється від імпульсу до імпульсу. Така зміна виникає як випадковим чином, так і при зміні параметрів розрядних імпульсів, шару струмопровідних гранул, швидкості потоку рідини, її температури і інших параметрів [4, 32-35, 161, 163, 167-169]. Тому, кажучи про опір навантаження $R_n(t)$ і зміну його величини від одного розрядного імпульсу струму до іншого, у багатьох роботах мають на увазі деякий усереднений опір за один розрядний імпульс. Для аналізу процесів в розрядному контурі установок ОЕІД використовується еквівалентний активний опір електроіскровий навантаження R_{n0} , який представляє собою такий лінійний активний опір, споживана потужність якого при інших рівних умовах еквівалентна потужності, що розсіюється в нелінійному навантаженні зі стохастичною зміною активного опору.

У роботах [37, 38] показано, що на часових інтервалах, найбільш часто відповідних закінченню розрядного імпульсу, випадковим чином виникають так звані холості розряди (тобто тривалі розряди з малим струмом без електроіскрінь в шарі гранул), протягом яких електричний опір навантаження стрибкоподібно збільшується в кілька разів. Тому для аналізу процесів в розрядному контурі установок ОЕІД в [38] запропоновано використовувати апроксимацію еквівалентного опору електроіскрового навантаження R_{n0} ступінчастою кусочно-лінійною функцією, яка відображає стрибкоподібне збільшення цього опору в кілька разів на часових інтервалах, відповідних закінченню розрядного струму.

При роботі на ЕІН параметри розрядного контуру зазвичай підбираються таким чином, щоб був реалізований коливальний розряд накопичувального конденсатора [4, 31, 34, 37, 38, 145, 154, 156, 157]. Це дозволяє отримувати розрядні імпульси по-

рівняно невеликої тривалості (20–80 мкс) і реалізувати безперервний технологічний процес з великими частотами розрядних циклів і відповідно великою продуктивністю диспергування. Використання коливального розряду конденсатора дозволяє також здійснити швидке природне замикання розрядного тиристорного комутатора установок ОЕІД і реалізувати в навантаженні частоту розрядних імпульсів струму більше 1 кГц. При коливальному розряді конденсатора на навантаження відбувається його перезаряд до напруги $U_C(t = \tau_{PI}) < 0$, де τ_{PI} – тривалість розрядного імпульсу [127].

Слід зазначити, що під час стрибкоподібного збільшення електричного опору іскрового навантаження випадковим чином в кілька разів добротність розрядного контуру зменшується, і розряд конденсатора з коливального може стати аперіодичним. Це призводить до суттєвого збільшення тривалості розрядного імпульсу, зменшення середньої імпульсної потужності, більш повільного і ненадійного відключення тиристорів в міру зменшення розрядних струмів до значень, менших струмів утримання тиристорів у відкритому стані [4, 31, 34, 36-38, 142, 145, 154, 157, 170].

Для одного розрядного імпульсу аперіодичний процес з точки зору енергетики може бути доцільним, оскільки вся накопичена в конденсаторі енергія передається в навантаження. Але реалізувати високу частоту зарядно-розрядних циклів і відповідно велику продуктивність ОЕІД установок в такому випадку стає неможливим. Крім того, як показали багаторазові раніше проведені дослідження [4, 31, 34, 36-38, 145, 154, 157, 171-182] дисперсність порошку безпосередньо пов'язана з тривалістю розрядного імпульсу, тобто максимальні розміри частинок іскроерозійних порошку тим менше, чим менше тривалість розрядних імпульсів струму. З цих міркувань аперіодичні режими розряду накопичувального конденсатора на іскроерозійне навантаження небажані як з точки зору стабілізації тривалості розрядного процесу, так і з точки зору отримання дрібнодисперсних порошків.

На підставі викладеного ясно, що для підвищення технологічної та енергетичної ефективності установок ОЕІД шару гранул в рідині дуже важливим є розробка методів швидкодіючої стабілізації режимів розряду, при якій тривалість іскророз-

рядних імпульсів в технологічній навантаженні залишалася б малою навіть при випадкових стрибкоподібних змінах її опору.

Необхідно відзначити, що опір електроіскрового навантаження є низькоомним і співмірний з внутрішнім опором установки, що спричиняє великі втрати енергії і низький ККД.

Тому одним з найбільш складних наукових завдань при проектуванні сучасних електророзрядних установок є розробка методів підвищення дози електричної енергії, переданої в низькоомне навантаження при обмеженій тривалості імпульсних струмів. При електричному опорі навантаження, співмірному з внутрішнім опором установки, вирішення цього завдання ускладнюється низьким коефіцієнтом передачі електроенергії від накопичувача у навантаження.

Найбільші труднощі виникають, коли збільшення імпульсного струму у навантаженні викликає різке зменшення його електричного опору, як, наприклад, після електричного пробою міжелектродного проміжку електророзрядних установок, що заповнюється різними середовищами [1-4, 17, 28, 34, 39, 72, 108, 111, 154, 183, 184]. Така зміна опору навантаження різко знижує коефіцієнт передачі в нього електроенергії від ємнісного накопичувача і викликає необхідність розробки нових методів управління перехідними процесами в ланцюгах ЕРУ для підвищення їх енергоефективності.

На даний час в Україні та світі зростає потреба отримання дрібнодисперсних порошків і колоїдних розчинів різних металів та їх хімічних сполук [80-94]. Це вимагає подальшого збільшення таких динамічних параметрів, як імпульсна потужність і швидкість наростання розрядного струму в навантаженні ЕРУ, спрямованих на реалізацію технологічних процесів об'ємного електроіскрового диспергування шару металевих гранул у рідинах між електродами [31, 42, 46, 50, 88, 95-99, 103, 154, 156, 157, 162, 164, 167, 170].

У публікаціях Щерби А.А. і Супруновської Н.І. [73-78] показано, що використання додаткових електричних кіл дозволяє реалізовувати регульовані додатні та від'ємні зворотні зв'язки за напругою, що забезпечує отримання в ЕРУ з напівкерваними напівпровідниковими комутаторами ККД більше 90% та можливість підвищу-

вати напругу на навантаженні до 1 кВ і більше. Але в колах таких ЕРУ перехідні процеси стають взаємозв'язаними, що ускладнює їх аналіз та визначення оптимальних параметрів [78].

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

Вищенаведені обставини обґрунтовують доцільність проведення досліджень взаємозв'язаних перехідних процесів, виникаючих у навантаженні ЕРУ з накопичувальними конденсаторами і керованими напівпровідниковими комутаторами, що спрямовані на вирішення наукового завдання підвищення динамічних характеристик кіл таких установок.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз літературних джерел з питань застосування накопичувачів електромагнітної енергії в розрядноімпульсних технологіях. Розглянуто різні типи таких накопичувачів і області їх застосування. Відзначено, що в даний час в джерелах живлення різних імпульсних навантажень найбільше використовуються ємнісні накопичувачі енергії. Проаналізовано відомі способи заряду таких накопичувачів, їхні переваги й недоліки.

2. 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. Розглянуто особливості технологічного навантаження, електричний опір якого зазвичай є істотно нелінійним, внаслідок чого аналітичні дослідження перехідних процесів в розрядному колі накопичувального конденсатора при його розряді на таке навантаження пов'язані з великими труднощами, що виникають через складність точного математичного опису всіх електрофізичних процесів.

3. Проаналізовано розроблену в Інституті електродинаміки НАН України (м. Київ) концепцію проектування електророзрядних установок з напівпровідниковими комутаторами для об'ємного електроіскрового диспергування шару металевих гранул в діелектричній рідині, яка базується на виявленій залежності ефективного опору електроіскрового навантаження, добротності розрядного контуру ЄНЕ і напруги його перезаряду від величини напруги попереднього заряду і на введенні зворотного зв'язку за напругою [31, 34-38, 74, 111, 143, 154, 157, 160].

4. В результаті критичного аналізу відомих наукових публікацій 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.

Посилання: [1-4, 17, 27-29, 31-39, 42, 46, 50, 54, 72-78, 88, 95-99, 103, 108, 111, 127, 135, 142, 143, 145-184] див. список використаних джерел стор. 173-194.

РОЗДІЛ 2

ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМУ В НАВАНТАЖЕННІ РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНИХ УСТАНОВОК

2.1 Підвищення динамічних характеристик струму керованої тривалості у навантаженні шляхом збільшення електричної ємності накопичувальних конденсаторів розрядно-імпульсних установок

Для реалізації в технологічному навантаженні великих імпульсних струмів і потужностей, які неможливо споживати від живильної електричної мережі, але які необхідні реалізації сучасних розрядно-імпульсних технологій [1–4], зокрема для обробки різних матеріалів й одержання іскроерозійних порошків, в електророзрядних установках (ЕРУ) використовують лінійні й нелінійні накопичувальні конденсатори [5–7, 108, 136]. У цьому випадку, ЕІН, що має параметричні, нелінійні й стохастичні властивості [8, 9], включається тільки в коло розряду конденсаторів і впливає на їхні кінцеві напруги [3], а також на характер перехідних процесів у цьому колі [8].

Однією з основних електродинамічних проблем удосконалення ФРІ для ЕРУ є підвищення швидкості наростання струмів та зменшення їх тривалості у технологічному навантаженні, оскільки при цьому зростає їх силовий вплив на нього. Зважаючи на те, що активна потужність, яка виділяється в електричному навантаженні (ЕН), прямо пропорційна величині його активного опору та квадрату величини розрядного імпульсу струму (ІС) в ньому, то підвищення силового впливу на технологічне навантаження, по суті, досягається формуванням у ньому великих ІС малої тривалості. Зокрема, в установках об'ємного електроіскрового диспергування (ОЕІД) металів і сплавів у діелектричній рідині збільшенням швидкості наростання розрядних струмів і зменшенням їхньої тривалості можливо зменшувати розміри отримуваних дисперсних іскроерозійних частинок [5, 6, 136, 137]. Тому такий підхід може бути покладено в основу підвищення продуктивності та дисперсності отримуваних іскроерозійних нанорозмірних порошків металів і сплавів, а також електрохімічно й біологічно активних колоїдних систем.

У даному підрозділі визначено особливості та закономірності перехідних процесів розряду накопичувального конденсатора формувача розрядних імпульсних струмів (ФРІ) на ЕН для виявлення можливостей регулювання швидкості наростання та (або) тривалості розрядного струму в ЕН при зміні параметрів розрядного кола та умов розряду конденсатора.

В ЕРУ для отримання іскроерозійних частинок технологічним навантаженням виступає шар занурених в діелектричну рідину металевих гранул, який знаходиться в міжелектродному проміжку технологічної камери. Дослідження показали, що електричний опір R_H всіх типів електроіскрових навантажень (ЕІН) є нелінійним. Його величина залежить від багатьох факторів: значення розрядного струму й швидкості його зміни, тривалості й частоти розрядних імпульсів, фізико-хімічних властивостей рідини і гранул, розмірів як самих гранул, так і шару з них, конструктивних і технологічних параметрів електророзрядної камери [5, 7, 108]. Нелінійна залежність опору електроіскрового навантаження від багатьох параметрів ускладнює застосування точних аналітичних методів для аналізу перехідних процесів у розрядному колі установки, тому зазвичай застосовують різні способи лінеаризації такого опору. При проведенні аналізу в даній роботі (як і в більшості інших робіт з цієї тематики) допускається, що ЕІН має кусочно-лінійний опір, величина якого $R_H = \text{const}$ протягом кожного розряду (тривалістю $t_{\text{розр}}$), але може стохастично змінитися під час паузи між розрядами (тобто під час заряду конденсатора). Опір R_H є енергетично еквівалентним лінійним опором, в якому споживається така ж електрична енергія, як і при розряді конденсатора на реальне нелінійне ЕІН $R(t)$. Цей лінійний опір R_H визначається з енергетичних умов:

$$\int_0^{t_{\text{розр}}} i^2(t)R(t)dt = \int_0^{t_{\text{розр}}} i^2(t)R_H dt \quad (2.1)$$

звідки

$$R_H = \frac{\int_0^{t_{\text{розр}}} i^2(t)R(t)dt}{\int_0^{t_{\text{розр}}} i^2(t)dt}, \quad (2.2)$$

де $i(t)$ – струм у ЕІН.

Для збільшення частоти зарядно-розрядних циклів конденсатора, а, отже, продуктивності порошкоутворення, у більшості установок ОЕІД використовується коливальний режим розряду конденсатора на навантаження з невеликим (до 30 % від зарядної напруги) його перезарядом [132] до напруги протилежної полярності. Найбільш простою електричною схемою заміщення розрядного кола ЕРУ з лінійним активним опором навантаження, є послідовне $R-L-C$ коло, що комутується напівпровідниковим ключем, в якому R – сумарний активний опір навантаження, ЗП і ЕК, L – індуктивність кола, C – ємність конденсатора, що розряджається. Відомо, що максимальне значення коливального розрядного струму I_{\max} при добротності такого контуру $Q > 2$ прямо пропорційно початковій напрузі на конденсаторі при його розряді й величині \sqrt{C} й обернено пропорційно \sqrt{L} . Тому в більшості ЕРУ індуктивність L зменшують до мінімально можливого значення. Збільшувати амплітуду струму можна, збільшуючи напругу заряду конденсатора і його ємність. Однак збільшення напруги заряду накопичувальних конденсаторів більше 1000 В має серйозні технічні обмеження й істотно збільшує небезпеку обслуговування ЕРУ, а збільшення ємності приводить до небажаного збільшення тривалості розрядного імпульсу t_{PI} (оскільки $t_{PI} \approx \pi\sqrt{LC}$) і розмірів отримуваних іскроерозійних порошоків. Тому, в даній роботі було проведено дослідження перехідних процесів при збільшенні ємності конденсатора C при його розряді на навантаження із примусовим обмеженням тривалості імпульсного струму t_{PI} за допомогою повністю керованого напівпровідникового ключа (IGBT транзистора), що розриває розрядне коло в необхідний момент часу.

На рис. 2.1 показано спрощену електричну принципову схему розрядного кола в установці ОЕІД шару металевих гранул з використанням повністю керованого напівпровідникового (НП) силового електричного ключа (ЕК) – IGBT транзистора.

Для з'єднання ФРІ з ЕН був використаний силовий високовольтний коаксіальний кабель (СВКК) з твердою полімерною ізоляцією (ТПІ) індуктивність якого має розподілений по довжині характер. У схемі дана розподілена індуктивність представлена двома зосередженими дроселями з індуктивностями L_1 та L_2 . Розряд поперед-

ньо зарядженого накопичувального конденсатора C у схемі здійснюється по колу C - $IGBT$ - L_1 - R_H - L_2 - R - C . Ланцюг зі зворотнім напівпровідниковим діодом $R_{ш}$ - VD забезпечує протікання струму в розрядному колі після розмикання $IGBT$. Позначення в схемі: R – активний опір розрядного кола (коаксіального кабелю та $IGBT$), R_H – лінеаризований опір технологічного навантаження, C – ємність накопичувального конденсатора, $IGBT$ – повністю керований НП ЕК ($IGBT$ транзистор) розрядного кола, $R_{ш}$ – опір шунта, VD – діод.

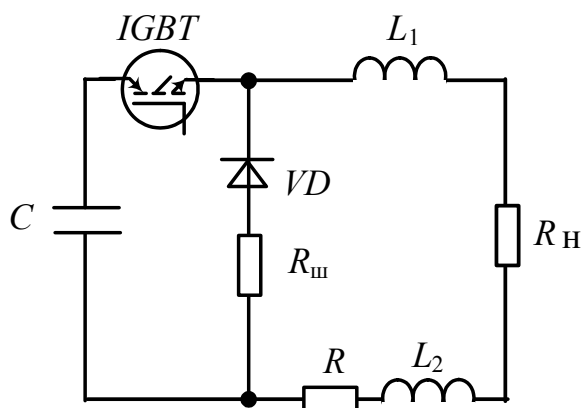


Рис. 2.1. Спрощена електрична принципова схема розрядного кола з $IGBT$ транзистором в якості електричного ключа в установці ОЕІД металів

У більшості випадків у таких установках робочими режимами розряду конденсатора на навантаження є коливальні режими. У загальному випадку струм коливального розряду конденсатора у R - L - C колі може бути розрахований за формулою.

$$i(t) = U_{0Cp} e^{-\omega_0 t / 2Q} \sin(\omega_0 B t) / L \omega_0 B, \quad (2.3)$$

де U_{0Cp} – початкова напруга конденсатора при його розряді, $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$ і $Q = \sqrt{L} / (\sqrt{C} \cdot R)$ – відповідно частота власних коливань та добротність розрядного кола, $B = \sqrt{1 - 1/4Q^2}$. Зауважимо, що для схеми наведеної на рис. 2.1 загальна індуктивність $L = L_1 + L_2$, а загальний активний опір $R = R_H + R$.

При добротності $Q_1 > 2$ (приймається, що $B \approx 1$ і $e^{-\omega_0 t / 2Q} \approx 1$) аналітична залежність (2.3) спрощується до наступного виду:

$$i(t) = U_{0Cp} \sin(\omega_0 t) / L \omega_0. \quad (2.4)$$

Для більшості ЕРУ граничним найменшим значенням індуктивності розрядного контуру є $L \approx 1$ мкГн. При під'єднанні ЕН за допомогою коаксіального кабелю (замість проводів типу вита пара) можна значно зменшити індуктивність розрядного контуру. У ФРІ, на якій досліджувалися перехідні процеси, індуктивність розрядного кола вдалося зменшити до 0,75 мкГн. Тому, при визначенні закономірностей зміни розрядних струмів при обмеженні їхньої тривалості й збільшенні ємності конденсатора, що розряджається, приймалося, що $L = 0,75$ мкГн = const.

Максимальне значення розрядного струму I_{max} можна записати відповідно (2.4) в наступному вигляді:

$$I_{max} = A/\omega_0, \quad (2.5)$$

де $A = U_{0cp}/L$ – постійний коефіцієнт, а $\sin(\omega_0 t_{max}) = 1$ (t_{max} – момент часу, що відповідає максимальному значенню ІС в ЕН).

Для будь-якого фіксованого значення часу $t_{fix} < t_{max}$, за яке розрядний струм досягне значення $I_{fix} < I_{max}$, можна записати, використовуючи (2.4):

$$A \cdot \sin(\omega_0 t_{fix})/\omega_0 = A/N, \quad (2.6)$$

де N – постійний коефіцієнт (який має розмірність кутової частоти рад/с), для якого виконується нерівність $N > \omega_0$.

Виконаємо диференціювання функції (2.4) по параметру ω_0 . Оскільки функція $i(\omega_0)$ неперервна і диференційована у всій області визначення, то в результаті її диференціювання отримаємо наступний аналітичний вираз

$$di(\omega_0)/d\omega_0 = A[\omega_0 t \cdot \cos(\omega_0 t) - \sin(\omega_0 t)]/\omega_0^2. \quad (2.7)$$

Згідно визначення коефіцієнт $A > 0$ і $\omega_0^2 > 0$, тоді знак похідної $di(\omega_0)/d\omega_0$ визначається співмножником у квадратних дужках виразу (2.7), який позначимо функцією $f(\omega_0)$:

$$f(\omega_0) = [\omega_0 t \cdot \cos(\omega_0 t) - \sin(\omega_0 t)], \quad \omega_0 \in (0; N). \quad (2.8)$$

Очевидно, що при $\omega_0 = 0$ (нижній границі області визначення) функція $f(\omega_0) = 0$. Для визначення знаку функції $f(\omega_0)$ на іншій частині області визначення $0 < \omega_0 < N$ і для $\forall t > 0$ досліджувалася її похідна:

$$df(\omega_0)/d\omega_0 = -\omega_0 t^2 \cdot \sin(\omega_0 t). \quad (2.9)$$

Зрозуміло, що за перший період коливального розряду конденсатора, коли $\sin(\omega_0 t) > 0$, можна стверджувати, що $f'(\omega_0) < 0$ для $0 < \omega_0 < N$ і $\forall t > 0$.

Таким чином, функція $f(\omega_0) < 0$ на всій області визначення, а, отже, також і похідна $di(\omega_0)/d\omega_0 < 0$ для $\forall t > 0$, $\omega_0 \in (0, N)$. Тому функція $i(\omega_0)$ для будь-якого поточного моменту часу t_k зменшується зі збільшенням ω_0 , і, відповідно, зростає зі збільшенням ємності C , оскільки величина ω_0 обернено пропорційна величині \sqrt{C} .

Таким чином, можна зробити висновок, що при коливальних режимах розряду конденсатора збільшення його ємності приводить до збільшення розрядного струму в будь-який момент часу $t_{fix} < t_{max}$.

Аналіз аперіодичного розряду конденсатора на електричне навантаження. У загальному випадку струм аперіодичного розряду конденсатора визначається функцією

$$i(t) = A e^{-\alpha t} \left(e^{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t} - e^{-\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} t} \right) / 2\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, \quad (2.10)$$

де $\alpha = (R_H + R)/2(L_1 + L_2)$.

Виконаємо диференціювання цієї функції по параметру ω_0 . Оскільки функція $i(\omega_0)$ безперервна й диференційована у всій області визначення, то отримаємо наступний аналітичний вираз

$$di(\omega_0)/d\omega_0 = A\omega_0 e^{-\alpha t} \frac{\left[\operatorname{sh}\left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}\right) - t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \cdot \operatorname{ch}\left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}\right) \right]}{\left(\alpha^2 - \omega_0^2\right)}. \quad (2.11)$$

Оскільки множники A і $e^{-\alpha t}$ є додатними і розглядається аперіодичний процес, при якому $\alpha^2 - \omega_0^2 > 0$ (тобто $\omega_0 \in (0, \alpha)$), то знак похідної $di(\omega_0)/d\omega_0$ визначається

співмножником у квадратних дужках виразу (2.11), котрий позначимо як функцію $F(\omega_0)$:

$$F(\omega_0) = \left[\operatorname{sh} \left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \right) - t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \cdot \operatorname{ch} \left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \right) \right], \quad \omega_0 \in (0, \alpha). \quad (2.12)$$

Ясно, що при $\omega_0 = \alpha$ (верхній границі області визначення) функція $F(\omega_0 = \alpha) = 0$. Для визначення знаку функції $F(\omega_0)$ для $0 < \omega_0 < \alpha$ і $\forall t > 0$ досліджувалась її похідна:

$$F'(\omega_0) = \omega_0 \cdot t^2 \cdot \operatorname{sh} \left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \right). \quad (2.13)$$

З того, що $t > 0$ і $\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} > 0$ випливає, що $\operatorname{sh} \left(t\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \right) > 0$. Тоді знаючи, що $\omega_0 > 0$, можна стверджувати, що $F'(\omega_0) > 0$ для $0 < \omega_0 < \alpha$ і $\forall t > 0$.

Таким чином, функція $F(\omega_0) < 0$ на всій області визначення, а, отже, й похідна $di(\omega_0)/d\omega_0 < 0$ для $\forall t > 0$, $\omega_0 \in (0, \alpha)$. Тому функція $i(\omega_0)$ для будь-якого поточного моменту часу t_k спадає зі збільшенням ω_0 , і, відповідно, зростає зі збільшенням ємності C , через те, що величина ω_0 обернено пропорційна величині \sqrt{C} .

Таким чином можна зробити висновок, що при аперіодичних режимах розряду конденсатора на ЕН (як і при коливальних розрядах) збільшення його ємності приводить до збільшення розрядного струму в будь-який момент часу $t_{fix} < t_{max}$.

Перехідні процеси розряду конденсатора на навантаження досліджувались на математичній моделі розрядного кола ОЕІД установки (рис. 2.1), реалізованій в програмному пакеті Matlab Simulink. Параметри кола при моделюванні вибиралися відповідними до параметрів експериментальної установки: $R_H = 0,2$ Ом, $L_1 = L_2 = 0,5$ мкГн, $R = 20$ мОм, $R_{ш} = 0,2$ Ом. Ємність конденсатора C змінювалась в широкому діапазоні від 6 до 300 мкФ при початковій напрузі на конденсаторі $U_{0cp} = 300$ В. При $C = 6$ мкФ і $C = 30$ мкФ розряд конденсатора має коливальний характер, а при $C = 300$ мкФ – аперіодичний (у випадку відсутності примусового обмеження тривалості переднього фронту ІС).

В певний момент часу $t_{fix} < t_{max}$ при C_{min} (де t_{max} при C_{min} – час, за який струм, відповідний найменшому з розглянутих значень ємності C , досягне свого максимального значення), повністю керований НП ЕК (IGBT) почне запиратися.

На рис. 2.2. представлені криві, які відображають змінення розрядного струму у ЕН при трьох значеннях ємності НК : $C = 6; 30; 300$ мкФ та перериванні цього струму при $t_{fix} = 3,15$ мкс (тоді як t_{max} при $C_{min} = 3,32$ мкс).

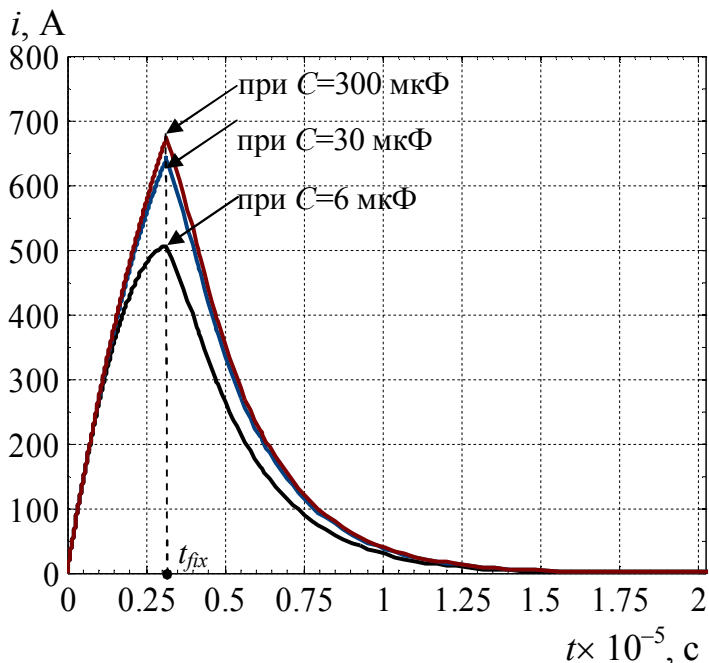


Рис. 2.2. Осцилограми струму в ЕН при різних значеннях електричної ємності розрядного конденсатора

У табл. 2.1. представлені результати аналізу залежностей, наведених на рис. 2.2: значення струмів $I_{fix Ci}$, яких струм досягне при тривалості розряду $t_{fix} = 3,15$ мкс. Також у таблиці приведено значення коефіцієнта $k = I_{fix Ci} / I_{fix Cmin}$, який показує у скільки разів збільшується розрядний струм I_{fix} при зростанні ємності C від значення C_{min} до значення C_i .

Таблиця 2.1

Значення струмів $I_{fix Ci}$, яких струм досягне при тривалості розряду t_{fix} та коефіцієнта $k = I_{fix Ci} / I_{fix Cmin}$

C , мкФ	6	30	300
t_{fix} , мкс	3,15	3,15	3,15
$I_{fix Ci}$, А	505	641	674
$k = I_{fix Ci} / I_{fix Cmin}$	1	1,27	1,33

Математичний аналіз функцій, якими описуються розрядні струми коливально-го та аперіодичного розряду конденсатора при збільшенні його ємності, а також аналіз результатів моделювання, представлених на рис. 2.2. та у табл. 2.1., показує, що при збільшенні ємності C струм I_{fix} збільшується незалежно від характеру розряду. При цьому необхідно зазначити, що при багаторазовому збільшенні ємності C збільшення I_{fix} стає усе менш значущим. Так зі збільшенням ємності C від 6 до 30 мкФ (у 5 разів) значення I_{fix} збільшиться на 27 %, а при її подальшому збільшенні від 30 до 300 мкФ (у 10 разів) – усього на 6 %.

Аналіз виразу (2.10) показує, що якщо ємність C перевищить деяке критичне значення $C_{кр}$ ($C > C_{кр}$), при якому $\alpha^2 \gg \omega_0^2$, то вираз (2.10) може бути перетворений до виду

$$i(t) \approx A(1 - e^{-2\alpha t}) / 2\alpha \approx U_{0Cp} (1 - e^{-(R_H + R)t / (L_1 + L_2)}) / (R_H + R), \quad (2.14)$$

з якого видно, що струм $i(t)$ не залежить від величини ємності C . Тобто при подальшому збільшенні ємності вище значення $C_{кр}$ крива розрядного струму асимптотично наближується до кривої, описаної виразом (2.14). Тому, подальше збільшення ємності C конденсатора несуттєво змінює значення I_{fix} та швидкість наростання струму I_{fix} / t_{fix} .

З рис. 2.2. видно, що тривалість розряду у навантаженні становить приблизно 15 мкс при всіх розглянутих значеннях C . Проведені нами дослідження показали, що при використанні в схемі тиристора (тобто напівкерованого ЕК) замість IGBT тривалість розряду зі збільшенням C значно подовжується. Наприклад при $C = 300$ мкФ тривалість розряду стає 375 мкс, тобто збільшується в 25 разів, що неприпустимо знижує частоту розрядних циклів.

На рис. 2.3 *a* приведено осцилограму струму в ЕН, зняту на лабораторній установці (з електричною схемою розрядного кола як на рис. 2.1.). Схема розрядного кола з IGBT транзистором в установці ОЕІД металів, в якій було реалізовано описаний метод збільшення швидкості наростання струму. Осцилограму отримано за допомогою давача струму з коефіцієнтом перетворення 1:100 (В/А) та осцилографа НАМЕГ–НМ–1507. Ціна поділок на осцилограмі: по напрузі (струму) – 200 мВ/поділка (20 А/поділка), а по часу – 2 мкс/поділка.

Параметри розрядного кола цієї установки: $C = 300 \text{ мкФ}$, $R_H = 1 \text{ Ом}$, $L_1 = L_2 = 0,7 \text{ мкГн}$, $R = 20 \text{ мОм}$, $R_{ш} = 3 \text{ мОм}$. Початкова напруга на конденсаторі становила $U_{0cp} = 130 \text{ В}$. Використовувався IGBT модуль SKM 300 GB12T4. На рис. 2.3, б відображено результат моделювання розрядного струму в навантаженні такої установки. Порівняльний аналіз кривих на рис. 2.3 а і б показує достатню точність їхнього збігу (похибка не перевищує 7 %).

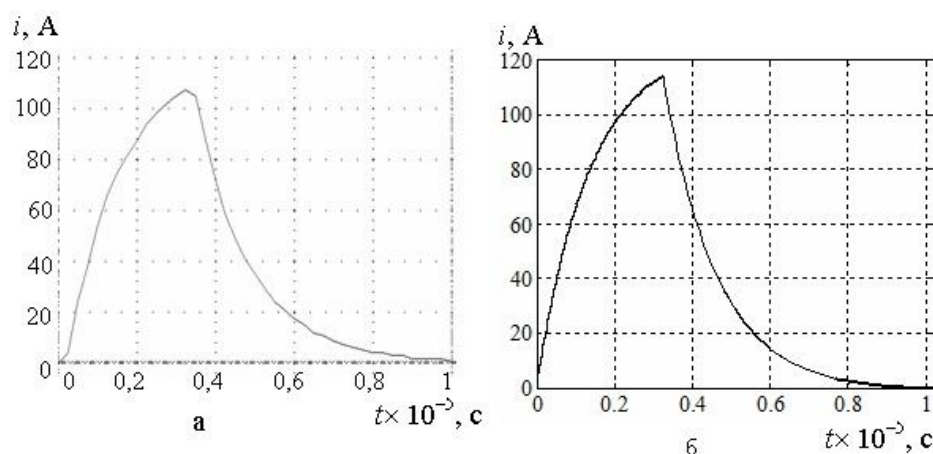


Рис. 2.3. Струми у навантаженні: а – осцилограма, знята на лабораторній установці, б – результат моделювання розрядного струму в навантаженні такої установки

Раніше аперіодичний режим розряду був неприйнятним для установок ОЕІД металів через неприпустимо велику тривалість протікання розрядного імпульсу в навантаженні та, як наслідок, неможливості реалізації високих частот зарядно-розрядних циклів конденсатора, що формує розрядні імпульси (а, отже, низьку продуктивність порошкоутворення). При використанні запропонованого методу аперіодичний режим розряду став прийнятним. Це пов'язано з тим, що опір електроіскрового навантаження не є постійним під час розряду конденсатора, а змінюється за законом U-подібної функції (при збільшенні струму до максимального значення опір навантаження зменшується до мінімальної величини, а після – при зменшенні розрядного струму знову збільшується) [9]. Для установок ОЕІД металів зменшення опору навантаження (при наростанні розрядного струму) є додатковим чинником, що впливає на ще більше зростання цього струму, у тому числі і його значення $I_{fix}(t_{fix})$. Окрім того, характерне підвищення величини опору навантаження наприкінці розрядного імпульсу буде зменшувати динамічні втрати в напівпровідниковому ключі, оскільки при тій самій

величині розрядного струму спадання напруги на опорі навантаження буде збільшуватися, а, отже, в ньому буде виділятися й більша потужність у порівнянні з потужністю при розряді конденсатора на лінійний опір R_n .

При реалізації алгоритму системи керування таких ЕРУ необхідно враховувати, що внаслідок зміни опорів іскроерозійного навантаження від одного розряду до іншого, до моменту t_{fix} струм буде наростати до різних величин. Таким чином, значення струму і швидкість його наростання будуть змінюватися в деякому діапазоні. В цьому випадку при збільшенні ємності конденсатора необхідно врахувати можливість того, що при значному зменшенні опорів навантаження величина струму може перевищити технологічно припустиме значення. Тому крім t_{fix} задається й гранично припустиме значення струму $I_{пр}$, при досягненні якого процес розряду повинен бути примусово перерваний.

При реалізації такого шляху формування розрядних ІС з підвищеною швидкістю наростання струму збільшення ємності конденсатора ЕРУ приводить не тільки до збільшення розрядного струму й швидкості його наростання, але й до збільшення середньої імпульсної потужності, виділюваної в навантаженні. Аналіз характеру електроіскрового навантаження при негармонійному електричному розряді керованої тривалості його переднього фронту наведено у додатку В.

Таким чином визначено особливості та закономірності змінення вихідних струмів напівпровідникових ЕРУ з НК в залежності від його ємності та умов обмеження тривалості струмів. Аналітично доведено, що для довільного режиму (коливального чи 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 НК (зокрема збільшувати швидкість наростання та/або зменшувати тривалість їх розрядно-імпульсних струмів у ЕН) шляхом збільшення ємності розрядного конденсатора порівняно з ємністю, достатньою для реалізації потрібного технологічного режиму, і примусового переривання струму в ЕН через встановлений проміжок часу. Такий підхід є доцільним для

підвищення продуктивності ЕРУ, орієнтованих на виробництво дисперсних іскроєрозійних порошків металів і сплавів.

2.2 Покращення електродинамічних характеристик розрядних імпульсних струмів в навантаженні електророзрядних установок шляхом зменшення індуктивності розрядного кола

У виробничих умовах, на відміну від лабораторних, ФРІ та ЕІН можуть бути значною мірою віддалені одне від одного. Це викликано технологічними умовами та вимогами електробезпеки. Дана відстань може сягати декількох метрів. Виходячи з того, що вихідний активний опір та власна індуктивність ФРІ мікросекундного діапазону має незначні значення, а активний опір та індуктивність ЗП порівняно з ними суттєві, то, в даному випадку, амплітуду та тривалість розрядних імпульсів струмів насамперед будуть визначати електричні параметрами ЗП.

Для з'єднання ФРІ з ЕІН зазвичай використовуються ЗП типу вита пара. Погонна індуктивність даного типу провідників має значну величину, яка при малих кутах закручування визначається наступною залежністю

$$L_n = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2D}{d}\right), \quad (2.15)$$

де μ_0 – магнітна постійна, D та d – зовнішній та внутрішній діаметри електричної ізоляції струмопровідних жил відповідно. Крім того, провідники даного типу повинні мати надмірний переріз струмопровідних жил, що викликано значним зниженням їх ефективного перерізу в імпульсному режимі роботи. На частотах змінного синусоїдального струму, що відповідають мікросекундному діапазону 0,1–1 МГц, глибина скін слою для мідних струмопровідних жил знаходиться в межах 0,21–0,067 мм.

Зазначене вище значною мірою обмежує можливість використання ЗП типу вита пара для з'єднання значно віддалених один від одного ФРІ мікросекундного діапазону з ЕІН. Погонна індуктивність даного типу ЗП співвідносна з вихідною індуктивністю ФРІ і вже при довжині кілька метрів значно перевищує її. Це призводить

до значного зменшення пікових значень струму в навантаженні, зменшує крутизну наростання струму та збільшує загальну тривалість розрядного імпульсу.

На рис. 2.4 наведена осцилограма струму в безіндуктивному резистивному навантаженні величиною 1 Ом приєднаному до ФРІ при тривалості розрядних імпульсів 3,25 мкс (час відкриття керованого НП ЕК).

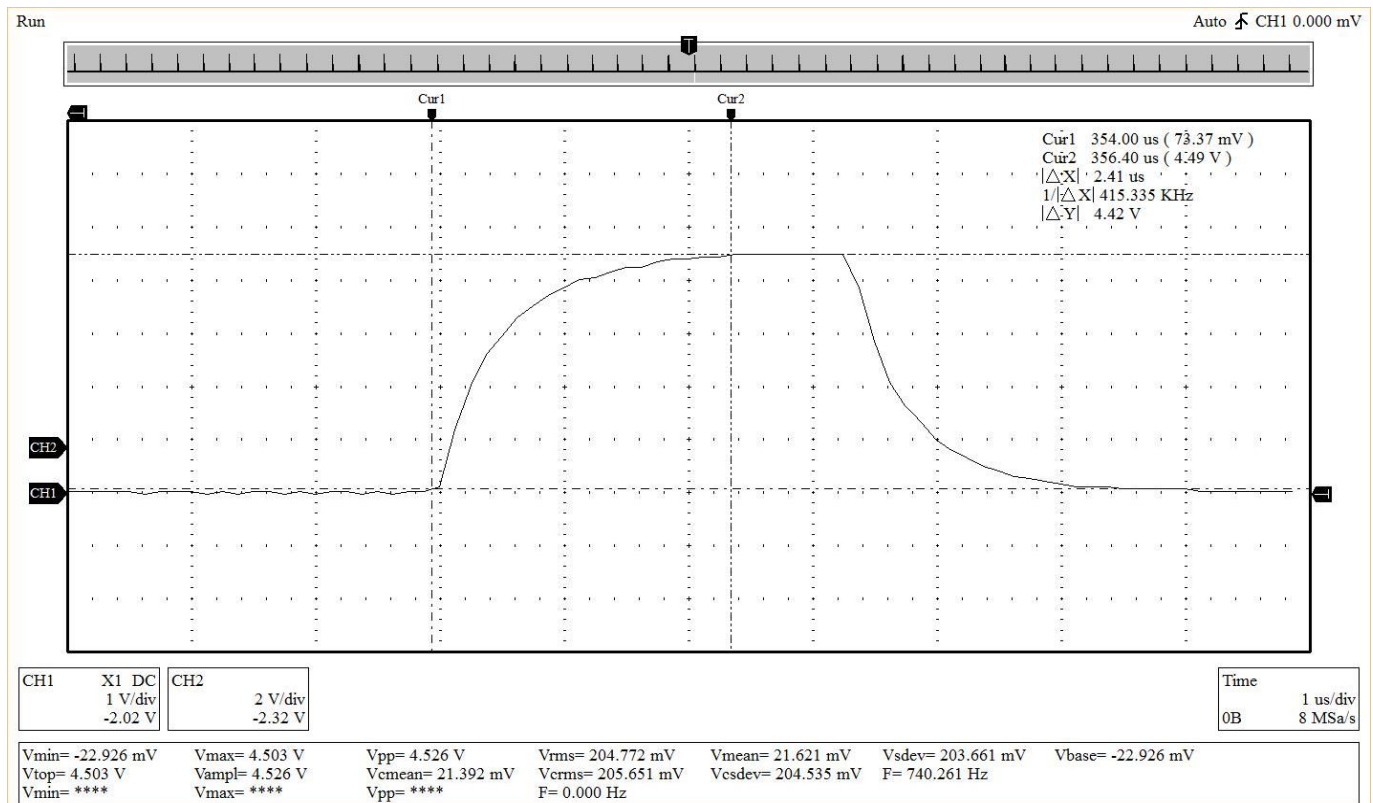


Рис. 2.4 Осцилограма струму в резистивному навантаженні 1 Ом без ЗП при напрузі 450 В та тривалості розрядного імпульсу 3,25 мкс (1 В відповідає 100 А)

Наведений на рис. 2.4 імпульс струму (IC) має передній та задній фронти, які змінюються в часі за експоненційним законом, та "полицю" незмінного в часі струму, яка знаходиться між фронтами. Постійна часу фронтів ($\tau=L/R$) визначається величинами активного опору та загальної індуктивності зарядного та розрядного контурів, а величина "полиці" величиною активного опору та величиною прикладеної напруги. Тривалість переднього та заднього фронтів для значень струму від 0,1 до 0,9 максимального складає 1,05 мкс, а середня швидкість його наростання по передньому фронту приведена до 1 В $\frac{di}{dt}$ *ср.вр.* складає 0,75 А/мкс.

На рис. 2.5 наведена осцилограма струму в безіндуктивному резистивному навантаженні величиною 1 Ом приєднаному до ФРІ через ЗП з мідними жилами типу вита пара $2 \times 50 \text{ мм}^2$ довжиною 5 м при тривалості розрядних імпульсів 3,25 мкс.

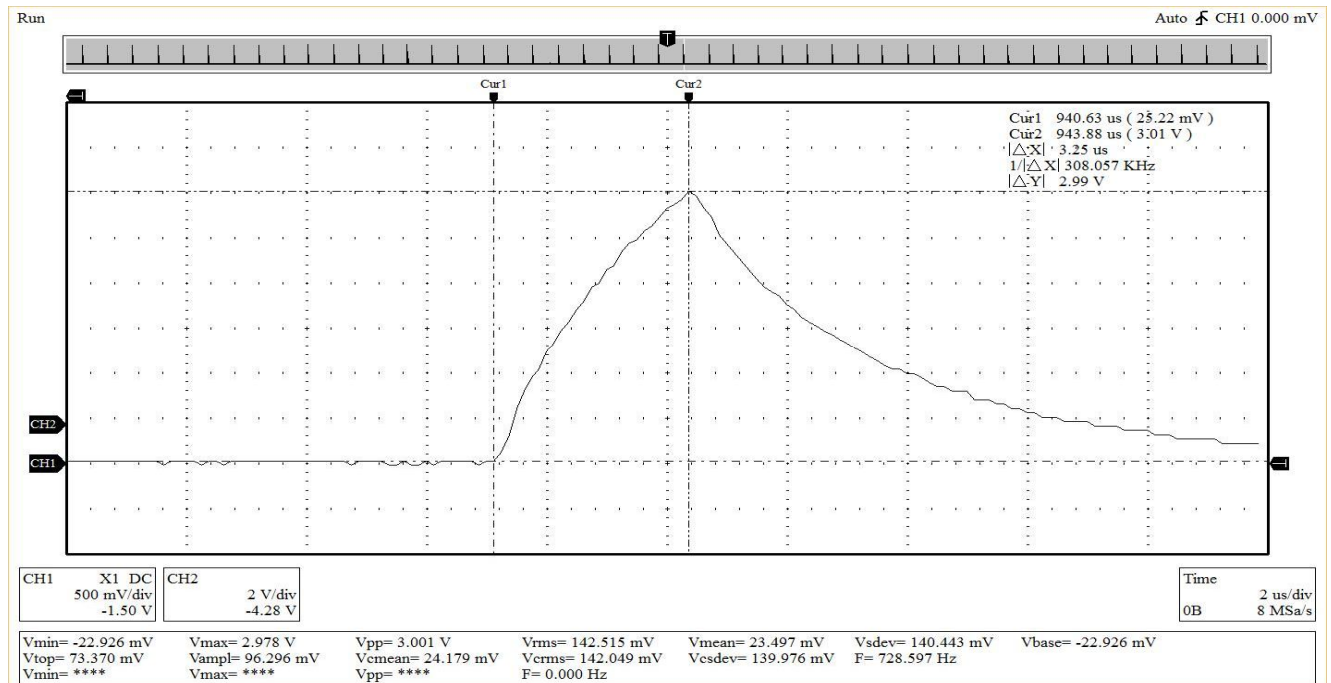


Рис. 2.5 Осцилограма струму в резистивному навантаженні 1 Ом зі ЗП типу вита пара при напрузі 450 В та тривалості розрядного імпульсу 3,25 мкс (1 В відповідає 100 А)

Наведений на рис. 2.5 ІС має значно відмінні передній та задній фронти від фронтів імпульсу струму наведених на рисунку 1. Вони також змінюються в часі за експоненціальним законом. Постійні часу наростання і спадання струму по передньому та задньому фронтам рівні між собою, а тривалості різні. Задній фронт має значно більшу тривалість ніж передній. Це свідчить про те, що постійна часу наростання струму значно перевищує тривалість сформованого розрядного імпульсу. Постійна часу фронтів визначається загальними величинами активного опору та індуктивності зарядного і розрядного контурів, які значно більші ніж у випадку відсутності ЗП. Тривалості переднього та заднього фронтів для значень ІС від 0,1 до 0,9 максимального складають 2,48 і 7,63 мкс відповідно, що відповідно в 2,36 та 7,27 рази більше у випадку наведеному на рисунку 1. "Полиця" струму відсутня, що свідчить про недосягнення струмом свого максимально можливого значення для даного режиму робо-

ти. Пікове значення струму зменшилось у 1,5 рази, а максимальне значення імпульсної потужності $P_{пик}$ 2,25 рази. Середня швидкість його наростання по передньому фронту приведена до 1 В складає 0,22 А/мкс, що в 3,41 рази менше ніж у випадкуведеному на рис. 2.4.

Значення середньої імпульсної потужності для приведених вище імпульсів струму для відомого значення величини електричного навантаження можна визначити за наступною аналітичною залежністю

$$P_c = \frac{R_n}{T} \int_0^T i^2(t) dt, \quad (2.16)$$

де R_n – опір електричного навантаження, T – загальна тривалість імпульсу.

Результати вимірювань та розрахунку імпульсів струму для випадків наявності ЗП типу вита пара та його відсутності наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Порівняльний аналіз імпульсів струму

Найменування	I_{max} , А	τ фрон- тов, мкс	$t_{пер(0.1-0.9)}$, мкс	$t_{зад(0.9-0.1)}$, мкс	$t_{0.1-0.1}$, мкс	$\frac{di}{dt}$ ср.пр., А/мкс	$P_{пик}$, кВт	P_c , кВт
Без провідника	450	0,508	1,05	1,05	4,4	0,75	203	125
Вита пара	300	3	2,48	7,63	10,74	0,22	90	23
Відношення	1,5	0,17	0,42	0,14	0,41	3,41	2,25	5,43

Таким чином, як можна бачити з даних наведених у табл. 2.2, наявність ЗП значно змінює амплітуду та тривалість розрядних ІС. Даним фактом не можна нехтувати при розробці та промисловій експлуатації як ФРІ так і ЕРУ.

Зазначену вище проблему можна частково вирішити шляхом паралельного з'єднання значної кількості ЗП даного типу. При цьому, їх еквівалентні індуктивність та активний опір будуть знижуватись пропорційно кількості пар провідників. Також, можливим шляхом вирішення даної проблеми може стати використання іншого типу

ЗП. В якості ЗП з малими значеннями погонної індуктивності можуть виступати кабелі типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил або СВКК.

З вище зазначеного, виникає необхідність провести порівняльний аналіз різних типів кабелів з метою визначення найбільш прийняттого в якості ЗП між ЕІН та ФРІ. Для цього, насамперед, необхідно визначити вихідні електричні параметри та межі роботи наявного ФРІ мікросекундного діапазону. Результати вимірювань та розрахунків наведені у додатку Г.

Розрахункові та інші данні даного ФРІ наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Електротехнічні параметри формувача імпульсних струмів

Параметр	Діапазон робочої на- пруги, В	Максима- льний імпу- льсний струм, А	Вихідна ін- дуктив- ність, мкГн	Вихідний активний опір, мОм	Тривалість розрядних імпульсів, мкс
Значення	0-600	1000	0,46	12,4	0,75-3,25

Тепер, коли стали відомі вихідні електричні параметри ФРІ, стає можливим провести порівняльний аналіз різних типів ЗП між собою. Порівняння буде проводитись між кабелями типів вита пара, коаксіальний (в коаксіальному режимі роботи) та літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил.

Спочатку стає необхідним визначити електротехнічні параметри порівнюваних кабелів, а саме погонних індуктивностей та активних опорів. Для цього дані кабелі були приєднані до ФРІ. Для визначення їх активно опру проводився опит короткого замикання, індуктивність ЗП визначалась автоколивальним методом. Результати вимірювань погонних індуктивностей ЗП наведені у додатку Д. Результати розрахунків погонних індуктивностей ЗП наведені у табл. 2.4.

З наведених у табл. 2.4 розрахункових даних видно, що погонна індуктивність даної виті пари перевищує погонну індуктивність коаксіального кабелю в 2,7 рази, а погонну індуктивність літцендрату з біфілярною намоткою струмопровідних жил в 13,4 рази.

Результати розрахунку погонної індуктивності кабелів

Тип кабелю	Період авто- коливань, мкс	Ємність конденса- тора, мкф	Довжина кабелю, м	Індукти- вність, мкГн	Погонна індуктив- ність, мкГн/м
Вита пара	4,22	0,15	5	2,547	0,509
Коаксіальний	2,68	0,15	4	0,752	0,188
Літцендрат	1,88	0,15	3	0,114	0,038

Результати розрахунку активного погонного опору R_n та ефективного перерізу S_e струмопровідних жил даних кабелів представлено в табл. 2.5, методика та відповідні осцилограми наведені у додатку Е.

Таблиця 2.5

Розрахункові результати порівняння кабелів

Тип кабелю	τ , мкс	R , мОм	R_n , мОм/м	S , мм ²	S_e , мм ²	S_e/S
Вита пара	131,15	11	2.20	2×50	2×15.91	0,32
Коаксіальний	44,46	15	3.75	70+16	2×9.33	0,22
Літцендрат	19,46	17	5.67	2×7	2×6.18	0,88

З наведених вище експериментальних та розрахункових даних видно, що з досліджуваних кабелів найкращими показниками погонної індуктивності та відношенням ефективного перерізу струмопровідних жил до фактичного має кабель типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Коаксіальний кабель має саме низьке відношення ефективного перерізу струмопровідних жил до фактичного, значно меншу погонну індуктивність порівняно з кабелем типу вита пара, але значно більшу порівняно з кабелем типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Слід також зазначити, що швидкість протікання вільного перехідного процесу (задні фронти ІС) в опиті короткого замикання з використанням різних типів кабелів значно відрізняється, а це значить що значно відрізняються і глибини

скін слою. Тому отриманні розрахункові данні погонних опорів даних кабелів відповідають тільки конкретно цим фізичним опитам і в самому загальному випадку можуть значно відрізнятися від них.

Тепер, коли сталі відомі вихідні електричні параметри ФРІ і погонні активні опори та індуктивності ЗП стає можливим провести їх порівняльний аналіз при роботі на активне навантаження (1 та 3 Ом). Експериментальні та розрахункові результати даного аналізу наведено в табл. 2.6. Осцилограми ІС для різних значень ЕН при його з'єднанні з формувачем розрядних імпульсних струмів різними типами кабелів наведенні у додатку Ж.

Таблиця 2.6

Результати порівняння різних типів кабелів

Тип кабелю	Величина навантаження, Ом	Середня швидкість наростання струму, А/мкс	Постійна часу, мкс	Напруга джерела, В	Приведена середня швидкість наростання струму, А /мкс
Літценд-рат (2 у паралель)	0	158,5	20,15	112	1,777
	1	155,4 (198)	0,615 (0,446)	395 (409)	0,393 (0,484)
	3	108	0,438	169	0,284
Вита пара	0	95	115	248	0,580
	1	91	3,11	400	0,345
	3	49	1,44	462	0,161
Коаксіальний	0	53	53,8	120	0,612
	1	126	1,24	400	0,396
	3	109	0,57	492	0,260

Як можна бачити з експериментальних та розрахункових даних наведених у табл. 2.6, максимальні швидкості наростання струму по передньому фронту та швидкості спадання струму по задньому фронту отримані при використанні в якості ЗП кабелю типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Тому, для

порівняння отриманих експериментальних та розрахункових даних між собою, доцільно віднести їх до даних отриманих для кабелю типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Результат порівняння, відносних приведеної крутизни наростання струму та постійної часу його спадання до приведеної крутизни наростання струму та постійної часу його спадання для кабелю типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил в якості ЗП, наведений у табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Відносні приведенні експериментальні та розрахункові данні

Тип кабелю	Величина навантаження, Ом	Відносна приведена середня швидкість наростання струму	Відносна постійна часу релаксації струму
Коаксиальний	0	0,34	2,67
	1	0,99	2,01
	3	0,92	1,30
Вита пара	0	0,33	5,71
	1	0,88	5,06
	3	0,57	3,29

Як можна бачити з розрахункових даних наведених в таблиці 6, СВКК, в якості ЗП між ФРІ та ЕН в діапазоні опору ЕН 1-3 Ом, майже не уступає кабелю типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил по крутизні наростання струму та незначно уступає по крутизні його спадання. Враховуючи, що виготовлення кабелю типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил дуже трудомістке, а міцність його електричної ізоляції значно менша за міцність ізоляції СВКК з ТПШ, в даному випадку доцільним стає використання в якості ЗП саме СВКК. Крім того, у кабелю типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил велика погонна ємність (у досліджуваного зразка погонна ємність складає 12 нФ/м), що в імпульсному режимі його роботи викликає протікання через його електричну ізоляцію суттєвих струмів електричного зміщення (десятки ампер). Цей струм дода-

тково навантажує керовані напівпровідникові ключі та викликає суттєвий перегрів електричної ізоляції кабелю, що, в свою чергу, викликає її прискорене електричне та теплове старіння, а виникаючи між окремими ізольованими струмопровідними жилами електромеханічні зусилля – її механічне старіння. Посилення електричної ізоляції кабелю типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил призведе до значного росту його погонної індуктивності, що, в свою чергу, повністю нівелює його перевагу над коаксіальним кабелем.

Таким чином, для електричного з'єднання суттєво віддалених один від одного (до 5 м) ФРІ мікросекундного діапазону та низькоомного електроіскрового навантаження, найбільш доцільно використовувати силові високовольтні (6-10 кВ) коаксіальні кабелі з твердою полімерною електричною ізоляцією. У випадках, коли значення погонної індуктивності цих кабелів перевищують допустимі, індуктивність розрядного контуру можливо зменшити шляхом паралельно з'єднання кількох кабелів даного типу. Використання коаксіальних кабелів робочою напругою до 1 кВ, враховуючи імпульсний режим роботи, небажано.

2.3 Підвищення динамічних характеристик імпульсних струмів в навантаженні електророзрядних установок шляхом використання в їх колах електричних фільтрів низької частоти

Для отримання в електричному навантаженні імпульсів струму тривалістю порядку декількох мікросекунд, доцільно використовувати ФРІ з повністю керованими НП ЕК, наприклад з біполярними транзисторами з ізольованим затвором (*BTI3* або *IGBT*). Це дозволяє здійснити керування тривалістю ІС в ЕН шляхом обмеження часу відкривання даних НП ЕК. З метою підвищення крутизни переднього фронту та покращення енергетичних показників ІС в ЕН, доцільно в якості накопичувача електричної енергії використовувати низькоімпедансні електростатичні конденсатори з великою електричною ємністю. Якщо, енергоємність даних конденсаторів на декілька порядків буде перевищувати енергію, яка віддається в ЕН на протязі одиночного

імпульсу струму, то їх, по відношенню до ЕН, можна вважати джерелом електрорушійної сили.

На рис. 2.6 наведемо спрощену електричну принципову схему вихідного кола ФРІ регульованої тривалості мікросекундного діапазону з приєднаним до нього електричним навантаженням через силовий коаксіальний кабель.

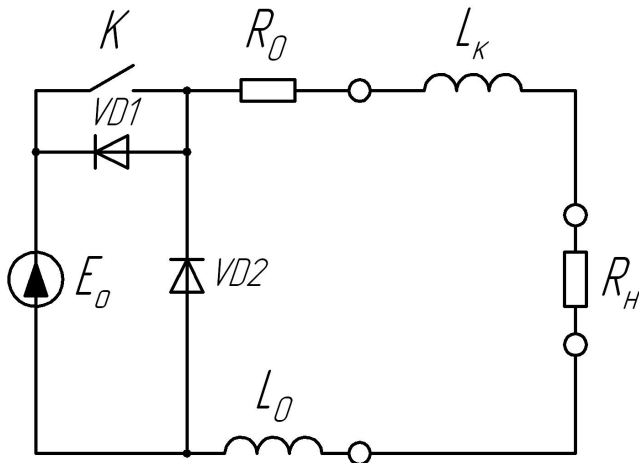


Рис. 2.6 Електрична принципова схема ФРІ з приєднаним до нього ЕН

На даній схемі E_0 являє собою ДОН величиною U ФРІ, R_0 та L_0 – відповідно його внутрішній опір та індуктивність, L_K – індуктивність ЗП, R_H – опір електричного навантаження, K – повністю керований НП ЕК, $VD1$ та $VD2$ – зворотні діоди.

Розглянемо детально роботу даної електричної схеми. В момент замикання керованого електричного ключа K утворюється замкнуте електричне коло між джерелом електрорушійної сили та електричним навантаженням через ЗП. У даному колі починається вимушений перехідний електричний процес. В його елементах починає протікати електричний струм $i_n(t)$ – струм переднього фронту. Так як, дане коло послідовне, то струм у всіх його елементах в кожний момент часу буде однаковим. Запишемо рівняння даного кола згідно другого закону Кірхгофа

$$U = U_R(t) + U_L(t), \quad (2.17)$$

де $U_R(t) = i_n(t) \cdot R$ – спад напруги на загальному активному опорі розрядного кола

$R = R_H + R_0$, $U_L(t) = L \frac{di_n(t)}{dt} = \frac{L}{R} \frac{dU_R(t)}{dt}$ – спад напруги на загальній індуктивності

розрядного кола $L = L_K + L_0$.

Використовуючи записані вище рівняння отримаємо диференціальне рівняння для даного кола

$$U_R(t) + \frac{L}{R} \frac{dU_R(t)}{dt} = U. \quad (2.18)$$

Приведемо дане рівняння до стандартного виду

$$\frac{dU_R(t)}{dt} + \frac{L}{R}(U_R - U) = 0. \quad (2.19)$$

Згідно закону комутації струм в індуктивному елементі електричного кола не може стрибкоподібно змінитися, тому початкову умову можна записати у вигляді $U_R(t=0) = 0$.

Стандартним розв'язком отриманого диференціального рівняння першого порядку є наступна часова залежність

$$i_n(t) = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2.20)$$

де $\tau = \frac{L}{R}$ – постійна часу релаксації струму.

Таким чином, як можна бачити з отриманої часової залежності струму в розрядному колі, в електричному навантаженні, що живеться від ФРІ керованої тривалості, буде протікати ІС з аперіодичним переднім фронтом. Крутизна якого буде визначаються електричними параметрами розрядного кола, а саме його загальними активним опором та індуктивністю.

У момент часу розмикання керованого електричного ключа K , що відповідає заданій тривалості розрядних імпульсів t_i , навантаження від'єднається від джерела опорної напруги, а в електричному колі почнеться новий вільний перехідний процес, який, аналогічно до вимушеного, опишеться наступним диференціальним рівнянням

$$\frac{dU_R(t)}{dt} + \frac{L}{R}U_R(t) = 0. \quad (2.21)$$

Згідно закону комутації струм в індуктивному елементі електричного кола не може стрибкоподібно змінитися, тому його початкове значення буде визначатися

величиною електричного струму наприкінці вимушеного перехідного процесу. Даний струм буде замикатися вже не через ДОН, а через зворотній діод $VD2$. Тому початкову умову вільного перехідного процесу можна записати у наступному вигляді

$$U_R(t_i) = U \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau}} \right).$$

Тоді, часова залежність ІС для заднього фронту опишеться наступною аналітичною залежністю

$$i_3(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau}} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{R} \left(e^{-\frac{t}{\tau}} - e^{-\frac{t+t_i}{\tau}} \right). \quad (2.22)$$

Отримана часова залежність заднього фронту ІС в розрядному колі є аперіодична функція. Крутизна заднього фронту, як і у випадку переднього фронту, буде визначаються суто електричними параметрами розрядного кола, а саме його загальними активним опором та індуктивністю, а постійні часу релаксації для обох фронтів ІС в ЕН в даному випадку будуть рівні між собою.

Швидкості наростання та спадання струму по передньому та задньому фронтам визначаються відповідними похідними по часу від представлених аналітичних залежностей

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_n(t) = \frac{U}{L} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \\ \frac{d}{dt} i_3(t) = -\frac{U}{L} \cdot e^{-\frac{t+t_i}{\tau}}. \end{cases} \quad (2.23)$$

Як можна бачити з наведених аналітичних залежностей 2.20, 2.22 та 2.23, початкова швидкість наростання та спадання струму в електричному навантаженні визначається виключно загальною індуктивністю розрядного кола, амплітуда струму визначається загальним активним опором розрядного кола, а тривалості переднього та заднього фронтів струму відношенням загальної індуктивності до загального опору розрядного кола.

Таким чином, для отримання значної амплітуди імпульсного струму, досягнення значної крутизни його фронтів та зменшення його загальної тривалості, загальні

індуктивність та активний опір розрядного кола, а також їх відношення, повинні бути як змога меншими. На практиці, загальна індуктивність розрядного кола ФРІ складає порядку 1 мкГн і суттєво знизити її не представляється можливим. Зменшення же опору навантаження без пропорційного зменшення загальної індуктивності розрядного контуру є недоцільним, так як це зменшує крутизну фронтів та збільшує постійну часу наростання та спадання струму в навантаженні, що, в свою чергу, збільшує його загальну тривалість. Якщо, тривалість передніх фронтів імпульсних струмів можна примусово обмежити, то тривалість його заднього фронту визначається виключно постійною часу вільного перехідного процесу.

На рис. 2.7 наведено осцилограму імпульсу струму в резистивному безіндукційному навантаженні величиною 1 Ом приєднаному до ФРІ через коаксіальний кабель довжиною 4 м. Величина опорної напруги ФРІ становить 355 В, а тривалості ІС по передньому фронту обмежені 3-ма мкс.

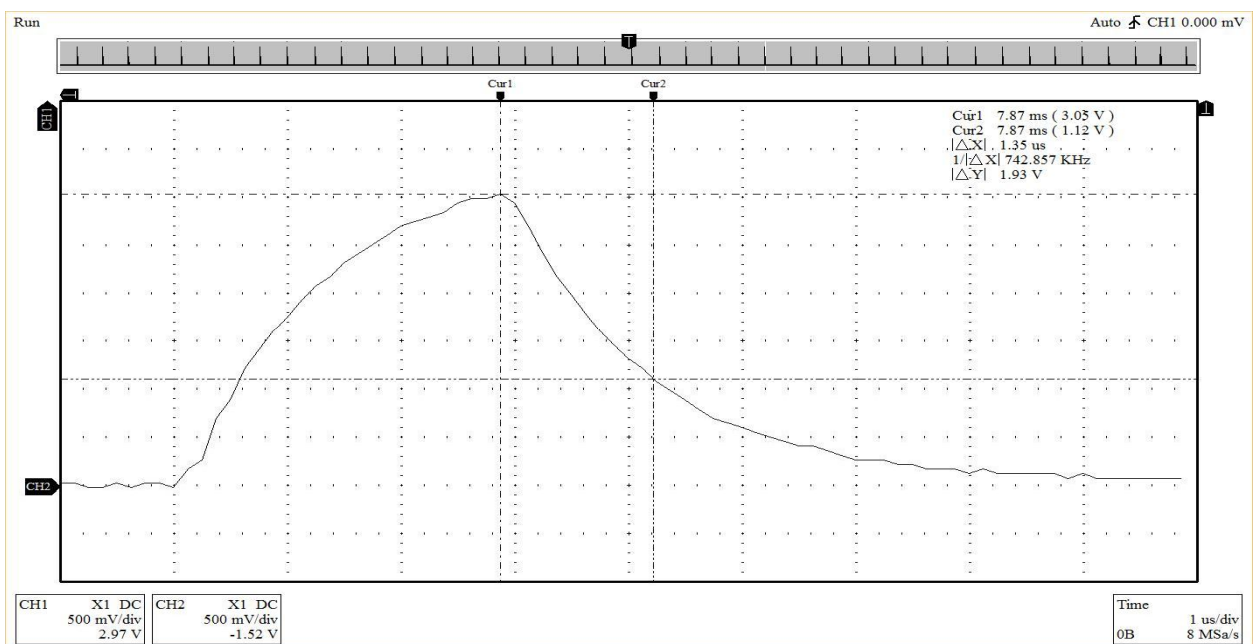


Рис. 2.7 Осцилограма ІС в ЕН величиною 1 Ом з обмеженням часу тривалості переднього фронту 3 мкс (1 В відповідає 100 А)

Як можна бачити з наведеної осцилограми на рис. 2.7, постійна часу наростання та спадання струму по фронтам становить 1,35 мкс, що значно менше за встановлену тривалість переднього фронту 3 мкс. При цьому, максимальне значення струму

становить 305 А, що менше його максимально можливого значення 355А в 1,16 рази, а загальна тривалість імпульсу струму по значенню 0,1 – 0,1 максимального становить 5,68 мкс, що 1,89 рази більше за встановлену тривалість переднього фронту.

Як, зазначалось вище, суттєво покращити електричні параметри розрядного контуру не представляється можливим, тому треба шукати інші способи зменшення загальної тривалості та збільшення амплітуди розрядних імпульсів. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми може стати надання даним перехідним процесам періодичного характеру. Для цього необхідно паралельно або послідовно до електричного навантаження приєднати конденсатор визначеної електричної ємності. При цьому, перехідний процес набуде періодичного характеру, загальна тривалість розрядного імпульсу значно зменшиться, а амплітудне значення струму збільшиться. Крім цього, також збільшаться і середні швидкості наростання та спадання струму по передньому та задньому фронтам.

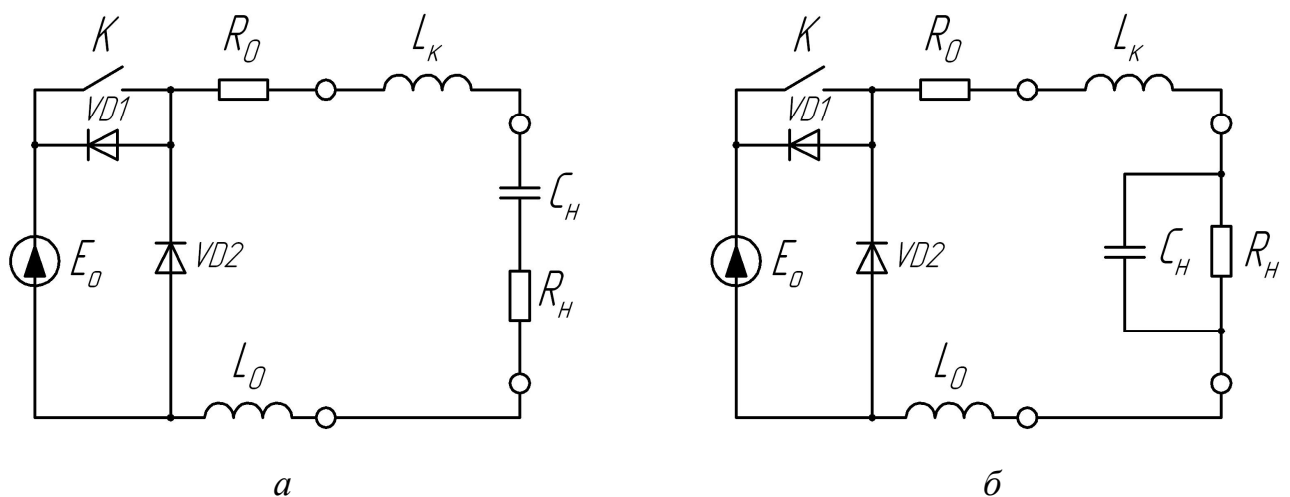


Рис. 2.8 Електрична принципова схема з'єднання активно-ємнісного навантаження послідовно – *а* та паралельно – *б* з ФРІ

Загальна індуктивність розрядного контуру утворює для електричного навантаження пасивний послідовний електричний фільтр (ППЕФ) низької частоти (НЧ) першого порядку з частотою зрізу по рівню -3 дБ

$$f_3 = \frac{R}{2\pi L} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,212} \cdot 10^6 = 131,3, \text{ кГц} \quad (2.24)$$

та спадом амплітудно-частотної характеристики в смузі затухання -6 дБ/окт. Частота першої гармоніки розрядних імпульсів з обмеженим переднім фронтом тривалістю $0,75 - 3,25$ мкс складає відповідно $667-154$ кГц, що вище за зазначену частоту зрізу даного ППЕФ НЧ.

Приєднана послідовно з електричним навантаженням ємність, разом з загальною індуктивністю розрядного контуру, утворює відносно навантаження пасивний послідовний електричний смуговий фільтр першого порядку, а приєднана паралельно до електричного навантаження ємність, разом з загальною індуктивністю розрядного контуру, утворює ППЕФ низької частоти другого порядку.

На рис. 2.9 наведено осцилограму струму в резистивному навантаженні величиною 1 Ом, приєднаному до ФРІ СВКК, при величині опорної напруги 130 В та тривалості розрядних імпульсів $3,25$ мкс.

На наведеній осцилограмі імпульс струму в навантаженні, при заданій тривалості переднього фронту $3,25$ мкс, встиг досягти свого максимально можливого значення

$$I_{\max} = \frac{U}{R} = \frac{130}{1} = 130, \text{ A} \quad (2.25)$$

та вийти на "полицю" струму.

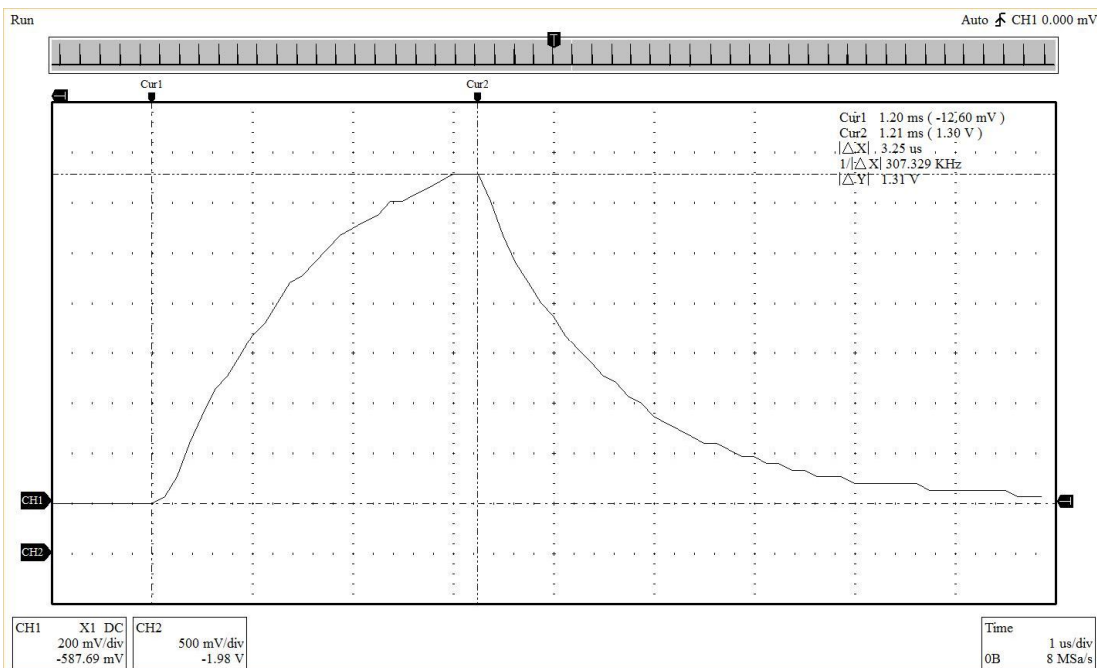


Рис. 2.9 Осцилограма ІС в резистивному ЕН 1 величиною Ом, при величині опорної напруги НК 130 В та часі відпирання НП ЕК $3,25$ мкс (1 В відповідає 100 А)

При послідовному з'єднанні з резистивним навантаженням ємності вона, разом з загальною індуктивністю розрядного контуру, утворює послідовний коливний контур з резонансною частотою

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}, \quad (2.26)$$

та електричною добротністю

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.27)$$

Визначимо необхідну величину електричної ємності послідовно з'єданого з навантаженням конденсатора, при відомій величині загальної індуктивності розрядного контуру 1,212 мкГн, та умові рівностей періоду першої гармоніки періоду розрядних імпульсів та періоду автоколивань резонансу контуру

$$C = \frac{t_i^2}{\pi^2 L} = \frac{3.25^2}{\pi^2 \cdot 1.212} \cdot 10^{-6} = 0,883 \text{ мкФ}. \quad (2.28)$$

При цьому, електрична добротність отриманого послідовного коливального кола становить

$$Q = \frac{1}{1} \sqrt{\frac{1,212}{0,883}} = 1,172, \quad (2.29)$$

що відповідає затухаючому слабоколивному характеру протікання перехідного процесу.

На рис. 2.10 представлено осцилограму струму в послідовному коливному контурі з резистивним навантаженням величиною 1 Ом, утвореному загальною індуктивністю розрядного контуру величиною 1,212 мкГн та конденсатором електричною ємністю 0,75 мкФ, при величині опорної напруги 130 В та тривалості розрядних імпульсів 3,25 мкс.

При послідовному приєднанні до резистивного навантаження конденсатора з електричною ємністю близькою до розрахункової, тривалість розрядного імпульсу по величині 0,1-0,1 амплітудного скоротилась з 6 до 3,32 мкс, тобто 1,81 рази. При цьому, його амплітудне значення скоротилось зі 130 до 65 А, тобто рівно у два рази.

Це обумовлено наявною постійною складовою напруги 65 В, яку в даному розрядному колі затримує конденсатор, відносно якої відбуваються коливання струму в електричному навантаженні. Крім того, у імпульсу струму замість аперіодичного заднього фронту з'явився значно довший затухаючий слабоколивний.

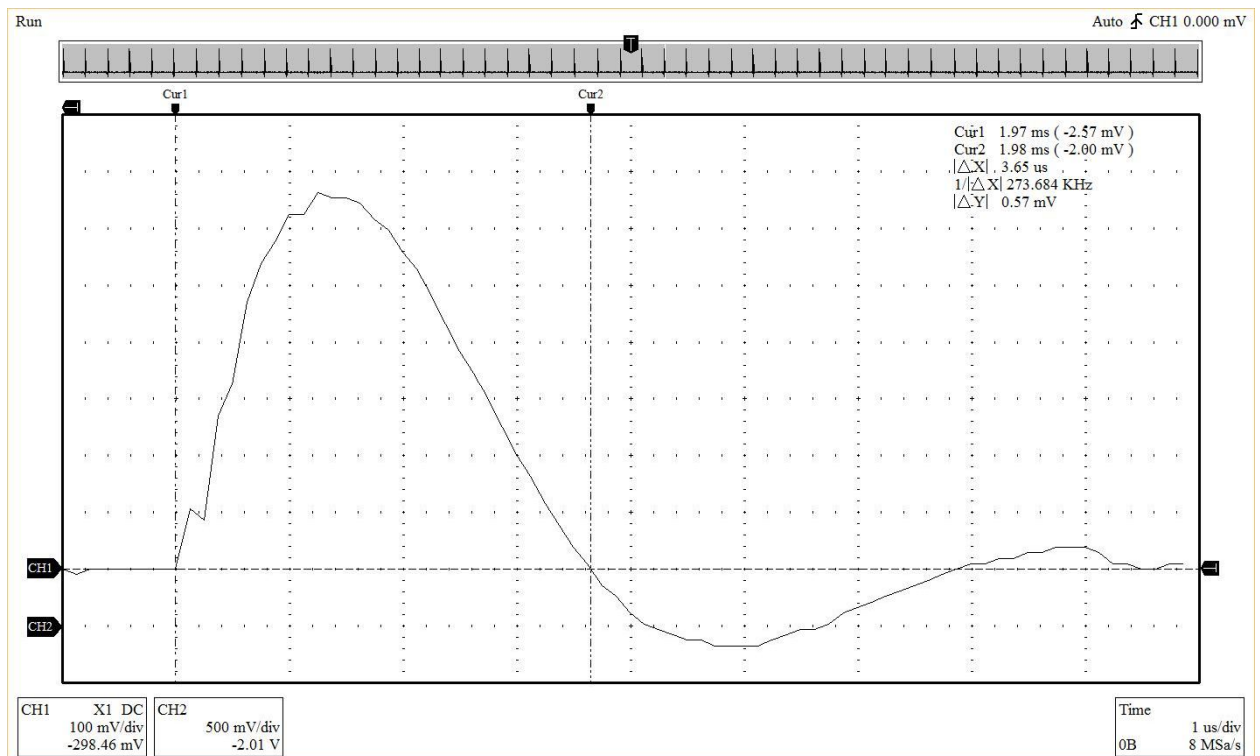


Рис. 2.10 Осцилограма ІС в резистивному ЕН величиною 1 Ом з послідовно з'єднаним конденсатором ємністю 0,75 мкФ, при величині опорної напруги НК 130 В та часі відпирання НП ЕК 3,25 мкс (1 В відповідає 100 А)

Визначимо частотну залежність коефіцієнту передачі по нарузі отриманого послідовного R - L - C кола

$$k_U(j\omega) = \frac{U_R(j\omega)}{U(j\omega)}, \quad (2.30)$$

де $U_R(j\omega)$ – напруга на електричному навантаженні, яку можна визначати через спад напруги

$$U_R(j\omega) = I(j\omega) \cdot R = \frac{U(j\omega)}{Z(j\omega)} R, \quad (2.31)$$

де $I(\omega)$ – частотна залежність струму в даному електричному колі, $Z(\omega)$ – частотна залежність загального комплексного опору даного електричного кола протіканню через нього змінного синусоїдального струму частотою ω . Визначимо частотну залежність загального комплексного опору даного смугового пасивного електричного фільтру

$$Z_C(j\omega) = j\omega L - j\frac{1}{\omega C} + R, \quad (2.32)$$

звідки визначимо частотну залежність коефіцієнта передачі за напругою отриманого пасивного електричного смугового фільтру першого порядку

$$k_{U_C}(j\omega) = \frac{\omega RC}{j(\omega^2 LC - 1) + \omega RC}. \quad (2.33)$$

Аналогічним чином визначимо частотну залежність коефіцієнту передачі за напругою для електричного кола без ємності. Частотна залежність повного комплексного опору послідовного R - L кола, протіканню через нього змінного синусоїдального струму частотою ω , становить

$$Z_{H1}(j\omega) = j\omega L + R. \quad (2.34)$$

Даний ланцюг являє собою R - L подільник і відносно R утворює ППЕФ НЧ першого порядку, частотна залежність коефіцієнта передачі за напругою якого визначається наступною аналітичною залежністю

$$k_{U_{H1}}(j\omega) = \frac{R}{j\omega L + R} \quad (2.35)$$

За допомогою отриманих аналітичних залежностей 2.33 та 2.35 коефіцієнтів передачі за напругою ППЕФ побудуємо їх частотні залежності для заданих параметрів розрядних кіл ($R = 1$ Ом, $L = 1,212$ мкГн, $C = 0,75$ мкФ).

Визначимо частотну залежність відношення коефіцієнтів передачі за напругою даних ППЕФ

$$\frac{k_{U_C}(j\omega)}{k_{U_{H1}}(j\omega)} = \frac{\frac{\omega RC}{j(\omega^2 LC - 1) + \omega RC}}{\frac{R}{j\omega L + R}} = \frac{j\omega^2 LC + \omega RC}{j(\omega^2 LC - 1) + \omega RC}. \quad (2.36)$$

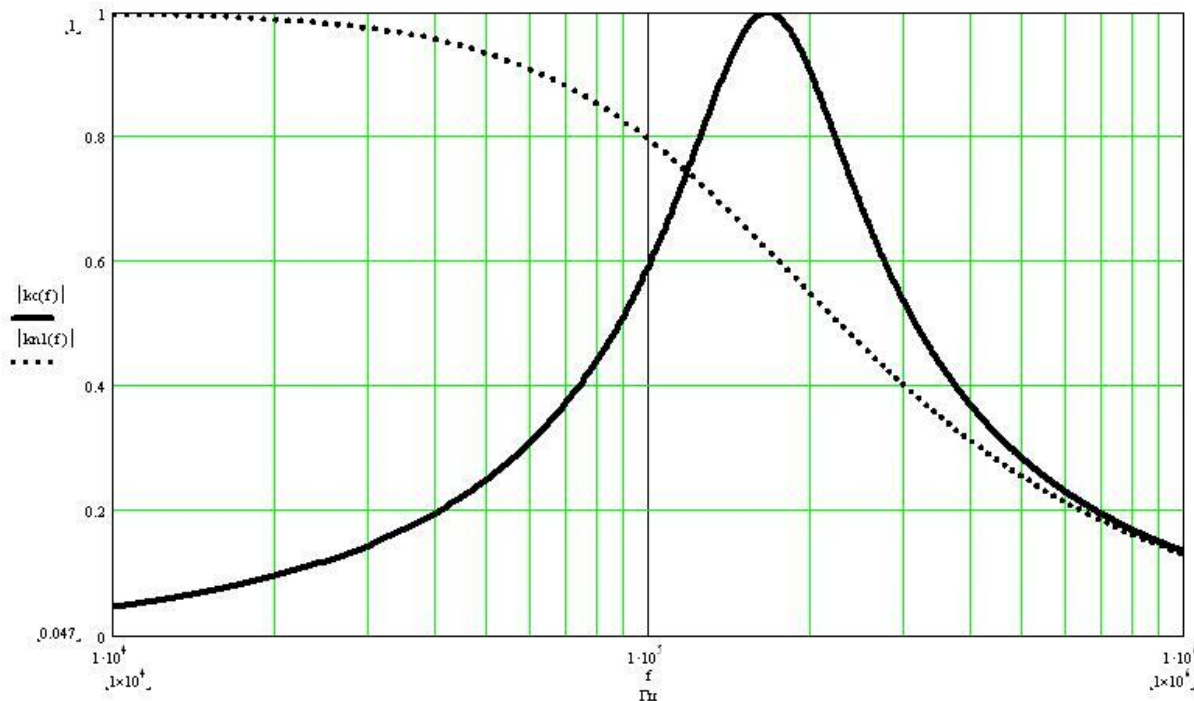


Рис. 2.11 Частотні залежності модуля коефіцієнту передачі по напрузі ППЕФ НЧ першого порядку – пунктирна крива та смугового першого порядку – суцільна крива

На рис. 2.12 наведено частотну залежність відношення коефіцієнтів передачі за напругою даних ППЕФ.

Як можна бачити з отриманих аналітичних кривих, на частоті що відповідає частоті першої гармоніки розрядних імпульсів 166,7 кГц, коефіцієнт передачі за напругою у смугового фільтра дорівнює одиниці, що в 1,62 рази більше ніж у ППЕФ НЧ першого порядку. Але росту амплітуди струму в розрядному контурі не спостерігається. Це викликано наявною постійною складовою в розрядному колі, яку послідовний смуговий електричний фільтр затримує. Так як, амплітуда першої гармоніки розрядних імпульсів відносно постійної складової струму становить приблизно половину величини опорної напруги, то і максимальне значення струму в цьому контурі зменшується приблизно вдвоє, що повністю співпадає отриманим експериментальним результатом.

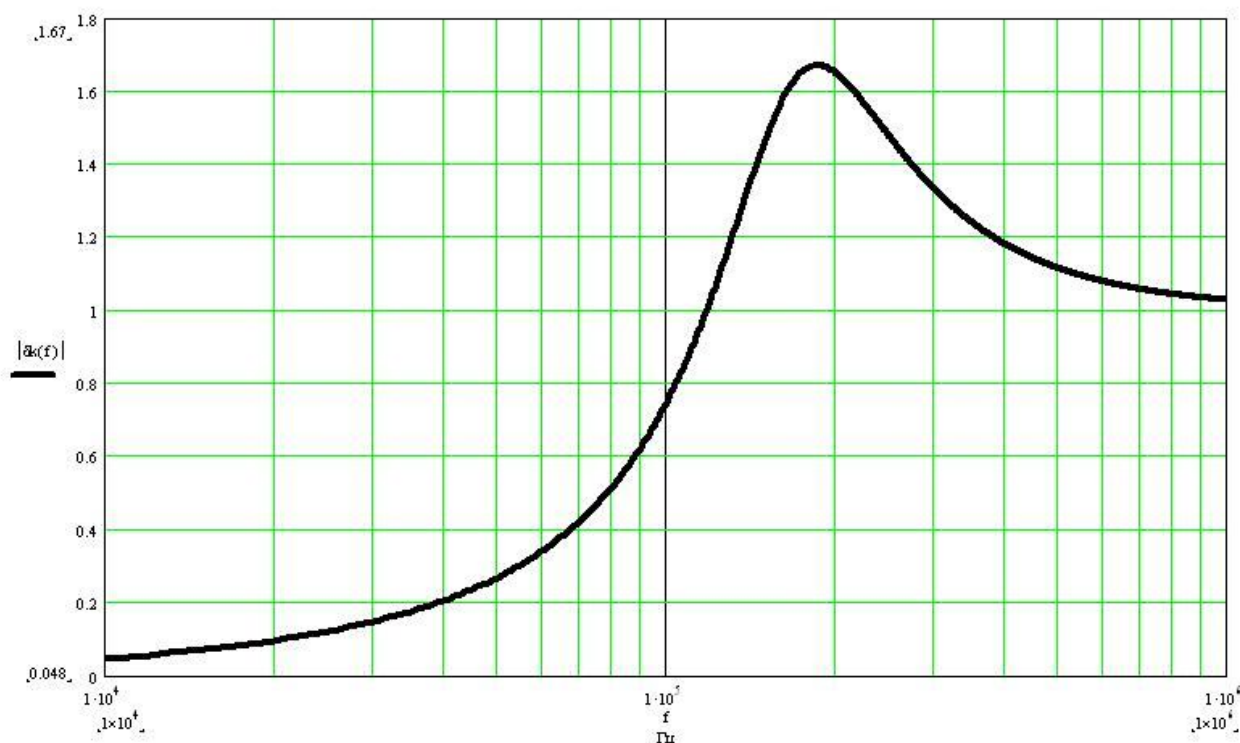


Рис. 2.12 Частотна залежність модуля відношення коефіцієнтів передачі за напругою смугового фільтру першого порядку до ППЕФ НЧ першого порядку

Як показують результати комп'ютерного моделювання, використання послідовного пасивного смугового фільтру, у випадку двополярних розрядних імпульсних струмів для заданих параметрів електричного кола, збільшує їх амплітуду у 1,31 рази. Тому використання даного типу пасивних електричних фільтрів стає доцільним тільки з формувачами двополярних розрядних ІС.

Також слід зазначити, що при послідовному з'єднанні з електричним навантаженням конденсатора через нього буде протікати вся величина струму навантаження, при цьому на ньому, в залежності від добротності розрядного контуру, можуть виникати напруги значно більші за величину опорної напруги ФРІ.

Виходячи з вищезазначеного, у випадку уніполярних розрядних ІС, доцільно приєднати конденсатор паралельно до електричного навантаження. У даному випадку через конденсатор не буде протікати значний струм навантаження, а напруга на конденсаторі завжди буде дорівнювати спаду напруги на резистивному навантаженні.

Розрядне коло без приєданого до навантаження конденсатора являє собою ППЕФ НЧ першого порядку, а з паралельно приєднаним конденсатором ППЕФ НЧ

другого порядку (рис. 2.8 б). Визначимо коефіцієнт передачі по напрузі ППЕФ НЧ другого порядку. Для цього необхідно визначити спад напруги на загальній індуктивності розрядного контуру

$$U_R(j\omega) = U(j\omega) - U_L(j\omega), \quad (2.37)$$

де $U_L(\omega)$ – частотна залежність спаду напруги на індуктивному опорі, яка визначається за наступною аналітичною залежністю

$$U_L(j\omega) = I_L(j\omega) \cdot jX_L(\omega) = \frac{U(j\omega)}{Z_{H2}(j\omega)} jX_L(\omega), \quad (2.38)$$

де $X_L(\omega) = \omega L$ – опір індуктивності протіканню змінного синусоїдального струму частотою ω . Загальний комплексний опір даного електричного кола визначається наступною аналітичною залежністю

$$Z_{H2}(j\omega) = jX_L(\omega) - \frac{jRX_C(\omega)}{R - jX_C(\omega)}, \quad (2.39)$$

де $X_C(\omega) = \frac{1}{\omega C}$ – ємнісний опір конденсатора протіканню змінного синусоїдального струму частотою ω . Через відомі значення опорної напруги ФРІ та загального комплексного електричного опору кола визначаємо частотну залежність спаду напруги на загальній індуктивності розрядного контуру

$$U_L(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{jX(\omega)_L + \frac{-jX_C(\omega)}{R - jX_C(\omega)}} jX_L(\omega). \quad (2.40)$$

Підставимо вираз 2.40 у залежність 2.30 та отримаємо частотну залежність коефіцієнту передачі по напрузі даного ППЕФ НЧ

$$k_{U_{H2}}(j\omega) = \frac{R}{R - \omega^2 RLC + j\omega L}. \quad (2.41)$$

Визначимо необхідну величину електричної ємності конденсатора для отримання максимального коефіцієнту передачі за напругою даного ППЕФ НЧ при ін-

ших відомих параметрах розрядного кола та заданій тривалості розрядних ІС. Прирівняємо похідну по ємності модуля коефіцієнта передачі за напругою до нуля

$$\frac{d}{dC} |k_{U_{H2}}(\omega)| = 0 \quad (2.42)$$

та розв'яжемо отримане рівняння відносно C

$$C = \frac{1}{\omega^2 L}, \quad (2.43)$$

Результат вимірювання струму в резистивному навантаженні величиною 1 Ом при паралельному приєднанні до нього конденсатору електричною ємністю 0,75 мкФ, величині опорної напруги 335 В та заданій тривалості розрядних ІС 3 мкс наведений на рис. 2.13.

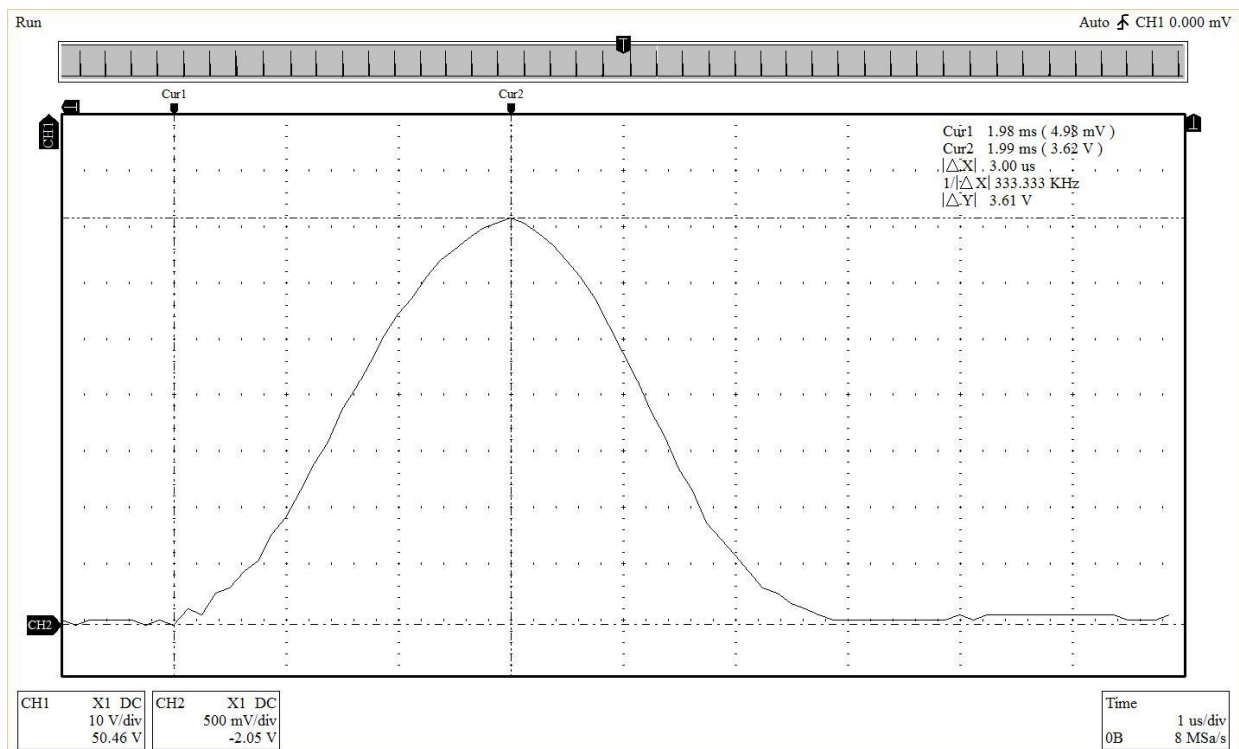


Рис. 2.13 Осцилограма ІС в резистивному навантаженні 1 Ом з паралельно приєднаним до нього конденсатором ємністю 0,75 мкФ (1 В відповідає 100 А)

При паралельному приєднанні до резистивного навантаження конденсатора з електричною ємністю близькою до розрахункової, тривалість розрядного ІС по величині 0,1-0,1 амплітудного скоротилась з 5,68 до 4,68 мкс, тобто 1,21 рази, а його амплітудне значення збільшилось з 305 до 362 А, тобто у 1,19 рази. При цьому, його

максимальна імпульсна потужність збільшилась з 93 до 131 кВт, тобто 1,41 рази; середня імпульсна потужність збільшилась з 36,2 до 65,5 кВт, тобто в 1,81 рази; середня швидкість наростання струму по передньому фронту збільшилась з 128,3 до 154,8 А/мкс, тобто в 1,21 рази.

Частотну залежність модуля коефіцієнтів передачі ППЕФ НЧ першого та другого порядків отримані за допомогою аналітичних залежностей (2.35) та (2.41) для заданих параметрів електричного кола ($R = 1$ Ом, $L = 1,212$ мкГн, $C = 0,75$ мкФ) наведено на рис. 2.14.

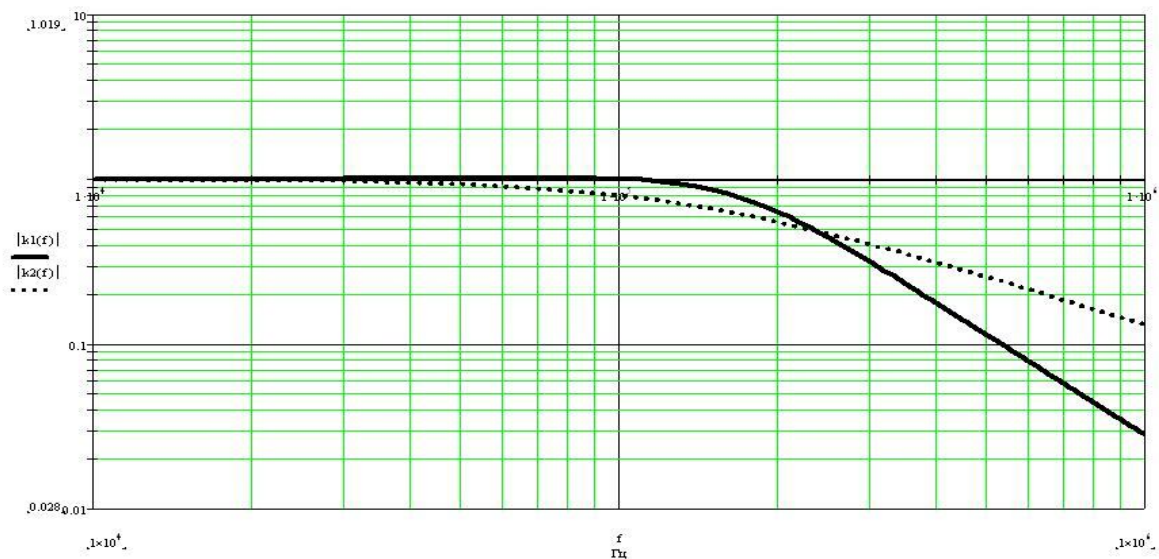


Рис. 2.14 Частотні залежності модуля коефіцієнту передачі по ППЕФ НЧ першого порядку пунктирна крива та другого порядку – суцільна крива

Як можна бачити з частотних залежностей приведених на рис. 2.14, в широкому діапазоні частот у ППЕФ НЧ другого порядку коефіцієнт передачі по напрузі значно більший ніж у ППЕФ НЧ першого порядку. Це чисельно можна оцінити відношенням даних коефіцієнтів, яке визначається за наступною аналітичною залежністю

$$\frac{k_{U_{H2}}(j\omega)}{k_{U_{H1}}(j\omega)} = \frac{\frac{R}{R - \omega^2 RLC + j\omega L}}{\frac{R}{j\omega L + R}} = \frac{j\omega L + R}{R - \omega^2 RLC + j\omega L}. \quad (2.44)$$

На рис. 2.15 наведено частотну залежність модуля відношення коефіцієнтів передачі за напругою ППЕФ НЧ другого та першого порядків.

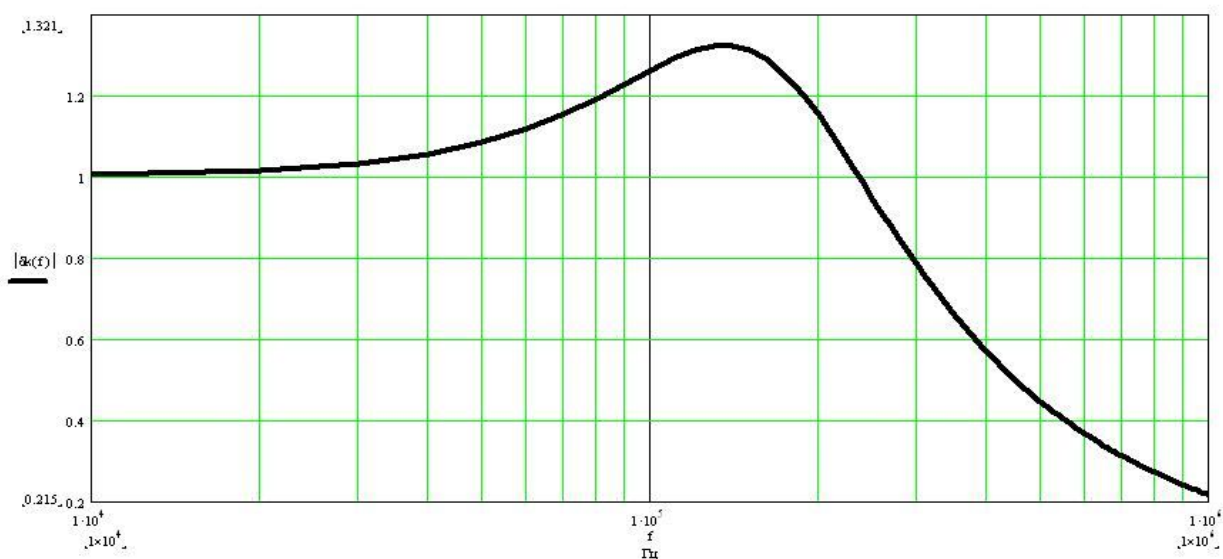


Рис. 2.15 Частотна залежність модуля відношення коефіцієнтів передачі за напругою ППЕФ НЧ другого та першого порядків

З наведеної залежності видно, що в частотному діапазоні 20 – 230 кГц ППЕФ НЧ другого порядку має більший коефіцієнт передачі за напругою відносно ППЕФ НЧ першого порядку. Їх відношення в даному діапазоні частот змінюється від 1 до 1,32. Також слід зазначити, що приведений ППЕФ НЧ другого порядку в діапазоні частот 0 – 100 кГц має коефіцієнт передачі по напрузі більший за 1. Це означає що напруга на ЕН в даному діапазоні частот може перевищувати величину напруги ДОН ФРІ.

На частоті, яка відповідає першій гармоніці розрядних ІС тривалістю 3 мкс, (166,7 кГц), відношення коефіцієнтів передачі за напругою ППЕФ НЧ другого та першого порядків становить 1,263, що добре корелює з отриманими експериментальними даними.

У табл. 2.8 наведенні експериментальні данні параметрів ІС в резистивному безіндукційному ЕН 1 та 3 Ом для різних значень тривалості розрядних ІС та ємності паралельно приєднаного до електричного навантаження конденсатора.

Експериментальні данні параметрів імпульсу струму

Номер експерименту	Тривалість імпульсу, мкс	Навантаження, Ом	Ємність паралельного конденсатора, мкФ	Приведена амплітуда, А	Тривалість переднього фронту 0,1-0,9, мкс	Середня швидкість наростання струму, А/мкс	Тривалість заднього фронту 0,9-0,1, мкс	Загальна тривалість імпульсу 0,1-0,1, мкс
1	3,25	1	-	0,867	2,08	0,333	2,81	5,55
2	3,25	1	0,75	1	1,83	0,437	1,75	4,56
3	0,75	1	-	0,387	0,665	0,466	2,65	3,47
4	0,75	1	0,75	0,330	0,692	0,382	1,44	3,20
5	3,25	3	-	0,303	1,68	0,144	1,80	5,07
6	3,25	3	0,15	0,362	1,05	0,256	1,12	4,59
7	0,75	3	-	0,222	0,445	0,399	0,98	1,74
8	0,75	3	0,15	0,241	0,731	0,263	1,04	2,02

У табл. 2.9 наведені розрахункові дані відношення параметрів розрядних ІС в ЕН з паралельно приєднаною до нього конденсатором до струму в цьому ЕН без паралельно приєданого до нього конденсатора.

З наведених табл. 2.8 і 2.9 експериментальних та розрахункових даних видно, що приєднання паралельно до електричного навантаження конденсатора може значно покращити параметри ІС в ньому, а саме на 15-20 % підвищити його амплітуду, на 10-20 % скоротити його тривалість та підвищити швидкість наростання струму по передньому фронту на 30-80 %.

Приведені параметри розрядних імпульсів струму

Тривалість імпульсу, мкс	Навантаження, Ом	Відношення величини приведених струмів	Відношення тривалості передніх фронтів	Відношення швидкостей наростання струму	Відношення тривалості задніх фронтів	Відношення загальної тривалості імпульсів
3,25	1	1,153	1,137	1,312	1,606	0,822
0,75	1	0,853	0,961	0,820	1,840	0,922
3,25	3	1,195	1,195	1,780	1,607	0,905
0,75	3	1,086	1,086	0,660	1,903	1,161

З зазначеного вище, можна зробити висновок, що з ростом порядку ППЕФ НЧ також буде зрости і амплітуда ІС в ЕН. Окрім цього, коефіцієнт передачі за напругою для ППЕФ НЧ другого і вище порядків на заданій частоті розрядних ІС може значно перевищувати одиницю. Таким чином, за допомогою ППЕФ НЧ на ЕН можна отримувати напругу яка перевищує напругу ФОП ФРІ, тим самим отримувати в ЕН ІС з амплітудою що перевищує максимально можливу при заданих величинах опорної напруги та опору навантаження.

Так як, індуктивність розрядного контуру ФРІ складається з його вихідної індуктивності L_0 та індуктивності ЗП L_K , стає можливим побудувати для ЕН ППЕФ НЧ третього та четвертого порядків. Для цього необхідно приєднати електричні ємності паралельно до навантаження та до ФРІ. Електричні принципові схеми даних ППЕФ НЧ наведені на рис. 2.16.

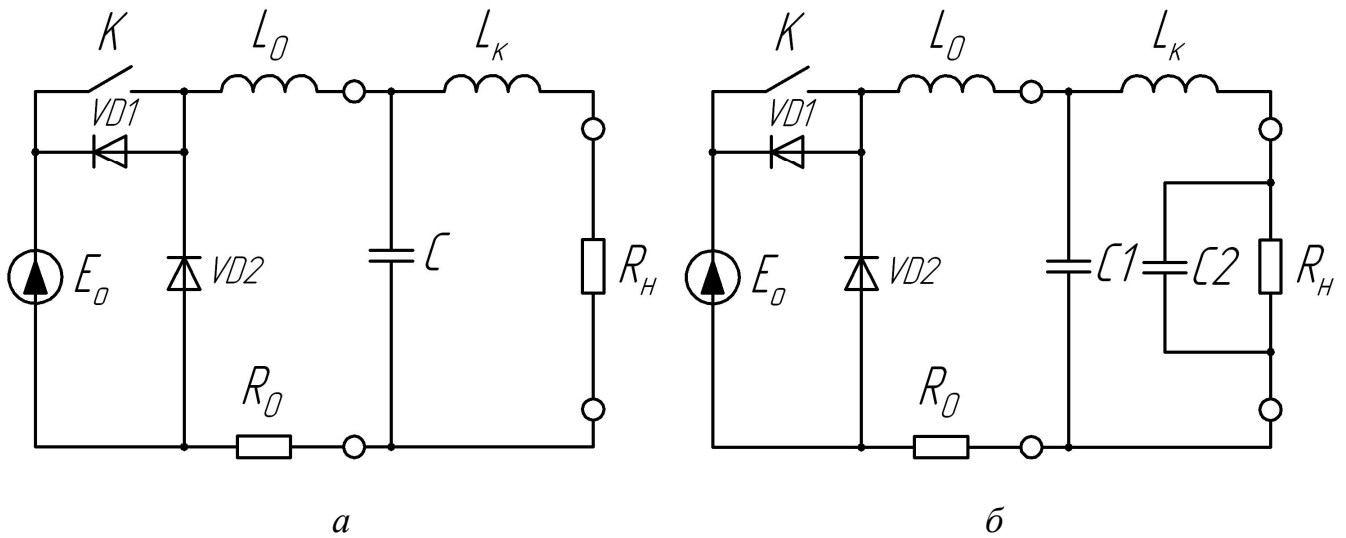


Рис. 2.16 Спрощені електричні принципові схеми ППЕФ НЧ
третього – *a* та четвертого – *б* порядків

Визначимо їх коефіцієнти передачі за напругою. Для цього необхідно визначити спади напруги на індуктивності ЗП та на вихідній індуктивності ФРІ

$$U_R(j\omega) = U(j\omega) - U_{L_0}(j\omega) - U_{L_{\Pi}}(j\omega), \quad (2.45)$$

де $U_{L_0}(j\omega)$ та $U_{L_{\Pi}}(j\omega)$ – відповідно спади напруги на індуктивностях джерела та ЗП, які відповідно визначаються

$$U_{L_0}(j\omega) = I_{L_0}(j\omega) \cdot j\omega L_0, \quad (2.46)$$

$$U_{L_{\Pi}}(j\omega) = I_{L_{\Pi}}(j\omega) \cdot j\omega L_{\Pi}, \quad (2.47)$$

де $I_{L_0}(j\omega)$ та $I_{L_{\Pi}}(j\omega)$ – відповідно струми що протікають через індуктивні опори ФРІ та ЗП. Визначимо ці струми. Струм що протікає через індуктивний опір ФРІ визначається відношенням величини опорної напруги та загального комплексного опору розрядного кола протіканню змінного синусоїдального струму

$$I_{L_0}(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{Z_H(j\omega)}, \quad (2.48)$$

а струм що протікає через індуктивний опір ЗП дорівнює відношенню різниці опорної напруги та спаду напруги на індуктивному опорі джерела до повного комплексного опору решти електричного кола протіканню змінного синусоїдального струму

$$I_{L_0}(j\omega) = \frac{U(j\omega) - U_{L_0}(j\omega)}{Z_p(j\omega)}. \quad (2.49)$$

Підставимо отримані залежності у вираз 2.30 та визначимо коефіцієнти передачі за напругою ППЕФ НЧ третього та четвертого порядків

$$k_{U_{H3-4}}(\omega) = \left(1 - \frac{j\omega L_0}{Z_H(\omega)}\right) \left(1 - \frac{j\omega L_{II}}{Z_P(\omega)}\right). \quad (2.50)$$

Величини повних комплексних опорів, що входять в дану аналітичну залежність, для ППЕФ НЧ третього та четвертого порядків визначаються за наступними аналітичними залежностями

$$Z_{H4}(\omega) = j\omega L_0 - \frac{j \frac{1}{\omega C_1} \cdot \left(j\omega L_{II} - \frac{j \frac{R}{\omega C_2}}{R - j \frac{1}{\omega C_2}} \right)}{j\omega L_{II} - j \frac{1}{\omega C_1} - \frac{j \frac{R}{\omega C_2}}{R - j \frac{1}{\omega C_2}}}, \quad (2.51)$$

$$Z_{H3}(\omega) = \frac{\omega(L_0 + L_{II} - \omega^2 L_0 L_{II} C) + jR(\omega^2 L_0 C - 1)}{\omega RC + j(\omega^2 L_{II} C - 1)}, \quad (2.52)$$

$$Z_{P4}(\omega) = \frac{jR(\omega^2 L_{II} C_2 - 1) + \omega L_{II}}{\omega RC_2 - j}, \quad (2.53)$$

$$Z_{P3}(\omega) = j\omega L_{II} + R. \quad (2.54)$$

Аналогічно до визначення ємності ППЕФ НЧ другого порядку, визначимо величини ємностей даних електричних ППЕФ НЧ для заданої тривалості ІС (3 мкс):

$$C = 1,2 \cdot \frac{(2 \cdot t_i)^2}{4 \cdot \pi^2 L_0} = 1,2 \cdot \frac{(2 \cdot 3)^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot 0,46} \cdot 10^{-6} = 2,378, \text{ мкФ}, \quad (2.55)$$

$$C_1 = 2 \cdot \frac{(2 \cdot t_i)^2}{4 \cdot \pi^2 L_0} = 2 \cdot \frac{(2 \cdot 3)^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot 0,46} \cdot 10^{-6} = 3,964, \text{ мкФ}, \quad (2.56)$$

$$C_2 = 2 \cdot \frac{(2 \cdot t_i)^2}{4 \cdot \pi^2 L_{II}} = 2 \cdot \frac{(2 \cdot 3)^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot 0.75} \cdot 10^{-6} = 2,432, \text{ мкФ.} \quad (2.57)$$

та побудуємо їх частотні залежності.

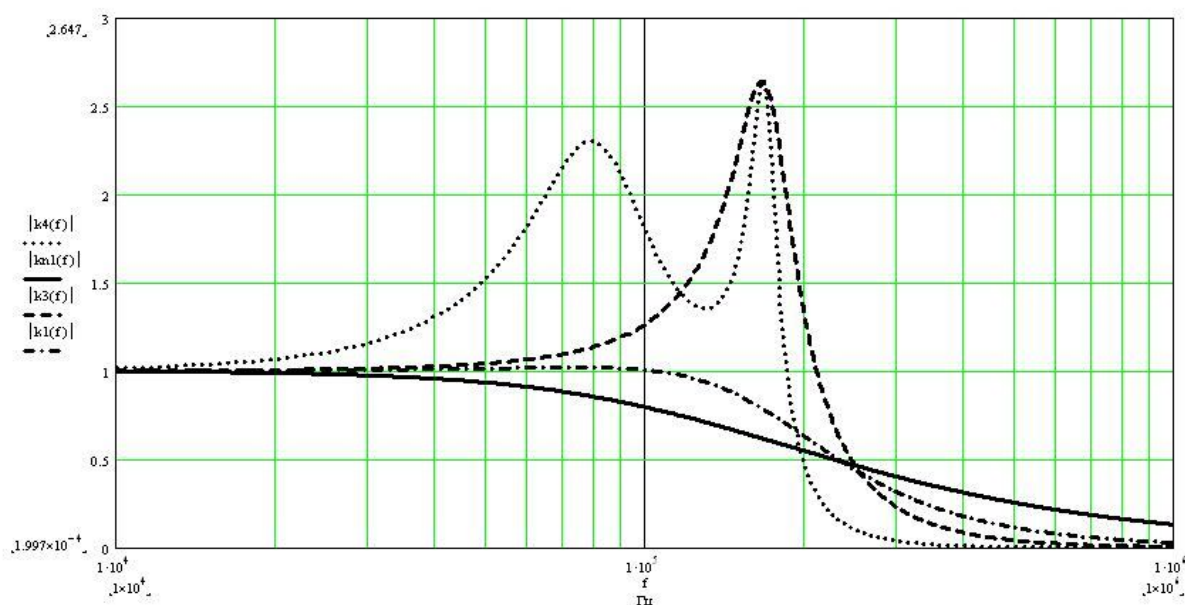


Рис. 2.17 Частотна залежність коефіцієнту передачі за напругою ППЕФ НЧ відповідно 1-го порядку – суцільна, 2-го порядку – штрих-пунктирна, 3-го порядку – штрихова та 4-го порядку – пунктирна криві

З наведених на рис. 2.17 частотних залежностей видно, що коефіцієнт передачі за напругою ППЕФ НЧ третього та четвертого порядків на частоті першої гармоніки розрядних ІС тривалістю 3 мкс співпадають. Крім того їх значення на даній частоті значно перевищують одиницю та коефіцієнти передачі за напругою ППЕФ НЧ першого та другого порядків у 4,28 та 3,37 рази відповідно.

Модуль відношення коефіцієнтів передачі за напругою ППЕФ НЧ другого, третього та четвертого порядків до першого наведені на рис. 2.18.

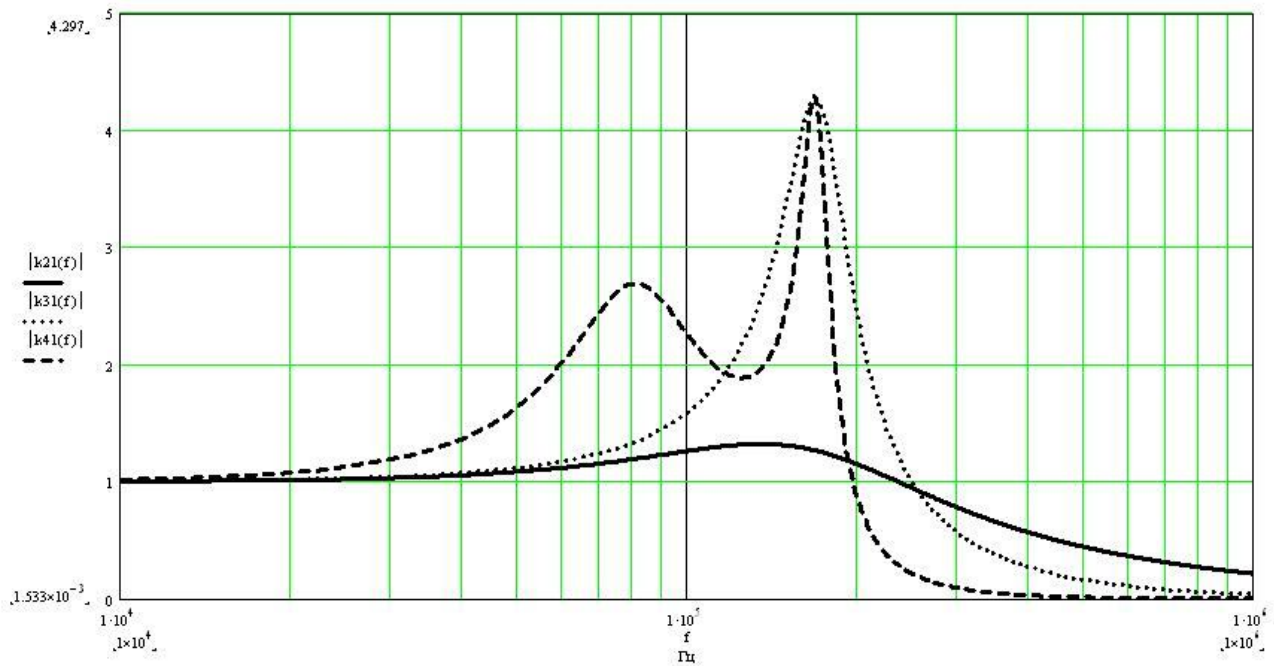


Рис. 2.18 Модуль відношення коефіцієнтів передачі за напругою ППЕФ НЧ 2-го порядку - суцільна крива, 3-го порядку - пунктирна крива та 4-го порядку - штрихова крива порядків до 1-го порядку

Таким чином, як видно з наведених частотних залежностей, приєднання ЕН до ФРІ через ППЕФ НЧ може збільшити напругу на ньому. Ця напруга, може значно перевищувати напругу на ФОР ФРІ. Завдяки цьому, стає можливим отримувати на ЕН розрядні ІС значно більшої амплітуди без зменшення його електричного опору або збільшення величини опорної напруги.

На рис. 2.19 наведено осцилограму струму в безіндукційному електричному навантаженні величиною 1 Ом, приєднаному до ФРІ з тривалістю 3 мкс, величиною опорної напруги 130 В і вихідною індуктивністю 0,460 мкГн коаксіальним кабелем довжиною 4 м з загальною індуктивністю 0,752 мкГн, з приєднанням до вихідних клем джерела конденсатора ємністю 2,35 мкФ, який утворює по відношенню до ЕН ППЕФ НЧ третього порядку.

Як можна бачити з наведених осцилограм, при приєднанні електричного навантаження до ФРІ через ППЕФ НЧ третього порядку амплітуда струму в ньому зросла з 109 до 167 А, тобто в 1,53 рази. Крім цього, його тривалість по рівню 0,1-0,1 амплітудного значення збільшилась з 6,35 до 7,38, тобто в 1,16 рази, швидкість нарощування

тання переднього фронту збільшилась з 32,14 до 55,30 А/мкс, тобто 1,72 рази, пікова імпульсна потужність збільшилась з 11,9 до 27,9 кВт, тобто у 2,34 рази. При цьому амплітудне значення струму, що видає ФРІ, збільшилось зі 109 до 282 А, також збільшилась його крутизна з 32,92 до 133,02 А/мкс, а форма струму набула явно гармонічного характеру.

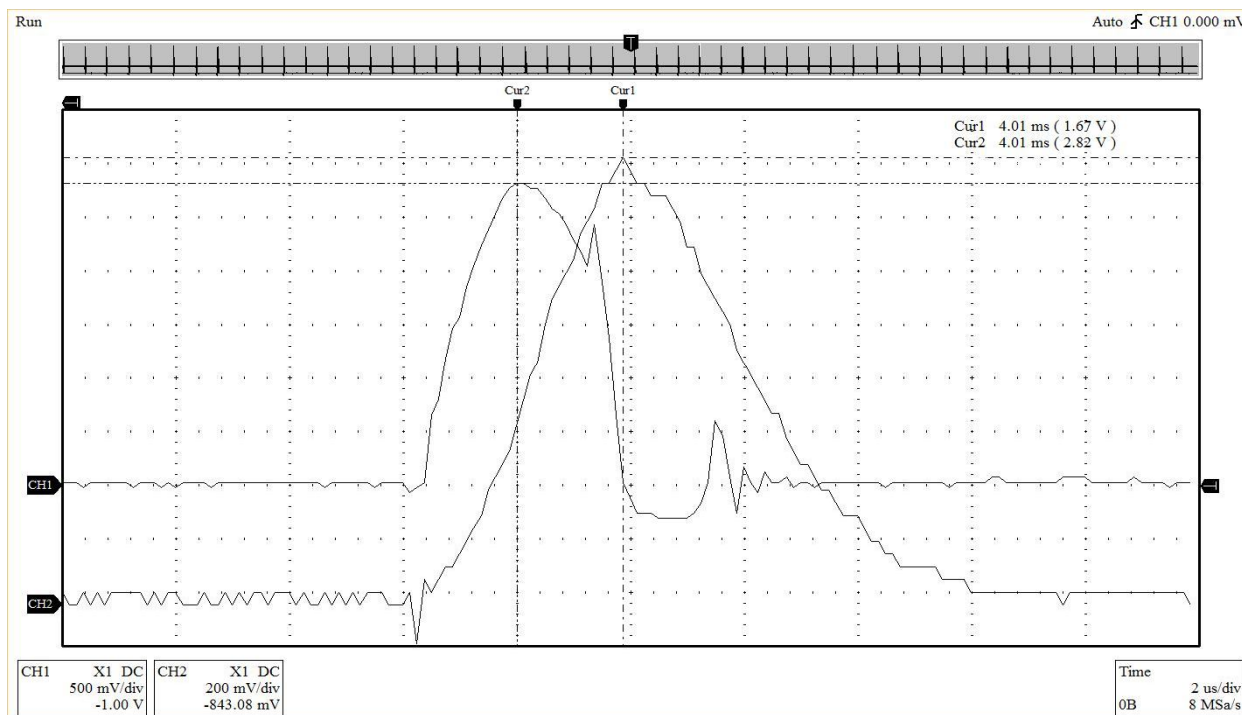


Рис. 2.19 Осцилограми вихідного струму ФРІ - CH-1 та струму в ЕН – CH-2, при їх з'єднанні через ППЕФ НЧ 3-го порядку

На рис. 2.20 наведено осцилограму струму в безіндукційному електричному навантаженні величиною 1 Ом з паралельно приєднаною до нього ємністю величиною 2,4 мкФ. Навантаження приєднано до ФРІ з тривалістю 3 мкс, величиною опорної напруги 130 В і вихідною індуктивністю 0,460 мкГн коаксіальним кабелем довжиною 4 м з загальною індуктивністю 0,752 мкГн, з приєднанням до вихідних клем джерела конденсатора ємністю 4 мкФ. Вихідна індуктивність ФРІ та власна індуктивність кабелю разом з приєднаними до них конденсаторами утворюють по відношенню до електричного навантаження ППЕФ НЧ четвертого порядку.

Амплітуди струмів ФРІ та ЕН на осцилограмах наведених на рис. 2.18 та 2.19 співпадають. Це підтверджує рівність коефіцієнтів передачі за напругою при даних

параметрах електричного кола для ППЕФ НЧ третього та четвертого порядків. Також помітна суттєва затримка струму в навантаженні відносно струму ФРІ і складає приблизно 2 мкс. Це обумовлено зсувом фаз між вхідними та вихідними напругами який створюють дані ППЕФ НЧ. Величину затримки можна визначити побудувавши фазочастотні характеристики цих ППЕФ НЧ, використавши наступну аналітичну залежність

$$\psi_i(\omega) = \arctg \frac{\operatorname{Re}(k_i(j\omega))}{\operatorname{Im}(k_i(j\omega))}, \quad (2.58)$$

де $\psi_i(\omega)$ – фазочастотна функція ППЕФ НЧ i -го порядку, $k_i(\omega)$ – частотна функція коефіцієнту передачі за напругою ППЕФ НЧ i -го порядку.

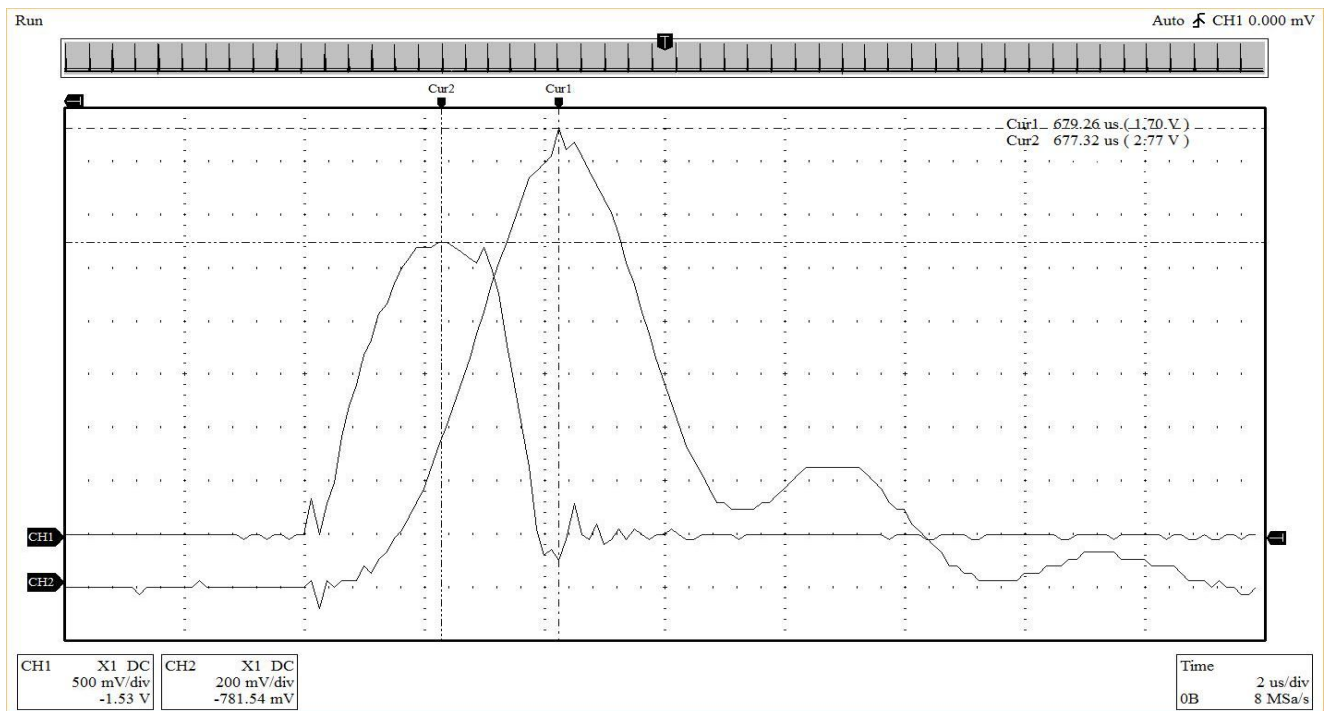


Рис. 2.20 Осцилограми вихідного струму ФРІ – СН-1 та струму в ЕН – СН-2, при їх узгодженні ППЕФ НЧ 4-го порядку

З наведених кривих видно, що електричні фільтра низької частоти всіх порядків створюють часову затримку ІС, яку можна визначити з фазочастотних характеристик даних ППЕФ НЧ за наступною аналітичною залежністю

$$t_3(\omega) = \frac{\psi(\omega)}{\omega}, \quad (2.59)$$

де $t_3(\omega)$ – частотна залежність часу затримки ІС. Для частоти, що відповідає першій гармоніці ІС, часова затримка для ППЕФ НЧ першого, другого, третього та четвертого порядків складає 0,86, 1,5, 2,06 та 2,10 мкс відповідно, що збігається з отриманими експериментальними результатами.

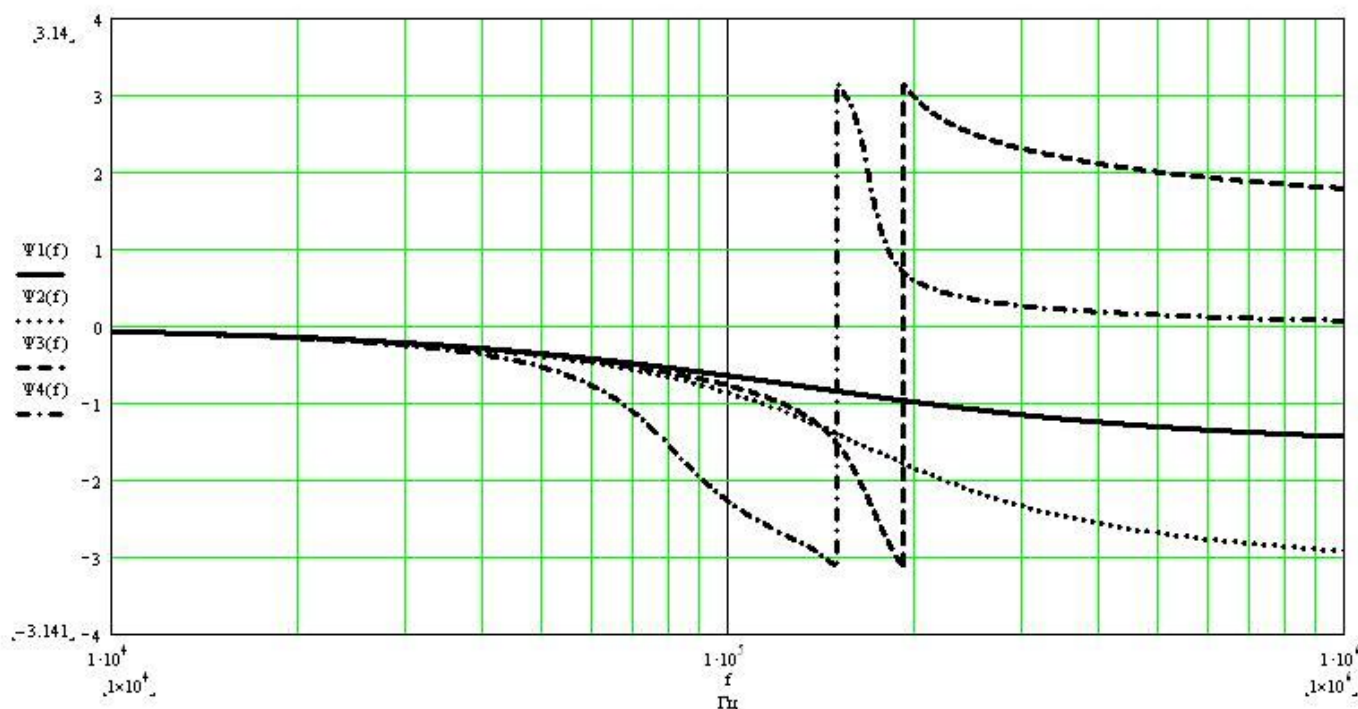


Рис. 2.21 Фазочастотні ППЕФ НЧ 1-го (суцільна крива), 2-го (пунктирна крива), 3-го (штрихова) крива та 4-го (штрих-пунктирна крива) порядків

На рис. 2.22 наведені графіки частотного відгуку даних електричних ППЕФ НЧ з першого по четвертий порядки.

У табл. 2.10 наведені експериментальні та розрахункові данні для ППЕФ НЧ першого – четвертого порядків для тривалості розрядних ІС 3 мкс.

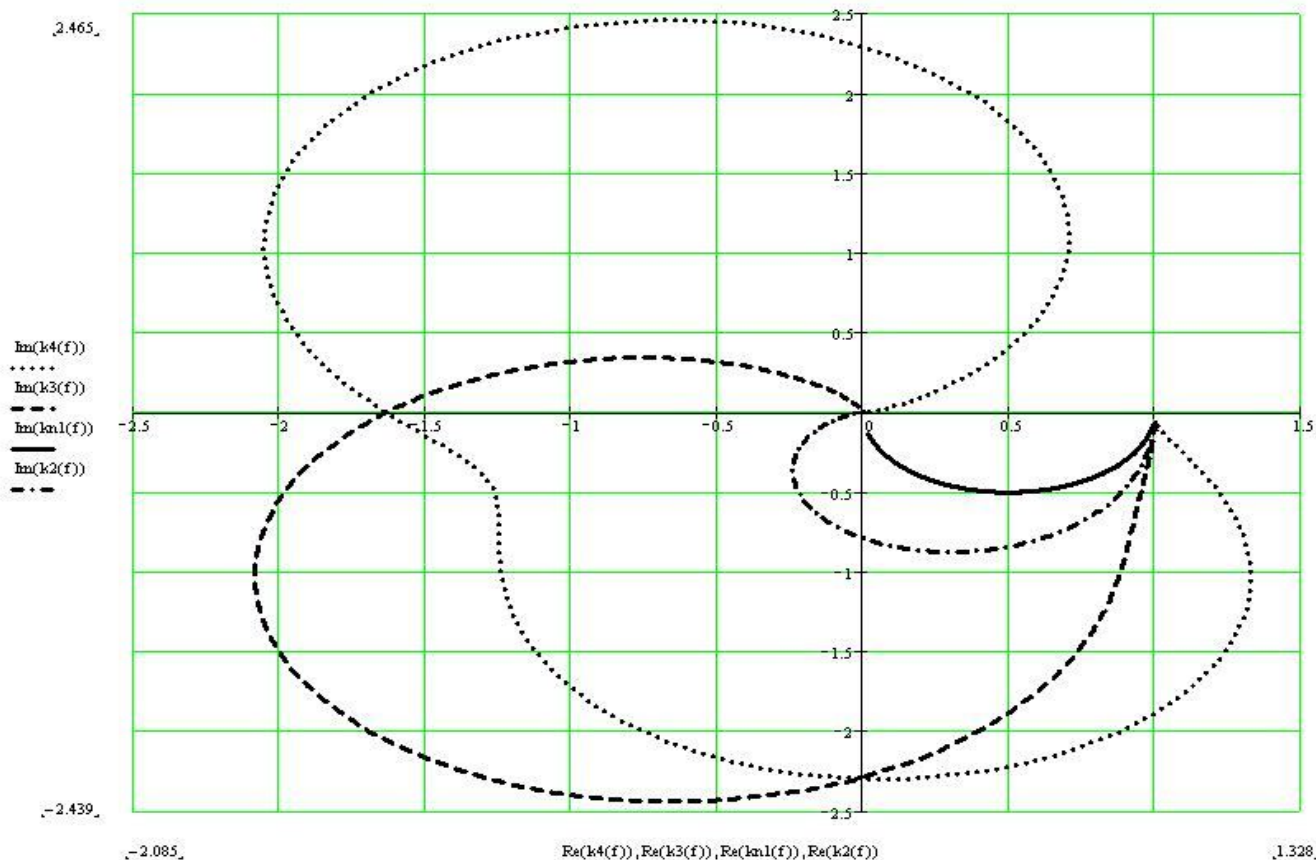


Рис. 2.22. Частотний відгук ППЕФ НЧ 1-го (суцільна крива), 2-го (штрих-пунктирна крива), 3-го (пунктирна крива) та 4-го (крапкова крива) порядків

Таблиця 2.10

Експериментальні та розрахункові данні ППЕФ НЧ

Порядок фільтру низької частоти	Коефіцієнт передачі	Відносний коефіцієнт передачі	Опорна напруга, В	Амплітуда струму, А	Швидкість наростання струму, А/мкс	Тривалість імпульсу, мкс	Максимальна імпульс- на потужність, Квт	Середня імпульсна потужність, Квт
1	0,619	1	130	107	32,14	5,68	11,45	5,72
2	0,788	1,273	130	130	43,33	4,68	16,90	8,45
3	2,65	4,281	130	167	55,30	5,84	27,89	14,32
4	2,65	4,281	130	170	54,00	5,44	28,90	15,62

З даних наведених у табл. 2.10 видно що мінімальна тривалість розрядного ІС досягається при узгодженні електричного навантаження з ФРІ ППЕФ НЧ другого порядку, а максимальні крутизна переднього фронту, амплітуда та імпульсні потужності при узгодженні ППЕФ НЧ третього та четвертого порядків. Приведені параметри ІС в ЕН при його узгодженні з ФРІ ППЕФ НЧ другого, третього та четвертого порядків до першого наведені в табл. 2.11.

Як видно з даних наведених у табл. 2.11, використання ППЕФ НЧ для узгодження електричного навантаження з ФРІ дозволяє значно покращити параметри ІС. Використання ППЕФ НЧ другого порядку дозволяє декілька скоротити загальну тривалість розрядного ІС, суттєво підвищити швидкість наростання струму та значно підняти імпульсні потужності, при цьому його амплітуда прямує до значення яке визначається відношенням величин опорної напруги та активного опору ЕН. Використання ППЕФ НЧ третього та четвертого порядків майже не змінюють тривалість розрядних ІС, але значно підвищує їх амплітуду, швидкість наростання та імпульсні потужності, при цьому їх амплітуда значно перевищує відношення величин опорної напруги та активного опору ЕН.

Таблиця 2.11

Приведені параметри імпульсів струму в навантаженні

Порядок ППЕФ НЧ	Приведена амплітуда ІС	Приведена швидкість наростання ІС	Приведена тривалість ІС	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

З вищезазначеного слідує, що для узгодження ЕН з ФРІ найбільш доцільно застосовувати ППЕФ НЧ третього та четвертого порядків. Це дозволяє значно покращити показники розрядних ІС в ЕН без внесення суттєвих конструктивних змін безпосередньо в сам ФРІ. Також, стає можливим отримувати значно більші імпульсні

потужності в ЕН без збільшення величини опорної напруги ДОН ФРІ. Це в свою чергу дозволяє, або використовувати НП ЕК з меншим класом напруги для отримання необхідних величин імпульсних потужностей в ЕН, або отримувати в декілька раз більші імпульсні потужності ніж дозволяє клас напруги НП ЕК.

Так як, задній фронт ІС в ЕН, при його узгодженні з ФРІ ППЕФ НЧ четвертого порядку, має коливний характер, на відміну від заднього фронту ІС при узгодженні ППЕФ НЧ третього порядку, більш доцільно використовувати ППЕФ НЧ третього порядку. Крім того, реалізація ППЕФ НЧ третього порядку значно простіша ніж ППЕФ НЧ четвертого порядку та, в даному випадку, потребує у 2,72 рази меншу ємність конденсаторів, які можуть бути встановлені безпосередньо в ФРІ та приєднанні до його вивідних клем.

Реальне ЕІН володіє суттєвою нелінійністю свого активного опору. У зв'язку з цим виникла необхідність експериментального підтвердження ефективності узгодження реального ЕІН з ФРІ ППЕФ НЧ.

В якості ЕІН була використана технологічна камера для ОЕІД шару металевих гранул в рідкому діелектричному середовищі з наступними параметрами: ширина електродів – 95 мм, МЕР – 40 мм. В якості ЗП був застосований СВКК типу ПвЭ-гаП-6кВ 1x70/16 довжиною 4 м.

Для узгодження ЕІН з ФРІ було необхідно визначити електричні параметри даної технологічної камери, а саме її власну індуктивність. Результати вимірювань і розрахунків індуктивності даної технологічної камери наведені у додатку И.

На рис. 2.23 та 2.24 наведені осцилограми ІС в розрядному колі ФРІ з ЕІН без його узгодження ППЕФ НЧ третього порядку та з узгодженням відповідно, при величині опорної напруги ФОР ФРІ 300 В та заданій тривалості переднього фронту розрядних ІС 3,25 мкс.

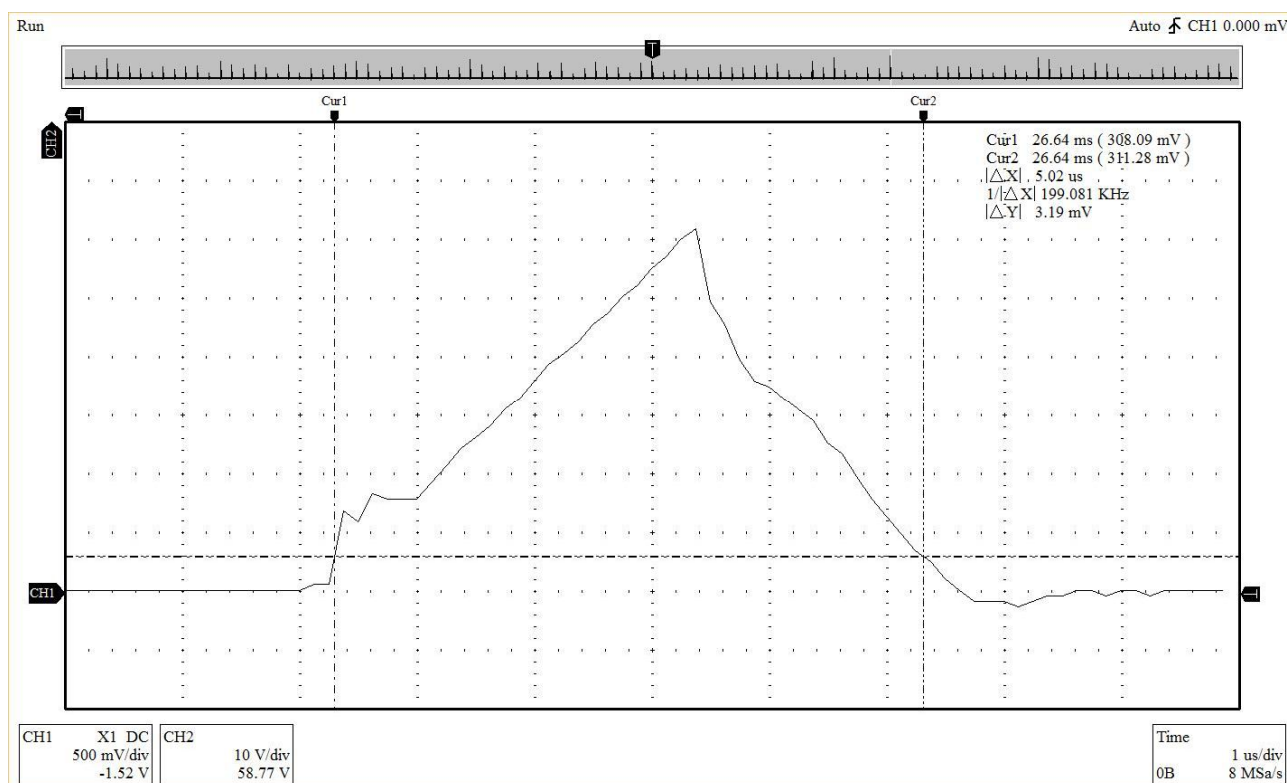


Рис. 2.23 Осцилограма ІС в ЕІН без його узгодження електричним ППЕФ НЧ
(1 В відповідає 100 А)

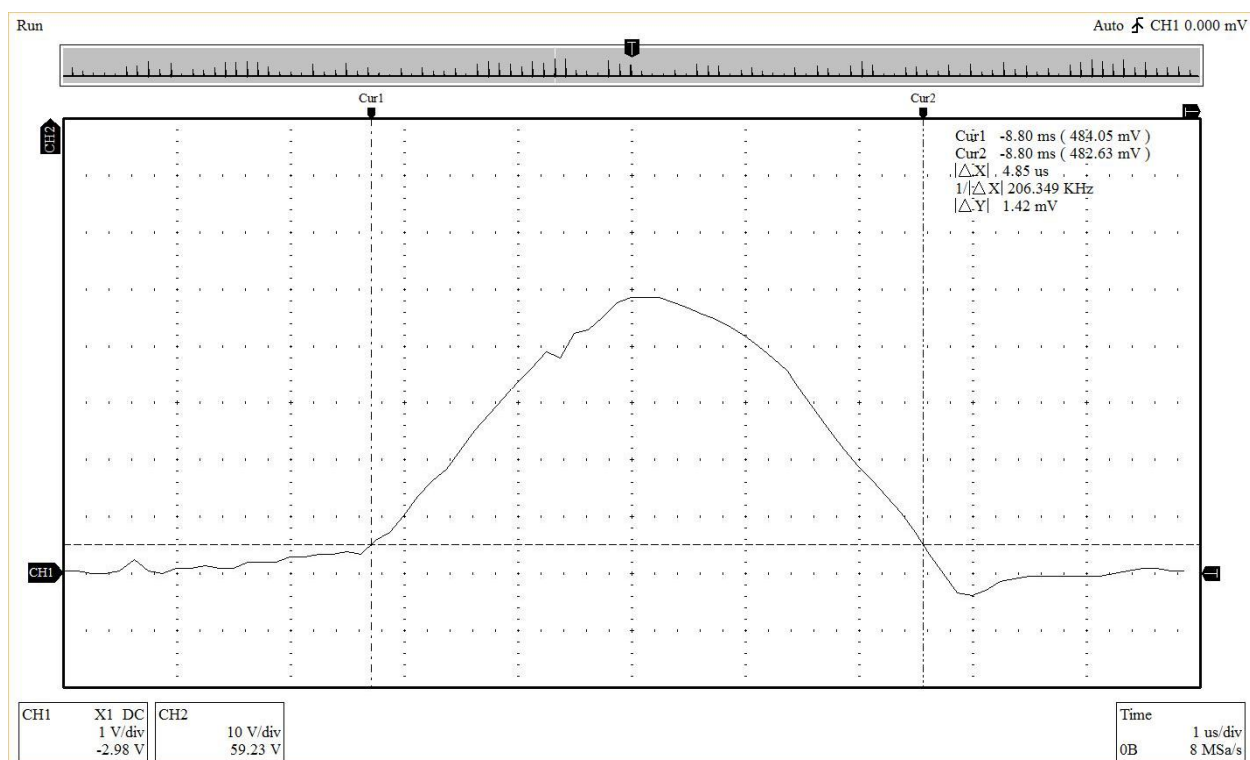


Рис. 2.24 Осцилограма ІС в електроіскровому навантаженні при його узгодженні
ППЕФ НЧ третього порядку (1 В відповідає 100 А)

В якості наповнювача технологічної камери були використати алюмінієві гранули, а якості діелектричної рідини – водопровідна вода. Для узгодження електроіскрового навантаження з формувачем розрядних імпульсних струмів був застосований ППЕФ НЧ третього порядку, який був реалізований шляхом приєднання до вивідних клем ФРІ електростатичного конденсатора. Величина ємності даного конденсатора, при відомій загальній індуктивності розрядного кола, визначалась за аналітичною залежністю (2.55) і в даному випадку становила 2,4 мкФ.

Як можна бачити з наведених на рис. 2.23 і 2.24 осцилограм ІС в ЕІН, узгодження ЕІН з ФРІ ППЕФ НЧ третього порядку призвело до зменшення тривалості та зростання амплітуди розрядних ІС в ньому. Загальна тривалість ІС в ЕІН зменшилась з 5,02 до 4,85 мкс (на 3,5 %), при цьому значно збільшилось його максимальне значення з 311 до 485 А, тобто в 1,56 рази. При цьому, також збільшились середня швидкість наростання ІС в ЕІН з 101 до 211 А/мкс, тобто 2,09 рази, максимальна та середня імпульсна потужність збільшились в 2,43 та 1,67 рази відповідно.

Отримані експериментальні результати добре корелюють з даними наведеними у табл. 2.11. При цьому, тривалість та прирости максимальних значень ІС, максимальної і пікової потужностей в ЕІН практично співпадають з відповідними отриманими у резистивному ЕН. Приріст середньої імпульсної потужності у електроіскровому навантаженні 1,5 рази менший ніж у резистивному, але, при цьому, середня швидкість наростання ІС по передньому фронту 1,21 рази більша.

Таким чином, узгодження ЕІН з ФРІ ППЕФ НЧ дозволяє значно покращити енергетичні та динамічні параметри ІС в ньому.

Висновки до розділу 2

1. Виявлено особливості та важливі закономірності взаємної залежності перехідних процесів наростання і спадання імпульсних струмів в колі електричного навантаження та їх впливу як на динамічні параметри імпульсних струмів, так і на методи їх регулювання. Зокрема виявлено, аналітично та експериментально підтверджено закономірності підвищення динамічних характеристик електророзрядних установок

(зокрема швидкості наростання їхніх вихідних імпульсних струмів та імпульсної потужності у навантаженні) при одночасному зменшенні добротності кола розряду накопичувального конденсатора та примусовому обмеженні тривалості наростання імпульсних струмів його розряду.

Використання таких закономірностей створює наукову основу для удосконалення методів аналізу взаємозалежних перехідних процесів у електричних колах змінної структури електророзрядних установок з підвищеними динамічними характеристиками наростання і спадання струмів.

2. Проведений аналіз впливу таких типів з'єднувальних провідників, як "вита пара", коаксіальний кабель і літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил, на динамічні показники розрядних імпульсних струмів в навантаженні електророзрядних установок. Встановлено їх суттєвий вплив на вказані показники, особливо у випадках їх значної довжини та незначної вихідної індуктивності електророзрядної установки.

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

3. 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.

Використання такого методу забезпечує можливість отримувати розрядні імпульсні струми у навантаженні з заданою тривалістю і підвищити їх динамічні та енергетичні характеристики.

РОЗДІЛ 3

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В РАДІАЛЬНО НЕОДНОРІДНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ

3.1 Використання сучасних силових кабелів у колі навантаження електророзрядних установок

При з'єднанні ФРІ з ЕІН виникає ряд суттєвих складнощів. При протіканні ІС великої амплітуди та малої тривалості через ЗП виникають суттєві поверхневі ефекти які призводять до різкого зменшення ефективного перерізу струмопровідних жил ЗП. Це, в свою чергу, призводить до підвищення активного опору цих ЗП і, як наслідок, до різкого зростання втрат електричної енергії в ЗП та їх значному перегріву. Крім того, ПЗ повинні володіти як змога меншою погонною індуктивністю, так як їх індуктивність є часткою загальної індуктивності розрядного кола ФРІ, а її значення визначає швидкість наростання ІС, добротність розрядного контуру, тривалість та амплітуду розрядних ІС в ЕН.

Найкраще цим умовам відповідають ЗП типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Такі ЗП володіють незначною погонною індуктивністю та великим ефективним перерізом жил. Але, для ЕРУ функціонуючих в тривалих та безперервних режимах роботи насамперед повинна бути забезпечена надійність ЗП.

На електричну ізоляцію ЗП діє ціла низка негативних факторів. ЗП типу літцендрат з біфілярною намоткою ствідних жил виконані з великої кількості окремих ізольованих (емальованих) провідників. Тонкий шар ізоляційного матеріалу та значна площа контакту між жилами визначає велику конструктивну ємність провідників даного типу. Це, враховуючи характер стуму в струмопровідних жилах, призводить до протікання значних струмів електричного зміщення через електроізоляційний матеріал і, як наслідок, викликає його додатковий перегрів. Крім того, між жилами виникають значні електромеханічні зусилля які викликають їх вібрації. Дані фактори призводять до прискореного електричного, теплового та механічного старіння електроізоляційного матеріалу провідників, що значно зменшує час їх безвідмовної

експлуатації. Ці фактори значною мірою обмежують можливість використання даного типу ЗП для з'єднання ЕРУ з ЕН.

ЗП типу "вита пара" з достатньою електричною міцністю електричної ізоляції володіють значною погонною індуктивністю. Це обумовлено необхідністю використання провідників зі значним поперечним перерізом струмопровідних жил, з метою підвищення їх ефективного перерізу при роботі з ІС, та значним шаром ізоляційного матеріалу, для забезпечення необхідної електричної міцності. Вище зазначене значною мірою обмежує можливість використання даного типу ЗП для з'єднання ЕІН з ФРІ у випадках коли вони значно віддалені один від одного.

Виходячи з характеру струму навантаження (уніполярні імпульси частотою 0,1-1 МГц з напругою до 1 кВ) для даних ЕРУ доцільним становиться використання якості ЗП СВКК з ТПІ в коаксіальному режимі їх роботи. Даний тип кабелів в такому режимі роботи володіє незначними погонними ємністю та індуктивністю. ТПІ даних кабелів має високу електричну та задовільну теплову міцності, а екрануюча жила значний розподілений переріз. Зменшення ефективного перерізу жили кабелю в даному режимі роботи може бути значним, але сегментування жили та вибір СВКК з підвищеним перерізом дозволяє значно зменшити цей негативний ефект.

Даний тип кабелів розрахований на тривалу експлуатацію зі струмами промислової частоти (50 Гц). Робота СВКК на підвищених частотах викликає прискорену деградацію електроізоляційного матеріалу. Крім того, при роботі на уніполярних імпульсних струмах також будуть проявлятися сорбційні властивості електроізоляційного матеріалу, що, в свою чергу, призведе до додаткового зростання швидкості електричного старіння електроізоляційного матеріалу кабелю.

При експлуатації СВКК, внаслідок тривалого впливу ряду негативних експлуатаційних чинників, відбувається поступова деградація його електроізоляційного шару. При цьому, внаслідок нерівномірності впливу експлуатаційних чинників на різні шари електроізоляційного матеріалу, старіння ізоляції кабелю відбувається не рівномірно по об'єму і протікає з різними швидкостями. З часом електроізоляційний шар стає неоднорідним, а його електрофізичні характеристики неоднорідними. Внаслідок того, що дія експлуатаційних чинників на різні шари електроізоляційного ма-

теріалу в аксіальному напрямку однакова, а в радіальному напрямку суттєво різна, з часом неоднорідність електрофізичних властивостей електроізоляційного матеріалу приймає виражений радіальний характер.

В процесі виготовлення СВКК з ТПІ виникає деяка технологічна неоднорідність електроізоляційного матеріалу, викликана умовами та методами їх виробництва. Наявність напівпровідних шарів електричної ізоляції біля жили та екрануючого провідника СВКК з ТПІ робить їх ізоляційний матеріал неоднорідним. Дані неоднорідності електроізоляційного матеріалу СВКК також носять радіальний характер.

Дана неоднорідність електроізоляційного матеріалу СВКК може бути подана радіальними функціями його електрофізичних властивостей, а саме відносної діелектричної проникності $\varepsilon(r)$ та питомої електричної провідності $\gamma(r)$. У коаксіальних кабелів з радіальною неоднорідністю електрофізичних параметрів його електроізоляційного матеріалу сильно виражені абсорбційні властивості. Тому, для якісної оцінки технічного стану такої ізоляції доцільним є використання методів що базуються на її абсорбційних властивостях. До таких методів можна віднести: метод вимірювання струму абсорбції, метод вимірювання та аналізу зворотної напруги, метод вимірювання тангенса кута діелектричних втрат, тощо. У зв'язку з цим, виникає необхідність у поглибленому аналізі перехідних електромагнітних процесів, які відбуваються в електроізоляційному матеріалі СВКК з ТПІ та наявною радіальною неоднорідністю її електрофізичних властивостей.

3.2 Розробка диференційної схеми заміщення радіально неоднорідної ізоляції

СВКК, при умові що його довжина значно більша поперечного перерізу, являє собою циліндричний конденсатор довжиною l з внутрішнім та зовнішнім радіусами обкладинок r_1 і r_2 .

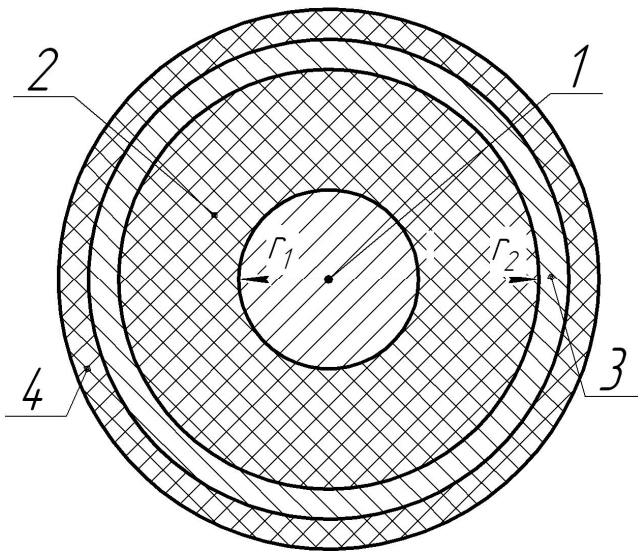


Рис. 3.1 Поперечний переріз силового високовольтного коаксіального кабелю з твердою полімерною ізоляцією.

- 1 – Центральна струмопровідна жила;
- 2 – тверда полімерна ізоляція;
- 3 – зовнішня екрануюча жила;
- 4 – оболонка

Для аналізу перехідних електромагнітних процесів, що відбуваються в радіально неоднорідній електричній ізоляції (РНЕІ) такого кабелю, необхідно задатися схемою її електричного заміщення. Для подання неоднорідної електричної ізоляції існує декілька поширених електричних схем заміщення.

На рис. 2 *a* зображено інтегральну схему заміщення неоднорідної електричної ізоляції. Дана схема не підходить для поглибленого аналізу перехідних електромагнітних процесів які протікають в радіально неоднорідній електричній ізоляції кабелів, тому що містить суто інтегральні електрофізичні параметри ізоляції і не відображають процесів які протікають безпосередньо в її окремих шарах.

На рис. 2 *б* зображена схема заміщення двошарової електричної ізоляції з різними електрофізичними параметрами її шарів, або частково пошкодженої електричної ізоляції. Треба зазначити, що шарів з різними електрофізичними параметрами електричної ізоляції та її схематичних зображень може бути і значно більше [185]. Дана схема для аналізу перехідних електромагнітних процесів, які протікають безпосередньо в електричній ізоляції кабелів, більш придатна, але у випадку її радіальної неоднорідності потребує суттєвого вдосконалення.

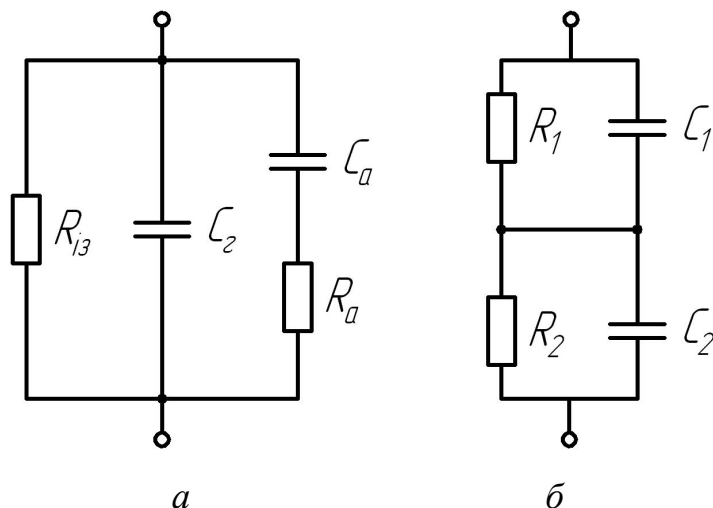


Рис. 3.2 Схеми заміщення неоднорідної електричної ізоляції

На даних схемах: R_{i3} – активний опір струмам витoku ізоляції кабелю; R_a – абсорбційний опір ізоляції кабелю; R_1 і R_2 – активні опори відповідних шарів електричної ізоляції кабелю; C_2 – геометрична (конструктивна) ємність ізоляції кабелю; C_a – абсорбційна ємність ізоляції кабелю; C_1 і C_2 – електричні ємності відповідних шарів ізоляції кабелю.

СВКК з РНЕІ можна подати у вигляді циліндричного конденсатора довжиною l з внутрішнім та 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 $\epsilon(r)$ і $\gamma(r)$ відповідно. Електричну схему заміщення такої ізоляції можна подати у вигляді n послідовно з'єднаних конденсаторів електричною ємністю C_i з реальним діелектриком товщиною dr та відповідним активним опором R_i .

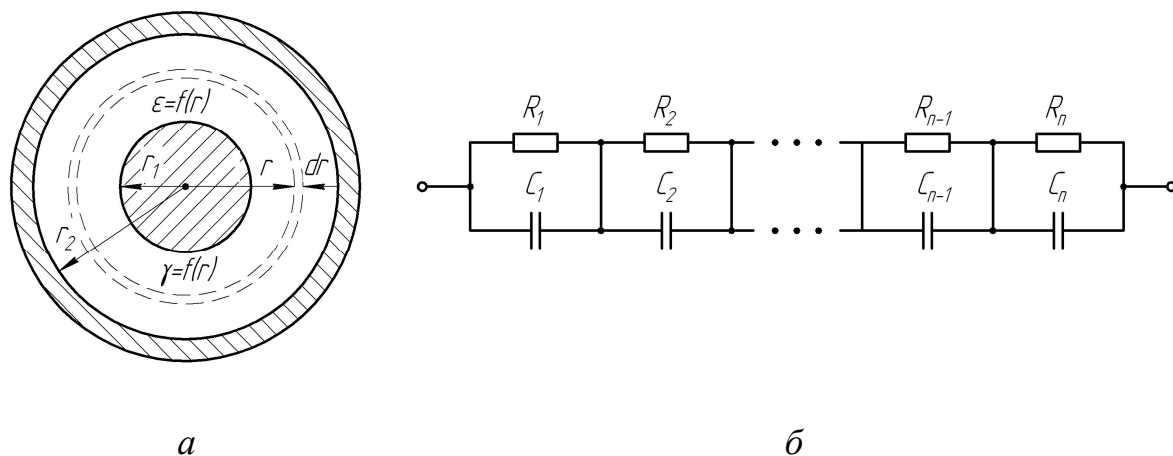


Рис. 3.3 Переріз коаксіального кабелю з радіальною неоднорідністю електрофізичних параметрів електричної ізоляції *a*) та схема її заміщення *б*)

Стає необхідним визначити параметри елементів електричного ланцюга схеми заміщення РНЕІ за наявними функціями розподілу її електрофізичних параметрів $\varepsilon(r)$ і $\gamma(r)$. Ємність циліндричного конденсатора визначається за відомою формулою:

$$C = 2\pi l \varepsilon_0 \frac{\varepsilon}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 2\pi l \varepsilon_0 \frac{\varepsilon}{\ln\left(\frac{r+dr}{r}\right)}, \quad (3.1)$$

де r – радіус внутрішньої обкладинки циліндричного конденсатора, $dr = r_2 - r_1$ – відстань між обкладинками циліндричного конденсатора, ε_0 – електрична постійна.

Якщо задатися значною кількістю послідовно з'єднаних конденсаторів n , то відстань між обкладинками в циліндричному конденсаторі стає значно меншою за радіуси обкладинок ($dr \ll r$), а площі циліндричних поверхонь такого конденсатора стають майже рівними. Конфігурація електричного поля між обкладинками такого конденсатора стає близькою до однорідної, а відносна діелектрична проникність ε та питома електрична провідність γ електроізоляційного матеріалу для визначеного радіусу обкладинок сталою величиною. При умові, що товщина діелектричного слою між обкладинками прямує до нуля і розкладаючи логарифм в залежності (3.1) в ряд Тейлора до першого члена отримуємо вираз

$$\lim_{dr \rightarrow 0} \ln\left(\frac{r+dr}{r}\right) = \lim_{dr \rightarrow 0} \ln\left(1 + \frac{dr}{r}\right) = \frac{dr}{r}. \quad (3.2)$$

Підставляючи даний вираз в рівність (3.1) отримуємо функціональну залежність електричної ємності елементарного РНЕІ радіусом r

$$dC(r) = \lim_{dr \rightarrow 0} \varepsilon_0 \varepsilon(r) \frac{S(r)}{dr}, \quad (4.3)$$

де $S(r) = 2\pi r l$ – площа циліндричної поверхні радіусом r .

Аналогічно до визначення електричної ємності елементарного шару ізоляції радіусом r визначаємо функціональну залежність його електричного опору струмам витоку

$$dR(r) = \lim_{dr \rightarrow 0} \frac{dr}{S(r)\gamma(r)}. \quad (3.4)$$

Тепер, коли визначенні параметри елементів схеми заміщення РНЕІ СВКК, стає можливим визначити геометричну ємність та опір струмам витоку такої ізоляції. Для цього використаємо схему заміщення РНЕІ представлену на рис. 3.4.

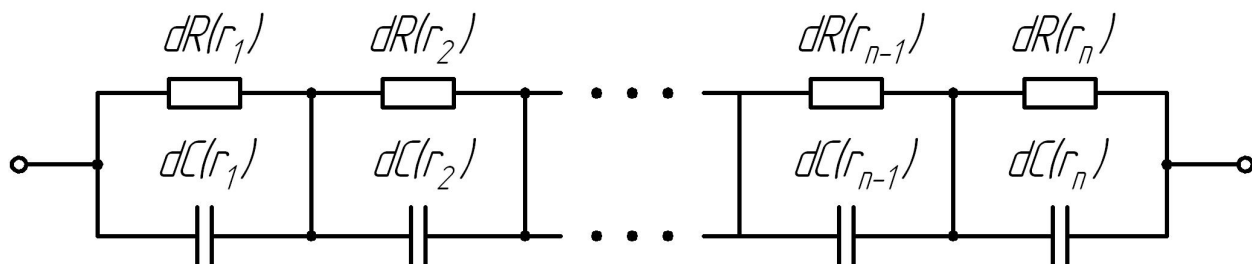


Рис. 3.4 Диференційна схема заміщення РНЕІ СВКК

Еквівалентна електрична ємність n послідовно з'єднаних конденсаторів визначається за наступною залежністю:

$$C = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \right)^{-1}. \quad (3.6)$$

Підставляючи в даний вираз отриману в (3.3) функціональну залежність електричної ємності елементарного циліндричного шару РНЕІ визначаємо геометричну ємність кабелю:

$$C = \lim_{dr \rightarrow 0} \left(\sum_{r=r_1, dr}^{r_2} \frac{dr}{\varepsilon_0 \varepsilon(r) S(r)} \right)^{-1} = \left(\int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon(r) S(r)} dr \right)^{-1} = \frac{2\pi l \varepsilon_0 \varepsilon_e}{v}, \quad (3.7)$$

де $v = \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$ – конструктивна стала коаксіального кабелю, $\varepsilon_e = v / \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\varepsilon(r)r} dr$ – еквівалентна відносна діелектрична проникність ізоляції кабелю, тобто така при якій ідентичний кабель з однорідною ізоляцією буде мати таку саму конструктивну електричну ємність.

Еквівалентний опір n послідовно з'єднаних резисторів визначається за наступною залежністю:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i. \quad (3.8)$$

Підставляючи у даний вираз отриману функціональну залежність електричного опору елементарного циліндричного шару РНЕІ (3.4) визначаємо повний опір струмам витоку ізоляційного матеріалу кабелю:

$$R = \lim_{dr \rightarrow 0} \sum_{r=r_1, dr}^{r_2} \frac{dr}{S(r)\gamma(r)} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{S(r)\gamma(r)} dr = \frac{v}{2\pi l \gamma_e}, \quad (3.9)$$

де $\gamma_e = v / \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\gamma(r)r} dr$ – еквівалентна питома провідність ізоляції кабелю, тобто така при якій ідентичний кабель з однорідною ізоляцією буде мати такий самий опір електричної ізоляції струмам витоку.

3.3 Перехідні процеси в радіально неоднорідній ізоляції коаксіального кабелю

З використанням диференційної схеми заміщення, розглянемо деякі перехідні електромагнітні процеси, які протікають в РНЕІ СВКК.

При приєднанні кабелю до джерела постійної напруги U в нульовий момент часу (при $t = 0$) через його електричну ізоляцію протікає струм електричного зміщення i_C , зумовлений миттєвими видами електричної поляризації, при цьому його геометрич-

на ємність практично миттєво заряджається до величини живлячої напруги, а на його жилах з'являється вільний електричний розподілений заряд рівний:

$$q_0 = U \cdot C = U \frac{2\pi l \varepsilon_0 \varepsilon_e}{v}. \quad (3.10)$$

Одночасно на обкладинках елементарних конденсаторів з'являються зв'язані електричні заряди рівні за по величині вільному електричному заряду накопиченому на провідниках СВКК. Під дією електричного поля, викликаного наявністю на жилах кабелю розподіленого електричного заряду з поверхневими густинами

$$\sigma_{01} = \pm \frac{q_0}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot l} \quad \text{та} \quad \sigma_{02} = \mp \frac{q_0}{2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot l}, \quad (3.11)$$

в електроізоляційному матеріалі кабелю встановлюється початкова напруженість електричного поля, яку можна визначити використав диференційну схему його заміщення. По своїй суті дана схема заміщення РНЕІ являє собою ємнісно-резистивний подільник. При відомих значеннях електричних ємностей елементарних шарів ізоляції кабелю та електричних зарядів (рівних), накопичених на їх поверхнях в початковий момент часу, стає можливим визначити і початкову напруженість електричного поля в ізоляції коаксіального кабелю

$$E_0(r) = \frac{q_0}{dC(r)dr} = \frac{U}{v} \cdot \frac{\varepsilon_e}{r\varepsilon(r)}. \quad (3.12)$$

Як можна бачити, початковий розподіл напруженості електричного поля між струмопровідними жилами СВКК визначається виключно діелектричними властивостями його електроізоляційного матеріалу і знаходиться в функціональній залежності тільки з функцією розподілу відносної діелектричної проникності $\varepsilon(r)$. При цьому об'ємна та поверхнева густини вільних електричних зарядів в ізоляції кабелю дорівнюють нулю, а об'ємна та поверхнева густини зв'язаних електричних зарядів визначаються наступними рівняннями

$$\rho_{cv}(r) = -\varepsilon_0 \frac{U_0}{rv} \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon^2(r)} \frac{d\varepsilon(r)}{dr}, \quad (3.13)$$

$$\sigma_{cs}(r) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_e U_0}{rv} \frac{\varepsilon(r) - 1}{\varepsilon(r)}. \quad (3.14)$$

Одночасно зі встановленням електричного поля в кабельній ізоляції у напрямку його дії починає протікати електричний стум провідності, який у разі неоднорідності електричної ізоляції є радіально нерівномірним, значення якого визначаються функціональними залежностями розподілу радіальних функцій початкової напруженості електричного поля і питомої електричної провідності ізоляції

$$i_0(r) = E_0(r) \gamma(r) S(r) = \frac{U_0 \cdot \varepsilon_e}{r \cdot v} \cdot \frac{\gamma(r)}{\varepsilon(r)} \cdot S(r). \quad (3.15)$$

В електричній ізоляції СВКК починає протікати вимушений перехідний процес який супроводжується протіканням радіально нерівномірного струму через її шари. Це викликає зміну напруженості електричного поля в шарах ізоляції та накопичення вільного об'ємного розподіленого електричного заряду – заряду абсорбції в об'ємі електричної ізоляції СВКК. По закінченні даного перехідного процесу (при $t = \infty$) через усі елементарні шари електричної ізоляції кабелю протікає однаковий та незмінний в часі струм витоку I_e , значення якого визначається величиною прикладеної до електричної ізоляції постійної напруги U та її опором струмам витоку R

$$I_e = \frac{U_0}{R} = \frac{2\pi l \gamma_e U}{v}. \quad (3.16)$$

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 електричної ізоляції кабелю при потіканні через них струму витоку

$$E_\infty(r) = \frac{I_e \cdot dR(r)}{dr} = \frac{U_0}{rv} \cdot \frac{\gamma_e}{\gamma(r)}. \quad (3.17)$$

Як можна бачити, радіальна напруженість електричного поля в кабельній ізоляції по закінченні перехідного процесу визначається виключно її провідними властивостями, а саме функцією радіального розподілу питомої електричної провідності ізоляції $\gamma(r)$.

На рис. 3.5 наведений приклад радіального розподілу напруженості електричного поля в РНЕІ СВКК на початку (крива 1) та в кінці (крива 2) перехідного процесу у порівнянні з еквівалентною однорідною ізоляцією (крива 3). У даному прикладі питома електрична провідність ізоляції $\gamma(r)$ лінійно зменшується з ростом радіусу, а відносна діелектрична проникність $\varepsilon(r)$ лінійно зростала.

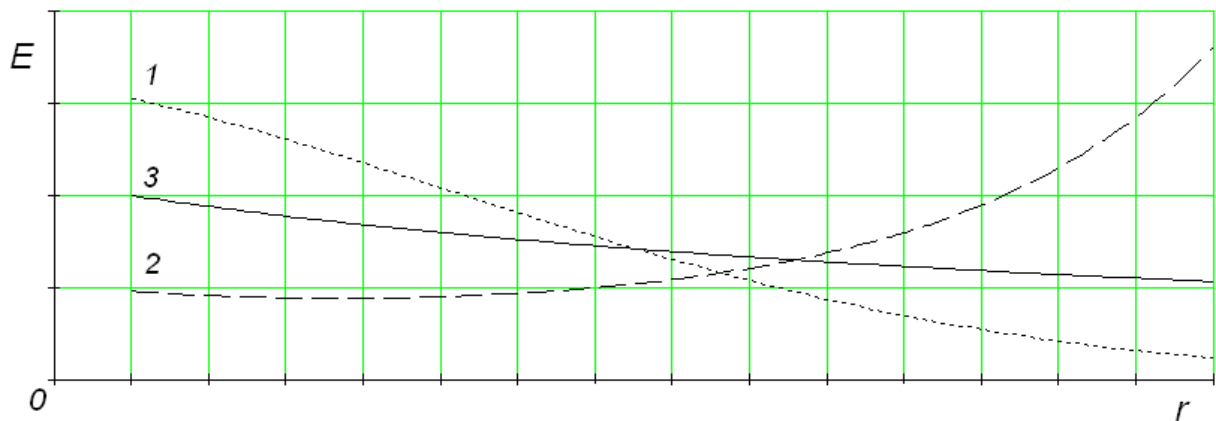


Рис. 3.5 Розподіл радіальної напруженості електричного поля в ізоляції коаксіального кабелю з неоднорідним та однорідним електроізоляційним матеріалом

Оскільки величина струму витoku під час проходження перехідного процесу в ізоляції кабелю незмінна, то різниця струмів провідності в електричній ізоляції кабелю на початку та в кінці перехідного процесу визначає початкове значення струму абсорбції

$$i_{a0}(r) = \frac{U_0}{r \cdot v} \cdot S(r) \cdot \left(\frac{\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r)}{\varepsilon(r)} \right). \quad (3.18)$$

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

$$\Delta E(r) = E_0(r) - E_\infty(r) = \frac{U}{vr} \cdot \frac{\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r)}{\varepsilon(r) \gamma(r)} \quad (3.19)$$

та повною мірою характеризує дефектність електричного поля в ізоляції. Так як, дефект електричного поля зумовлений наявною неоднорідністю електрофізичних вла-

стивостей електроізоляційного матеріалу, то в абсолютно однорідній електроізоляції він повністю відсутній. Окрім того, в електричній ізоляції кабелю з будь якою неоднорідністю її електрофізичних параметрів завжди існує елементарний шар електричної ізоляції напруженість електричного поля в якому на початку та в кінці перехідного процесу рівна.

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 РНЕІ окрім зв'язаного електричного заряду накопичується вільний електричний заряд сорбції

$$q_a(r) = -\Delta E(r) dC(r) dr = -\frac{U \varepsilon_0}{rv} \frac{\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r)}{\gamma(r)} S(r), \quad (3.20)$$

поверхнева та об'ємна густини якого визначаються наступними рівняннями:

$$\sigma_a(r) = -\frac{U \varepsilon_0}{rv} \frac{\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r)}{\gamma(r)}, \quad (3.21)$$

$$\rho_a(r) = \operatorname{div}[\varepsilon_0 \varepsilon(r) \Delta E(r)] = -\frac{\varepsilon_0 \gamma_e U}{rv} \frac{d}{dr} \left[\frac{\varepsilon(r)}{\gamma(r)} \right]. \quad (3.22)$$

Тепер коли відомі початкові та кінцеві умови перехідного процесу стає можливим визначити невідомі параметри схеми заміщення поданої на рис. 3.3 *a* та розглянути деякі перехідні процеси в динаміці.

Після подачі на струмопровідні жили СВКК постійної напруги U і зарядження його геометричної ємності C в ізоляції кабелю починає протікати вимушений перехідний процес, який фізично, в контексті обраних схем заміщення електричної ізоляції, складається з перезарядження елементарних конденсаторів через відповідні елементарні резистори (для диференціальної схеми) і, як наслідок, відбувається зарядження абсорбційної ємності C_a (для інтегральної схеми). При цьому на елементарних резисторах відбувається процес перетворення енергії електричного поля в теп-

лову, а на елементарних конденсаторах процес накопичення вільного електричного заряду. Внаслідок цього у зовнішньому колі починає протікати електричний струм, який є сумою незмінного в часі струму витoku I_e і струму релаксації $i_p(t)$, який зменшується в часі за експоненціальним законом. Струм релаксації підводить до силового кабелю додаткову електричну енергію, яка витрачається на покриття додаткових теплових втрат в ізоляції кабелю, зумовлених протіканням в ній струму абсорбції, і на накопичення додаткового вільного електричного заряду на його електродах. Початкове значення струму релаксації можна визначити з енергетичного балансу використав для цього закон Джоуля-Ленца в диференційній формі

$$U \int_0^{\infty} i_p(t) dt = \int_0^{\infty} \int_V \Delta E^2(r, t) \gamma(r) dV(r) dt, \quad (3.23)$$

де $dV(r) = 2\pi l r dr$ – елементарний об'єм циліндричної поверхні радіусом r , звідки

$$i_p = \frac{2\pi l U}{v^2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{(\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r))^2}{\varepsilon^2(r) \gamma(r) r} dr. \quad (3.24)$$

Електричне поле, створене абсорбційним зарядом, розподіленим в ізоляції кабелю, взаємодіючи з електричним полем, створеним вільними розподіленими поверхневими електричними зарядами на струмопровідних жилах СВКК, приводить до появи додаткового вільного електричного заряду q_a на його жилах. Величину абсорбційної ємності визначимо з рівняння енергетичного балансу

$$\frac{C_a \cdot U^2}{2} = W_{\infty} - W_0 = \frac{\varepsilon_0}{2} \int_V \varepsilon(r) \cdot \Delta E^2(r) dV, \quad (3.25)$$

де W_0 і W_{∞} – відповідно енергія електричного поля, зосереджена в ізоляції кабелю на початку і в кінці перехідного процесу. Переходячи від об'ємного інтеграла до визначеного, знаходимо значення абсорбційної ємності електричної ізоляції кабелю

$$C_a = \frac{2\pi l \varepsilon_0}{v^2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{(\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r))^2}{\gamma^2(r) \varepsilon(r) r} dr = C k_C, \quad (3.26)$$

де $k_C = \frac{C_a}{C} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} \frac{(\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r))^2}{\gamma^2(r) \varepsilon(r) r} dr}{\varepsilon_e \nu}$ – коефіцієнт пропорційності між абсорбційною та геометричною ємностями кабелю.

Абсорбційний опір кабельної ізоляції можна визначити через відомі величини прикладеної до кабельної ізоляції постійної напруги та початкового значення струму релаксації

$$R_a = \frac{U}{i_p} = \frac{\nu^2}{2\pi l \int_{r_1}^{r_2} \frac{(\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r))^2}{\varepsilon^2(r) \gamma(r) r} dr} = R k_R, \quad (3.27)$$

де $k_R = \frac{R_a}{R} = \frac{\nu \gamma_e}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{(\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r))^2}{\varepsilon^2(r) \gamma(r) r} dr}$ – коефіцієнт пропорційності між абсорбційним опором і опором ізоляції струмам витоку.

При приєднанні кабелю до джерела постійної напруги в ЗП починає протікати електричний струм, який являє собою суперпозицію незмінного в часі струму витоку через електричну ізоляцію та спадаючого за експоненціальним законом струму релаксації

$$i(t) = i_e + i_p e^{-\frac{t}{\tau}} = 2\pi l \frac{\gamma_e U_0}{\nu} \left[1 + k_R e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (3.28)$$

де $\tau = R_a C_a = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_e}{\gamma_e} k_R k_C$ – постійна часу заряду абсорбційної ємності.

Зміна опору ізоляції кабелю в часі протіканню через неї електричного струму визначається за наступною аналітичною залежністю

$$R(t) = \frac{U}{i(t)} = \frac{k_R R}{k_R + e^{-\frac{t}{\tau}}}. \quad (3.29)$$

Ступінь старіння електричної ізоляції кабелю чисельно можна оцінити коефіцієнтом її неоднорідності

$$k = \frac{k_C}{k_R} = \frac{RC_a}{R_a C} \quad (3.30)$$

який збільшується з ростом неоднорідності ізоляційного матеріалу кабелю. У процесі експлуатації силового високовольтного кабелю його абсорбційний опір і опір ізоляції струмам витоків знижуються, абсорбційна ємність зростає, а геометрична ємність залишається практично незмінною.

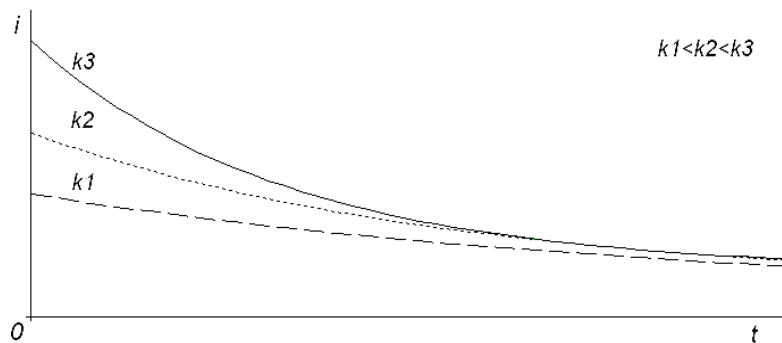


Рис. 3.8 Часові залежності струму через ізоляцію кабелю з різними значеннями коефіцієнта неоднорідності ізоляції

Вимірювання і аналіз часових залежностей струму релаксації дозволяє виявити характер неоднорідності ізоляції. Зростання початкового значення струму абсорбції свідчить про збільшення неоднорідності електроізоляційного матеріалу, а збільшення струму витоків і зменшення постійної часу релаксації – про суцільну деградацію ізоляції СВКК.

Для опису перехідних електричних процесів, що відбуваються безпосередньо в об'ємі РНЕІ СВКК, при його приєднанні до джерела постійної напруги U скористуємося диференційною схемою її заміщення. Дані перехідні процеси доцільно аналізувати використовуючи метод контурних струмів поданий в операторній формі.

Даний вимушений перехідний процес описується наступною системою диференціальних рівнянь поданих в операторній формі

$$\begin{cases} I(p) \frac{1}{Cp} - \int_{r_1}^{r_2} \frac{i(r,p)}{dC(r)p} = 0, \\ -I(p) \frac{1}{dC(r)p} + i(r,p) \left(dR(r) + \frac{1}{dC(r)p} \right) = \frac{dU(r)}{p}, \end{cases} \quad (3.31)$$

де $I(p)$ – зображення струму релаксації, $i(r,p)$ – зображення струму провідності в кабельній ізоляції, $dU(r) = \frac{UC}{dC(r)} = \frac{U}{rv} \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon(r)} dr$ – початковий розподіл напруги на елементарних шарах ізоляції. Після перетворення якої отримуємо

$$\begin{cases} i(r,p) = \frac{\gamma(r) U \varepsilon_0 \varepsilon_e S(r) + vr I(p)}{vr \varepsilon_0 \varepsilon(r) p + \gamma(r)}, \\ I(p) = \frac{\varepsilon_e S(r) f(p)}{v^2 r} \left(\frac{U \varepsilon_0 \varepsilon_e S(r)}{r} + v I(p) \right), \end{cases} \quad (3.32)$$

де $f(p) = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma(r)}{\varepsilon(r) S(r) (\varepsilon_0 \varepsilon(r) p + \gamma(r))} dr$ – подана в операторній формі інтегральна функція яка визначає характер перехідного процесу в кабельній ізоляції. Звідки визначаються рівняння шуканих функцій струмів подані в операторній формі

$$\begin{cases} I(p) = \frac{U \varepsilon_0 \varepsilon_e^2 S(r)^2 f(p) p}{v^2 r^2 - rv \varepsilon_e S(r) f(p) p}, \\ i(r,p) = \frac{U \varepsilon_0 \varepsilon_e \gamma(r) S(r)}{-\varepsilon_0 \varepsilon_e \varepsilon(r) S(r) f(p) p - \varepsilon_e \gamma(r) S(r) f(p) + vr \varepsilon_0 \varepsilon(r) p + vr \gamma(r)}. \end{cases} \quad (3.33)$$

Тепер стає можливим визначити функціональну залежність розподілу напруженості електричного поля в електричній ізоляції кабелю під час проходження даного перехідного процесу

$$E(r,p) = \frac{i(r,p)}{\gamma(r) S(r)} = \frac{U \varepsilon_0 \varepsilon_e}{-\varepsilon_0 \varepsilon_e \varepsilon(r) S(r) f(p) p - \varepsilon_e \gamma(r) S(r) f(p) + vr \varepsilon_0 \varepsilon(r) p + vr \gamma(r)}, \quad (3.34)$$

розв'язок якої та знаходження її оригіналу, при відомих функціях розподілу електрофізичних параметрів електроізоляційного матеріалу кабелю, дає можливість визначити радіальну напруженість електричного поля в ізоляції кабелю в будь-який момент часу проходження даного перехідного процесу.

Якщо, по закінченні даного перехідного процесу кабель від'єднати від джерела постійної напруги та призвести короткочасне замикання його жил між собою в ізоляції почнеться новий вже вільний перехідний процес. Внаслідок якого на поверхнях жил кабелю знов почне з'являтися вільний електричний заряд та відновлюватися напруга. Дана напруга носить назву поверненої. Її поява обумовлена наявністю залишкового електричного поля в електричній ізоляції кабелю після короткочасного розряду його геометричної ємності. Залишкове електричне поле створює заряд абсорбції розподілений в електроізоляційному матеріалі кабелю. Як зазначалось вище, даний заряд є вільним, його поверхнева та об'ємна густини були визначені раніше в (3.21) і (3.22).

Внаслідок незначної електричної провідності кабельної ізоляції, на відміну від зв'язаного електричного заряду, абсорбційний заряд не встигає стекти при короткочасному розряді, а електричне поле яке він створює компенсує наявний дефект електричного поля в кабельній ізоляції в початковий момент часу проходження перехідного процесу. Далі, під дією електричного поля, в кабельній ізоляції починають протікати струми провідності і в ній починається вільний перехідний процес, який, в контексті вибраної диференціальної схеми зміщення, являє собою процес розрядження елементарних ємностей $dC(r)$ через відповідні їм елементарні опори $dR(r)$. При цьому, на елементарних опорах виникає спад напруги, а між жилами кабелю при цьому виникає змінна в часі повернена напруга $U_n(t)$, яка є алгебраїчною сумою цих напруг і може бути аналітично визначена через відомий дефект електричного поля ізоляції

$$u_n(t) = - \int_{r_1}^{r_2} \Delta E(r) e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr, \quad (3.35)$$

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

Якщо, даний перехідний процес розглянути в контексті інтегральної схеми заміщення РНЕІ, то він являє собою суперпозицію двох експонент і визначається наступним рівнянням

$$u_n(t) = \frac{U}{R_a \cdot C(\alpha_1 - \alpha_2)} \cdot (e^{\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}), \quad (3.36)$$

де α_1 і α_2 – корені характеристичного рівняння $\alpha^2 + \frac{CR + C_a R + C_a R_a}{C \cdot C_a \cdot R \cdot R_a} \alpha + \frac{1}{C \cdot C_a \cdot R \cdot R_a} = 0$.

На рис. 3.10 наведені часові залежності поверненої напруги при різних ступенях неоднорідності електричної ізоляції кабелю.

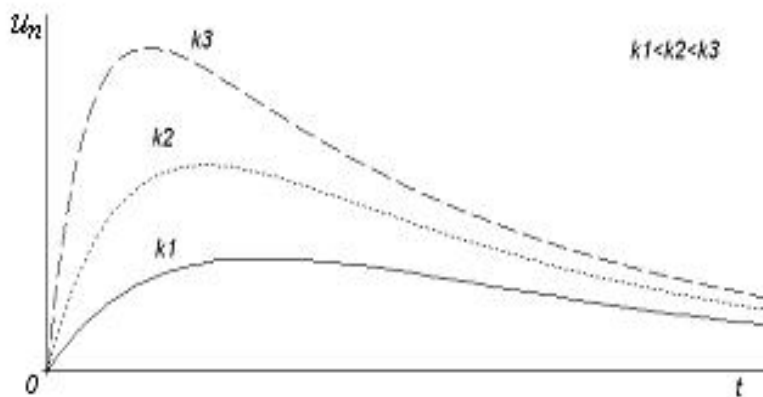


Рис. 3.10 часові залежності поверненої напруги для ізоляції з різним ступенем її неоднорідності

Слід зазначити, що аналітичний вираз часової залежності поверненої напруги можна отримати не тільки по закінченні проходження вимушеного перехідного процесу, а і для будь-якого іншого моменту часу. Але, криві що отримані по закінченні проходження вимушеного перехідного процесу будуть найбільш інформативними.

Найбільш чутливими до ступеня неоднорідності електроізоляційного матеріалу є наступні показники: максимальне значення поверненої напруги та коефіцієнт поляризації [186] (p-Factor [187])

$$k_{\text{пол}} = \frac{U_{n\text{max}}}{U} \times 100\%, \quad (3.37)$$

де $U_{n\text{max}}$ – максимальне значення поперечної напруги, а також час досягнення максимуму поперечної напруги, початкова швидкість наростання та постійна часу спадання поперечної напруги [188-192]. Їх можна визначити за допомогою похідної від аналітичного виразу функціональної залежності величини поперечної напруги в часі

$$\frac{du_n(t)}{dt} = \frac{U}{v\varepsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r)}{\varepsilon^2(r)r} e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr. \quad (4.38)$$

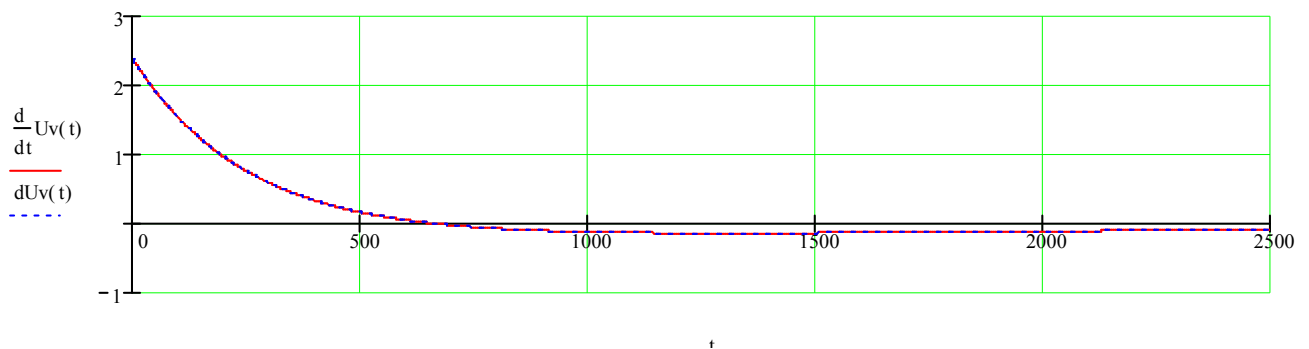


Рис. 3.11 Похідна від функції поперечної

Часові залежності похідної поперечної напруги отримані для диференційної та інтегральної схем заміщення співпадають.

Деякі інші перехідні процеси, вплив зовнішнього кола на характер їх протікання, вплив неоднорідності ізоляції на розподіл радіальної напруженість електричного поля при дії змінної синусоїдальної напруги та інше розглянуто у додатку К.

Висновки до розділу 3

1. Визначено причини появи радіальної неоднорідності електроізоляційного матеріалу силових високовольтних коаксіальних кабелів.

2. Розроблено диференційну схему заміщення та математичну модель твердої полімерної ізоляції сучасних силових високовольтних коаксіальних кабелів з радіальною неоднорідністю її електрофізичних параметрів, а саме відносної діелектричної проникності та питомої електричної провідності.

3. Проведено аналіз перехідних процесів які протікають безпосередньо в шарах радіально неоднорідної електроізоляції коаксіальних кабелів, а саме процеси абсорбції вільного розподіленого електричного заряду такою ізоляцією при дії на неї постійними електричними полями та процеси десорбції даного заряду після короткочасного розряду геометричної ємності коаксіального кабелю.

4. Отримані аналітичні залежності дозволяють за зміною характеру протікання даних перехідних процесів оцінювати ступінь та характер неоднорідності електроізоляційного матеріалу коаксіальних кабелів, їх загальну надійність та залишковий ресурс.

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 зміненням характеру перехідних процесів у колі навантаження електророзрядних установок забезпечують оцінку їхньої надійності.

РОЗДІЛ 4

ВЗАЄМОЗАЛЕЖНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ

4.1 Перехідні процеси в колах електророзрядних установок з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту імпульсних струмів

У ФРІ керованій тривалості мікросекундного діапазону для обмеження часу протікання ІС в ЕН застосовуються повністю керовані НП силові ЕК в його розрядному колі. Обмеження часу протікання ІС в ЕН досягається шляхом примусового запирання даних ЕК через встановлений проміжок часу. Це дозволяє значно обмежити тривалість переднього фронту ІС, але при цьому їх задній фронт залишається відносно тривалим. Струм в задньому фронті ІС спадає в часі за аперіодичним законом, а його постійна часу релаксації визначається загальними індуктивністю та активним опором розрядного кола, які, в свою чергу, є конструктивними та заданими параметрами.

Для подальшого скорочення тривалості ІС в ЕН може бути застосоване примусове обмеження тривалості його заднього фронту. Одним із шляхів обмеження тривалості заднього фронту ІС може бути кероване примусове шунтування ЕН за допомогою повністю керованих НП силових ЕК, встановлених безпосередній близькості до ЕН, аналогічних до встановлених у розрядному контурі ФРІ. Це дозволяє значно збільшити крутизну спадання по задньому фронту ІС. В даному випадку, постійна часу релаксації заднього фронту ІС буде визначатися вже не загальною індуктивністю розрядного кола, а значно меншою власною індуктивністю ЕН.

Таким чином, тривалість розрядних ІС в ЕН може бути обмежена часом відпирання НП ЕК у розрядному колі ФРІ.

На рис. 4.1 наведено спрощену електричну принципову схему розрядного кола ФРІ з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту ІС, шляхом шунтування ЕН повністю керованим НП силовим ЕК.

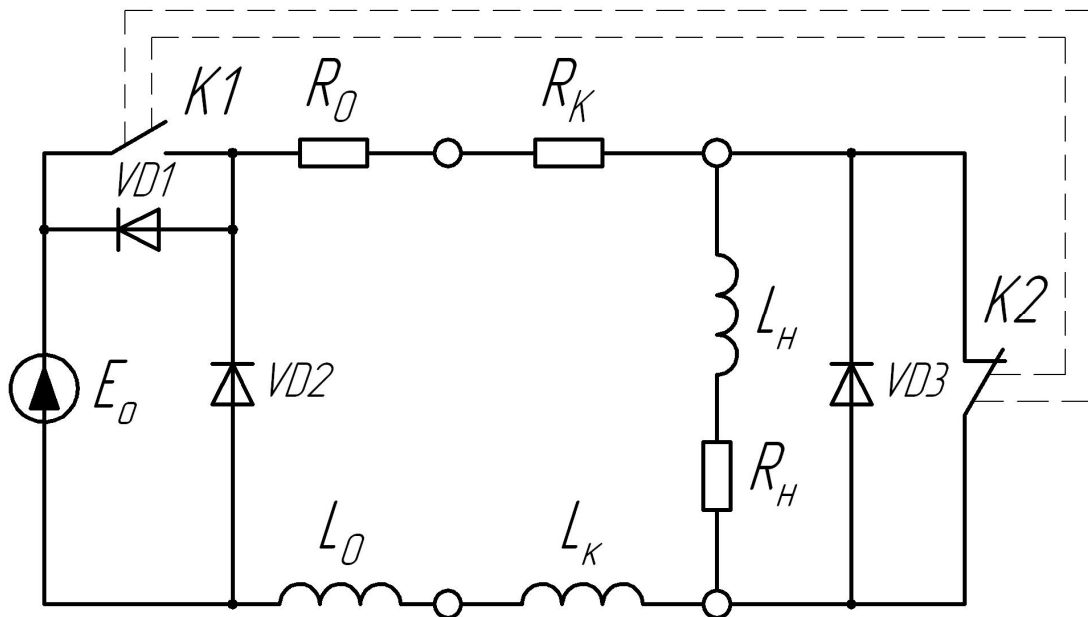


Рис. 4.1 Електрична принципова схема розрядного кола з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту імпульсу струму

На представленій електричній принциповій схемі E_0 являє собою ДОН величиною U ФРІ, R_0 та L_0 – відповідно його вихідні опір та індуктивність, R_K та L_K – відповідно активний опір та індуктивність ЗП, R_H та L_H – відповідно активний опір та власна індуктивність ЕН, $K1$ та $K2$ – повністю керовані узгодженні між собою НП ЕК, $VD1$, $VD2$ та $VD3$ – НП зворотні діоди.

Детально розглянемо роботу даної електричної схеми. В момент подання керуючого сигналу на НП ЕК $K1$ та $K2$, $K1$ – замикається, а $K2$ – розмикається, при цьому утворюється замкнуте електричне коло між джерелом електрорушійної сили та ЕН через ЗП. В електричному колі починається вимушений перехідний електричний процес. У всіх його елементах починає протікати рівний по величині для кожного моменту часу електричний струм $i_n(t)$ – струм переднього фронту, який змінюється в часі за експоненціальним законом.

В момент часу зняття з керованих НП ЕК $K1$ та $K2$ керуючого сигналу, що відповідає заданій тривалості переднього фронту ІС t_i , $K1$ – розмикається, а $K2$ – замикається, при цьому електричне ЕН від'єднується від джерела електрорушійної сили E_0 та практично накоротко шунтується електричним ключем $K2$. У розрядному колі починається новий вільний перехідний електричний процес. Згідно закону комутації

струм в індуктивному елементі електричного кола не може стрибкоподібно змінитися, тому початкове значення заднього фронту ІС буде кінцевим значенням струму його переднього фронту, а саме

$$i_3(t=0) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_3}}, \quad (4.1)$$

де $\tau_n = \frac{L_0 + L_K + L_H}{R_0 + R_K + R_H}$ – постійна часу релаксації переднього фронту ІС, $\tau_3 = \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K}$ – постійна часу релаксації заднього фронту ІС, $R = R_0 + R_K + R_H$ – загальний активний опір розрядного кола. При цьому, якщо вважати власну індуктивність електричного навантаження значно меншою за індуктивність іншої частини розрядного контуру ($L_H \ll L_0 + L_K$), струм в ньому майже миттєво спаде до нуля, а струм розрядного кола повністю замкнеться через НП ЕК $K2$ та зворотній діод $VD2$. Так як, ЕН практично накоротко шунтується ЕК $K2$, в момент комутації відбувається різке зменшення активного опору розрядного кола, а рівняння згідно другого закону Кірхгофа для даного кола набуває наступного виду

$$U_R(t) + U_L(t) = 0, \quad (4.2)$$

де $U_R(t) = i(t) \cdot (R_0 + R_K)$ – спад напруги на загальному активному опорі отриманого розрядного контуру, $U_L(t) = (L_0 + L_K) \frac{di_3(t)}{dt} = \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K} \frac{dU_R(t)}{dt}$ – спад напруги на загальній індуктивності отриманого розрядного контуру.

Враховуючи вищезазначене, диференціальне рівня перехідного процесу для даного кола набуде наступного вигляду

$$\frac{dU_R(t)}{dt} + \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K} U_R(t) = 0. \quad (4.3)$$

З врахуванням початкової умови часова залежність зміни струму в розрядному контурі описується наступною аналітичною залежністю

$$i_K(t) = \frac{U}{R_0 + R_K + R_H} \left(e^{-\frac{t}{\tau_3}} - e^{-\frac{t_i \cdot \tau_3 + t \cdot \tau_n}{\tau_n \cdot \tau_3}} \right). \quad (4.4)$$

Так як, при комутації відбувається значна зміна активного опору розрядного контуру, а його загальна індуктивність лишається майже незмінною, то і постійні часу релаксації ІС по передньому та задньому фронтам будуть значно відрізнятися.

На рис. 4.2 приведено результати математичного моделювання даного перехідного процесу при величинах активного опору ЕН 1 Ом та розрядного кола 20 мОм, загальній індуктивності розрядного контуру 1,5 мкГн та заданій тривалості розрядного ІС 1 мкс. Струм на отриманій аналітичній залежності приведений до його максимально можливого значення, що визначається величиною напруги ДОН ФРІ та величиною активного опору ЕН, та поданий у відносних одиницях.

Як можна бачити з аналітичних кривих наведених на рис. 4.2, струми в ЕН та розрядному колі ФРІ до моменту часу вимикання НП ЕК *K1* співпадають, а після його запирання протікають по різним електричним колам з суттєво відмінними одне від одного електричними параметрами. Струм в ЕН, при даних параметрах розрядного кола і заданій тривалості ІС, встигає досягти приблизно половини свого максимально можливого значення. При цьому, передній фронт ІС має значну крутизну. В момент перемикання НП ЕК струм в ЕН (майже) миттєво зникає. Енергія магнітного поля, накопичена на загальній індуктивності розрядного контуру, починає поступово перетворюватись на теплову на незначному активному опорі розрядного контуру. Струм, що протікає у розрядному контурі, має значно більшу постійною часу релаксації відносно у струму переднього фронту ІС.

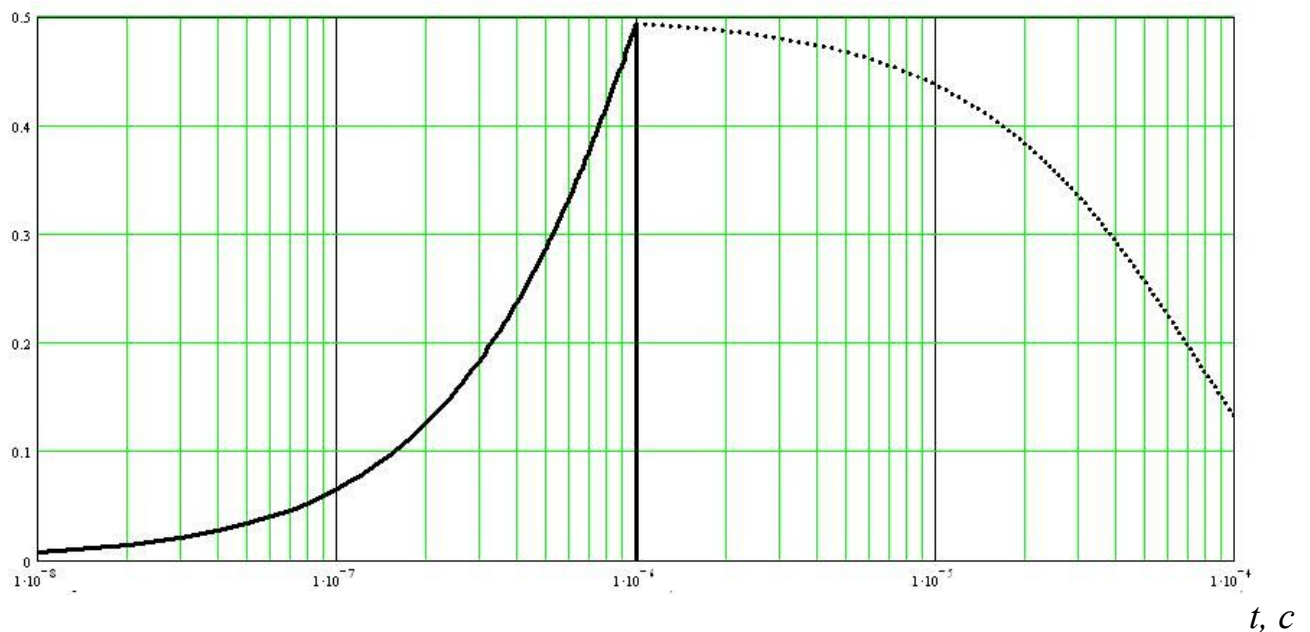


Рис. 3.2 Часові залежності струму в електричному навантаженні – суцільна крива та у розрядному контурі – пунктирна крива

В реальних умовах отримати миттєве спадання до нуля ІС в ЕН практично неможливо. Це насамперед обумовлено наявною незначною індуктивністю ЕН, відносно загальної розрядного контуру, та кінцевою швидкістю сучасних НП силових ЕК. Тому задній фронт ІС буде мати значну але кінцеву крутизну.

У момент замикання НП ЕК $K2$ електричне коло перетворюється на два незалежних одне від одного кола – ЕН замкнуте саме на себе через зворотній діод $VD3$, інша частина розрядного кола замкнена в обхід ЕН через НП ЕК $K2$ та зворотній діод $VD2$. У випадку наявної індуктивності ЕН, в момент комутації НП ЕК ($K1$ – розмикається, $K2$ – замикається), одночасно почнуть протікати два вільних і незалежних один від одного перехідних електричних процесів перетворення енергії магнітного поля в теплову. Початкові умови у даних процесів рівні і визначаються за аналітичною залежністю 4.1, а постійні часу релаксації значно відмінні між собою та визначаються суто електричними параметрами, утворених при замиканні НП ЕК $K2$, незалежних електричних кіл. У даному випадку, задні фронти ІС у ЕН та розрядному колі ФРІ будуть визначатися наступними аналітичними залежностями

$$\begin{cases} i_{3K}(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{3K}}}, \\ i_{3H}(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{3H}}}, \end{cases} \quad (4.5)$$

де $\tau_{3K} = \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K}$ та $\tau_{3H} = \frac{L_H}{R_H}$ – постійні часу релаксації заднього фронту ІС в розрядному контурі ФРІ та в ЕН відповідно.

На рис. 4.3 наведено аналітичні криві струмів в ЕН та у розрядному колі ФРІ для умов аналогічних приведеному на рис. 4.2, але з наявною індуктивністю електричного навантаження величиною 0,1 мкГн при загальній індуктивності розрядного кола 1,5 мкГн.

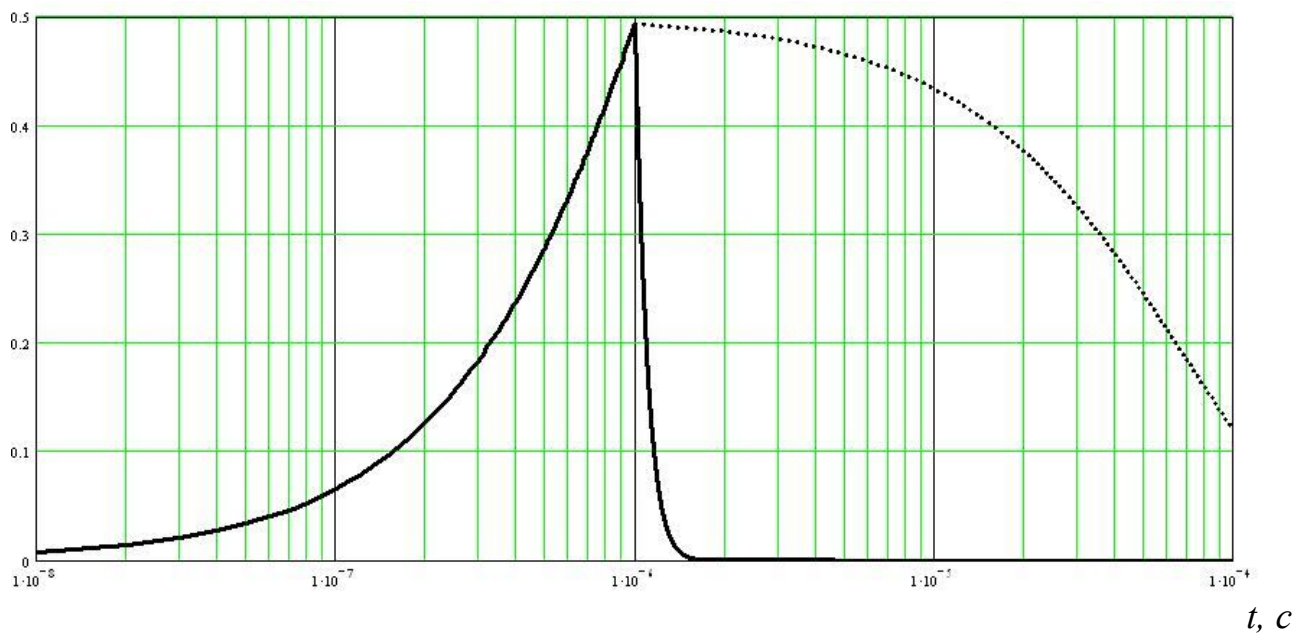


Рис. 4.3 Часові залежності струму в електричному навантаженні – суцільна крива та у розрядному контурі – пунктирна крива

Як можна бачити з часових залежностей наведених на рис. 4.3, задній фронт ІС у розрядному колі ФРІ майже не змінився, а задній ІС в ЕН став аперіодичним зі значно меншою величиною постійної часу релаксації відносно його переднього фронту.

Таким чином з вищезазначеного можна зробити висновок, що примусове керування шунтування ЕН силовими НП повністю керованими ЕК дозволяє значно обмежити тривалість заднього фронту ІС чим суттєво скоротити їх загальну тривалість.

4.2 Енергетичний аналіз роботи схеми з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту імпульсів струму

Слід зазначити, що майже вся енергія магнітного поля, накопичена індуктивністю розрядного кола, перетворюється на теплову, що значно погіршує енергетичні показники ЕРУ та викликає додатковий суттєвий перегрів ЗП та інших елементів розрядного кола.

Для оцінки енергоефективності роботи, наведеної на рис. 4.1, електричної схеми необхідно провести енергетичний аналіз перехідних процесів що в ній протікають.

Енергія, яку віддає ДОН ФРІ в розрядне коло, може бути визначена через відомі значення величини опорної напруги та часової залежності переднього фронту ІС в розрядному колі

$$W = U \cdot \int_0^{t_i} i_n(t) dt = \frac{U^2}{R} \cdot \int_0^{t_i} 1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} dt = \frac{U^2}{R} \left(t_i + \frac{L}{R} \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - 1 \right) \right), \quad (4.6)$$

Дана енергія частково передається в ЕН, частково втрачається на активному опорі елементів розрядного кола та частково перетворюється в енергію магнітного поля на індуктивностях елементів розрядного кола. Виходячи з цього, рівняння енергетичного балансу розрядного кола для переднього фронту ІС буде визначатися наступною рівністю

$$W = W_{H1} + W_{B1} + W_{L1}, \quad (4.7)$$

де W_{H1} – електрична енергія що передається ЕН, W_{B1} – втрати електричної енергії на активних опорах елементів розрядного кола, W_{L1} – енергія магнітного поля, накопичена на загальній індуктивності розрядного кола, на момент закінчення переднього

фронту ІС (що відповідає моменту часу t_i), які визначаються за наступними аналітичними залежностями

$$W_{H1} = R_H \cdot \int_0^{t_i} i_n^2(t) dt, \quad (4.8)$$

$$W_{B1} = (R_0 + R_K) \cdot \int_0^{t_i} i_n^2(t) dt, \quad (4.9)$$

$$W_{L1} = \frac{1}{2} L \cdot i_n^2(t_i). \quad (4.10)$$

При комутації ($K1$ – розімкнений, $K2$ – замкнений) енергія магнітного поля, накопичена на загальній індуктивності розрядного кола, тільки частково передається електричному навантаженню, а значна частина перетвориться на теплову на активних опорах елементів розрядного кола. Згідно зазначеного, рівняння енергетичного балансу розрядного кола для заднього фронту ІС визначається наступною рівністю

$$W_{L1} = W_{H2} + W_{B2}, \quad (4.11)$$

де W_{H2} – електрична енергія яка передається в ЕН на другому етапі перехідного процесу, W_{B2} – втрати електричної енергії на активних опорах елементів розрядного контуру на другому етапі перехідного процесу, які визначаються за наступними аналітичними залежностями

$$W_{H2} = R_H \cdot \int_{t_i}^{\infty} i_{3H}^2(t) dt, \quad (4.12)$$

$$W_{B2} = (R_0 + R_K) \cdot \int_{t_i}^{\infty} i_{3K}^2(t) dt. \quad (4.13)$$

З урахуванням того, що енергія магнітного поля розподіляється між елементами розрядного кола пропорційно їх індуктивностям та незалежним характером протікання перехідних електричних процесів в колі ЕН та в розрядному колі ФРІ, дані енергії W_{H2} та W_{B2} також можна визначити через їх індуктивності

$$W_{H2} = \frac{L_H}{L} W_{L1} = \frac{U^2}{R^2} \frac{L_H}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}}\right)^2, \quad (4.14)$$

$$W_{B2} = \frac{L_K}{L} W_{L1} = \frac{U^2}{R^2} \frac{L_K}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}}\right)^2. \quad (4.15)$$

Тепер, коли стали відомі аналітичні залежності енергетичного балансу розрядного кола при проходженні в ньому даних перехідних електричних процесів, стає можливим визначити значення коефіцієнтів корисної дії даної електричної схеми

$$\eta_1 = \frac{W_{H1}}{W} = \frac{1}{R_H} \frac{t_i + \frac{L}{R} \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - 1 \right)}{\frac{t_i}{R} + \frac{2L}{R^2} e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - \frac{L}{2R^2} e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - \frac{3}{2} \frac{L}{R^2}}, \quad (4.16)$$

$$\eta_2 = \frac{W_{H2}}{W_{L1}} = \frac{\frac{U^2}{R^2} \frac{L_H}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}}\right)^2}{\frac{U^2}{R^2} \frac{L}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}}\right)^2} = \frac{L_H}{L}, \quad (4.17)$$

$$\eta = \frac{W_{H1} + W_{H2}}{W} = \frac{1}{R_H} \frac{t_i + \frac{L}{R} \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - 1 \right)}{\frac{t_i}{R} + \frac{2L}{R^2} e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} + \frac{L_H}{2RR_H} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}}\right)^2 - \frac{L}{2R^2} e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - \frac{3}{2} \frac{L}{R^2}}, \quad (4.18)$$

де η_1 та η_2 – коефіцієнти корисної дії даної електричної схеми по передньому та задньому фронтам ІС в ЕН, η – загальний коефіцієнти корисної дії даної електричної схеми.

Як можна бачити з наведених аналітичних залежностей, ККД даної електричної схеми визначається величинами активного опору та індуктивності її елементів, а також тривалістю переднього фронту ІС.

Результати енергетичного аналізу, роботи електричної схеми наведеної на рис. 4.1, для тривалості переднього фронту ІС в ЕН t_i 1, 2 та 3 мкс наведених в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Результати енергетичного аналізу роботи схеми

t_i , 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

Як можна бачити з розрахункових даних наведених у табл. 4.1 дана електрична схема має вкрай низьку енергоефективність, яка зменшується зі зменшенням тривалості переднього фронту ІС. Основні втрати електричної енергії відбуваються за рахунок накопичення енергії магнітного поля на індуктивності розрядного кола під час проходження переднього фронту ІС в ЕН, яка повністю перетворюється на теплову на активному опорі елементів розрядного кола під час проходження заднього фронту ІС у розрядному колі. Низька енергоефективність роботи даної схеми з великою вірогідністю призведе до неприпустимого перегріву елементів розрядного кола ФРІ, а саме зворотного напівпровідникового діоду $VD2$, НП ЕК $K2$ та ЗП. Також слід зазначити, що, в даному випадку, збільшення поперечного перерізу струмопровідних жил ЗП майже не змінить ККД даної схеми, а лише призведе перерозподілу втрат електричної енергії між елементами розрядного кола ФРІ.

4.3 Перехідні процеси в колах електророзрядних установок з шунтувальними ланцюгами рекуперації електроенергії

Одним із засобів підвищення коефіцієнту корисної дії електричної принципової схеми, наведеної на рис. 4.1 є організація рекуперації накопиченої, під час протікання ІС в ЕН, енергії магнітного поля в розподіленій індуктивності розрядного кола ФРІ. Для реалізації рекуперації електричної енергії достатньо послідовно з шунту-

вальним НП ЕК $K2$ через НП діод встановити електростатичний конденсатор, енергоємність якого повинна значно перевищувати енергію, що накопичує загальна індуктивність розрядного кола під час протікання в ньому переднього фронту ІС. У даному випадку, енергію, яка накопичується в конденсаторі, стає можливим шляхом її перетворення зі значною енергоефективністю повертати у НК ДОП ФРІ.

На рис. 4.4 зображено спрощену електричну принципову схему розрядного кола з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту ІС, шляхом шунтування ЕН повністю керованим НП силовим ЕК, з рекуперацією енергії магнітного поля, накопиченої на розподіленій індуктивності розрядного кола.

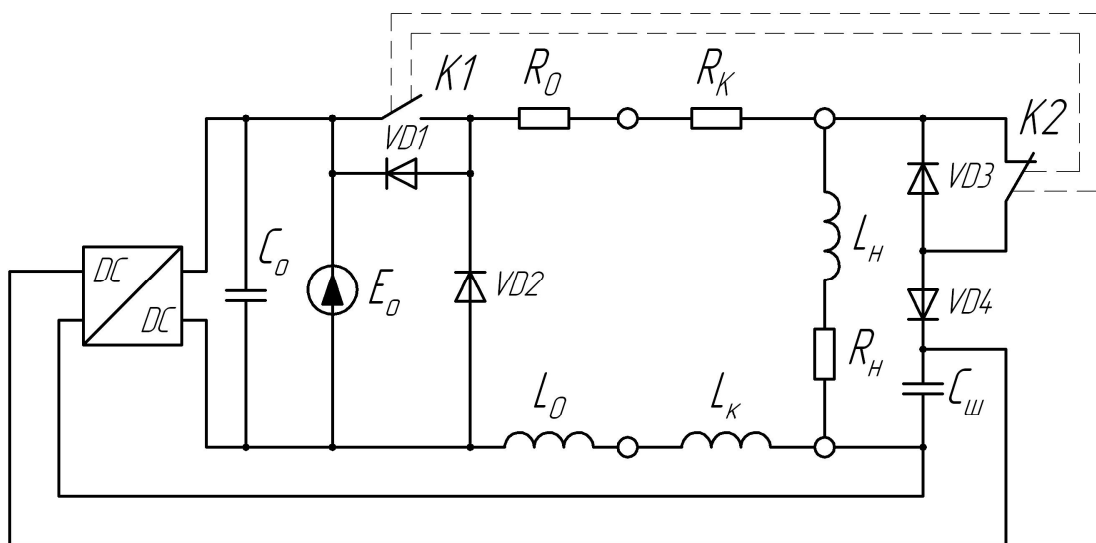


Рис. 4.4 Електрична принципова схема розрядного кола з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту ІС та рекуперацією електричної енергії

На приведеній електричній принциповій схемі рис. 4.4, на відміну від схеми приведеній на рисунку 4.1, НП ЕК $K2$ шунтує ЕН не накоротко, а через НП діод $VD4$ на електростатичний конденсатор великої ємності $C_{ш}$. У момент розмикання НП ЕК $K1$ та замикання $K2$, ЕН від'єднується від ДОН E_0 . Струм, що протікає в розрядному колі, згідно закону комутації не може стрибкоподібно змінитися, тому він продовжує циркулювати в розрядному колі в тому ж напрямку замикаючись вже не через ДОН E_0 , а через зворотній НП діод $VD2$. У момент часу замикання керованого НП ЕК $K2$ ЕН через $K2$ і НП діод $VD4$ шунтується електростатичним конденсатором великої ємності $C_{ш}$, при цьому майже весь стум в розрядному колі замикається на

нього, а напруга на ЕН спадає майже до нуля. Електрична енергія, накопичена електростатичним конденсатором C_{III} , шляхом її перетворення за допомогою підвищального перетворювача DC/DC повертається у накопичувальну ємність ДОН ФРІ. Таким чином, дане удосконалення розрядного кола ФРІ може забезпечити скорочення тривалості заднього фронту ІС з одночасною рекуперацією більшої частини енергії магнітного поля, зосередженої на розподіленій індуктивності розрядного кола.

Якщо встановити шунтувальний конденсатор C_{III} 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 ФРІ, стабілізується. В момент замикання НП ЕК $K2$ напруга на електричному навантаженні майже миттєво спаде, але вже не до нуля, як у випадку електричної принципової схеми наведеної на рис. 4.1, а до напруги яка буде визначатися сумою спаду напруги на НП $VD4$ та напруги на шунтувальному конденсаторі C_{III} . При цьому, задній фронт ІС в ЕН з великою крутизною, відносно переднього фронту, спаде до величини, яка буде визначатися величинами напруги на шунтувальному конденсаторі C_{III} та опору ЕН

$$i_{3НП}(t) = \frac{U_{VD} + U_C}{R}, \quad (4.19)$$

де U_{VD} – спад напруги на НП діоді, U_C – величина напруги на шунтувальному конденсаторі. Аналітичний вираз згідно другого закону Кіргхофа для заднього фронту ІС в даному випадку буде описуватися наступним диференціальним рівнянням

$$U_{R_H}(t) + \frac{L}{R_H} \frac{dU_{R_H}(t)}{dt} + (U_{VD} + U_C) = 0. \quad (4.20)$$

З врахуванням початкової умови на момент початку перехідного процесу

$$U_{3H}(t = t_i) = U \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right), \quad (4.21)$$

де $U_{3H}(t = 0)$ – спад напруги на активному опорі електричного навантаження в момент початку перехідного процесу, та при постійній величині спаду напруги на шу-

шунтувальній ланці $U_{VD} + U_C = \text{const}$ дане диференційне рівняння відносно струму в ЕН має наступний розв'язок

$$i_{3H}(t) = \frac{U_{VD} + U_C}{R_H} + \frac{U}{R} \left(1 - \frac{R}{R_H} \frac{U_{VD} + U}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3H}}} \quad (4.22)$$

Згідно другого закону Кіргхофа рівняння для розрядного кола ФРІ опишеться наступним диференціальним рівнянням

$$(R_0 + R_K) i_{3K}(t) + (L_0 + L_K) \frac{di_{3K}(t)}{dt} - (U_{VD} + U_C) = 0. \quad (4.23)$$

З врахуванням початкової умови на момент початку перехідного процесу

$$i_{3K}(t = t_i) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \quad (4.24)$$

та незмінності в часі величини напруги на шунтувальній ємності розв'язок даного диференційного рівняння має наступний вигляд

$$i_{3K}(t) = \frac{U}{R} \left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_{VD} + U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3K}}} - \frac{U_{VD} + U_C}{R_0 + R_K}. \quad (4.25)$$

Стум, що протікає у розрядному колі ФРІ під час проходження даного перехідного процесу, згідно першого закону Кіргхофа являє собою суму ЕН та шунтувальної ємності. Звідки стає можливим визначити стум шунтувальної ємності як різницю струмів що протікають через розрядний контур та ЕН

$$i_C(t) = i_{3K}(t) - i_{3H}(t), \quad (4.26)$$

звідки

$$i_C(t) = \frac{U}{R} \left(\left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_{VD} + U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3K}}} - \left(1 - \frac{R}{R_H} \frac{U_{VD} + U}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3H}}} \right) - (U_{VD} + U_C) \frac{R}{R_0 R_H + R_H R_K}. \quad (4.27)$$

В момент часу коли струм у розрядному контурі зрівняється зі струмом, що протікає через ЕН, НП діод $VD4$ запереться, а протікання ємнісного струму припиниться. Почнеться новий вільний перехідний процес при якому струм в ЕН стане рівним струму в розрядному колі ФРІ.

Для визначення часу початку даного вільного перехідного процесу прирівняємо між собою часові залежності струмів задніх фронтів розрядного контуру та ЕН

$$\begin{aligned} \frac{U}{R} \left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_{VD} + U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3K}}} - \frac{U_{VD} + U_C}{R_0 + R_K} = \\ = \frac{U}{R} \left(1 - \frac{R}{R_H} \frac{U_{VD} + U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3H}}} + \frac{U_{VD} + U_C}{R_H}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

Після скорочення та перенесення правої частини отримаємо наступне рівняння

$$\begin{aligned} \frac{R_H}{R^2(U_{VD} + U_C)} \left((U_{VD} + U_C)R + U(R_0 + R_K) \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3K}}} - \\ - \frac{(R_0 + R_K)}{R^2(U_{VD} + U_C)} \left(UR_H \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) - (U_{VD} + U_C)R \right) e^{-\frac{t}{\tau_{3H}}} - 1 = 0, \end{aligned} \quad (4.29)$$

розв'язок якого відносно t і є шуканим часом початку вільного перехідного процесу.

При умові що $\tau_{3K} \gg \tau_{3H}$ розв'язок даного рівняння має наступний вид

$$t_B = \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K} \left(\ln \left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_{VD} + U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) - \ln \left(\frac{R^2 \cdot (U_{VD} + U_C)}{UR_H (R_0 + R_K)} \right) \right). \quad (4.30)$$

На рис. 4.5 наведено залежність часу початку вільного перехідного процесу як функцію відношення величин напруги на шунтувальній ємності до напруги ДОН ФРІ для заданих електричних параметрів елементів розрядного кола

$$f\left(\frac{U_C}{U}\right) = t_B(U_C). \quad (4.31)$$

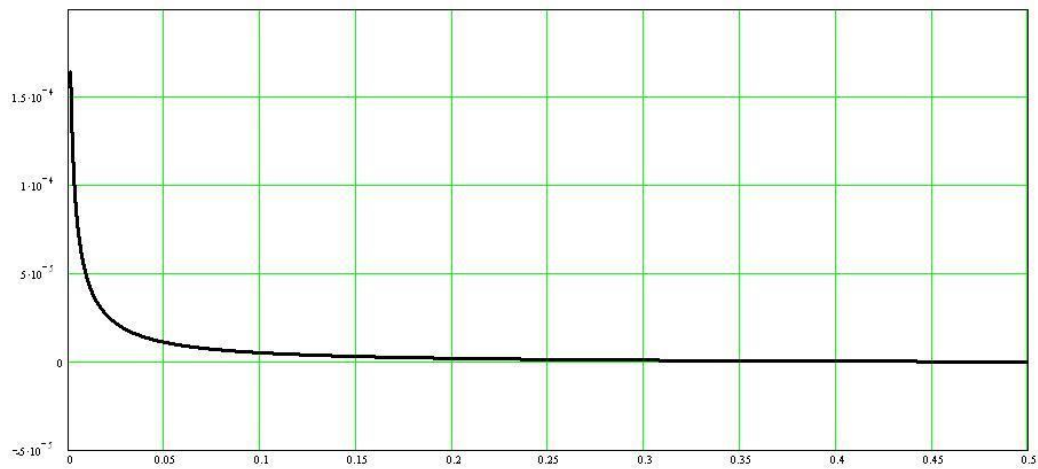


Рис. 4.5 Залежність часу початку вільного перехідного процесу від величини напруги на шунтувальній ємності

Тепер, коли відомий час початку вільного перехідного процесу, стає можливим визначити часову залежність струму в ЕН на третім етапі перехідного процесу. Складемо рівняння для розрядного кола за другим законом Кірхгофа

$$\frac{dU_R(t)}{dt} + \frac{L}{R}U_R(t) = 0. \quad (4.32)$$

Згідно закону комутації, значення струму в ЕН на початку даного перехідного процесу відповідає кінцевому значенню струму в попередньому перехідному процесі. Згідно цього, початкова умова для отриманого диференційного рівняння буде мати наступний вигляд

$$i_{ЗНВ}(t = t_B) = \frac{U_{VD} + U_C}{R_H} + \frac{U}{R} \left(1 - \frac{R}{R_H} \frac{U_{VD} + U}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t_B}{\tau_{zn}}}, \quad (4.33)$$

розв'язок якого дозволяє отримати часову залежність струму в ЕН під час проходження зазначеного вільного перехідного процесу

$$i_{3HB}(t) = \left(\frac{U_{VD} + U_C}{R_H} + \frac{U}{R} \left(1 - \frac{R}{R_H} \frac{U_{VD} + U}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t_B}{\tau_{3H}}} \right) e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (4.34)$$

де $\tau = \frac{L}{R}$ – постійна часу релаксації струму у розрядному колі.

Таким чином, перехідний процес в розрядному колі ФРІ наведеному на рис. 4.4, складається з трьох послідовних перехідних процесів, при цьому кінцеві умови попередніх процесів є початковими умови для наступних.

Перший перехідний процес являє собою аперіодичне зростання струму в ЕН, при цьому струми в розрядному колі ФРІ та в ЕН співпадають.

При переключенні повністю керованих НП силових ЕК $K1$ та $K2$ в момент часу t_i починається новий перехідний процес, який являє собою сукупність двох незалежних перехідних процесів, кожний з яких має вільну та вимушену складові. При протіканні перехідного процесу в розрядному колі ФРІ, енергія магнітного поля, накопичена на його індуктивностях, частково перетворюється в енергію електричного поля шунтувальної ємності $C_{ш}$ та частково в теплову енергію на його активному опорі. Одночасно з цим, у напрямку протилежному протіканню струму розрядного колі ФРІ, починає протікати постійний та незмінний в часі струм вимушеної складової, величина якого визначається відношенням величини напруги на шунтувальній ємності до величини активного опору розрядного кола ФРІ. При протіканні перехідного процесу в ЕН, енергія магнітного поля накопичена на його власній індуктивності перетворюється в теплову на його активному опорі, при цьому, у напрямку протікання струму вільної складової, починає протікати постійний та незмінний в часі струм вимушеної складової, величина якого визначається відношенням величини напруги на шунтувальній ємності до величини активного опору ЕН.

В момент часу, коли величини струмів в електричному навантажені та в розрядному колі ФРІ стають рівними по величині, починається новий вільний перехідний процес, при якому ємнісний струм відсутній, а струм, що замикається через ЕН та розрядне коло ФРІ, аперіодично спадає до нуля. При цьому, енергія магнітного по-

ля, що залишилась в індуктивностях розрядного контуру та електричного навантаження, перетворюється на теплову на їх активних опорах. Постійна часу релаксації цього струму визначається відношенням загальної індуктивності до загального активного опору даного електричного кола.

На рис. 4.6 наведені часові залежності струмів в ЕН, розрядному колі ФРІ та шунтувальному ланцюгу, побудовані за допомогою отриманих аналітичних залежностей, для електричної схеми представленої на рис. 4.4, при величинах індуктивностей 1,4 та 0,1 мкГн, активних опорів 0,02 та 1 Ом розрядного кола ФРІ та ЕН відповідно, при напрузі ДОН ФРІ 100 В, за умови незмінності в часі величини напруги на шунтувальній ємності $U_C(t) = const = 10$ В.

На рис. 4.7 наведені часові залежності струмів аналогічних до наведених на рис. 4.6, отримані шляхом комп'ютерного моделювання роботи електричної схеми представленої на рис. 4.4, при заданих величинах електричних параметрів елементів даної схеми. Струму в ЕН відповідає товста лінія, струму в розрядному колі ФРІ відповідає лінія середньої товщини, а струму в шунтувальному ланцюгу відповідно тонка лінія.

Як можна бачити з часових залежностей струмів в ЕН, розрядному колі ФРІ та шунтувальному ланцюгу, наведених на рис. 4.6 та 4.7, результати комп'ютерного моделювання збігаються з результатами отриманими шляхом використанням аналітичних залежностей, що свідчить достовірність отриманих результатів.

Слід також зазначити, що наведені на рис. 4.5 та 4.6 часові залежності струмів відповідають вибраним параметрам електричного кола, які значною мірою можуть відрізнятися від реальних. Це зроблено суто для наочності. Величина опорної напруги джерела розрядних імпульсних струмів була вибрана 100 В, що значно менше за можливу до 1000 В. Також, з метою сумірності амплітуди ІС з "полицею" струму, напруга шунтувальної ємності була взята значно більша за мінімально можливу (приблизно 1-2 В) для забезпечення нормального функціонування DC/DC перетворювача.

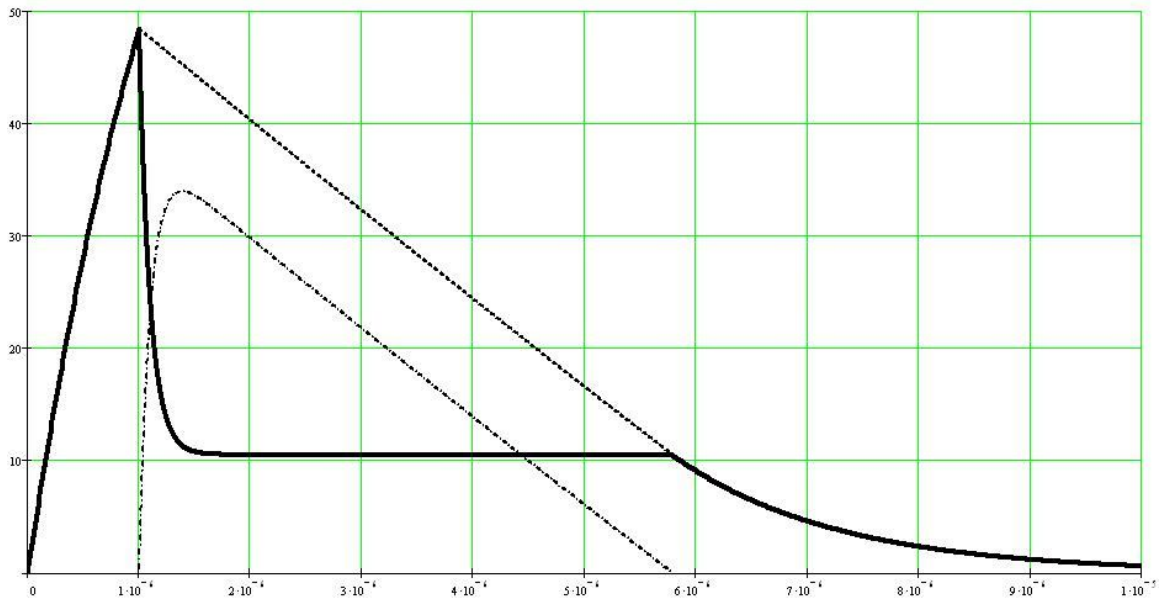


Рис. 4.6 Часові залежності струмів в електричному навантаженні – сполотшна крива, розрядному контурі – пунктирна крива та шунтувальному ланцюгу – штрих-пунктирна крива

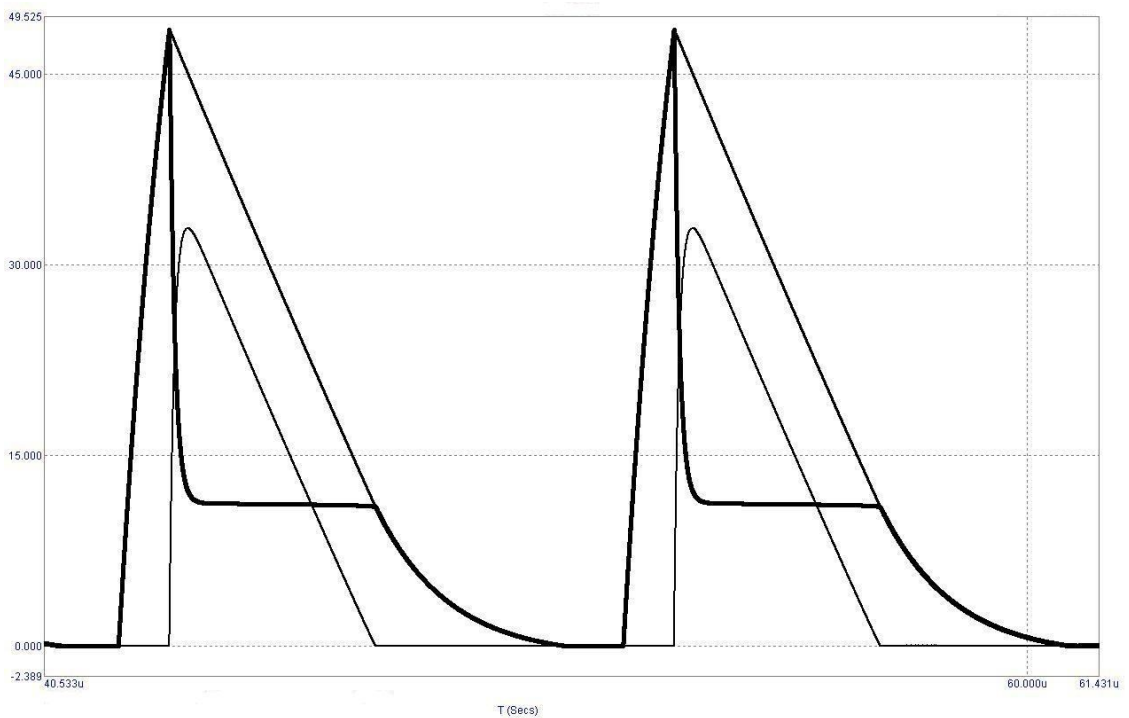


Рис.4.7 Часові залежності струмів в електричному навантаженні, розрядному контурі та шунтувальному ланцюгу

Коли стали відомі аналітичні залежності струмів в елементах електричних схем представлених на рис. 4.1 та 4.4, стає можливим оцінити ефективність їх роботи. Для цього необхідно провести порівняльний аналіз енергоефективності їх роботи.

Електрична енергія, яку видає ДОН в розрядне коло ФРІ за одиночний ІС, може бути визначена через відомі величини опорної напруги, часової залежності струму у розрядному колі ФРІ та тривалості ІС t_i за аналітичною залежністю (4.6). Дана енергія частково передається ЕН, частково втрачається на активному опорі розрядного кола ФРІ та частково накопичується у загальній розподіленій індуктивності розрядного кола ФРІ. Згідно цього, рівняння енергетичного балансу для переднього фронту ІС опишеться аналітичною залежністю (4.7) аналогічно для схеми наведеної на рис. 4.1.

На другому етапі перехідного процесу (для електричної схеми наведеної на рис. 4.4,) енергія магнітного поля, накопичена на загальній індуктивності розрядного кола ФРІ, частково зберігається, частково перетворюється у енергію електричного поля в шунтувальному конденсаторі, частково передається ЕН та частково перетворюється в теплову на активних опорах елементів розрядного контуру ФРІ. Рівняння енергетичного балансу для розрядного кола ФРІ з наявною рекуперацією електричної енергії набуває наступного вигляду

$$W_{L1} = W_{L2} + W_{H2} + W_P + W_{B2}, \quad (4.35)$$

де W_{L2} – енергія магнітного поля, що залишилась в загальній індуктивності розрядного кола ФРІ на момент закінчення другого етапу перехідного процесу в момент часу $t_i + t_B$, W_{H2} – електрична енергія яку спожило ЕН на другому етапі перехідного процесу, W_P – енергія рекуперації що передається в шунтувальну ємність, W_{B2} – втрати електричної енергії на активних опорах елементів розрядного кола ФРІ на другому етапі перехідного процесу, які визначаються за наступними аналітичними залежностями.

$$W_{L2} = \frac{1}{2} L \cdot i_3^2(t_i + t_B), \quad (4.36)$$

$$W_{H2} = R_H \cdot \int_{t_i}^{t_B} i_{3H}^2(t) dt, \quad (4.37)$$

$$W_P = U_C \int_{t_i}^{t_B} i_C(t) dt, \quad (4.38)$$

$$W_{B2} = (R_0 + R_K) \cdot \int_{t_i}^{t_B} i_{3K}^2(t) dt. \quad (4.39)$$

Для електричної схеми наведеної рис. 4.1 рівняння енергетичного балансу для заднього фронту ІС має наступний вид

$$W_{L1} = W_{B3}, \quad (4.40)$$

де W_{B3} – втрати електричної енергії на активних опорах елементів розрядного кола ФРІ під час проходження вільного перехідного процесу, які визначаються за наступною аналітичною залежністю

$$W_{B3} = (R_0 + R_K) \cdot \int_{t_i}^{\infty} i_3^2(t) dt = \frac{1}{2} L \cdot i_n^2(t_i). \quad (4.41)$$

На третьому етапі перехідного процесу (для електричної схеми рис. 4.4) залишкова енергія магнітного поля, накопичена на загальній індуктивності розрядного кола ФРІ, частково передається в ЕН та частково втрачається на активних опорах елементів розрядного кола ФРІ. Рівняння енергетичного балансу даного процесу має наступний вид

$$W_{L2} = W_{H3} + W_{B3}, \quad (4.42)$$

де W_{H3} – електрична енергія що передається в ЕН на третьому етапі перехідного процесу, W_{B3} – втрати електричної енергії на активних опорах елементів розрядного кола ФРІ на третьому етапі перехідного процесу, які визначаються за наступними аналітичними залежностями

$$W_{H3} = R_H \cdot \int_{t_B}^{\infty} i_H^2(t) dt, \quad (4.43)$$

$$W_{B3} = (R_0 + R_K) \cdot \int_{t_B}^{\infty} i_H^2(t) dt. \quad (4.44)$$

Результати порівняльного енергетичного аналізу роботи електричних схем наведених на рис. 4.1 та 4.4 для різних значень величин напруги ДОН ФРІ та напруги на шунтувальній ємності при заданих параметрах елементів електричного кола наведені у табл. 4.2.

З наведених у табл. 4.2 розрахункових даних видно, що схема з наявною рекуперацією електричної енергії за енергоефективністю значно виграє у схеми без рекуперації. Для заданих електричних параметрів елементів розрядного кола, схема без наявної рекуперації електричної енергії має сталий коефіцієнт корисної дії (ККД) $\eta_1 = 0,341$. Він не залежить від величини напруги ДОН ФРІ і визначається лише електричними параметрами розрядного кола, а саме активними опорами та індуктивностями його елементів. Слід зазначити, що ККД рівний 0,341 є вкрай низький. Це означає, що елементи розрядного кола ФРІ будуть поглинати більшу частину електричної енергії яку віддає ДОН в це коло, що, в свою чергу, призведе до їх значного перегріву.

Схема з наявною рекуперацією електричної енергії, для заданих параметрів її елементів, дозволяє повернути в ДОН ФРІ до 43 % загальної електричної енергії, накопиченої на індуктивностях елементів розрядного кола, та отримати значення ККД більше за 0,9. Слід зазначити, що ККД, який відображує відношення енергії яку поглинуло ЕН до енергії яку віддало ДОН, в даному випадку не може виступати в якості критерію оптимізації. Це насамперед обумовлено поглинанням електричної

Таблиця 4.2

Порівняльний енергетичний аналіз робо схем

№	U_0 , В	U_c , В	$\frac{W_{H1}}{W}$	$\frac{W_{B1}}{W}$	$\frac{W_{L1}}{W}$	$\frac{W_{H2}}{W}$	$\frac{W_{B2}}{W}$	$\frac{W_{L2}}{W}$	$\frac{W_p}{W}$	$\frac{W_{H3}}{W}$	$\frac{W_{B3}}{W}$	η_1	η_2
1		2				0,085	0,145	0,001	0,420	$5,88 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10^{-5}$		0,847
2		5				0,144	0,068	0,007	0,420	$6,83 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-4}$	0,341	0,912
3	100	10				0,207	0,035	0,028	0,330	0,027	$5,47 \cdot 10^{-4}$		0,906
4		25				0,114	$4,25 \cdot 10^{-3}$	0,174	0,032	0,171	$4,25 \cdot 10^{-3}$		0,658
5		50				0,639	0,013	0	0	0	0		0,980
6		2				0,053	0,262	$1,78 \cdot 10^{-4}$	0,332	$1,75 \cdot 10^{-4}$	$3,45 \cdot 10^{-6}$		
7		5				0,084	0,145	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,420	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10^{-5}$		0,846
8	250	10				0,126	0,083	$4,46 \cdot 10^{-3}$	0,431	$4,37 \cdot 10^{-3}$	$8,75 \cdot 10^{-5}$		0,902
9		25				0,207	0,035	0,028	0,330	0,027	$5,47 \cdot 10^{-4}$		0,906
10		50				0,194	0,012	0,112	0,126	0,109	$2,19 \cdot 10^{-3}$		0,770
11		2	0,341		0,652	0,049	0,361	$4,46 \cdot 10^{-5}$	0,242	$4,37 \cdot 10^{-5}$	$8,75 \cdot 10^{-7}$		0,632
12		5		0,00682		0,062	0,231	$2,79 \cdot 10^{-4}$	0,359	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$5,47 \cdot 10^{-6}$		0,762
13	500	10				0,084	0,145	$1,15 \cdot 10^{-3}$	0,420	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$2,19 \cdot 10^{-5}$	0,341	0,846
14		25				0,144	0,068	$6,97 \cdot 10^{-3}$	0,420	$6,83 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$		0,912
15		50				0,207	0,035	0,028	0,329	0,027	$5,47 \cdot 10^{-4}$		0,906
16		2				0,046	0,449	$1,12 \cdot 10^{-5}$	0,158	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$2,19 \cdot 10^{-7}$		0,544
17		5				0,051	0,330	$6,97 \cdot 10^{-5}$	0,271	$6,83 \cdot 10^{-5}$	$1,37 \cdot 10^{-6}$		0,633
18	1000	10				0,062	0,231	$2,79 \cdot 10^{-4}$	0,389	$2,73 \cdot 10^{-4}$	$5,47 \cdot 10^{-6}$		0,762
19		25				0,095	0,122	$1,74 \cdot 10^{-3}$	0,430	$1,71 \cdot 10^{-3}$	$3,42 \cdot 10^{-5}$		0,868
20		50				0,144	0,068	$6,97 \cdot 10^{-3}$	0,42	$6,83 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$		0,912

енергії навантаженням, під час проходження через нього заднього фронту імпульсу струму з наявною постійною складовою, що, в свою чергу, підвищує ККД даної електричної схеми, але одночасно з цим погіршує якісні показники ІС в ЕН.

В якості критерію оцінки енергоефективності роботи схеми з наявною рекуперацією електричної енергії найкраще підходить коефіцієнт рекуперації – відношення енергії повернутої в ДОН до енергії відданої їм у розрядне коло. Як можна бачити з розрахункових даних наведених у табл. 4.2, коефіцієнт рекуперації для кожної вибраної величини опорної напруги має свій екстремум, який, при даних параметрах розрядного кола ФРІ, знаходиться приблизно при відношенні величин напруги ДОН до напруги на шунтувальній ємності 1 до 20.

З метою покращення якісних показників заднього фронту ІС та енергоефективності роботи схеми з наявною рекуперацією електричної енергії виникає необхідність знайти оптимальне відношення величин напруги ДОН ФРІ до напруги на шунтувальній ємності. Для цього необхідно знайти екстремум функції коефіцієнту рекуперації електричної енергії відносно величини напруги на шунтувальній ємності при заданій величині напруги ДОН ФРІ. Для цього, прирівняємо до нуля похідну по напрузі на шунтувальній ємності від даної функції

$$\frac{d}{dU_C} \frac{W_P}{W} = \frac{d}{dU_C} \frac{U_C \int_{t_i}^{t_B} i_C(t) dt}{U \int_0^{t_i} i_n(t) dt} = 0 \quad (4.45)$$

та розв'яжемо отримане рівняння відносно U_C . Так як, знаменник даного рівняння не знаходиться у функціональній залежності з напругою на шунтувальній ємності його можна скоротити. Після відповідної підстановки дане рівняння набуває наступного виду

$$\frac{d}{dU_C} U_C \int_{t_i}^{t_B} \frac{U}{R} \left(\begin{array}{l} \left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{зк}}} - \\ - \left(1 - \frac{R}{R_H} \frac{U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{зл}}} \end{array} \right) - U_C \frac{R}{R_0 R_H + R_H R_K} = 0, \quad (4.46)$$

Так як, у даному виразі верхня межа інтегрування знаходиться у функціональній залежності з напругою на шунтувальній ємності, виникає необхідність знайти загальний розв'язок даної інтегральної залежності. Для спрощення пошуку загального розв'язку даної інтегральної залежності доцільно перетворити її на суму інтегралів та знайти загальні розв'язки для кожного з отриманих інтегральних виразів окремо

$$\begin{aligned} & \int_{t_i}^{t_B} \frac{U}{R} \left(\begin{array}{l} \left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{зк}}} - \\ - \left(1 - \frac{R}{R_H} \frac{U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t}{\tau_{зл}}} \end{array} \right) - U_C \frac{R}{R_0 R_H + R_H R_K} = \\ & = \frac{U}{R} \left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \int_{t_i}^{t_B} e^{-\frac{t}{\tau_{зк}}} dt - \frac{U}{R} \left(1 - \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \int_{t_i}^{t_B} e^{-\frac{t}{\tau_{зл}}} dt - \\ & - U_C \frac{R}{R_0 R_H + R_H R_K} \int_{t_i}^{t_B} 1 dt = \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K} \frac{U R_0 R_H + R_H R_K}{R^2 U_C} \left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_{зк}}} - e^{-\frac{t_B}{\tau_{зк}}} \right) - \\ & - \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K} \frac{U R_0 R_H + R_H R_K}{R^2 U_C} \left(1 - \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_{зл}}} - e^{-\frac{t_B}{\tau_{зл}}} \right) - \\ & - U_C \frac{R}{R_0 R_H + R_H R_K} (t_i - t_B). \end{aligned} \quad (4.47)$$

Підставимо отриману аналітичну залежність (4.47) у рівняння (4.46)

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dU_C} \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K} \frac{UR_0R_H + R_HR_K}{R^2} \left(1 + \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_{зк}}} - e^{-\frac{t_B}{\tau_{зк}}} \right) - \\
& - \frac{d}{dU_C} \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K} \frac{UR_0R_H + R_HR_K}{R^2} \left(1 - \frac{R}{R_0 + R_K} \frac{U_C}{U} - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_{зк}}} - e^{-\frac{t_B}{\tau_{зк}}} \right) + , \quad (4.48) \\
& + \frac{d}{dU_C} U_C \frac{R}{R_0R_H + R_HR_K} (t_i - t_B) = 0
\end{aligned}$$

після її диференціювання та скорочення отримуємо рівняння для визначення оптимальної величини напруги на шунтувальній ємності

$$\frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K} \left(1 - e^{-\frac{t_B(U_C) - t_i}{\tau_{зк}}} \right) + (t_i - t_B(U_C)) = 0, \quad (4.49)$$

де $t_B(U_C)$ – час початку вільного перехідного процесу, який визначається за аналітичною залежністю (4.30).

У зв'язку зі складністю отриманого рівняння його розв'язок, при заданих електричних параметрах розрядного кола, здійснено за допомогою пакету програмного забезпечення Mathcad Professional графічним методом. Для цього побудуємо криву лівої частини рівняння як функцію відношення величин напруги на шунтувальній ємності до напруги ДОН ФРІ

$$f\left(\frac{U_C}{U}\right) = \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K} \left(1 - e^{-\frac{t_B(U_C) - t_i}{\tau_{зк}}} \right) + (t_i - t_B(U_C)), \quad (4.50)$$

перетин якої з віссю абсцис і буде шуканою величиною оптимальної напруги на шунтувальній ємності.

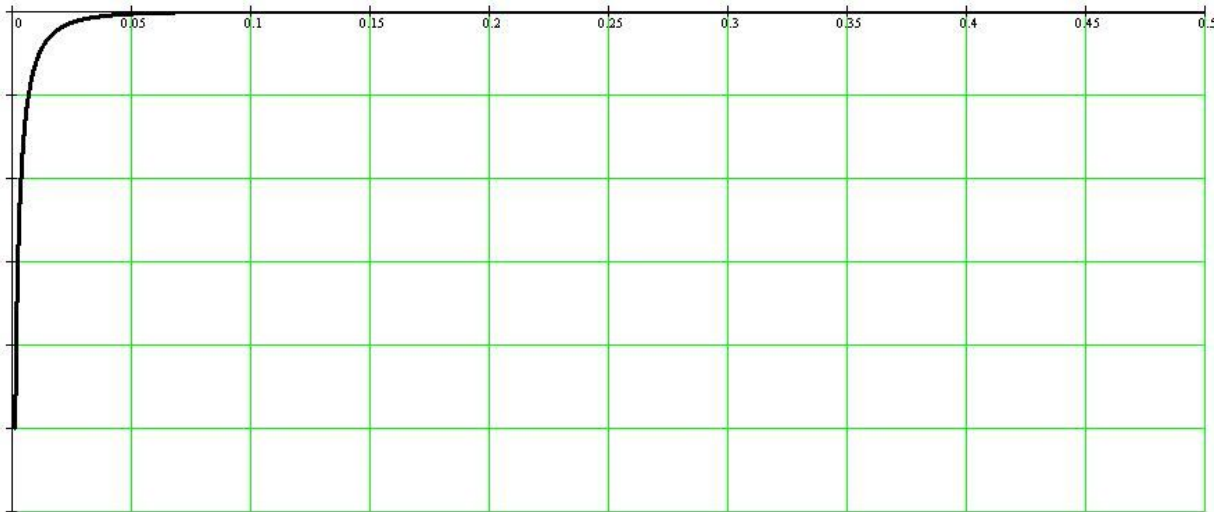


Рис. 4.8. Крива для знаходження оптимальної величини напруги на шунтувальній ємності

Крива, наведена на рис. 4.8, в широкому діапазоні зміни напруги на шунтувальній ємності близька до нуля. Це означає, що ефективність рекуперації електричної енергії, починаючи з певної величини напруги на шунтувальній ємності, майже не змінюється. Виходячи з того, що величина напруги на шунтувальній ємності окрім енергоефективності рекуперації електричної енергії також визначає і величину вимушеної складової струму в ЕН, тобто визначає рівень "полиці" струму на другому етапі перехідного процесу, доцільно вибрати мінімально необхідну величину напруги на ній. При заданих електричних параметрах розрядного кола оптимальна величина напруги на шунтувальній ємності становить приблизно 5-10 % від величини напруги ДОН ФРІ.

На рис. 4.9 наведена залежність ККД розрядного кола ФРІ з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту ІС для електричної схеми наведеної на рис. 4.4 від відношення величин напруги на шунтувальній ємності до напруги ДОН ФРІ.

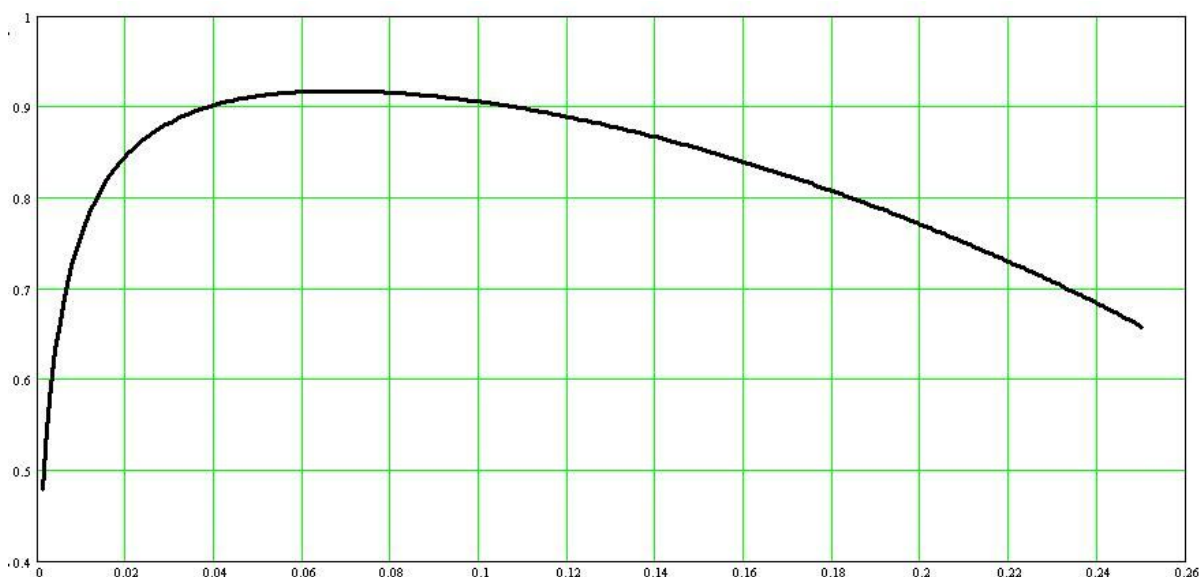


Рис. 4.9 Залежність коефіцієнту корисної дії розрядного кола від відношення величин напруги на шунтувальній ємності до опорної напруги

Як можна бачити з залежності наведеної на рис. 4.9, найвищий ККД розрядне коло з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту ІС при заданих електричних параметрах його елементів має в діапазоні напруги на шунтувальній ємності 4 – 10 % від величини напруги ДОН ФРІ.

На рис. 4.10 наведені часові залежності ІС в ЕН, розрядному колі ФРІ та шунтувальному ланцюгу, побудовані за допомогою отриманих аналітичних залежностей, для електричної схеми представленої на рис. 4.4, при величинах індуктивностей 1,4 та 0,1 мкГн, активних опорів 0,02 та 1 Ом розрядного кола та ЕН відповідно, напруги ДОН ФРІ 600 В, за умови незмінності в часі величини напруги на шунтувальній ємності $U_C = 0,05 \cdot U_0 = 30$ В.



Рис. 4.10 Часові залежності струмів в електричному навантаженні – сполошна крива, розрядному контурі – пунктирна крива та шунтувальному ланцюгу – штрих-пунктирна крива

При заданих рівнях напруги ДОН ФРІ та напруги на шунтувальній ємності, загальна тривалість ІС становить 1,3 мкс, при його піковому значенні 290,2 А, при цьому коефіцієнт рекуперації становить 0,42, а загальний ККД 0,912. При відсутності примусового обмеження тривалості заднього фронту ІС його загальна тривалість в ЕН становить 4,38 мкс, що 3,37 рази більше, при загальному ККД 0,98, що у 1,075 рази більше.

Таким чином, застосування примусового обмеження тривалості заднього фронту ІС з одночасною рекуперацією енергії магнітного поля, накопиченої на загальній індуктивності елементів розрядного кола ФРІ, дозволяє отримувати ІС в ЕН зі значною крутизною заднього фронту та загальною тривалістю близькою до заданої тривалості переднього фронту, при незначному зниженні загального ККД.

Для підтвердження достовірності результатів отриманих аналітичним методом та шляхом комп'ютерного моделювання була побудована малопотужна фізична модель схеми наведеної на рис. 4.4. В якості електричного навантаження були застосовані малоіндуктивні резистори з загальним електричним опором 1 Ом, загальна індуктивність розрядного контуру становить приблизно 2 мкГн.

На рис. 4.11 наведено осцилограму ІС в ЕН з вимкненою шунтувальною ланкою. Міжімпульсний період становить приблизно 6,25 мкс при заданій тривалості переднього фронту розрядного імпульсу струму 0,878 мкс, що відповідає коефіцієнту заповнення 0,14.

На рис. 4.12 наведено осцилограму ІС в ЕН для електричної схеми з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту ІС в ЕН та з наявною рекуперацією електричної енергії.

Як можна бачити з наведених на рис. 4.11 та 4.12 осцилограм ІС в ЕН, результати отримані аналітичним шляхом та шляхом комп'ютерного моделювання збігаються з результатами фізичного моделювання.

Також слід зазначити, що наявність "полиці" струму в електричному навантаженні в міжімпульсний проміжок часу для реального ЕІН, не є критичною. Це обумовлено значною нелінійністю даного навантаження. Для виникнення стійкого електроіскрового розряду не вистачить величини спаду напруги на ньому, а в умовах відсутності електроіскрового розряду ЕІН має значний електричний опір. Як наслідок, в міжімпульсний проміжок часу в реальному ЕІН буде протікати електричний струм незначної величини, а енергія магнітного поля, накопичена на індуктивності розрядного контуру, майже повністю буде поглинута шунтувальною ємністю, що, в свою чергу, підвищить коефіцієнт рекуперації електричної схеми наведеної на рис. 4.4.

У додатку Л наведено результати аналітичного розрахунку та експериментальні данні для випадку використання шунтувальної ланки з конденсатором.

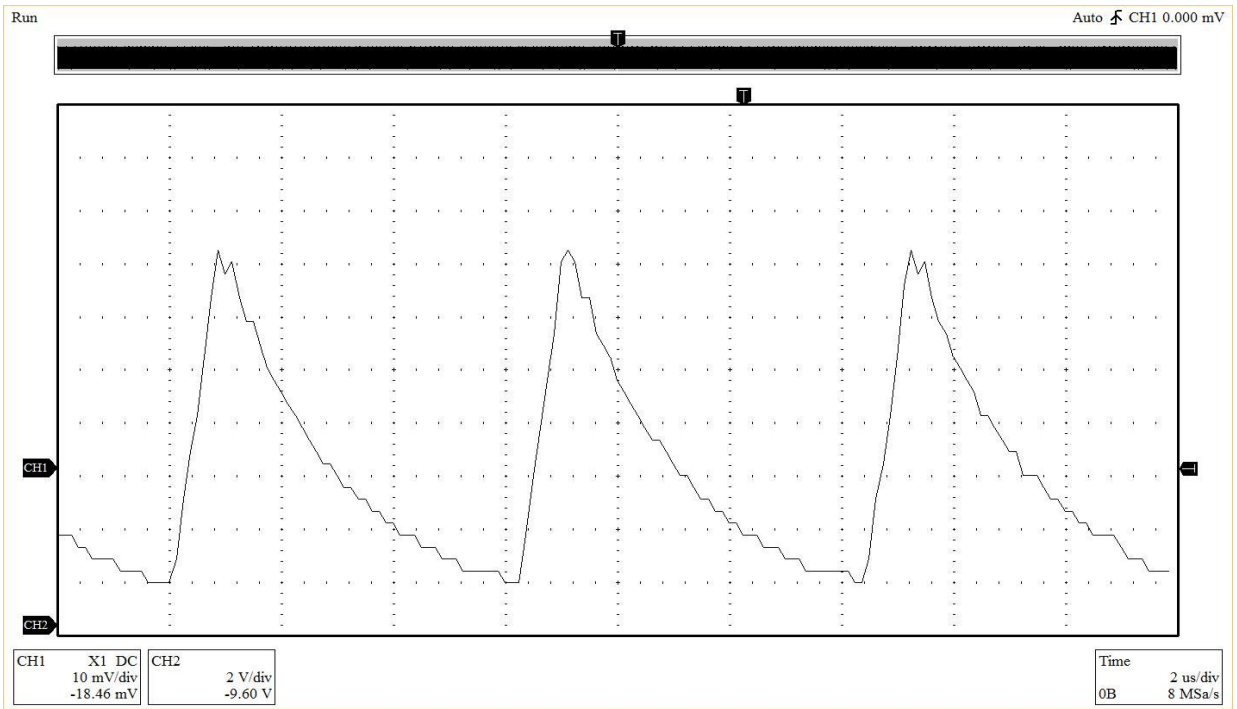


Рис. 4.11 Осцилограма імпульсів струму в електричному навантаженні

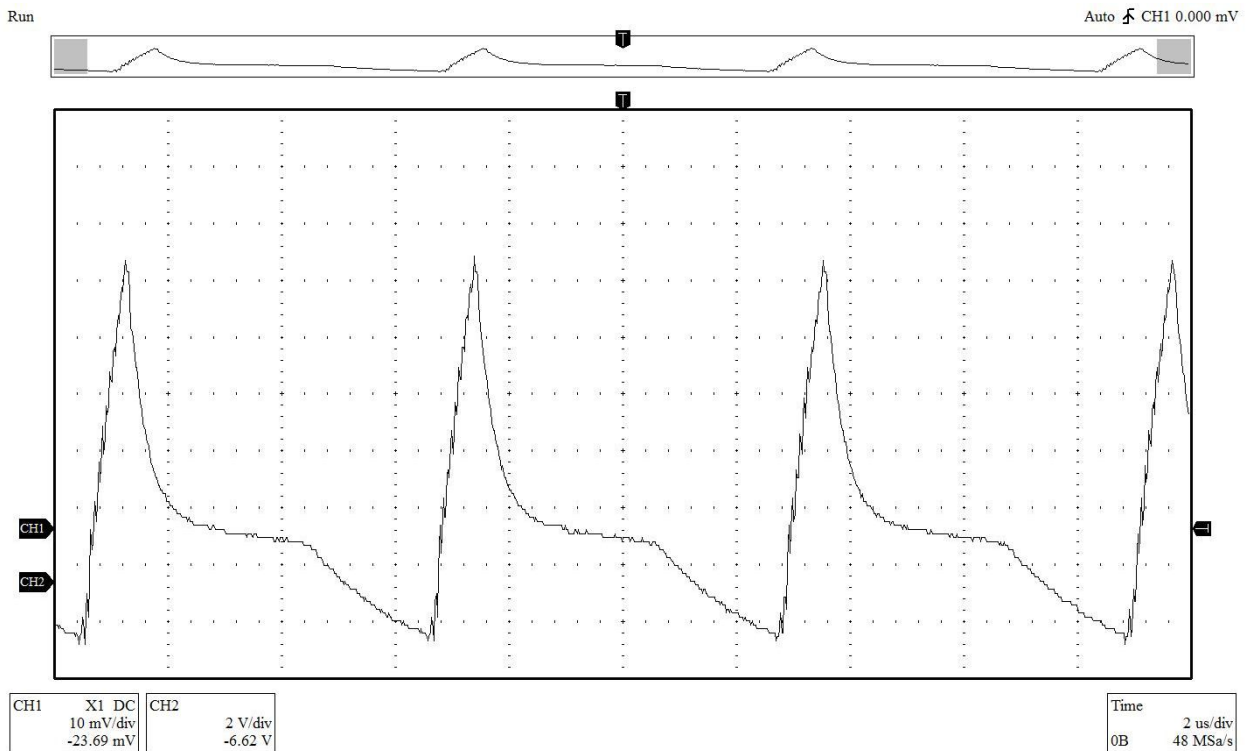


Рис. 4.12 Осцилограма імпульсів струму в електричному навантаженні з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту імпульсу струму та наявною рекуперацією електричної енергії

4.4 Підвищення динамічних характеристик розрядних імпульсних струмів шляхом використання енергії магнітного поля розрядного кола

Як зазначалось раніше, при примусовому обмеженні тривалості заднього фронту ІС в ЕН, значна частина електричної енергії, яку віддає ДОН в розрядне коло ФРІ, накопичується на індуктивностях елементів розрядного кола у вигляді енергії магнітного поля. Частина даної енергії, в залежності від електричних параметрів розрядного кола та часу тривалості переднього фронту ІС в ЕН, може становити 0,5 – 0,9 загальної. Що, у випадках відсутності додаткових засобів направлення цієї енергії в ДОН або в ЕН, суттєво знижує ККД даної електричної схеми, а енергія магнітного поля повністю перетворюється на теплову на активних опорах елементів розрядного кола ФРІ.

На рис. 4.13 наведено спрощену електричну принципову схему розрядного кола ФРІ з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту ІС в ЕН.

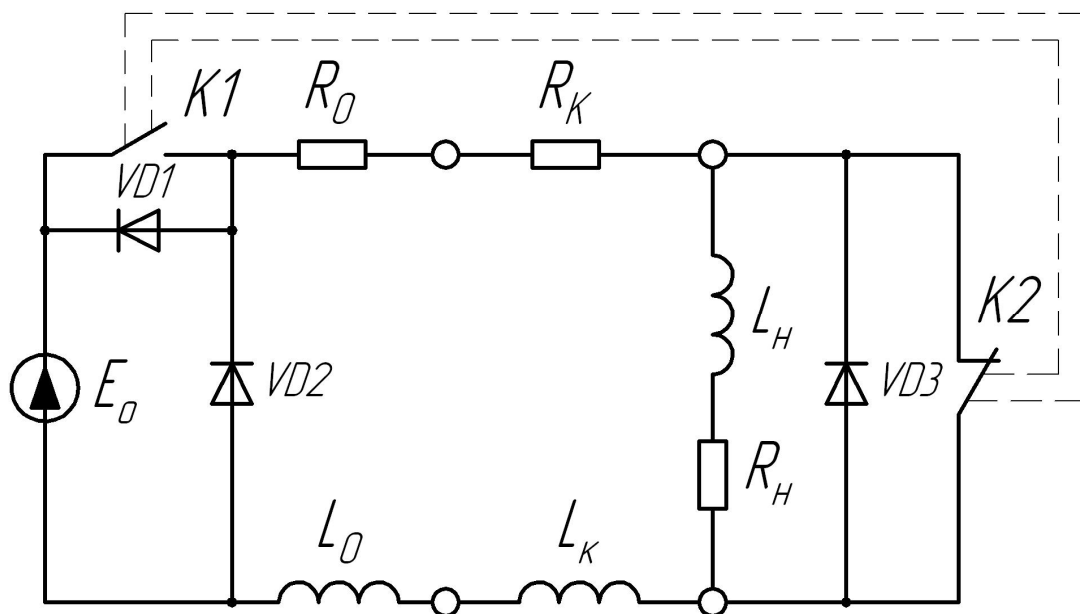


Рис. 4.13 Електрична принципова схема розрядного кола з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту імпульсу струму

Принцип роботи даної схеми був детально розглянутий у підрозділі 4.1. Струм, що протікає через ЕН, має аперіодичні передні та задні фронти, постійні часу релак-

сації яких визначаються загальним активним опором і загальною індуктивністю розрядного кола ФРІ та активним опором і власною індуктивністю ЕН відповідно. Струм, що протікає у розрядному колі ФРІ, по переднім та заднім фронтам також носить аперіодичний характер, але при цьому, його передній фронт збігається з відповідним в ЕН, а задній має значно більшу постійну часу релаксації від відповідного в ЕН. Постійна часу релаксації заднього фронту ІС в розрядному колі ФРІ визначається його індуктивністю та незначним, по відношенню до електричного ЕН, активним опором.

Часові залежності струмів в розрядному контурі та в електричному навантаженні описуються наступною системою рівнянь

$$\begin{cases} i_{\text{ПН}}(t) = i_{\text{ПК}}(t) = \frac{U}{R_0 + R_K + R_H} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right), \\ i_{\text{ЗН}}(t) = \frac{U}{R_0 + R_K + R_H} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t+t_i}{\tau_{\text{ЗН}}}}, \\ i_{\text{ЗК}}(t) = \frac{U}{R_0 + R_K + R_H} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{t+t_i}{\tau_{\text{ЗК}}}}, \\ i_{\text{К}}(t) = \frac{U}{R_0 + R_K + R_H} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \left(e^{-\frac{t+t_i}{\tau_{\text{ЗК}}}} - e^{-\frac{t+t_i}{\tau_{\text{ЗН}}}} \right), \end{cases} \quad (4.51)$$

де $i_{\text{ПН}}(t)$ – часова залежність переднього фронту ІС в ЕН, $i_{\text{ПК}}(t)$ – часова залежність переднього фронту ІС в розрядному колі ФРІ, $i_{\text{ЗН}}(t)$ – часова залежність заднього фронту ІС в ЕН, $i_{\text{ЗК}}(t)$ – часова залежність заднього фронту ІС в розрядному колі ФРІ, $i_{\text{К}}(t)$ – часова залежність струму в шунтувальному ланцюгу (К2); $U = E_0$ – величина напруги ДОН ФРІ, R_0 та L_0 – відповідно внутрішній опір та індуктивність ФРІ, R_K та L_K – відповідно активний опір та індуктивність ЗП, R_H та L_H – відповідно активний опір та власна індуктивність ЕН; t_i – задана тривалість переднього фронту ІС; τ_n , $\tau_{\text{ЗН}}$ та $\tau_{\text{ЗК}}$ – відповідно постійні часу релаксації струму по передньому фрон-

ту в ЕН та в розрядному колі ФРІ, по задньому фронту в ЕН та по задньому фронту в розрядному колі ФРІ, які визначаються за наступними аналітичними залежностями

$$\tau_n = \frac{L_0 + L_K + L_H}{R_0 + R_K + R_H}, \quad \tau_{zn} = \frac{L_H}{R_H}, \quad \tau_{зк} = \frac{L_0 + L_K}{R_0 + R_K}. \quad (4.52)$$

Для оцінки енергетичної ефективності роботи електричної схеми, наведеної на рис. 4.13, в залежності від параметрів її електричних елементів необхідно провести енергетичний аналіз. Складемо рівняння енергетичного балансу для одиночного імпульсу струму

$$W = W_{HP} + W_{BP} + W_{HZ} + W_{BП}, \quad (4.53)$$

де W – енергія яку передає ДОН в розрядне коло, W_{HP} та W_{HZ} – відповідно енергія спожита ЕН під час проходження через нього переднього та заднього фронтів ІС, W_{BP} та $W_{BП}$ – відповідно енергія втрат у розрядному колі ФРІ під час проходження через нього переднього та заднього фронтів ІС.

З відомих часових залежностей ІС в ЕН та в розрядному колі ФРІ визначимо ці енергії. Енергію, яку передає ДОН в розрядний контур при заданій тривалості розрядного імпульсу струму t_i , можна визначити за наступною аналітичною залежністю

$$W = U \cdot \int_0^{t_i} i_{PH}(t) dt = \frac{U^2}{R} \cdot \left(t_i - \frac{L}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \right), \quad (4.54)$$

де $L = L_0 + L_K + L_H$ – загальна індуктивність розрядного кола, $R = R_0 + R_K + R_H$ – загальний активний опір розрядного кола.

Втрати електричної енергії та енергію, яку споживає ЕН під час проходження через нього переднього фронту імпульсу струму, можна визначити через відомі величини активних опорів елементів даної електричної схеми

$$W_{HP} = R_H \cdot \int_0^{t_i} (i_{PH}(t))^2 dt = \frac{R_H}{R^2} U^2 \cdot \left(t_i + \frac{L}{R} \left(2 \cdot e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - \frac{1}{2} e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - \frac{3}{2} \right) \right), \quad (4.55)$$

$$W_{ВП} = (R_0 + R_K) \cdot \int_0^{t_i} (i_{ПП}(t))^2 dt = \frac{R_0 + R_K}{R^2} U^2 \cdot \left(t_i + \frac{L}{R} \left(2 \cdot e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - \frac{1}{2} e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - \frac{3}{2} \right) \right). \quad (4.56)$$

Енергія магнітного поля, накопичена на загальній індуктивності розрядного кола, на момент часу закінчення переднього фронту імпульсу струму t_i може бути визначена через відомі величини загальної індуктивності розрядного кола та струму в електричному навантаженні

$$W_L = \frac{1}{2} L \cdot i_{ПП}^2(t_i) = U^2 \frac{L}{2R^2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \left(2 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \right), \quad (4.57)$$

яка розподіляється між ЕН та розрядним колом ФРІ пропорційно величинам їх індуктивностей при проходженні через них заднього фронту ІС

$$W_{H3} = \frac{L_H}{L} \cdot W_L = L_H \frac{U^2}{2R^2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \left(2 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \right), \quad (4.58)$$

$$W_{B3} = \frac{L_0 + L_K}{L} \cdot W_L = (L_0 + L_K) \frac{U^2}{2R^2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \left(2 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \right). \quad (4.59)$$

Як можна бачити з наведених вище аналітичних залежностей, розподіл електричної енергії між елементами даної електричної схеми визначається виключно їх активним опором по передньому фронту ІС та їх індуктивностями по задньому фронту ІС.

Загальна електрична енергія, що передається ЕН від ДОН ФРІ, визначається сумою енергій спожитої ним під час проходження через нього переднього та заднього фронтів ІС

$$W_H = W_{ПП} + W_{H3} = \frac{U^2}{R^2} \left(R_H \cdot \left(t_i + \frac{L}{R} \left(2 \cdot e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - \frac{1}{2} e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - \frac{3}{2} \right) \right) + L_H \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \left(2 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \right) \right), \quad (4.60)$$

відповідно енергія яка втрачається на активних опорах елементів розрядного кола ФРІ визначається сумою енергій спожитої ними під час проходження через них переднього та заднього фронтів імпульсу струму

$$W_B = W_{BII} + W_{B3} = \frac{U^2}{R^2} \left((R_0 + R_K) \cdot \left(t_i + \frac{L}{R} \left(2 \cdot e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - \frac{1}{2} e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - \frac{3}{2} \right) \right) + (L_0 + L_K) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \left(2 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \right) \right) \quad (4.61)$$

ККД даної електричної схеми буде визначатися відношенням енергії спожитої електричним навантаженням до енергії яку віддало ДОН ФРІ в розрядне коло

$$\eta = \frac{W_H}{W} = \frac{R_H \cdot \left(t_i + \frac{L}{R} \left(2 \cdot e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - \frac{1}{2} e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - \frac{3}{2} \right) \right) + L_H \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \left(2 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \right)}{R \left(t_i + \frac{L}{R} \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - 1 \right) \right)} \quad (4.62)$$

На рис. 3.25 наведено аналітичні залежності коефіцієнту корисної дії електричної схеми, наведеної на рис. 3.24, від величини активного опору електричного навантаження при різній тривалості переднього фронту імпульсу струму t_i для наступних електричних параметрів елементів схеми: активний опір розрядного кола $R_0 + R_K = 20$ мОм; індуктивність розрядного контуру $L_0 + L_K = 1,4$ мкГн, індуктивність електричного навантаження $L_H = 0,1$ мкГн.

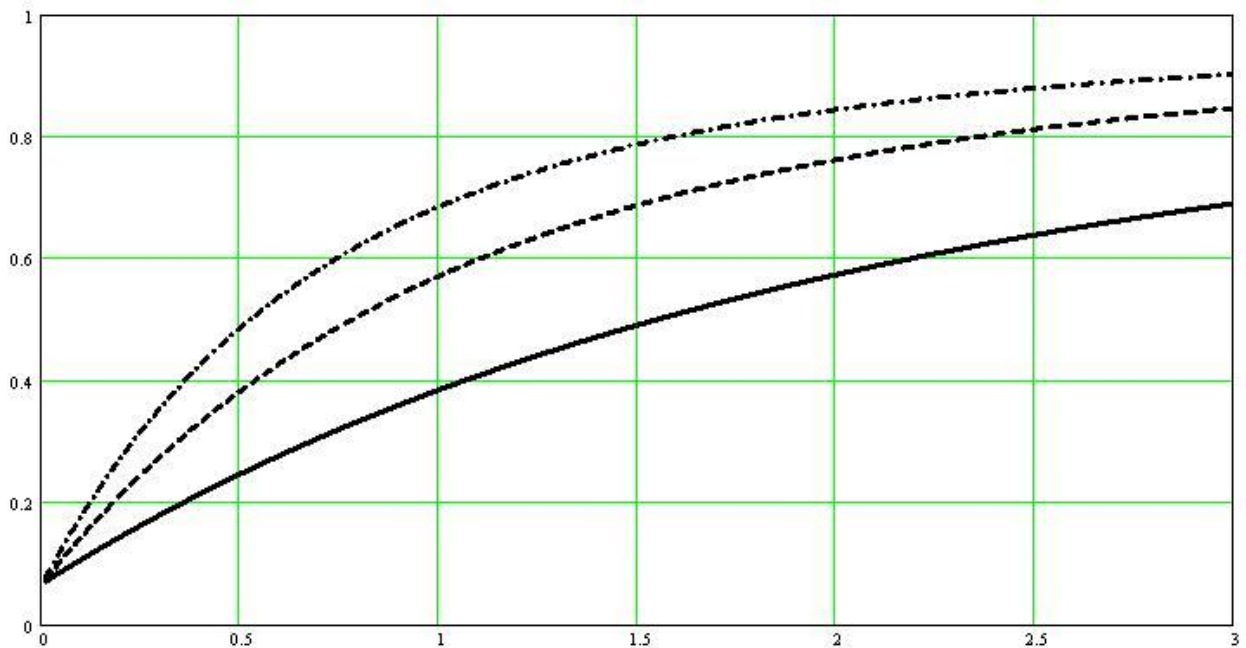


Рис. 4.14 Залежність коефіцієнту корисної дії електричної схеми від величини активного опору електричного навантаження та тривалості переднього фронту імпульсу струму 1 мкс – суцільна лінія, 2 мкс – штрихова лінія, 3 мкс – штрих-пунктирна лінія

Як можна бачити з наведеної аналітичної залежності (4.62) та рис. 4.14, ККД даної схеми зростає з ростом активного опору ЕН та з ростом тривалості переднього фронту ІС в ньому. Мінімальне значення коефіцієнту корисної дії даної схеми не залежить від тривалості переднього фронту імпульсу струму та величини активного опору ЕН, а визначається виключно відношенням власної індуктивності ЕН до загальної індуктивності розрядного кола

$$\eta_{\min} = \frac{L_H}{L_0 + L_K + L_H}. \quad (4.63)$$

Для отримання значної швидкості наростання ІС в ЕН по передньому фронту величина загальної індуктивності розрядного кола повинна бути як змога меншою, а по задньому фронту повинна бути як змога меншою власна індуктивність ЕН. З вищезазначеного слідує, що при незначних величинах активного опору ЕН та незначній тривалості переднього фронту ІС в ньому отримати прийнятний ККД для даної схеми стає практично неможливим. Це обумовлено накопиченням значної частини електричної енергії, яку відає в розрядне коло ДОН, на індуктивностях елементів розрядного кола ФРІ. Зменшення тривалості переднього фронту ІС та величини активного опору ЕН призводить до різкого зростання частини енергії, яка накопичується на індуктивностях елементів розрядного кола, що, в свою чергу, призводить до різкого зменшення ККД даної електричної схеми.

Відношення енергії магнітного поля, накопиченої на індуктивностях розрядного кола ФРІ, до загальної енергії, яку віддало ДОН в дане коло, в залежності від величини активного опору ЕН, при заданих електричних параметрах елементів розрядного кола, для різної тривалості переднього фронту ІС в ньому наведено на рис. 4.15.

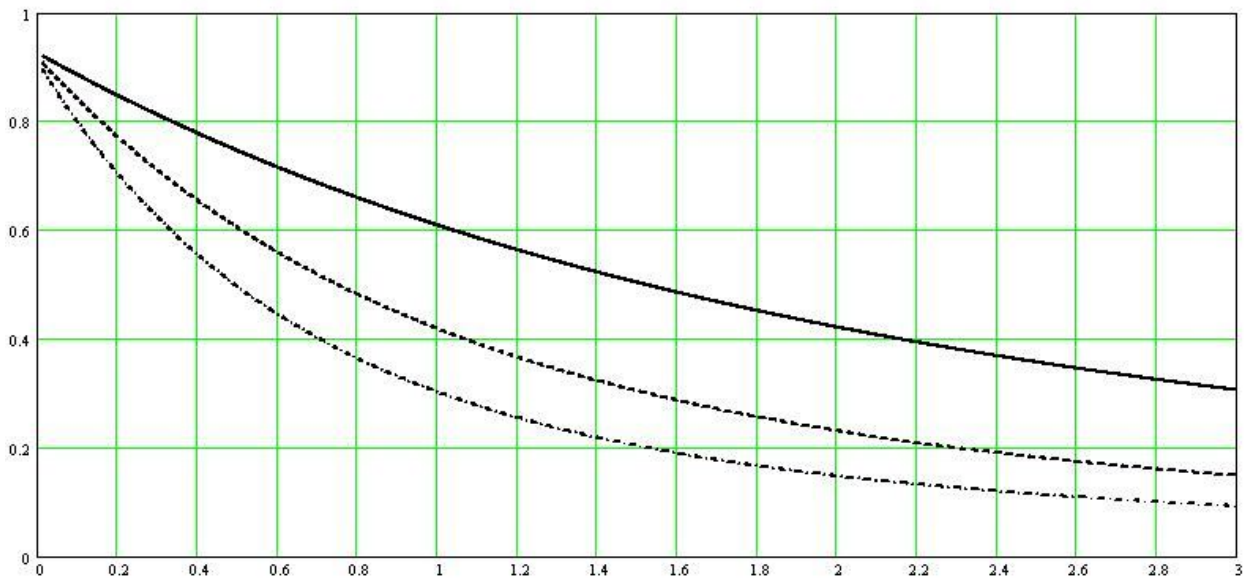


Рис. 4.15 Відношення енергії, накопиченої в індуктивності розрядного контуру, до загальної в залежності від величини активного опору електричного навантаження при тривалості переднього фронту імпульсу струму в ньому 1 мкс - суцільна лінія, 2 мкс - штрихова лінія, 3 мкс - штрих-пунктирна лінія

Так як, індуктивність ЕН, відносно загальної індуктивності розрядного кола, має незначну величину, то ККД даної електричної схеми для заданої тривалості переднього фронту ІС насамперед буде визначатися відношенням індуктивності розрядного контуру до активного опору електричного навантаження, тобто відношенням постійної часу релаксації по передньому фронту ІС до його тривалості. На рис. 4.16 наведено залежність ККД даної електричної схеми від відношення постійної часу релаксації переднього фронту імпульсу струму до його тривалості

$$\eta = f\left(\frac{\tau_n}{t_i}\right). \quad (4.64)$$

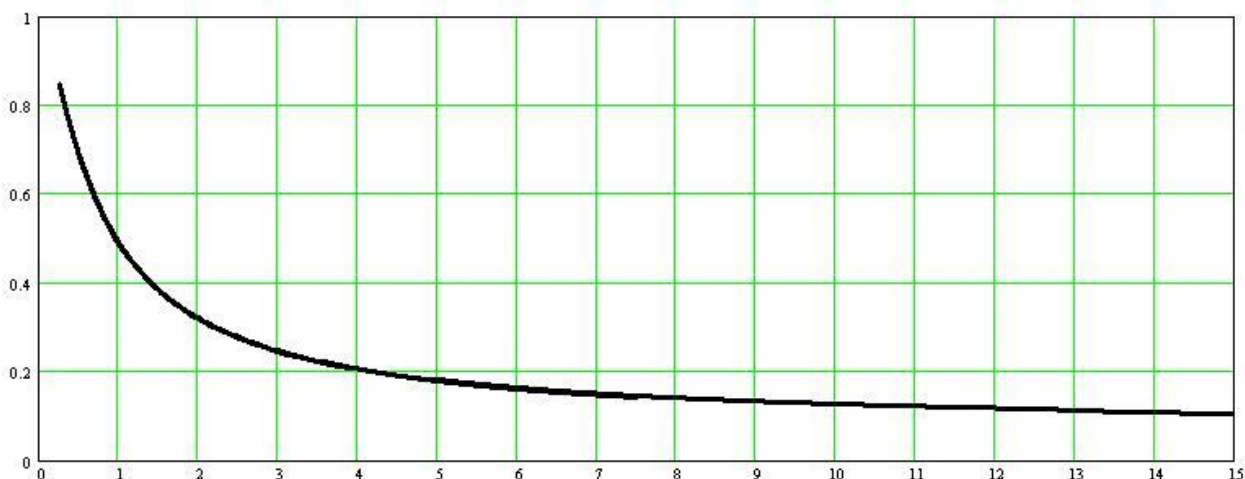


Рис. 4.16 Залежність коефіцієнту корисної дії схеми від відношення постійної часу релаксації струму по передньому фронту до його тривалості

Таким чином, як можна бачити з залежності заведеної на рис. 4.16, ККД даної схеми при малих значеннях власної індуктивності ЕН визначається відношенням постійної часу релаксації ІС по передньому фронту до його тривалості. При цьому, його максимальне значення визначається відношенням активного опору ЕН до загального активного опору розрядного кола

$$\eta_{\max} = \frac{R_H}{R_0 + R_K + R_H}, \quad (4.65)$$

а при рівності тривалості переднього фронту ІС в ЕН відповідній постійній часу релаксації ККД даної електричної схеми становить 0,5.

З вище зазначеного слідує, що високу енергоефективність дана електрична схема може забезпечити тільки при величинах постійній часу релаксації ІС в ЕН по передньому фронту значно менших за його тривалість. Так як, індуктивність розрядного контуру значно зменшити не представляється можливим, а тривалість переднього фронту ІС та величина активного опору ЕН є заданими, то, в більшості випадків, використання даної електричної схеми стає недоцільним.

Значно покращити енергоефективність даної електричної схеми може використання енергії магнітного поля, накопиченої на індуктивностях елементів розрядного кола ФРІ, для формування переднього фронту наступного ІС в ЕН. Так як, постійна часу релаксації ІС в розрядному контурі по задньому фронту значно більша за ана-

логічну для його переднього фронту, то, у випадках коли вона значно більша за безструмову паузу в ЕН, енергія магнітного поля, накопиченої на індуктивностях елементів розрядного кола, частково буде передана ЕН.

Розглянемо роботу електричної схеми, наведеної на рис. 4.13, у вадку коли струм в розрядному контурі не встиг повністю зникнути за безструмову паузу в ЕН. В момент часу відкривання НП ЕК $K1$ (запирання $K2$) утворюється електричне коло. ЕН через ЗП з'єднується з ДОН ФРІ. У розрядному колі починає протікати зростаючий в часі за аперіодичним законом електричний струм $i_{пк}(t)$, постійна часу релаксації якого визначається загальними індуктивністю L та активним опором R розрядного кола. Через встановлений проміжок часу t_i відбувається примусове запирання НП ЕК $K1$, ЕН від'єднується від ДОН ФРІ. Одночасно з цим відбувається відпирання НП ЕК $K2$ який майже накоротко шунтує ЕН. Струм в ЕН $i_{зН}(t)$ із-за незначної постійної часу релаксації майже миттєво спадає до нуля, а струм в розрядному колі ФРІ $i_{зК}(t)$, замикаючись через НП ЕК $K2$ та зворотній діод $VD2$, починає повільно спадати за аперіодичним законом, постійна часу релаксації якого $\tau_{зк}$ визначається його індуктивністю та незначним активним опором. Якщо, в момент часу наступного відкривання НП ЕК $K1$ (запирання $K2$) струм в розрядному колі ФРІ, враховуючи його значну постійну часу релаксації, не встигне повністю зникнути, то в момент комутації ЕРС самоіндукції додасться до напруги ДОН ФРІ і струм в ЕН майже миттєво зросте до рівня струму в розрядному колі ФРІ, який був в ньому на момент комутації. Струм в ЕН почине зростати за аперіодичним законом з тією ж постійною часу релаксації, але вже з ненульового початкового значення струму в ньому. Через проміжок часу t_i відбувається примусове запирання електричного ключа $K1$ (запирання $K2$) і даний процес повторюється.

Надалі, щоб не порушувати законів комутації (індуктивність зі струмом комутується на індуктивність), аналіз роботи даної електричної схеми будемо робити для безіндукційного електричного навантаження.

За другим законом Кіргхофа складемо рівняння в операторній формі для розрядного кола ФРІ у випадку ненульового значення струму в ньому на момент комутації НП ЕК ($K1$ – замкнений, $K2$ – розімкнений)

$$i_{\text{ПН}}(p)(R_0 + R_K + R_H + Lp) = Li_{3K}(t = T - t_i) + \frac{U}{p}, \quad (4.66)$$

де $i_{\text{ПН}}(p)$ – зображення часової залежності переднього фронту ІС в ЕН, $i_{3Kn}(t = T - t_i)$ – струм в розрядному колі ФРІ на момент комутації, який визначається з відповідного рівняння системи (4.51)

$$i_{3K}(t = T - t_i) = \frac{U}{R_0 + R_K + R_H} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{3K}}}, \quad (4.67)$$

де T – період між двома послідовними ІС в ЕН.

З рівняння (4.66) визначаємо залежність для зображення переднього фронту ІС в ЕН

$$i_{\text{ПН}}(p) = \frac{Lpi_{3K}(t = T - t_i) + U}{Lp^2 + p(R_0 + R_K + R_H)} \quad (4.68)$$

та за теоремою подібності знайдемо її оригінал. Для цього визначимо корені характеристичного рівняння та похідну знаменника по p для отриманого виразу

$$p(Lp + (R_0 + R_K + R_H)) = 0, \quad p_1 = 0, \quad p_2 = -\frac{R}{L}; \quad (4.69)$$

$$\frac{d}{dp}(Lp^2 + p(R_0 + R_K + R_H)) = 2Lp + R. \quad (4.70)$$

Звідки

$$i_{\text{ПН}}(t) = \frac{Lp_1 i_{3K}(t = T - t_i) + U}{2Lp_1 + R} e^{p_1 t} + \frac{Lp_2 i_{3K}(t = T - t_i) + U}{2Lp_2 + R} e^{p_2 t}. \quad (4.71)$$

Підставляємо в отриманий вираз початкову умову та знаходимо часову залежність переднього фронту другого ІС в ЕН

$$i_{\text{ПН}}(t) = \frac{U}{R} + \frac{U}{R} \left(e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{3K}}} - e^{-\frac{T-t_i-t_i}{\tau_{3K} \tau_n}} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau_n}}. \quad (4.72)$$

На рис. 4.17 наведено часові залежності струму в ЕН та розрядному колі ФРІ для електричної схеми, наведеної на рис. 4.13, при наступних параметрах: період між двома послідовними ІС $T=20$ мкс, тривалість переднього фронту ІС в ЕН $t_i=1$ мкс, активний опір розрядного кола $R_0 + R_K=20$ мОм; індуктивність розрядного кола $L_0 + L_K=1,5$ мкГн, активний опір ЕН $R_H=1$ Ом, величина напруги ДОН $U=100$ В.

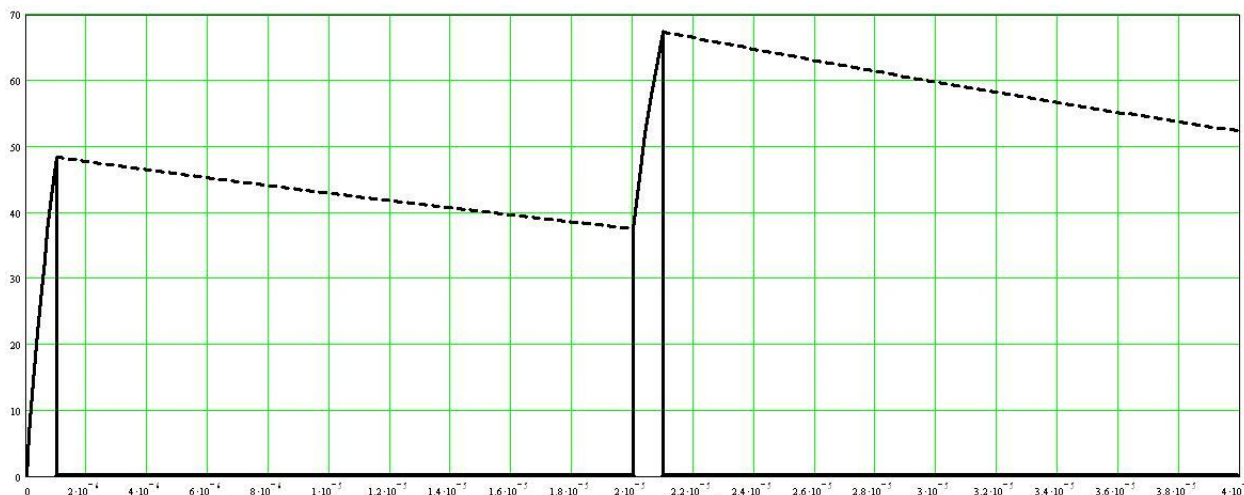


Рис. 4.17 Часові залежності ІС в ЕН – суцільна лінія та в розрядному колі ФРІ – пунктирна лінія

Як можна бачити з наведених на рис. 4.17 часових залежностей ІС в ЕН та розрядному колі ФРІ, кожен наступний ІС в ЕН має більшу амплітуду порівняно з попереднім. Це обумовлено наявністю вільної складової струму в розрядному колі ФРІ під час безструмової паузи в ЕН. Струм в ЕН, за виключенням першого імпульсу, починає зростати з ненульового значення, а зі значення, яке відповідає величині струму в розрядному колі ФРІ, на момент початку комутації. Початкове значення струму в ЕН визначається піковим значенням попереднього ІС, постійною часу релаксації заднього фронту струму в розрядному колі, тривалістю ІС та періодом між двома послідовними ІС в ЕН. Енергія, яка віддається в розрядне коло ДОН ФРІ, для кожного наступного імпульсу струму також зростає.

На рис. 4.18 наведено результат комп'ютерного моделювання роботи електричної схеми, наведеної на рис. 4.13, з електричними параметрами її елементів відповідно рис. 4.17.

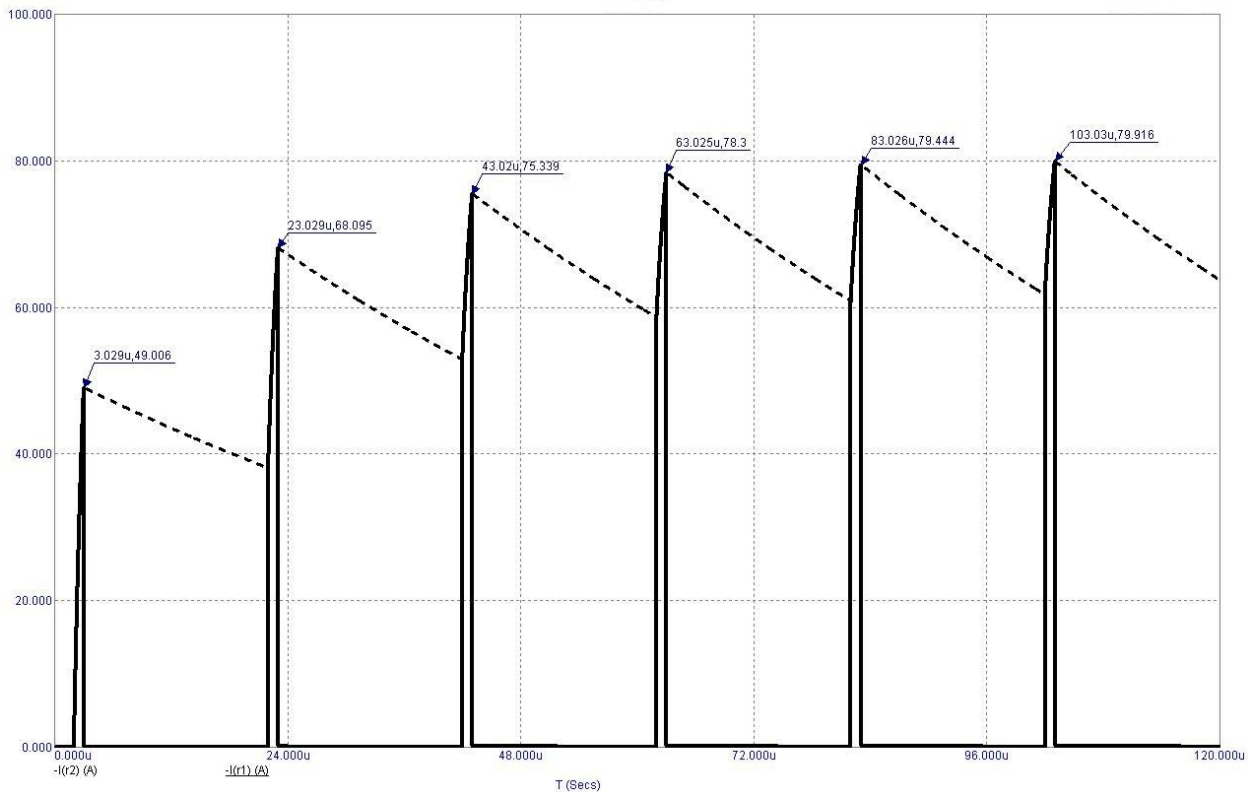


Рис. 4.18 Результати комп'ютерного моделювання роботи електричної схеми, суцільна лінія відповідає часовій залежності струму в ЕН, пунктирна лінія – в розрядному колі ФРІ

Як можна бачити з часових залежностей струмів в електричному навантаженні та в розрядному контурі, наведених на рис. 4,17 і 4,18, результати комп'ютерного моделювання збігаються з результатами отриманими аналітичним методом для перших двох ІС в ЕН, що свідчить про достовірність отриманих аналітичних залежностей.

Для проведення енергетичного аналізу роботи даної схеми насамперед необхідно визначити параметри усталеного режиму її роботи, а саме усталене пікове значення струму в ЕН. Усталений режим наступить коли кількість електричної енергії, яку відає ДОН в розрядний контур, зрівняється з енергією яку споживають резистив-

ні елементи даної електричної схеми. Складемо рівняння енергетичного балансу для одиночного ІС

$$U \int_0^{t_i} i_{\text{ПН}}(t) dt = (R_0 + R_K + R_H) \int_0^{t_i} i_{\text{ПН}}^2(t) dt + (R_0 + R_K) \int_{t_i}^T i_{\text{ЗК}}^2(t) dt, \quad (4.73)$$

в ньому ліва частина відповідає енергії, яку відає ДОН ФРІ в розрядний коло, а права частина відповідає енергії, яку спожили резистивні елементи даного кола.

Струм, який відає ДОН ФРІ в розрядний колор, буде складатися з постійної складової, яка відповідає величині вільної складової струму в розрядному контурі на момент комутації, та змінної в часі складової, яка буде визначатися параметрами розрядного кола та його початковими умовами. Так як, на момент комутації (К1 – замкнений, К2 – розімкнений) усі елементи розрядного контуру з'єднані послідовно, то через них буде протікати однаковий струм. Запишемо рівняння даного кола згідно другого закону Кірхгофа

$$U = U_R(t) + U_L(t), \quad (4.74 \text{ 3.92})$$

де $U_R(t) = i_{\text{ПН}}(t) \cdot R$ – спад напруги на загальному активному опорі розрядного кола,

$U_L(t) = L \frac{di_n(t)}{dt} = \frac{L}{R} \frac{dU_R(t)}{dt}$ – спад напруги на загальній індуктивності розрядного

кола.

Згідно закону комутації струм в індуктивному елементі електричного кола не може стрибкоподібно змінитися, тому початкова умова для струму в ЕН буде визначатися кінцевим значенням струму в розрядному колі ФРІ на момент комутації

$$U_R(t=0) = R \cdot i_{\text{max}} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{\text{ЗК}}}}, \quad (4.75)$$

де i_{max} – шукане максимальне значення струму в ЕН.

Стандартним розв'язком отриманого диференційного рівняння першого порядку при заданій початковій умові є наступна часова залежність

$$i_{\text{ПН}}(t) = \frac{U}{R} + \left(i_{\text{max}} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{\text{ЗК}}}} - \frac{U}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau_n}}. \quad (4.76)$$

Запишемо рівняння енергетичного балансу за відомими часовими залежностями струмів

$$U \int_0^{t_i} \frac{U}{R} + \left(i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} - \frac{U}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau_n}} dt = R \int_0^{t_i} \left(\frac{U}{R} + \left(i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} - \frac{U}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right)^2 dt + (R_0 + R_K) \int_0^{T-t_i} \left(i_{\max} e^{-\frac{t}{\tau_{зк}}} \right)^2 dt \quad (4.77)$$

та розв'яжемо його відносно i_{\max} . Для цього необхідно знайти значення відповідних визначених інтегралів. Представимо відповідні інтеграли суми у вигляді відповідних сум інтегралів

$$\begin{aligned} \frac{U^2}{R} \int_0^{t_i} 1 dt + U i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{t}{\tau_n}} dt - \frac{U^2}{R} \int_0^{t_i} e^{-\frac{t}{\tau_n}} dt &= \frac{U^2}{R} \int_0^{t_i} 1 dt + 2U i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{t}{\tau_n}} dt - 2 \frac{U^2}{R} \int_0^{t_i} e^{-\frac{t}{\tau_n}} dt + \\ + R i_{\max}^2 e^{-2\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{2t}{\tau_n}} dt - 2U i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{2t}{\tau_n}} dt + \frac{U^2}{R} \int_0^{t_i} e^{-\frac{2t}{\tau_n}} dt + (R_0 + R_K) i_{\max}^2 \int_0^{T-t_i} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{зк}}} \right)^2 dt, \end{aligned} \quad (4.78)$$

та визначимо значення цих інтегралів в межах їх інтегрування

$$\begin{aligned} \frac{U^2}{R} \int_0^{t_i} 1 dt &= \frac{U^2}{R} t_i, \quad U i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{t}{\tau_n}} dt = \frac{L}{R} U i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right), \\ - \frac{U^2}{R} \int_0^{t_i} e^{-\frac{t}{\tau_n}} dt &= \frac{L}{R} \frac{U^2}{R} \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - 1 \right), \\ 2U i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{t}{\tau_n}} dt &= 2 \frac{L}{R} U i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right), \quad - 2 \frac{U^2}{R} \int_0^{t_i} e^{-\frac{t}{\tau_n}} dt = 2 \frac{L}{R} \frac{U^2}{R} \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - 1 \right), \\ R i_{\max}^2 e^{-2\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{2t}{\tau_n}} dt &= \frac{L}{2} i_{\max}^2 e^{-2\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \left(1 - e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} \right), \\ - 2U i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{2t}{\tau_n}} dt &= \frac{L}{R} U i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} \left(e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - 1 \right), \\ \frac{U^2}{R} \int_0^{t_i} e^{-\frac{2t}{\tau_n}} dt &= \frac{L}{R} \frac{U^2}{2R} \left(1 - e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} \right), \quad (R_0 + R_K) i_{\max}^2 \int_0^{T-t_i} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{зк}}} \right)^2 dt = \frac{1}{2} L i_{\max}^2 \left(e^{-2\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (4.79)$$

Підставимо значення інтегралів (4.79) у вираз (4.77), скоротимо та приведемо отримане квадратне рівняння до стандартного вигляду

$$L \left(2e^{-2\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} - e^{-2\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - 1 \right) i_{\max}^2 + 2 \frac{UL}{R} \left(e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) i_{\max} + \frac{U^2 L}{R^2} \left(2e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - 1 \right) = 0. \quad (4.80)$$

Як можна бачити другий член отриманого квадратного рівняння дорівнює нулю, тому його розв'язок має наступні корені

$$i_{\max} = \pm \sqrt{\frac{U^2 \left(2e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - 1 \right)}{R^2 \left(2e^{-2\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} - e^{-2\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} - 1 \right)}}, \quad (4.88)$$

дійсним коренем даного квадратного рівняння є дійсний додатній корінь значення якого знаходяться в наступних межах

$$\frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \leq i_{\max} \leq \frac{U}{R}. \quad (4.89)$$

Максимальне значення імпульсів струму в усталеному режимі роботи також можна визначити склавши різницеве рівняння. Усталений режим роботи наступить тоді, коли спад струму в розрядному контурі за міжструмову паузу в ЕН зрівняється з приростом струму в ньому під час проходження імпульсу струму в ЕН

$$i_{\max} - i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}} = \frac{U - R \cdot i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{зк}}}}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right). \quad (4.90)$$

Розв'язок даного рівняння відносно i_{\max} дозволяє отримати аналітичну залежність для визначення пікової величини ІС в ЕН в усталеному режимі роботи даної електричної схеми

$$i_{\max} = \frac{U}{R} \cdot \frac{1 - e^{-k_1}}{1 - e^{-k_2}}, \quad (4.91)$$

$$\text{де } k_1 = \frac{R}{L} t_i, \quad k_2 = \frac{R_0 + R_K}{L} T + \frac{R_H}{L} t_i.$$

На рис. 4.19 наведені залежності відносної амплітуди ІС (віднесені до максимально можливої) тривалістю 1, 2 та 3 мкс в ЕН в залежності від міжімпульсного періоду.

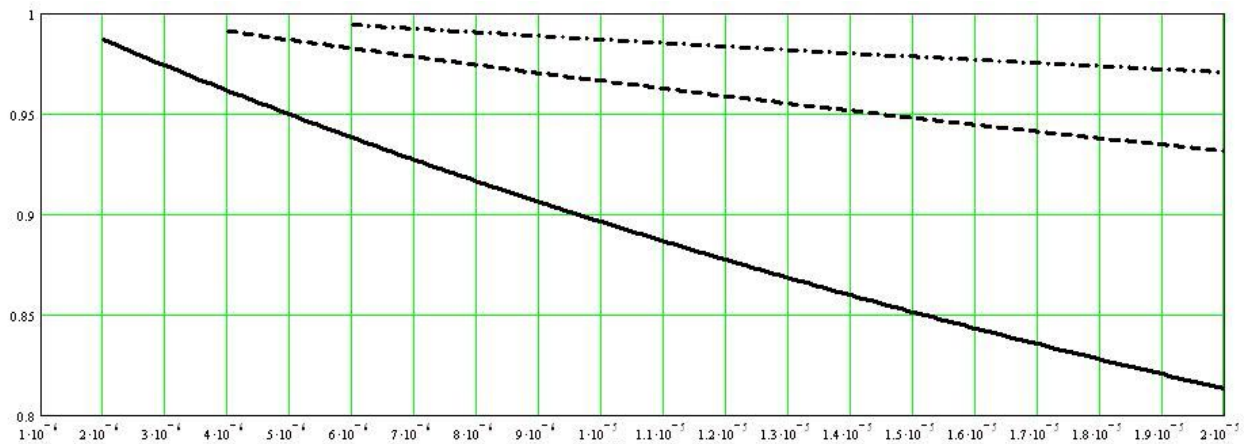


Рис. 4.19 Залежність відносної амплітуди ІС від міжімпульсного періоду для тривалості ІС 1 мкс - суцільна лінія, 2 мкс - штрихова та 3 мкс - штрих-пунктирна лінія

Так як, різній тривалості ІС в ЕН при однаковому міжімпульсному періоді відповідає різний коефіцієнт заповнення, стає доцільним побудувати залежності відносної амплітуди ІС в залежності від їх коефіцієнта заповнення. На рис. 4.20 наведені залежності амплітуди ІС в ЕН від їх коефіцієнта заповнення (відношення тривалості імпульсу струму до міжімпульсного періоду часу)

$$D = \frac{t_i}{T}. \quad (4.92)$$

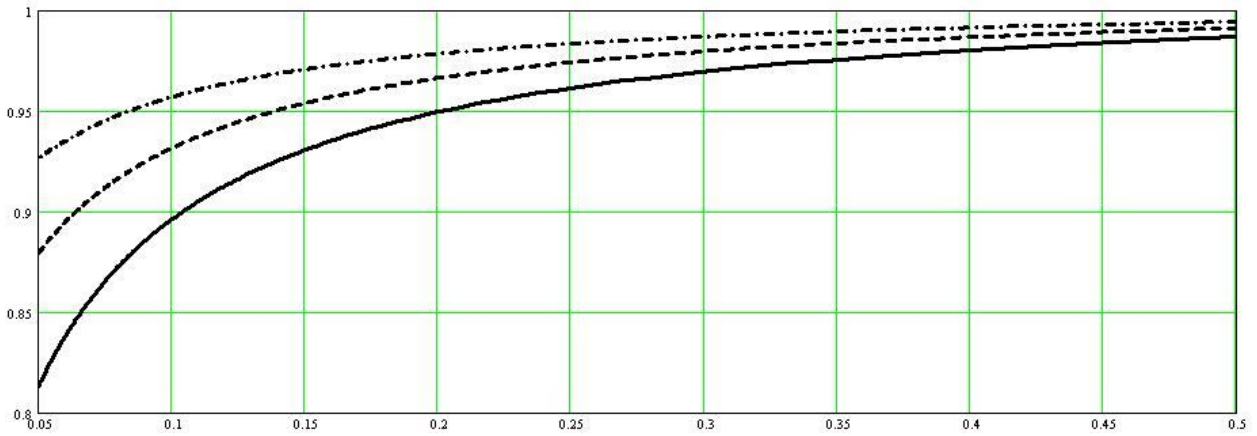


Рис. 4.20 Залежності відносної амплітуди імпульсів струму від коефіцієнта заповнення для тривалості ІС в ЕН 1 мкс - суцільна лінія, 2 мкс - штрихова та 3 мкс - штрих-пунктирна лінія

Як можна бачити з наведених на рис. 4.20 та 4.21 залежностей, відносна амплітуда ІС при великому значенні коефіцієнта заповнення майже не змінюється в залежності від його тривалості. При коефіцієнтах заповнення менших за 0,25 починається суттєве зменшення відносної амплітуди ІС в ЕН. При цьому, крутизна спадання відносної амплітуди більша у ІС з меншою тривалістю.

Тепер, коли стала відомою аналітична залежність для визначення максимального значення ІС в ЕН, стає можливим визначити середню швидкість його наростання по передньому фронту. Середня швидкість наростання імпульсу струму в електричному навантаженні визначається відношенням його максимального значення до тривалості

$$\frac{\Delta i_{\max}}{\Delta t_{\max}} = \frac{U}{RTD} \cdot \frac{1 - e^{-k_1}}{1 - e^{-k_2}}, \quad (4.93)$$

Для оцінки приросту середньої швидкості наростання ІС в ЕН по передньому фронту доцільно віднести його до середньої швидкості наростання переднього фронту першого ІС

$$\frac{\Delta i_{\max}}{\Delta t_{\max}} \Big/ \frac{\Delta i_{\max 1}}{\Delta t_{\max 1}} = \frac{i_{\max}}{i_{IH}(t = TD)} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{T}{L}(R_0 + R_K + R_H D)}}. \quad (4.94)$$

На рис. 4.21 наведено залежності середньої приведеної швидкості наростання ІС в ЕН від його коефіцієнта заповнення для тривалості ІС 1, 2 та 3 мкс.

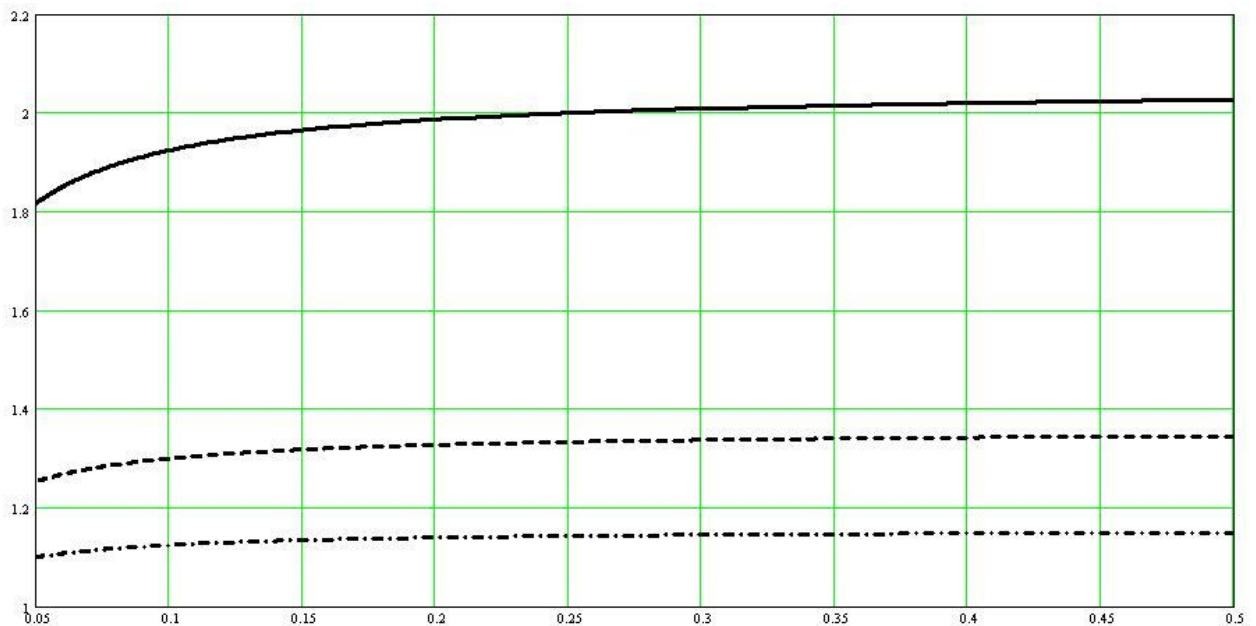


Рис. 4.21 Залежності середньої приведеної швидкості наростання ІС від коефіцієнта заповнення для тривалості 1 мкс - суцільна лінія, 2 мкс - штрихова та 3 мкс - штрих-пунктирна лінія

Як можна бачити з наведених на рис. 4.21 залежностей, при заданих параметрах розрядного кола ФРІ середня швидкість наростання ІС в ЕН зростає в усьому діапазоні коефіцієнта заповнення. Приріст середньої швидкості наростання ІС в ЕН збільшується зі зменшення його тривалості та збільшенням його коефіцієнта заповнення.

ККД даної схеми для випадків коли струм в розрядному колі ФРІ не встигає повністю зникнути за міжструмову паузу в ЕН можна визначити за наступним аналітичним виразом

$$\eta = \frac{W_H}{W}, \quad (4.95)$$

де W_H – енергія, яку споживає ЕН за одиночний ІС; W – енергія, яку віддає у розрядне коло ДОН ФРІ за одиночний ІС.

Визначимо значення цих енергій. Енергія, яку споживає ЕН за одиночний ІС, відповідає лівій частині рівняння енергобалансу (4.77). Після підстановки відповідних значень визначених інтегралів (4.79) у даний вираз отримуємо наступну аналітичну залежність

$$W = \frac{U}{R} \left(Ut_i + Li_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{\text{зк}}}} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) - \frac{UL}{R} \left(e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} - 1 \right) \right), \quad (4.96)$$

а з врахуванням аналітичної залежності (4.92) та $t_i = DT$ отримуємо

$$W = \frac{U^2}{R} \left(DT + \frac{L}{R} \left(1 - e^{-\frac{T}{L} DR} \right) \cdot \left(\frac{1 - e^{-\frac{T}{L} (DR + (1-D)(R_0 + R_K))}}{1 - e^{-\frac{T}{L} (R_0 + R_K + R_H D)}} - 1 \right) \right). \quad (4.97)$$

Згідно закону Джоуля-Ленца, енергія, яку споживає ЕН за одиночний ІС, визначається як добуток величини активного опору ЕН та визначеного інтегралу по часу від квадрату часової залежності ІС в ньому в межах його тривалості

$$W_H = R_H \int_0^{t_i} i_{\text{IH}}^2(t) dt = R_H \int_0^{t_i} \left(i_{\max} e^{-\frac{T-t}{\tau_{\text{зк}}}} e^{-\frac{t}{\tau_n}} + \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right) \right)^2 dt. \quad (4.98)$$

Визначимо цей інтеграл

$$W_H = R_H \left(\frac{L}{2R} \left(i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{\text{зк}}}} - \frac{U}{R} \right) \left(1 - e^{-\frac{2t_i}{\tau_n}} \right) + 2 \frac{UL}{R^2} \left(i_{\max} e^{-\frac{T-t_i}{\tau_{\text{зк}}}} - \frac{U}{R} \right) \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) + \frac{U^2}{R^2} t_i \right), \quad (4.99)$$

з врахуванням аналітичних залежностей (4.91) та (4.92) отримуємо

$$W_H = U^2 \frac{R_H}{R^2} \left(\frac{L}{2R} \left(\frac{e^{\frac{T}{L} (1-D)(R_0 + R_K)} + e^{\frac{T}{L} (R_0 + R_K + R_H D)} - e^{\frac{T}{L} (SR + (1-D)(R_0 + R_K))} - 1}{1 - e^{-\frac{T}{L} (R_0 + R_K + R_H D)}} \right) \left(1 - e^{-\frac{2T}{L} RD} \right) + \right. \\ \left. \frac{2L}{R} \left(\frac{e^{\frac{T}{L} (1-D)(R_0 + R_K)} + e^{\frac{T}{L} (R_0 + R_K + R_H D)} - e^{\frac{T}{L} (SR + (1-D)(R_0 + R_K))} - 1}{1 - e^{-\frac{T}{L} (R_0 + R_K + R_H D)}} \right) \left(1 - e^{-\frac{T}{L} RD} \right) + TD \right). \quad (4.100)$$

На рис. 4.22 наведено ККД даної електричної схеми при заданих параметрах електричного кола в залежності від тривалості періоду між двома послідовними ІС в ЕН.

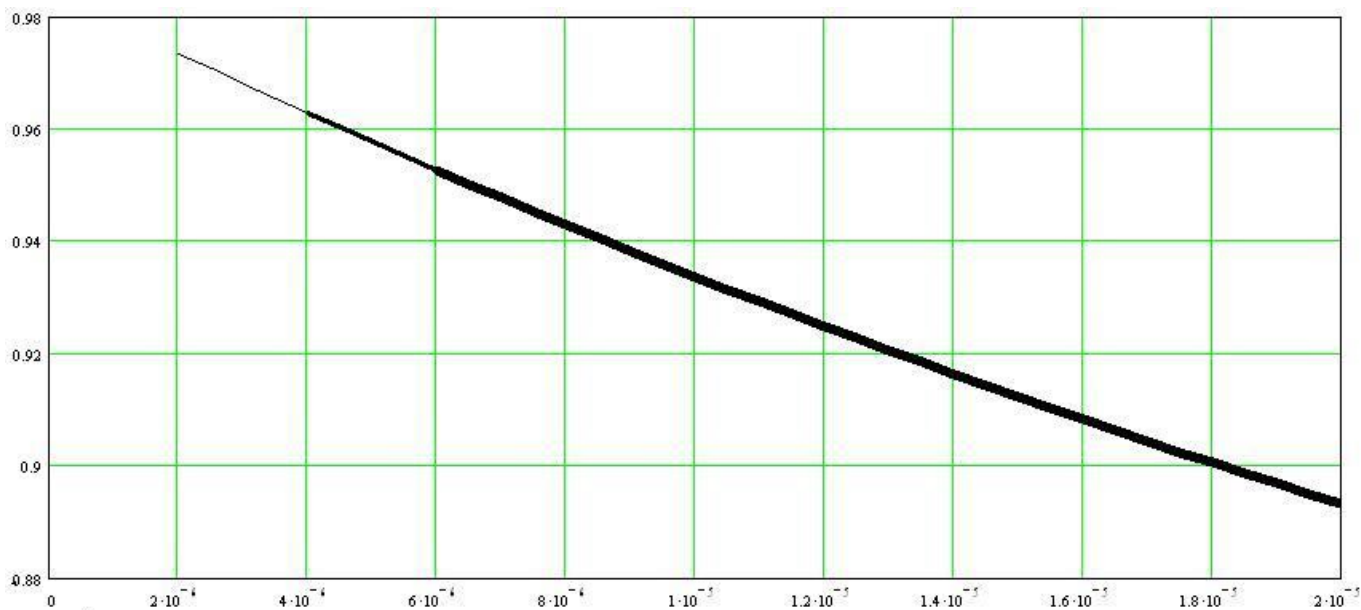


Рис. 4.22 Залежність коефіцієнту корисної дії електричної схеми від величини міжімпульсного періоду та тривалості ІС 1 мкс - тонка лінія, 2 мкс - лінія середньої товщини, 3 мкс - товста лінія

Як можна бачити, з наведених на рис. 4.22 залежностей ККД електричної схеми від величини міжімпульсного періоду, його значення не залежить від тривалості ІС в ЕН, а визначається виключно величиною міжімпульсного періоду. Зменшення міжімпульсного періоду в ЕН призводить до зростання ККД даної електричної схеми.

На рис. 4.23 наведено ККД даної електричної схеми при заданих параметрах електричного кола в залежності від коефіцієнта заповнення ІС в ЕН.

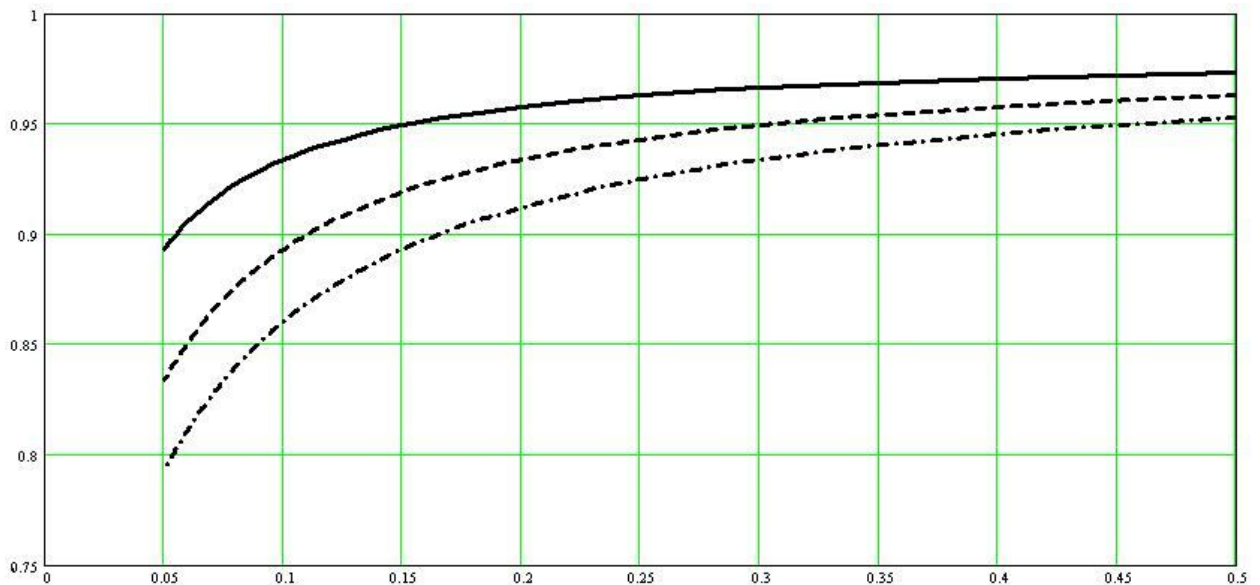


Рис. 4.23 Залежності коефіцієнту корисної дії від коефіцієнта заповнення при тривалості імпульсу струму 1 мкс - суцільна лінія, 2 мкс - штрихова та 3 мкс - штрих-пунктирна лінія

Як можна бачити, з наведених на рис. 4.23 залежностей ККД електричної схеми від коефіцієнта заповнення ІС в ЕН з різною тривалістю, ККД даної схеми зростає зі зменшенням тривалості ІС в ЕН та зі збільшенням їх коефіцієнта заповнення. Це, насамперед, обумовлено зростанням діючого значення струму, що протікає у розрядному колі ФРІ, зі збільшенням тривалості ІС в ЕН і, як наслідок, збільшення втрат енергії на його активному опорі.

Таким чином, використання даної електричної схеми зі значним значенням коефіцієнту заповнення ІС в ЕН дозволяє досягнути прийнятних значень її ККД. Крім того, зростання коефіцієнта заповнення ІС дозволяє значно підвищити середню та пікову потужність в ЕН без підвищення величини опорної напруги та (або) зменшення загальної індуктивності розрядного кола.

Пікова потужність в електричному навантаженні буде визначатися добутком його активного опору на квадрат пікового значення імпульсу струму

$$P_{II} = R_H i_{\max}^2 = U^2 \frac{R_H}{R^2} \left(\frac{1 - e^{-\frac{T}{L} DR}}{1 - e^{-\frac{T}{L} (R_0 + R_K + R_H D)}} \right). \quad (4.101)$$

Для оцінки величини приросту пікової потужності в ЕН в залежності від коефіцієнту заповнення ІС в ньому, доцільно знайти його відношення до пікового значення потужності першого ІС, що рівнозначно відношенню його до пікових значень ІС з безмежно великим міжімпульсним періодом або безмежно малим коефіцієнтом заповнення

$$\frac{P_{II}}{P_{III}} = \frac{U^2 \frac{R_H}{R^2} \left(\frac{1 - e^{-\frac{T}{L}DR}}{1 - e^{-\frac{T}{L}(R_0 + R_K + R_H D)}} \right)^2}{R_H \left(\frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \right)^2} = \frac{1}{\left(1 - e^{-\frac{T}{L}(R_0 + R_K + R_H D)} \right)^2}. \quad (4.102)$$

На рис. 4.24 наведено залежності відносного приросту пікової потужності в ЕН від коефіцієнта заповнення імпульсів струму в ньому при їх тривалості 1, 2 та 3 мкс.

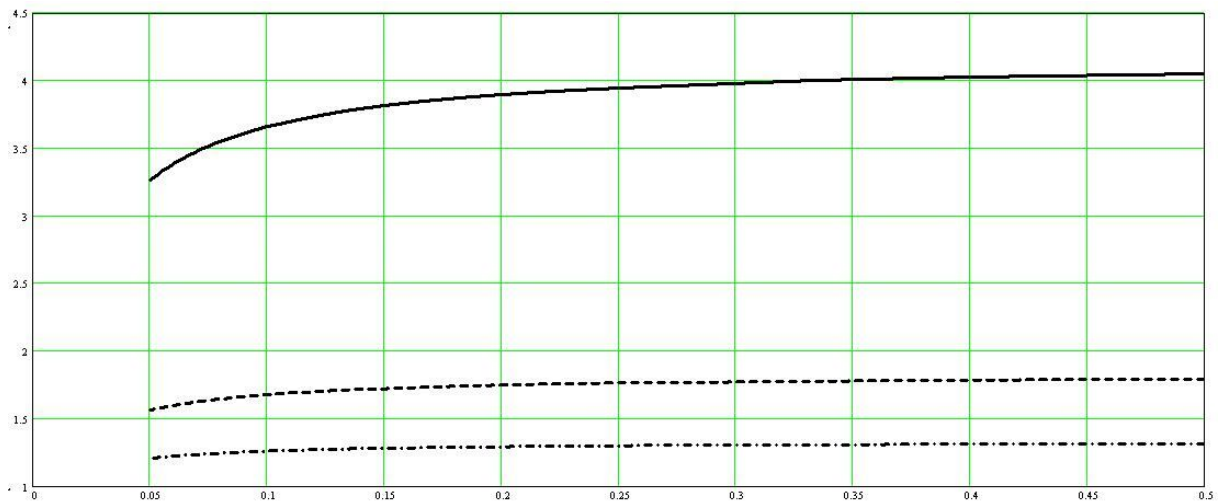


Рис. 4.24 Залежності відносного приросту пікової потужності від коефіцієнта заповнення імпульсу струму при його тривалості 1 мкс - суцільна лінія, 2 мкс - штрихова та 3 мкс - штрих-пунктирна лінія

Середню імпульсну впотужність в ЕН можна визначити через відношення енергії, яку воно споживає під час походження через нього ІС, до його тривалості. Згідно закону Джоуля-Ленца, енергія, яку споживає ЕН за одиночний ІС, буде визначається як добуток величини активного опору ЕН та визначеного інтегралу по часу від квад-

рату часової залежності ІС в ньому в межах його тривалості. Запишемо аналітичну залежність для визначення середньої імпульсної потужності в ЕН

$$P_C = \frac{W_H}{t_i} = \frac{R_H}{TD} \int_0^{TD} i_{III}^2(t) dt, \quad (4.103)$$

яка після визначення інтегралу в межах його інтегрування набуває виду

$$P_C = \frac{U^2 R_H}{TD R^2} \left(\frac{L}{2R} \left(\frac{e^{-\frac{T}{L}(1-D)(R_0+R_K)} + e^{-\frac{T}{L}(R_0+R_K+R_H D)} - e^{-\frac{T}{L}(DR+(1-D)(R_0+R_K))} - 1}{1 - e^{-\frac{T}{L}(R_0+R_K+R_H D)}} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{T}{L}RD} \right) + \frac{2L}{R} \left(\frac{e^{-\frac{T}{L}(1-D)(R_0+R_K)} + e^{-\frac{T}{L}(R_0+R_K+R_H D)} - e^{-\frac{T}{L}(DR+(1-D)(R_0+R_K))} - 1}{1 - e^{-\frac{T}{L}(R_0+R_K+R_H D)}} \right) \left(1 - e^{-\frac{T}{L}RD} \right) + TD \right), \quad (4.104)$$

Для оцінки приросту середньої імпульсної потужності в ЕН доцільно віднести значення середньої імпульсної потужності в усталеному режимі роботи до значення середньої імпульсної потужності першого ІС

$$K(D) = \frac{P_C(D)}{P_{C1}}, \quad (4.105)$$

де P_{C1} – середня імпульсна потужність першого ІС в ЕН, яка, згідно з законом Джоуля-Ленца, визначається за наступною аналітичною залежністю

$$P_{C1} = \frac{R_H}{TD} \int_0^{TD} i_{III1}^2(t) dt = \frac{U^2 R_H}{TD R^2} \left(TD + \frac{2L}{R} e^{-\frac{T}{L}DR} - \frac{L}{2R} e^{-2\frac{T}{L}DR} - \frac{3L}{2R} \right). \quad (4.106)$$

На рис. 4.25 наведено залежність приросту відносної середньої імпульсної потужності в ЕН в усталеному режимі роботи електричної схеми від коефіцієнта заповнення ІС в ньому при їх тривалості 1, 2 та 3 мкс.

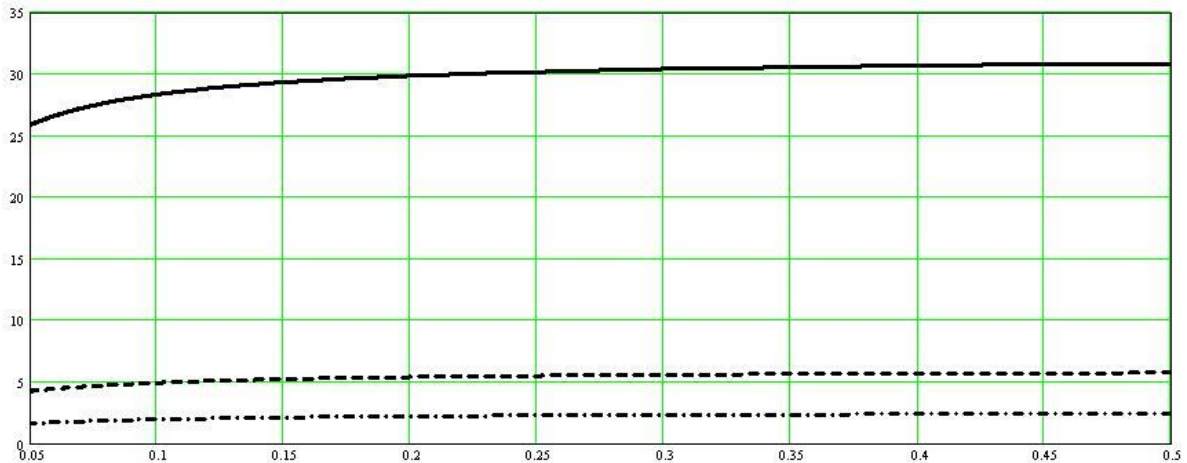


Рис. 4.25 Залежності відносного приросту середньої потужності від коефіцієнта заповнення імпульсу струму при його тривалості 1 мкс - суцільна лінія, 2 мкс - штрихова та 3 мкс - штрих-пунктирна лінія

Як можна бачити, з наведених на рис. 4.24 та 4.25 залежностей приростів відносних пікових та середніх потужностей в ЕН, зменшення тривалості ІС та збільшення його коефіцієнта заповнення призводить до їх зростання.

Середнє значення потужності, що споживається ЕН за міжімпульсний період часу в усталеному режимі роботи даної електричної схеми, буде визначатися відношенням енергії, яка передається в ЕН одиночним ІС, до його міжімпульсного періоду

$$P = \frac{W_H}{T} = \frac{W_H}{t_i} D. \quad (4.107)$$

Як можна бачити з аналітичної залежності (4.107), середня потужність, яку споживає ЕН, прямо пропорційно коефіцієнту заповнення ІС в ньому.

Таким чином, застосування наведеної на рис. 4.13 електричної схеми розрядного кола ФРІ, дозволяє отримувати в ЕН ІС заданої тривалості, яка не залежить від постійної часу релаксації струму в ньому і обмежується лише швидкодією сучасних силових НП ЕК. Дана електрична схема дозволяє значно підвищити крутизну нарощування

тання та спадання струму в ЕН по передньому та задньому фронтам, а також суттєво підіймає середню та пікову потужність, яка передається в нього.

Керування потужністю, яка передається в ЕН, можливо здійснювати в широкому діапазоні, без суттєвої втрати енергоефективності, зміною коефіцієнта заповнення ІС в ньому.

Так як, дана електрична схема дозволяє формувати ІС мікросекундного діапазону тривалості з великим коефіцієнтом заповнення, стає можливим на її базі створювати ФРІ великої потужності.

Для забезпечення високої енергоефективності роботи малопотужних ФРІ, які працюють з великим коефіцієнтом заповнення ІС в ЕН, необхідно збільшити постійну часу релаксації струму розрядного кола. Цього можна досягти шляхом збільшення індуктивності або зменшення активного опору розрядного кола. Збільшити індуктивність розрядного контуру значно простіше, але це призведе до зменшення пікових значень ІС в ЕН, тому найбільш доцільно зменшувати його активний опір. Це можливо досягти шляхом збільшення поперечного перерізу струмопровідних жил ЗП, або шляхом збільшення кількості паралельно ЗП, та використанням великої кількості паралельно з'єднаних НП ЕК та діодів.

На практиці, як ЕН так і НП силові ЕК володіють певною власною індуктивністю, що не дозволяє отримувати вертикальні фронти ІС в ЕН. Крім цього, в моменти комутації на НП ЕК можуть виникати суттєві перенапруги. Тому, в наведеній на рис. 4.13 електричній схемі, для обмеження комутаційних перенапруг паралельно до НП ЕК шунтувальної ланки необхідно приєднувати демпфіруючі R - C ланки.

На рис. 4.26 наведено результат комп'ютерного моделювання роботи даної електричної схеми з врахуванням власних індуктивностей ЕН та НП силових ЕК. Величини індуктивностей ЕН та НП силових ЕК були прийняті 0,1 та 0,05 мкГн, величини активного опору та ємності демпфіруючої R - C ланки 2,2 Ом та 47 нФ. Тривалості ІС та міжімпульсного періоду складають 1 і 20 мкс відповідно, що відповідає коефіцієнту заповнення 0,05.

На рис. 4.27 наведено результати комп'ютерного моделювання імпульсу струму в електричному навантаженні в усталеному режимі роботи даної електричної схеми.

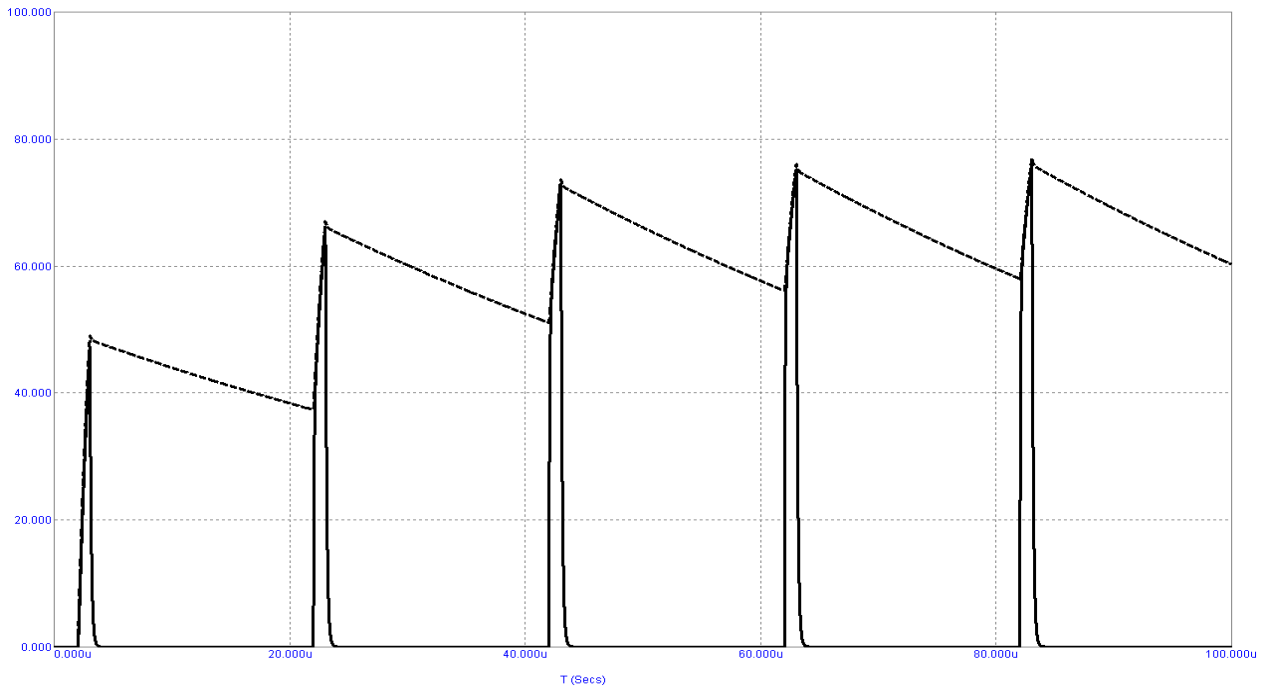


Рис. 4.26 Часові залежності струмів в електричному навантаженні
– суцільна лінія та в розрядному контурі - пунктирна лінія

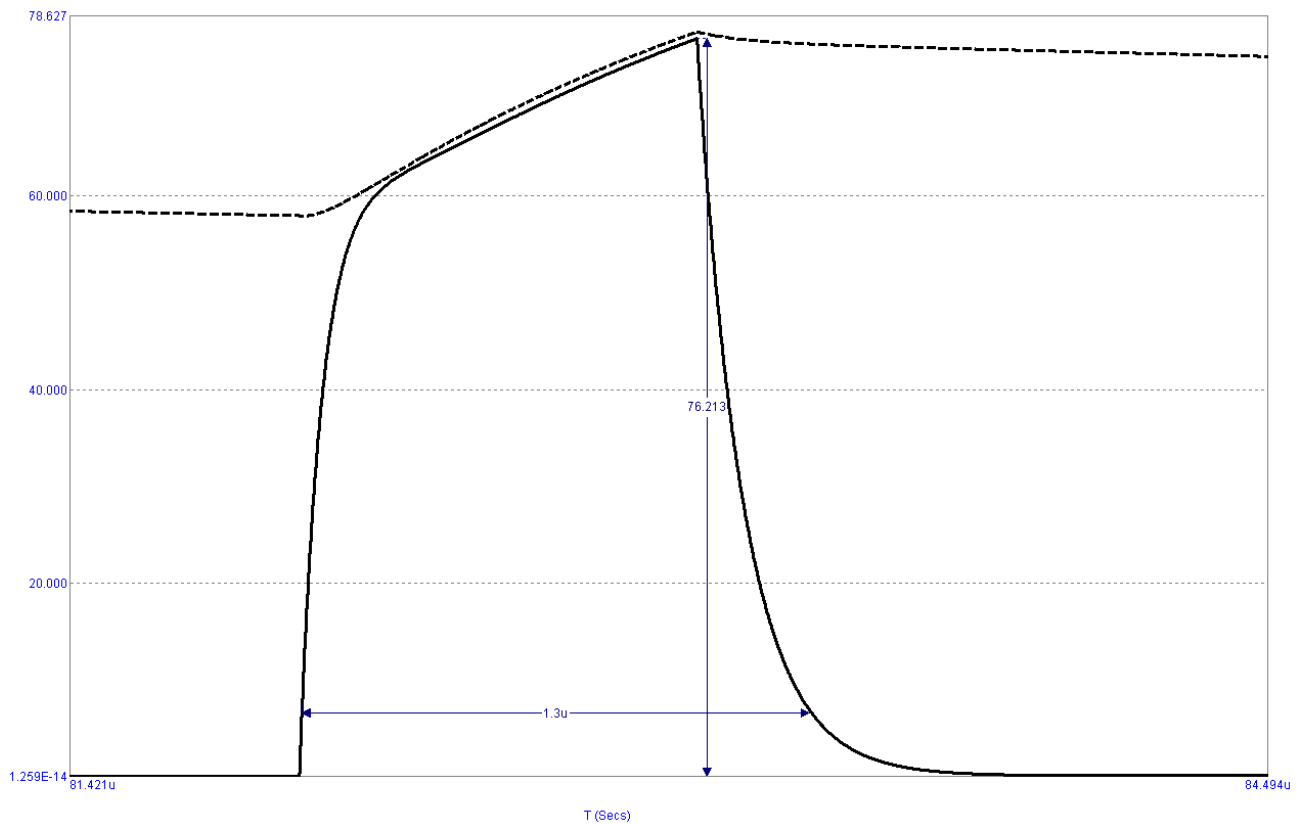


Рис. 4.27 Часові залежності струмів в електричному навантаженні
– суцільна лінія та в розрядному контурі – пунктирна лінія

Як можна бачити, з часових залежностей струмів електричному навантажені та в розрядному колі ФРІ наведених на рис. 4.26, наявні власні індуктивності ЕН та НП ЕК не викликають суттєвої зміни форми ІС в ЕН, а також суттєвого зменшення їх пікових значень. В момент комутації НП ЕК, пікові значення напруги на них незначно перевищують опорну напругу формувача розрядних імпульсних струмів.

Як можна бачити, з часової залежності струму електричному навантажені наведеної на рис. 4.27, наявні власні індуктивності ЕН та НП силових ЕК викликають незначне зменшення пікових значень ІС в ЕН. Також, у ІС з'являється аперіодичний задній фронт, який декілька збільшує його загальну тривалість, а у переднього фронту з'явився початковий нахил.

Для підтвердження достовірності результатів отриманих аналітичним методом та шляхом комп'ютерного моделювання була побудована малопотужна фізична модель схеми наведеної на рис. 4.13. В якості ЕН були застосовані малоіндуктивні резистори з загальним електричним опором 1 Ом, загальна індуктивність розрядного контуру становить приблизно 2 мкГн.

На рис. 4.28 та 4.29 наведені осцилограми імпульсів струму в ЕН з вимкненою та ввімкненою шунтувальною ланкою відповідно. Міжімпульсний період становить приблизно 6,25 мкс при заданій тривалості переднього фронту розрядного ІС 0,878 мкс, що відповідає коефіцієнту заповнення 0,14.

Як можна бачити з наведених на рис. 4.28 та 4.29 осцилограм, застосування шунтувальної ланки в даному випадку дозволило зменшити загальну тривалість імпульсу струму в ЕН по рівню 0,1-0,1 максимального значення з 4,4 до 1,13 мкс, тобто 3,89 рази, збільшити амплітуду розрядних імпульсів струму 1,625 рази, збільшити максимальну імпульсну потужність у 2,64 рази, та, що саме головне, збільшити швидкість наростання струму по передньому фронту у 8,835 рази.

У даному випадку, приведена до 1 В швидкість наростання струму в ЕН по передньому фронту при використанні шунтувальної ланки становить 2,85 А/В·мкс, яку можна досягти у схемі без шунтувальної ланки тільки зменшив загальну індуктивність розрядного кола приблизно на порядок, що є практично недосяжним.

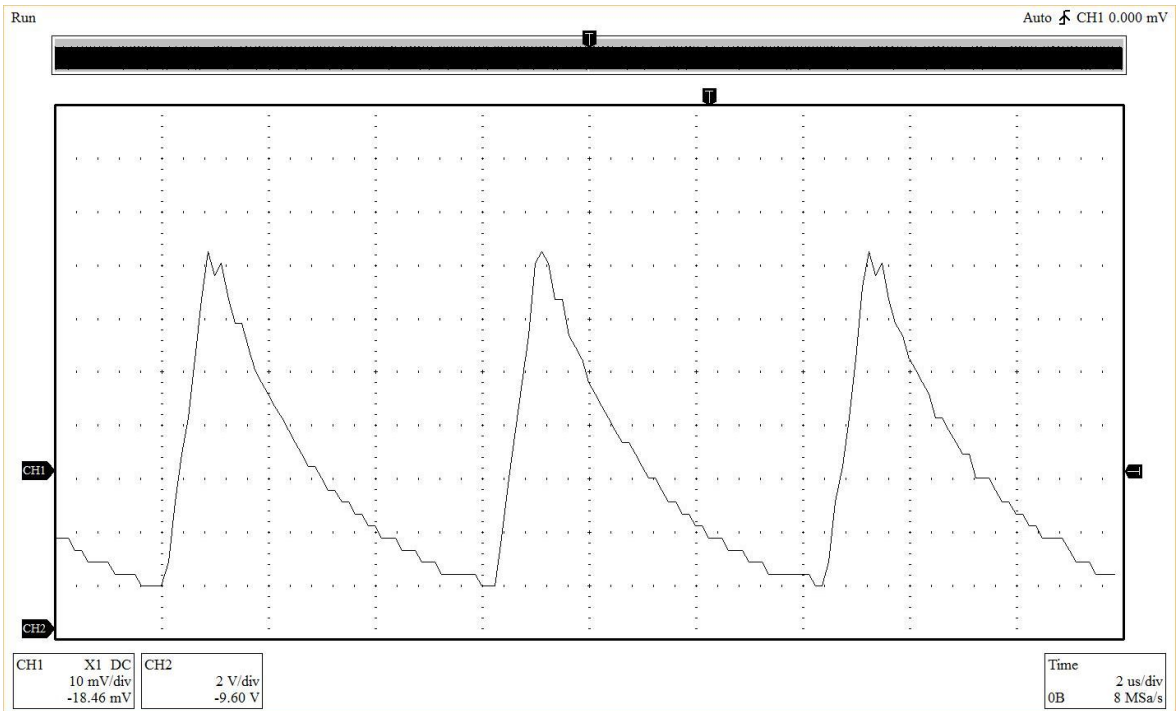


Рис. 4.28 Осцилограма імпульсів струму в електричному навантаженні з вимкненою шунтувальною ланкою

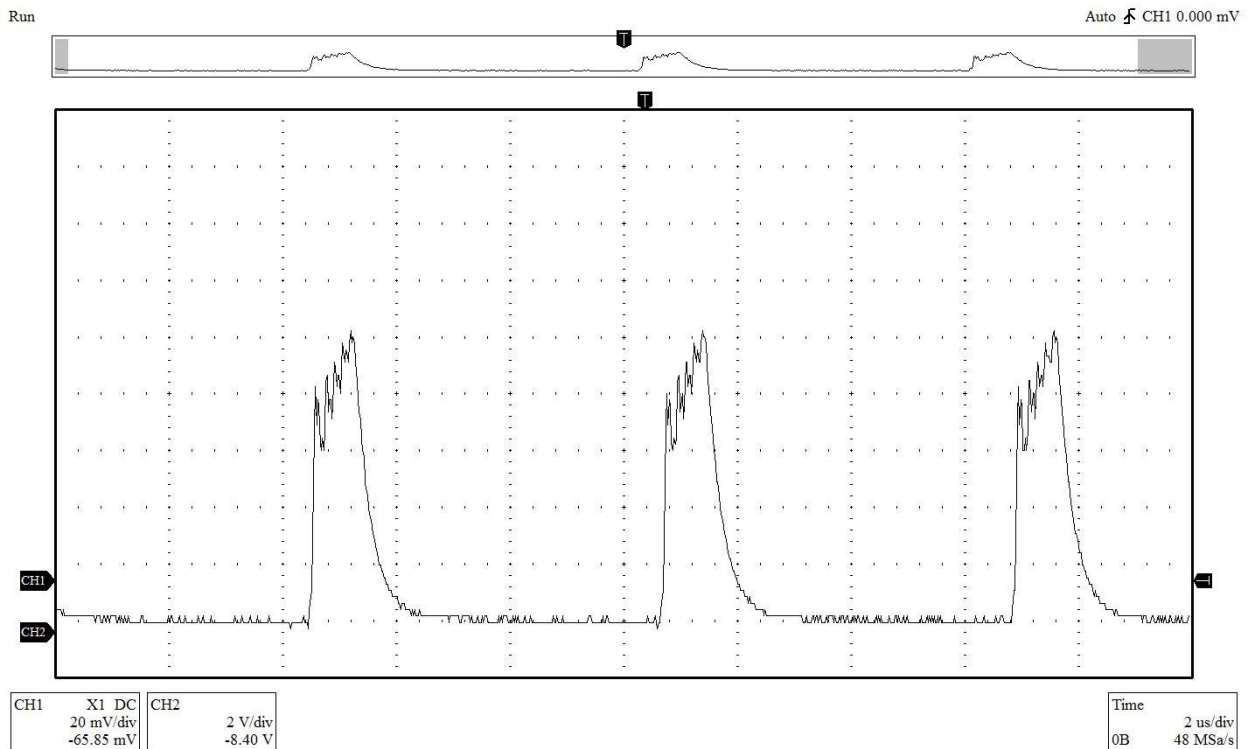


Рис. 4.29 Осцилограма імпульсів струму в електричному навантаженні з ввімкненою шунтувальною ланкою

Висновки до розділу 4

1. Отримані в дисертації аналітичні вирази використано для розробки методик розрахунку взаємозалежних перехідних процесів у колах електророзрядних установок з накопичувальними конденсаторами та керованими напівпровідниковими комутаторами у всій часовій області змінення електричного опору їхнього навантаження.

2. Удосконалено метод підвищення динамічних характеристик розрядного струму у навантаженні електророзрядних установок введенням в їхні розрядні кола керованих напівпровідникових комутаторів струму та алгоритмів узгодженого змінення структури цих кіл під час спадання імпульсних струмів у навантаженні та при підключенні до них заряджених накопичувальних конденсаторів.

Такий метод забезпечує подальше підвищення динамічних характеристик електророзрядних установок за рахунок зменшення (зазвичай більше, ніж у 10 разів) тривалості фронтів спадання імпульсних струмів в навантаженні.

3. Розроблено метод аналізу взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струмів у колах змінної структури електророзрядних установок, який забезпечує отримання та розв'язання відповідних різницевих рівнянь і визначення граничних динамічних характеристик імпульсних струмів при різних усереднених опорах навантаження.

4. Розроблені методики використанні при створенні ЕРУ з підвищеними динамічними параметрами розрядних імпульсних струмів у відділі електроживлення технологічних систем Інституту електродинаміки НАН України, загальний вигляд яких приведено у додатку М.

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 різнице-вих рівнянь 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).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учебное пособие: В 2 т.: Обработка материалов с применением инструмента / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова и др.; под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. Т 1. 247 с.
2. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учебное пособие: В 2 т.: Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии / Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова и др.; под ред. В.П. Смоленцева.– М.: Высшая школа, 1983. Т 2. 208 с.
3. Артамонов Б.А., Круглов А.И., Стебаев Л.И. Генераторы импульсов для электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1976. 48 с.
4. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов / У.А. Асанов, А.Д. Цой, А.А. Щерба, В.И. Казекин. Фрунзе: Илим, 1990. 256 с.
5. Баранов М.И., Белый И.В. Переходный процесс при разряде конденсатора на коаксиальную систему цилиндрических проводников с активно-индуктивной нагрузкой. *Электричество*. 1978. № 8. С. 33–37.
6. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Магнито-импульсная обработка тонкостенных металлов. Харьков: МОСТ–Торнадо, 2002. 288 с.
7. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. 168 с.
8. Бердинских Г.С. О методике определения параметров зарядных устройств. Вестник Киевского политехнического института. *Сер. Электроэнергетика*. 1974. № 11. С. 26–29.
9. Бертинов А.И., Гершберг В.С., Кофман Д.Б. Регулируемый статический преобразователь для заряда емкостного накопителя. К.: Устройства преобразовательной техники, 1969. Вып. 2. С. 205–218.
10. Емкостной накопитель большой энергии с использованием серийных тиристоров в качестве управляемых коммутаторов / Григорьев А.В., Заенц С.Л., Кручинин А.И. Источники электропитания кратковременных и импульсных нагрузок большой мощности. Л.: ВНИИэлектронмаш. 1981. С. 131–133.

11. Булатов О.Г., Иванов В.С., Панфилов Д.И. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии. М.: Радио и связь, 1986. 160 с.
12. Вовченко А.И., Дивак Н.П., Тертилов Р.В. Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них. *Техн. електродинаміка*. 2009. № 6. С. 54–60.
13. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно импульсных технологий. *Національний університет кораблебудування: зб. наук. пр.*, 2010. № 4. С. 118–124.
14. Волков И.В., Закревский С.И. Импульсный заряд емкостных накопителей энергии. Проблемы технической электродинамики, 1969. Вып. 19. С. 83–87.
15. Волков И.В., Пентегов И.В. Оптимальные процессы заряда емкостных накопителей. Изв. вузов СССР. Энергетика, 1967. № 4. С. 25–28.
16. Аналитическое исследование некоторых методов зарядки конденсатора от источника переменного тока / А.А. Воробьев, Е.И. Глузберг, К.Г. Сулимов и др. Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция. М.: Энергия, 1970. С. 539–546.
17. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. К.: Наукова думка, 1982. 424 с.
18. Пентегов И.В., Волков И.В. Оптимизация зарядного процесса индуктивных накопителей энергии. Изв. АН СССР. Сер. *Энергетика и транспорт*. 1969. № 1. С. 163–167.
19. Пентегов И.В. Основы теории и расчета зарядных цепей емкостных накопителей энергии. Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.09.05 "Теоретическая электротехника". К., 1974. 56 с.
20. Пентегов И.В., Волков, И.В. Про оптимальный закон зарядки батарей конденсаторов. Доп. АН УРСР, 1966. №4. С. 477–479.
21. Исследование зарядных устройств конденсаторных сварочных машин / Пентегов И.В., Стемковский Е.П., Шейковский Д.А., Мещеряк С.Н. *Автомат. сварка*. 1974. № 4. С. 23–26.

22. Песоцкий В.С. Анализ энергетических показателей зарядной цепи R,L,C. Импульсная электроэнергетика. Казань: КВКПУ, 1970. С. 134–140.

23. Петков А.А. Синтез разрядных цепей емкостных накопителей энергии для формирования больших импульсных токов с нормированными параметрами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.13. – Харьков, 2012. – 428 с.

24. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. К.: Наукова думка, 1982. 424 с.

25. Способ получения порошков и устройство для его осуществления: А.с. 70000 СССР. / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко (СССР). № 1371/321510; заявл. 01.04.1943; опубл. 19.11.1964. Бюл. № 22. С. 120.

26. Способ обработки металлов, сплавов и других токопроводящих материалов: А.с. 70010 СССР. / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко (СССР). № 8959/321923/25-4; заявл. 03.04.1943; опубл. 04.02.1971, Бюл. № 7. С. 205.

27. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Физика электроискрового способа обработки металлов. М.: ЦБТИ МЭП, 1946. 76 с.

28. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая эрозия металлов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1944. 28 с.

29. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка металлов. М.: Госэнергоиздат, 1950. 120 с.

30. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н. Моделирование процессов в цепи разряда конденсатора на искроэрозионную нагрузку. *Электрон. моделирование*. 2012. Т. 34. № 6. С. 73–81.

31. Шидловский А.К., Щерба А.А. Повышение эффективности электропитания технологических линий электроэрозионного диспергирования металлов. Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий. Комсомольск-на-Амуре: КАПИ, 1986. С. 102–103.

32. Шидловский А.К., Щерба А.А., Захарченко С.Н. Перспективы применения искроэрозионной коагуляции в системах водоподготовки тепловых сетей. *Энергетика и электрификация*. 2002. № 12. С. 34–41.

33. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А. Полупроводниковый преобразователь для установки электроимпульсной обработки металлов. *Техн. електродинаміка*. 1987. № 5. С. 30–37.

34. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А. Стабилизация режимов объемного электроэрозионного диспергирования металлов. Состояние и перспективы развития электротехнологии. Иваново: ИЭИ им. Ленина, 1985. Ч. 2. С. 161–162.

35. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А. Формирование выходных характеристик преобразователя с учетом свойств объемной электроэрозионной нагрузки. *Техн. електродинаміка*. 1988. №1. С. 28–34.

36. Повышение качественных показателей и стабилизации электроэрозионного диспергирования металлов с учетом взаимного влияния характеристик источника питания и технологического аппарата / Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А., Карвовский В.Б. Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий. Комсомольск-на-Амуре: КАПИ, 1986. С. 98–99.

37. Щерба А.А. Принципы построения и стабилизации параметров полупроводниковых электроимпульсных систем электроискрового диспергирования слоя токопроводящих материалов. Стабилизация параметров электрической энергии. К.: ИЭД АН Украины, 1991. С. 12-30.

38. Щерба А.А. Тиристорные системы электропитания технологических установок с параметрической стабилизацией выходных характеристик. Преобразование и стабилизация параметров электрической энергии. К.: ИЭД НАНУ, 1996. С. 18-27.

39. Щерба А.А., Дубовенко К.В. Высоковольтные электроразрядные компактные системы. К.: Наукова думка, 2008. 299 с.

40. Щерба А.А., Захарченко С.Н. Стабилизация и регулирование параметров разрядных импульсов в системах объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред. *Праці ІЕД НАНУ, Електродинаміка*, 2001. С. 30–35.

41. Применение объемного электроискрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов / Щер-

ба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Афтандилянц Е.Г. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2009. № 22. С. 74–79.

42. Разрядно-импульсные системы производства нанокolloидных растворов биологически активных металлов методом объемного электроискрового диспергирования / А.А. Щерба, С.М. Захарченко, К.Г. Лопатько, Н.И. Шевченко, Н.А. Ломко. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2010. № 26. С. 152–160.

43. Технологическая система объемного электроискрового обеззараживания воды: влияние параметров разрядов на антимикробный эффект / Щерба А.А., Захарченко С.Н., Савлук О.С., Потапченко Н.Г. *Техн. електродинаміка*. Тем. вип. “Силовая электроника и энергоэффективность”. 1998. Т. 2. С. 41–46.

44. Повышение энергоэффективности электрофизических методов очистки сточных вод от органических загрязнений / А.А. Щерба, С.Н. Захарченко, Н.И. Шевченко и др. *Техн. електродинаміка*. Тем. вип. “Силовая электроника и энергоэффективность”. 2007. Т. 5. С. 75–79.

45. Стабілізація режимів електротехнологічних систем для отримання іскроерозійних мікро- та нанопорошків / А.А. Щерба, С.М. Захарченко, М.І. Шевченко и др. *Техн. електродинаміка*. Тем. вип. “Силовая электроника и энергоэффективность”. 2006. Т. 1. С. 120–123.

46. Развитие систем получения ультрадисперсных искроэрозионных порошков: влияние вибрации на параметры разрядных импульсов и характеристики продукции / Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Лопатько К.Г., Афтандилянц Е.Г., Святненко В.А. *Техн. електродинаміка*. Темат. вип. “Проблеми сучасної електротехніки”. 2008. Ч. 4. С. 107–112.

47. Щерба А.А., Иванов А.В. Высоковольтный электротехнический комплекс для электроразрядной обработки расплавов металлов с повышенной интенсивностью электросилового воздействия и перемешивания. *Электронная обработка материалов*. 2014. № 2. С. 108–116.

48. Щерба А.А., Иванов А.В. Электротехнические компактные системы обработки расплавов металлов высоковольтными электроразрядными импульсами. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 36. С. 96–102.

49. Математическое моделирование динамических параметров при электроразрядном взрыве проводников / А.А. Щерба, Д.Е. Куприн, Н.И. Кускова, С.В. Петриченко, Н.И. Супруновская. *Техн. електродинаміка*. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". 2006. Ч. 5. С. 94–97.

50. Развитие метода и совершенствование оборудования объемного электроискрового диспергирования гранул сплавов в криогенных жидкостях / Захарченко С.Н., Шевченко Н.И., Масловский В.А., Супруновская Н.И. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2006. Вип. 2(14). С. 161–164.

51. Стабилизация параметров систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред / Захарченко С.Н., Шевченко Н.И., Масловський В.А., Супруновская Н.И. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2005. Вип. 2(11). Ч. 2. С. 9–13.

52. Анализ эффективности искроэрозионной коагуляции и импульсного подводного искрового разряда при деструкции органических соединений в водных растворах / Захарченко С.Н., Шевченко М.И., Супруновская Н.И., Соломенцева И.М. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2007. Вип. 1 (16). С. 42–45.

53. Супруновская Н.И. Анализ неустойчивости переходных процессов при разряде конденсатора на электроискровую нагрузку. *Техн. електродинаміка*. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". 2008. Ч. 3. С. 29–32.

54. Лившиц А.Л., Отто М.А. Импульсная электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983. 352 с.

55. Лившиц А.Л., Рогачев И.С., Отто М.Ш. Генераторы импульсов. М.: Энергия, 1970. 224 с.

56. Вовк И.Т., Вовченко А.И., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития силового высоковольтного оборудования для электрогидроимпульсных технологий. *Техн. електродинаміка*. 2002. №2. С. 63–67.

57. Вовченко А.И., Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины (обзор). *Техн. електродинаміка*. 2010. № 5. С. 69–74.

58. Вовченко А.И., Дивак Н.П., Тертилов Р.В. Оптимизация электрогидроимпульсных технологий и выбор соответствующих режимов работы источников энергии для них. *Техн. електродинаміка*. 2009. № 6. С. 54–60.
59. Вовченко А.И., Кривицкий Е.В., Бондарец Л.М. Электрические характеристики подводного искрового разряда. Физические основы электрогидравлической обработки материалов. К.: Наукова думка, 1978. С. 14–25.
60. Вовченко А.И., Позднеев В.А., Штомпель И.В. Параметры подводного электрического разряда в условиях сложного энерговода. *Техн. електродинаміка*. 1985. № 3. С. 16–19.
61. Вовченко А.И., Посохов А.А. Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. К.: Наукова думка, 1992. 168 с.
62. Вовченко А.И., Посохов А.А., Позднеев В.А. Электродинамические характеристики высоковольтного электрохимического взрыва. Физико-технические аспекты электровзрывного преобразования энергии. К.: Наукова думка, 1990. С. 30–42.
63. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно импульсных технологий. *Національного університету кораблебудування*: зб. наук. пр. 2010. № 4. С. 118–124.
64. Калеко Д.М., Моравский В.Э., Чвертко Н.А. Ударная конденсаторная сварка. К.: Наук. думка, 1984. 307 с.
65. Spark erosion: a high production rate method for producing $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ nanoparticles with enhanced thermoelectric performance / Nguyen P.K., Lee K.H., Moon J., Kim K.A., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S. and Berkowitz A.E. *Nanotechnology*. 2012. № 23. P.1–7.
66. Nguyen P.K., Sungho J., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 115. Iss. 17. P. 17A756-1.
67. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion / A.E. Berkowitz, M.F. Hansen, F.T. Parker, K.S. Vecchio, F.E. Spada, E.J. Lavernia, R. Rodriguez. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*. 2003. January, V. 254–255. Pp. 1–6.

68. Hollow metallic microspheres produced spark erosion / Berkowitz A.E., Harper H., Smith D.J., Hao Yu, Jiang Q., Solomon V.C., Radousky H.B. *Applied Physics Letters*. 2004. V. 95. P. 940.

69. Berkowitz A.E., Walter J.L. Spark Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine powders. *J. of Mater. Res.* 1987. March/April, 2 (2). Pp. 277–288.

70. Carrey J., Radousky H.B., Berkowitz A.E. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters. *Journal of Applied Physics*. 1 February 2004. V. 95. № 3. P. 823–829.

71. Ishibashi W., Araki T., Kisimoto K., Kuno H. Method of producing Pure Aluminum by Spark Discharge Process and the Characteristics there of. *Creamier Japan*. 1971. N. 6. P. 461–468.

72. Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Многоуровневая модель взаимозависимых переходных процессов в цепях электроразрядных установок со стохастической нагрузкой. *Техн. електродинаміка*. 2013. №5. С. 5–13.

73. Применение обратных преобразователей для регулирования и стабилизации напряжения емкостных накопителей разрядно-импульсных систем / Щерба А.А., Захарченко С.Н., Шевченко Н.И., Супруновская Н.И., Масловский В.А. *Техн. електродинаміка*, Тем. вип.: "Силовая електроніка та енергоефективність". Ч. 1. 2005. С. 53–56.

74. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Шевченко Н.И. Стабилизация длительности разрядных токов в нагрузке, формируемых тиристорным преобразователем с отрицательной обратной связью по напряжению. *Фізика імпульсних разрядів в конденсованих середовищах*: мат. XV МНК (15–19.08.2011). Миколаївська обласна друкарня. 2011. С. 193–196.

75. Синтез зарядно-разрядных цепей тиристорных формирователей разрядных импульсов с положительной обратной связью по напряжению / Щерба А.А., Супруновская Н.И., Маслак Л.П., Белецкий О.А. Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. 2013. Спец. вып. № 8 (114). Т. 2. С. 90–95.

76. Параметрический синтез зарядной и разрядной цепей конденсатора в тиристорных формирователях разрядных импульсов с положительной обратной связью по напряжению / Щерба А.А., Супруновская Н.И., Маслак Л.П., Белецкий О.А.

Докл. МНТК "Силовая электроника и энергоэффективность". 23-27.09.2013. Алушта, Крым. ISSN 2307-857X–1. (Эл. опт. диск (CD ROM), 12 см.

77. Синтез цепей конденсатора в тиристорных формирователях разрядных импульсов с регулируемой обратной связью по напряжению / Супруновская Н.И. [Электронный ресурс]: Международная научно-техническая конференция "Силовая электроника и энергоэффективность" 23-27.IX.2013, Алушта, Крым ISSN 2307-857X – 1 электрон. опт. диск (CD ROM); 12 см.

78. Супруновская Н.И. Анализ взаимосвязанных зарядно-разрядных процессов конденсатора в цепях с положительной обратной связью по напряжению. *Техн. електродинаміка*. 2017. № 4 С. 14–21.

79. Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Многоуровневая модель взаимозависимых переходных процессов в цепях электроразрядных установок со стохастической нагрузкой. *Техн. електродинаміка*. 2013. № 5. С. 5–13.

80. Liu Y., Li X., Li Y., Zhao Zh., Bai F. The lattice distortion of nickel particles generated by spark discharge in hydrocarbon dielectric mediums. *Applied Physics A*. 2016. Vol. 122. Pp. 174-1 – 174-9.

81. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient analysis in circuits of electric discharge installations with voltage feedback taking into account the recovery time of locking properties their semiconductor switches. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 43–47.

82. Analysis, design and experimental results of a high frequency power supply for spark erosion / Casanueva R., Azcondo F.J, Branas C., Bracho S. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2005. Vol. 20. Pp. 361–369. DOI:

83. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. Vol. 51 (6). Pp. 581-588.

84. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency / Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118.

85. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids / Ochin P., Gilchuk A.V, Monastyrsky G.E., Koval Yu.N., Shcherba A.A, Zaharchenko S.N. Materials Science Forum. 2013. Vol. 738. Pp. 451–455.

86. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion / Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. 2003. Vol. 254–255. Pp. 1–6.

87. Spark erosion: a high production rate method for producing $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ nanoparticles with enhanced thermoelectric performance / Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Nanotechnology. 2012. Vol. 23. Pp. 415604-1 – 415604-7.

88. Применение объемного электроискрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов / Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатько К.Г., Афтандилянц Е.Г. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2009. Вип. 22. С. 74–79.

89. Лопатько К.Г., Мельничук М.Д. Фізика, синтез та біологічна функціональність нанорозмірних об'єктів. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2013. 297 с.

90. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency / Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Journal of Electrostatics. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118.

91. Фостер Л. Нанотехнологии, наука, инновации и возможности / пер. с англ. М.: Техносфера, 2008. 352 с.

92. Чекман І.С., Сердюк А.М., Кундієв Ю.І. Нанотоксикологія: напрямки досліджень. Довкілля та здоров'я. 2009. № 7. С. 3–7.

93. Шуленбург М. Нанотехнологии. Новинки завтрашнего дня. Люксембург. Служба по официальным изданиям ЕС, 2006. 60 с.

94. Nanoparticles: structure, properties, preparation and behavior in environmental media / P. Christian, V. Kammer, P. Balousha et al. Ecotoxicology, 2008. V. 17. P. 326–343.

95. Щерба А.А., Муратов В.А., Карвовский В.В. Влияние характеристик источников питания и технологического аппарата на производительность искрового диспергирования металлов в слое гранул. Состояние и перспективы развития электро-технологии (П Бенардосовские чтения) т. П. Иваново, 1985. С. 104–105.

96. Щерба А.А., Шидловський А.К., Муратов В.А. Повышение качественных показателей и стабилизация электроэрозионного диспергирования металлов с учетом взаимного влияния характеристик источника питания и технологического аппарата. Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов пром. предприятий. КНА-ПИ, 1986. С. 86–88.

97. Щерба А.А., Петриченко С.В. Физическое моделирование и анализ динамики процессов при электроэрозионном диспергировании токопроводящих гранул в жидкости. *Техн. електродинаміка*. 2004. № 3. С. 27–32.

98. Компьютерный анализ характеристик микрочастиц, получаемых искроэрозионным диспергированием слоя металлических гранул в жидкости / Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Перекос А.Е., Щербина В.В. *Праці ІЕД НАН України*, 2005. № 1. С. 128–135.

99. Синтез ультра и нано размерных частиц биогенных металлов методом объемного электроискрового диспергирования / Щерба А.А., Лопатько К.Г., Афтандиянц Е.Г., Захарченко С.Н. // *Вісн. ХНТУСГ*. – Вип. 96. Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. 2010. С. 25–35.

100. Decrease of transients duration and improvement of dynamic characteristics of electrical discharge installations by changing the structure of their discharge circuit / Suprunovskaya N.I., Shcherba M.A., Peretyatko Yu.V., Roziskulov S.S. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 15–18.

101. Долбня В.Т. Топологический анализ и синтез электрических и электро-механических систем. Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. 356 с.

102. Захарченко С.Н. Моделирование зависимости электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока. *Техн. електродинаміка*. 2012. № 5. С. 17–27.

103. Захарченко С.Н. Повышение эффективности получения ультрадисперсных частиц металлов объемным электроэрозионным диспергированием их гранул в жидкости. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 1. С. 16–23.

104. Супруновская Н.И. Метод формирования мощных разрядных импульсов с повышенной скоростью нарастания токов в нагрузке. *Техн. електродинаміка*. 2012. № 2. С. 109–110.

105. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н. Моделирование процессов в цепи разряда конденсатора на искроэрозионную нагрузку. *Електрон. моделювання*. 2012. Т. 34. № 6. С. 73–81.

106. Захарченко С.Н., Руденко Ю.В. Сравнительный анализ алгоритмов импульсного заряда емкостных накопителей энергии для систем плазмоэрозионной обработки гетерогенных токопроводящих сред. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 37. С. 100–108.

107. Кныш В.А. Энергетические характеристики вентильной системы заряда накопительного конденсатора с ограничивающим линейным дросселем. Л.: ЛВИКА, 1969. Вып. 543. С. 33–39.

108. Байков А.П., Искольдский А.М., Нестерихин Ю.Е. Электрический взрыв проволок при высоких скоростях ввода энергии. *Журн.техн.физ.* 1973. Т. 43. Вып. 1. С. 136-140.

109. Лившиц А.Л., Рогачев И.С. Генераторы периодических импульсов сильного тока. М.: Госэнергоиздат, 1959. 199 с.

110. Кныш В.А. Полупроводниковых преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. Л.: Энергоиздат, 1981. – 160 с.

111. Анализ стабилизации режимов высокочастотного генератора импульсов с помощью математического моделирования / Милях А.Н., Щерба А.А., Ющенко Б.А., Казекин В.И. Проблемы преобразовательной техники. Ч. 1. К.: ИЭД АН УССР, 1983. С. 190–193.

112. Исследование переходных процессов в разрядных контурах импульсных высоковольтных устройств / Дульзон А.А., Каляцкий И.И., Кисилев Г.А., Фортес Ю.Б. *Електрон. обраб. матеріалів*. 1968. № 5. С. 3–9.

113. Изотов В.Ю., Громадский Д.Г., Малетин Ю.А. Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатора. *Наук. вісті НТУУ "КПІ"*. 2008. № 6. С. 114–118.
114. Каляцкий И.И., Семкин Б.В., Халилов Д.Д. К анализу энергетических характеристик искры в контуре RLC. *Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция*. М.: Энергия, 1970. С. 242–247.
115. Теоретичні основи електротехніки / Карпов Ю.О., Ведміцький Ю.Г., Кухарчук В.В. та ін. Вінниця: ВНТУ, 2011. 530 с.
116. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
117. Кравченко В.И., Петков А.А. Параметрический синтез высоковольтного импульсного испытательного устройства с емкостным накопителем энергии. *Електротехніка і електромеханіка*. 2007. № 6. С. 70–75.
118. Круглов А.И. Требования к генераторам и схемы генераторов для электроискровой обработки металлов с емкостным накопителем энергии. *Проблемы электрической обработки материалов*. М.: 1960. С. 152–187.
119. Месяц Г.А. Взрывная электронная эмиссия и порционная модель электрической дуги. *Вестник РАН*. 2014. Т. 84. № 7. С. 579–583.
120. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. К.: Наукова думка, 1974. 276 с.
121. Тиристоры: [справочник] / О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, С.Л. Пожидаев. М.: Радио и связь, 1990. 272 с.
122. Кривицкий Е.В., Апостоли В.Л., Сорочинский А.П. Проводимость канала подводного искрового разряда. *Электрон. обраб. материалов*. 1968. № 6. С. 34–37.
123. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. К.: Наукова думка, 1986. 208 с.
124. Милях А.Н., Барабанов В.А., Щерба А.А. Исследование характеристик источников питания со стабилизацией потребляемой мощности. *Процессы в устройствах преобразования параметров электрической энергии*. К.: Наукова думка, 1983. С. 24–28.

125. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Методы генерации и физические эффекты, связанные с созданием импульсных полей мегаэрседного диапазона / пер. с англ. М.: Мир, 1972. 391 с.

126. Кривицкий Е.В., Кустовский В.Д., Сливинский А.П. Исследование влияния начальных условий на динамику развития канала подводной искры. I. Влияние параметров генератора и среды. *Журнал технической физики*. 1980. № 8. С. 1705–1712.

127. Круг К.А. Физические основы электротехники. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1946. 472 с. (Основы электротехники; т.1).

128. Круг К.А. Переходные процессы в линейных электрических цепях. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948. 344 с.

129. Супруновская Н.И. Особенности анализа переходных процессов в разрядной цепи конденсатора при изменении ее конфигурации. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2009. Вип. 24. С. 110–115.*

130. Супруновская Н.И. Энергетические параметры цепи при уменьшении длительности переходных процессов разряда накопительного конденсатора на электроискровую нагрузку. *Техн. електродинаміка*. – Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". 2008. Ч. 2. С. 27 – 30.

131. Супруновская Н.И. Энергетические характеристики при изменении начальных условий колебательного заряда конденсатора от источника постоянного напряжения. *Техн. електродинаміка*. 2008. № 4. С. 27–33.

132. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. [3-е изд., испр.]. М.: Наука, 1975. 768 с.

133. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / под ред. Гулого Г.А. М.: Машиностроение, 1977. 320 с.

134. Данилевич О.И. Определение к.п.д. процесса заряда емкостного накопителя в установках МИОМ. *Вестн. Харьк. политехн. ин-та*. 1976. № 121. С. 38–42.

135. Супруновская Н.И. Анализ переходных процессов в разрядной цепи конденсатора электроимпульсных установок с применением диаграмм Вышнеград-

ского. *Техн. електродинаміка*. Тем. Вип. "Силовая електроніка та енергоефективність". 2010. Ч. 2. С. 191–194.

136. Бердинских Г.С. Зарядное устройство с улучшенным коэффициентом мощности. *Автоматическая сварка*. 1971. № 8. С. 72–73.

137. Білецький О.О., Щерба А.А., Супруновська Н.І. Енергетичні характеристики кіл аперіодичного заряду суперконденсатора при зміні на ньому початкових напруг. *Вестник НТУ "ХПИ"*. Тем. Вып. 12 (1121) "Проблемы автоматизированного электропривода. Силовая электроника и энергоэффективность". Харьков, 2015. – С. 379–383.

138. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. К.: Наук. думка, 1990. 208 с.

139. Жильцов В.П. Зарядная цепь с промежуточным емкостным накопителем для питания мощных высокочастотных импульсных ламп. *Светотехника*. 1963. № 7. С. 17–22.

140. Анализ эффективности искроэрозионной коагуляции и импульсного подводного искрового разряда при деструкции органических соединений в водных растворах / Захарченко С.Н., Шевченко М.И., Супруновская Н. И., Соломенцева И.М. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: зб. наук. пр.* К.: ІЕД НАНУ, 2007. Вип. 1(16). С.42–45.

141. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971. 155 с.

142. Супруновская Н.И. Моделирование и анализ переходных процессов в электрических цепях полупроводниковых электроразрядных установок с нелинейной электроискровой нагрузкой. *Энергосбережение, энергетика, энергоаудит*. 2014. Спец. вып. Т. 1. № 9 (128). С. 34–44.

143. Супруновская Н.И. Переходные процессы при разряде конденсатора на электроискровую нагрузку и ограничении длительности протекающих в ней импульсных токов. *Техн. електродинаміка*. 2008. № 5. С. 20–26.

144. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов / Г.В. Буткевич, Г.С. Белкин, Н.А. Ведешенков, М.А. Жаворонков. М.: Энергия, 1978. 256 с.

145. Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц / С.Н. Захарченко, И.П. Кондратенко, А.Е. Перекос, В.П. Залуцкий, В.В. Козырский, К.Г. Лопатько. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 6. № 5(60). С. 66–72.

146. Кузнецов А.М. Синтез параметров и допусков элементов электрических цепей. Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международный сборник научных трудов. Вып. 10 / под ред. В. В. Филаретова. Ульяновск: УлГТУ, 2012. С. 3–13.

147. Анализ эффективности искроэрозионной коагуляции и импульсного подводного искрового разряда при деструкции органических соединений в водных растворах / Захарченко С.Н., Шевченко М.И., Супруновская Н. И., Соломенцева И.М. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2007. Вип. 1(16). – С.42–45.

148. Пробой жидкостей при импульсном напряжении / Ушаков В.Я., Клишкин В.Ф., Коробейников С.М., Лопатин В.В. Томск: НТЛ, 2005. 488 с.

149. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: Учебное пособие: В 2-х томах. – Т 2: Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии / [Б.А. Артамонов, Ю.С. Волков, В.И. Дрожалова и др.]; под ред. В.П. Смоленцева.– М.: Высшая школа, 1983.– 208 с.

150. Стабилизация параметров систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред / Захарченко С.Н., Шевченко Н.И., Масловский В.А., Супруновская Н.И. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2005. Вип. 2(11). Ч. 2. С. 9–13.

151. Влияние параметров генератора и технологических условий получения искроэрозионных порошков на их характеристики и стабильность процесса / Захар-

ченко С.Н., Шевченко Н.И., Яцюк С.А., Шевченко С.Н. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ. 2008. № 20. С. 54–55.*

152. Иващенко Д.С., Супруновская Н.И. Переходные процессы в электрических цепях со стохастической нагрузкой, характеризующейся непрерывной случайной величиной. *Техн. електродинаміка. 2016. № 4 С. 17–19.*

153. Анализ эффективности искроэрозионной коагуляции и импульсного подводного искрового разряда при деструкции органических соединений в водных растворах / Захарченко С.Н., Шевченко М.И., Супруновская Н. И., Соломенцева И.М. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2007. Вип. 1(16). С. 42–45.*

154. Муратов В.А., Щерба А.А., Карвовский В.Б. Влияние характеристик источника питания и технологического аппарата на производительность искрового диспергирования металлов в слое гранул. Состояние и перспективы развития электротехнологии. Ч.2. Иваново: ИЭИ им. Ленина, 1985. С. 104.

155. Супруновская Н.И., Подольцев А.Д., Шевченко Н.И. Моделирование и анализ импульсных процессов в электроискровой нагрузке и разрядном контуре конденсатора. *Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силовая электроника и энергоэффективность". 2008. Ч. 3. С. 109–114.*

156. Повышение качественных показателей и стабилизации электроэрозионного диспергирования металлов с учетом взаимного влияния характеристик источника питания и технологического аппарата / Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А., Карвовский В.Б. Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий. Комсомольск-на-Амуре: КАПИ, 1986. С. 98–99.

157. Щерба А.А. Основные принципы построения многофазных стабилизированных источников питания установок электроэрозионного диспергирования металлов в жидкости. Проблемы преобразовательной техники. Ч.1. К.: 1983. С. 59–62.

158. Converters with Consumed Power Stabilization – Effective Devices for Supply and Stabilization of Operation Conditions of Electrodischarge Metal Dispersion Units /

Milyakh F.N., Baranov V.A., Shcherba A.A., Muratov V.A. 5-th Power Electronics Conference. Budapest. 1985. P. 273–282.

159. Effective Devices for Power Supply and Stabilization of Operation Conditions of Electrodischarge Metal Dispersion Units / Milyah A.N., Barabanov V.A., Shcherba A.A., Muratov V.A. Proc. 5-th Power Electronics Conf. Vol. 3. Budapest (Hungary). 1985. P. 273–282.

160. Progress in spark-eroded particle production: Development of technological system for high-yield electrical-spark dispersion of metal granules in liquid / A.A. Shcherba, A.D. Podoltsev, S.N. Zakharchenko, I.N. Kucheryavaya, N.I. Suprunovskaya, N.I. Shevchenko. *Техн. електродинаміка*. 2005. № 6. С. 3–13.

161. Шидловский А.К., Щерба А.А., Захарченко С.М. Високоєфективна технологія електрофізичної водопідготовки теплових електростанцій та теплоцентралей. *Вода і водоочисні технології*. 2003. № 2(6). С. 21–26.

162. Повышение качественных показателей и стабилизации электроэрозионного диспергирования металлов с учетом взаимного влияния характеристик источника питания и технологического аппарата / Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А., Карвовский В.Б. Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий. Комсомольск-на-Амуре: КАПИ, 1986. С. 98–99.

163. Синтез интегральных характеристик эрозионных нагрузок параметрических формирователей искровых разрядов / Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А., Павелко А.Н. Стабилизация параметров электрической энергии. К.: ИЭД АН Украины, 1991. С 3–11.

164. Повышение качественных показателей и стабилизации электроэрозионного диспергирования металлов с учетом взаимного влияния характеристик источника питания и технологического аппарата / Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А., Карвовский В.Б. Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий. Комсомольск-на-Амуре: КАПИ, 1986. С. 98–99.

165. Ivashchenko D., Shcherba A., Suprunovska N. Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. Proceedings IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2016), June 7-11. Ukraine. Kyiv, 2016. P.45–48.

166. Намитоков К.К. Электроэрозионные явления. М.: Энергия, 1978. 456 с.

167. Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А. Моделирование аппарата объёмного электроэрозионного диспергирования металлов как элемента электрической цепи. Преобразование и стабилизация параметров электрической энергии. К.: Наук. думка, 1990. С. 128–133.

168. Повышение качественных показателей и стабилизации электроэрозионного диспергирования металлов с учетом взаимного влияния характеристик источника питания и технологического аппарата / Шидловский А.К., Щерба А.А., Муратов В.А., Карвовский В.Б. Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий. Комсомольск-на-Амуре: КАПИ, 1986. С. 98–99.

169. Mostov P., Neuringer J., Rigney D. Optimum charging efficiency for space system. Proc. IREE. 1961. 49. N 5. P. 941–948.

170. Супруновская Н.И. Особенности анализа переходных процессов в цепях разряда накопительных конденсаторов при электроискровом диспергировании слоя металлических гранул. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2015. Вип. 41. С.124–131.

171. Супруновская Н.И. Энергетические характеристики электрического контура зарядки конденсатора от источника постоянного напряжения при изменении начального напряжения на конденсаторе. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*: зб. наук. пр. К.: ІЕД НАНУ, 2008. Вип. 20. С. 71.

172. Супруновская Н.И., Подольцев А.Д. Моделирование электромагнитных процессов в высоковольтной кабельной линии 110 кВ и перенапряжений в экранах кабелей. *Техн. електродинаміка*. Тем. вип. “Силовая электроника и энергоэффективность”. 2007. Т. 3. С. 99–104.

173. Jiang W., Yatsui K. Synthesis of Nanosize Powders by Pulsed Wire Discharge. The 11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Tech. Papers. Vol. 1. Baltimore, Maryland USA. 1997. P. 214–219.

174. Jones H.M., Kunhardt E.E. Development of Pulsed Dielectric Breakdown in Liquids. Journal of Physics. D: Applied Physics. 1995. Vol. 28. № 1. P. 178 – 188.

175. A Flexible Control Scheme for Current Wave Forming Using Multiple Capacitor Banks Units / Kim J.S., Rim G.H., Jin Y.S., et al. IEEE Intl Pulsed Power Plasma Science 2001 Conf. Digest of Technical. Papers. Las Vegas, Nevada, USA. 2002. Vol. 2. P. 1512–1515.

176. Application of volumetric electric-spark dispersion for the fabrication of Ti-Zr-Ni hydrogen storage alloys / G.Ya. Kolbasov, A.I. Ustinov, A.A. Shcherba, A.Ye. Perekos, M.O. Danilov, N.V. Vyunova, S.N. Zakharchenko, G. Hossbah. Journal of Power Sources. 2005. Vol. 150. P. 276–281.

177. Kolkert W.J., Jamet F. Electric Energy Gun Technology: Status of the French – German – Netherlands Programme. IEEE Transactions on Magnetics. 1999. Vol. 35, № 1. P. 25–30.

178. Pulsed Current Generator for Microsecond Duration Pressure Pulse Generation / Krivosheev S.I., Adamian Yu.E., Vasilevsky V.M., Nenashev A.P. Proceedings of the 1st Intl Congress on Radiation Physics, High Current Electronics, and Modification of Materials. Tomsk: HCEI. 2000. Vol. 2. P. 259–262.

179. Obtaining of metallic nanoparticles by plasma-erosion electrical discharges in liquid mediums for biological application / K.G. Lopatko, M.G. Melnichuk, Y.G. Aftandilyants, E.N. Gonchar, V.F. Boretskij, A.N. Veklich, S.N. Zakharchenko, T.I. Tugay, A.V. Tugay, V.V. Trach. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture. 2013. № 61. P. 105–115.

180. Microstructure investigation of the spark plasma sintered Cu-Al-Ni shape memory material / G.E. Monastyrsky, A.V. Kotko, A.V. Gilchuk, P. Ochin, Yu.N. Koval. Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии НАНСИС, 2013. Тезисы IV Междунар. науч. конф., Киев, 19-22 ноября 2013 / редкол.: А.Г. Наумовец и др. – К.: Институт металлофизики им. В.Г. Курдюмова НАН Украины, 2013. С. 217.

181. The Role of Nano-sized Fraction on Spark Plasma Sintering the Pre-Alloyed Spark-Erosion Powders / G.E. Monastyrsky, P. Ochinnikov, A.V. Gilchuk, V.I. Kolomytsev, Yu.N. Koval. Journal of Nano and Electronic Physics. 2012. Vol. 4, № 1. P. 01007-1-01007-7.

182. Characteristics of Ozonizer Using Pulsed Power / Namihira T., Shinozaki K., Katsuki S. et al. IEEE Intl Pulsed Power Plasma Science 2001 Conf. Digest of Technical Papers. – Las Vegas, Nevada, USA. 2002. Vol. 2. P. 1090–1093.

183. Pulsed Power for Advanced Waste Water Remediation / Bystritskiy V.M., Wood T.K., Yankelevich Y. et al. The 11th IEEE Intl Pulsed Power Conf. Digest of Tech. Papers. Vol. 1. Baltimore, Maryland USA. 1997. P. 79–84.

184. Dubovenko K.V., Kurashko Yu.I., Shvets I.S. Power Supplies for Compact Submerged High Voltage Equipment. Abstracts of the IEEE Intl Pulsed Modulator Conf. (PMC'2002). Report PA55. Hollywood, California, USA. 2002. P. 73.

185. Кучинский Г.С., Назаров Н.И. Силовые электрические конденсаторы. – 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1992. 320 с.

186. Ковригин Л.А., Седельников Л.А. Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей по возвратному напряжению. КАБЕЛЬ-news. 2009. № 8. С. 54–56.

187. Patsch R., Kouzmine O. *p-Factor, a Meaningful Parameter for the Evaluation of Return Voltage Measurements*, CEIDP '02, Cancun, Mexico, 2002. Pp. 906–909.

188. Привалов И.Н. Современные методы и технические средства для испытаний и диагностики силовых кабельных линий номинальным напряжением до 35 кВ включительно: Учебное пособие. Санкт-Петербург, 2008. 86 с.

189. Bognar A., Kalocsai L., Csepes G., Nemeth E., Schmidt J. Diagnostic Tests of High Voltage Oil-Paper Insulating Systems (In Particular Transformer Insulation) using DC Dielectrometrics, CIGRE'90, Paris, France, 1990. 15/33–08.

190. Patsch R., Kouzmine O. The Influence of Climatic Conditions on the Diagnostic Results of Return Voltage Measurements, ISEI'02, Boston, USA, 2002. 191–419.

191. Беспрозванных А.В. Физическая интерпретация кривых восстанавливающегося напряжения на основе схем замещения неоднородного диэлектрика. *Техн. електродинаміка*. 2009. № 6. С. 23–27.

192. Розискулов С.С., Щерба А.А. Переходные электромагнитные процессы в неоднородной электрической изоляции силовых высоковольтных коаксиальных кабелей с твердой полимерной изоляцией при её диагностике методом измерения тока релаксации. *Техн. електродинаміка*. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність" – Харків. 2012. Ч. 1. С. 64–69.

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації**Список публікацій здобувача 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 (Особистий внесок – брав участь в розробці електричної принципової схеми, комп'ютерному моделюванні та обробці отриманих результатів).
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 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання роботи електричної принципової схеми, розвиток методу аналізу взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струмів у колах змінної структури).
3. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Розискулов С.С., Перетятко Ю.В. Особенности повышения скорости нарастания токов в нагрузке полупроводниковых электро-разрядных установок. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 47. С. 77–85 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання роботи електричної принципової схеми, розвиток методу аналізу взаємозалежних перехідних процесів наростання і спадання струмів у колах змінної структури).
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*. 2014. Вип. 38. С. 145–155 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання роботи електричної принципової схеми, визначення умов ефективного підвищення таких динамічних характеристик електророзрядних установок, як швидкість наростання їх вихідних

струмів та імпульсна потужність у навантаженні).

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 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання роботи електричної принципової схеми, визначення умов ефективного підвищення таких динамічних характеристик електророзрядних установок, як швидкість наростання їх вихідних струмів та імпульсна потужність у навантаженні).

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 (Особистий внесок – удосконалення методу підвищення динамічних характеристик струму у навантаженні введенням керованих напівпровідникових комутаторів струму).

7. Щерба М.А., Розіскулов С.С., Васильєва О.В. Закономерности распределения плотности электрического тока в канале водного триинга в зависимости от его конфигурации. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 37. С.77–81 43 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання, аналіз та верифікація отриманих результатів моделювання).

8. Щерба М.А., Розіскулов С.С., Васильєва О.В. Зависимость возмущений электрического поля в диэлектрике от дисперсности близко расположенных водных микровключений. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 17–19 (Особистий внесок – комп'ютерне моделювання, аналіз та верифікація отриманих результатів моделювання).

9. Розіскулов С.С. Расчет радиально неоднородного электрического поля в полимерной изоляции силовых высоковольтных коаксиальных кабелей. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2013. Вип. 34. С.90–93. (Особистий внесок – розробка математичної моделі та моделювання впливу неоднорідності кабельної ізоляції на радіальний розподіл в ній змінного електричного поля).

10. Розіскулов С.С., Михайлів В.І., Грабчук Б.Л. Перехідні електромагнітні процеси у неоднорідній електричній ізоляції високовольтних кабелів при її діагнос-

тиці методами вимірювання і аналізу струму релаксації та поверненої напруги. *Методи та прилади контролю якості*. 2013, №1 (30), С. 84–91 (Особистий внесок – аналіз та моделювання перехідних процесів у радіально неоднорідній ізоляції силових коаксіальних кабелів).

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*. 2019. Вип. 53. С.75–79 (Особистий внесок – удосконалення методу підвищення динамічних характеристик струму у навантаженні введенням керованих напівпровідникових комутаторів струму).

12. Щерба А.А., Розіскулов 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 (Особистий внесок – аналіз перехідних процесів у неоднорідній ізоляції кабелів, розробка диференційної схеми заміщення і моделей ізоляції кабелів).

Продовж. дод. А

Апробація результатів дисертації

1. II науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (Київ, 20-21 10 квітня 2009 р., форма участі – публікація тез);
2. II науково-практична конференція «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ, 25-26 листопада 2009 р., форма участі – публікація тез);
3. V науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» (Київ, 1 грудня 2009 р., форма участі – публікація тез);
4. III науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування» (Київ, 27-29 квітня 2010 р., форма участі – публікація тез);
5. V Всеукраїнська науково-практична конференція «Комп'ютерні технології: наука і освіта» (Київ, 2010 р., форма участі – публікація тез);
6. VI науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» (Київ, 24 листопада 2010 р., форма участі – публікація тез);
7. XVI Международная научная конференция «Физика импульсных разрядов в концентрированных средах» (Николаев, 19-22 августа 2013 р., форма участія – устный доклад);
8. XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Силовая електроніка та енергоефективність'2013» (Алушта, 23-27 вересня 2013 р., форма участі – усна доповідь).
9. XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки - 2014» (Київ 2-6 червня 2014 р., форма участі – усна доповідь).

10. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки - 2016» (Київ 6-10 червня 2016 р., форма участі – усна доповідь).

11. XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми сучасної електротехніки - 2020» (Київ 8-12 червня 2020 р., форма участі – усна доповідь).

Додаток Б

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту електродинаміки
НАН України, академік НАН України



[Handwritten signature]
О.В. Кириленко

А К Т

використання наукових результатів провідного інженера відділу електроживлення технологічних систем Розіскулова С.С., отриманих в Інституті електродинаміки НАН України при виконанні фундаментальних НДР "Імроз" (№ ДР 0112U008204) та "Елкаб" (№ ДР 0117U007713), що проводились за рішеннями Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України (протоколи № 14 від 25.09.2012 та № 14 від 04.07.2017), і прикладних НДР: "Елста-П" (№ ДР 0112U008328), "Інтерм-П" (№ ДР 0115U004397) і "Елтерм-П" (№ ДР 0119U001212), виконаних у 2012-2021 рр. за рішеннями Вченої ради Інституту електродинаміки НАН України

У фундаментальних НДР "Імроз" і "Елкаб" Розіскулов С.С. був відповідальним виконавцем робіт з дослідження взаємозалежних перехідних процесів у колах змінної структури напівпровідникових електророзрядних установок (ЕРУ) з накопичувальними конденсаторами і керованими комутаторами, що змінювали умови протікання перехідних процесів. Отримані ним результати у сукупності підвищують ефективність методів розрахунку перехідних процесів зі змінними початковими і кінцевими умовами їх комутацій та удосконалюють методи оптимізації режимів у колах електророзрядних установок змінної структури, що реалізують великі швидкості наростання струмів та імпульсні потужності у навантаженні.

С.С. Розіскулов удосконалив метод аналізу перехідних процесів у електричних колах змінної структури електророзрядних установок шляхом отримання та рішення різницевих рівнянь для циклічних процесів наростання і спадання струму

в навантаженні та регулюванні граничних і часових інтервалів згідно заданих динамічних характеристик імпульсних струмів. Отримані результати дозволяють оцінювати величину похибки при розрахунках таких процесів чисельними методами і отримувати умови стійкості та доцільності використання такого методу.

Згідно планів НДР "Елста-П", "Інтерм-П" та "Елтерм-П" Розіскулов С.С. досліджував умови узгодження змінень структури електричного кола навантаження ЕРУ при розрядах НК на навантаження та умови примусового обмеження параметрів розрядного струму, при яких підвищуються динамічні характеристик ЕРУ з НК та керованими напівпровідниковими комутаторами. Він виявив особливості та закономірності взаємної залежності перехідних процесів наростання і спадання струму в колі навантаження та впливу їхньої тривалості на швидкість наростання імпульсного струму в навантаженні і методи її регулювання. Ним аналітично і експериментально підтверджено підвищення швидкості наростання струмів та імпульсної потужності у навантаженні при одночасному зменшенні добротності кола розряду накопичувального конденсатора електророзрядних установок та примусовому обмеженні тривалості струму його розряду. Показано, що найбільш доцільним є змінення добротності кола навантаження від 0,05 до 0,5.

С.С. Розіскулов удосконалив метод підвищення динамічних характеристик струму у колі навантаження ЕРУ введенням в їхні розрядні кола керованих напівпровідникових комутаторів струму та алгоритмів узгодженого змінення структури цих кіл під час спадання струму у навантаженні та при підключенні до них заряджених накопичувальних конденсаторів. Реалізація такого методу на порядок може зменшити тривалість фронту спадання імпульсних струмів у навантаженні. Він розробив також новий метод змінення характеру перехідних процесів у колах навантаження ЕРУ шляхом введення в них послідовних електричних фільтрів низької частоти та коаксіальних кабелів, реактивні розподілені параметри яких являються складовою частиною вказаних фільтрів. Використання цього методу дозволяє отримувати розрядні імпульси у навантаженні заданої тривалості та підвищувати їх динамічні та енергетичні характеристики.

Результати Розіскулова С.С., отримані при дослідженні перехідних процесів наростання і спадання струмів у колах змінної структури електророзрядних установок і підвищення швидкості наростання струмів та імпульсної потужності в їхньому навантаженні використано в Інститутах НАН України (електродинаміки, газу та імпульсних процесів і технологій), Інституті розвитку територіальних громад України, а також у навчальних процесах кафедри теоретичної електротехніки НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського) і кафедри імпульсних процесів і технологій Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова (м. Миколаїв).

Подальше використання наукових і практичних результатів щодо регулювання імпульсної потужності та швидкості наростання струмів розряду накопичувальних конденсаторів у колах з напівпровідниковими комутаторами й нелінійним навантаженням пропонується в інститутах НАН України (електродинаміки, електрозварювання, металофізики, імпульсних процесів і технологій), а також у навчальних процесах кафедри теоретичної електротехніки НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського" та кафедри імпульсних процесів і технологій Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова (м. Миколаїв).

Науковий керівник НДР "Імроз" та "Елкаб",

відпов. викон. НДР "Елста-П", "Інтерм-П" і "Елтерм-П",

зав. відділу № 16, чл.-кор. НАН України, д.т.н.

А.А. Щерба

Головний науковий співробітник від. № 16, д.т.н.

О.Д. Подольцев

Провідн. наук. співробітник від. № 16, д.т.н.

Н.І. Супруновська

КОПІЮ ЗАСВІДЧУЮ.
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР СВР



Ю.М. ГОРИСЛАВЕЦЬ

КОШІЮ ЗАСВІДЧУЮ,
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР СВР



Ю. М. ГОРИСЛАВЕЦЬ



ЗАТВЕРДЖУЮ
"ГОЛДЕНСІДС" ТОВ "ГОЛДЕНСІДС"

В.С. Вольський

12.02.2020 р.

А К Т

впровадження науково-прикладних результатів,

отриманих у НДР "Розробка та створення напівпровідникового формувача розрядних імпульсів з регульованими параметрами" за договором № 1607-19 від 21.05.2019 між Інститутом електродинаміки НАН України (Виконавцем) і ТОВ "ГОЛДЕНСІДС" (Замовником)

Чинний акт складено в тому, що згідно договору № 1607-19 від 21.05.2019 Інститутом електродинаміки НАН України (Виконавцем) розроблено принципову електричну і структурну схеми напівпровідникового формувача розрядних імпульсів з регульованими параметрами для електророзрядної обробки шару металевих гранул (або шматочків різних металів) у воді або її розчинах. Виконавець створив напівпровідниковий формувач розрядних імпульсів з регульованими параметрами для електророзрядної обробки шару гранул або шматочків різних металів і визначив оптимальні режими такої обробки. Створений формувач підключається до однофазної мережі електроживлення напругою 220 В (частотою 50 Гц) і може споживати від неї потужність до 600 Вт (в безперервному режимі) та до 1000 Вт (в короткочасному режимі). При цьому в шарі гранул, що розташовані у водному розчині між електродами, формуються імпульсні напруги до 900 В та розрядні струми до 600 А з частотою повторення до 150 розрядних імпульсів за 1 секунду. Енергія розрядних імпульсів становить не менше 4 Дж при періоді їх повторення від 6 до 100 мс. Вхідні та вихідні електричні кола формувача є гальванічно-розв'язаними.

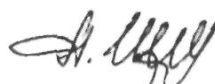
Напівпровідниковий формувач розрядних імпульсів з регульованими параметрами створено в Інституті електродинаміки НАН України (м. Київ) за договором № 1607-19 і передано ТОВ "ГОЛДЕНСІДС" (м. Київ) для розробки промислових технологій отримання біоактивних наноколоїдних розчинів, здатних до активації зростання та збільшення урожайності рослин сільськогосподарського призначення. Виконавець і Замовник зацікавлені у подальшому співробітництві з розробки та впровадження таких технологій та захисті спільних науково-прикладних результатів.

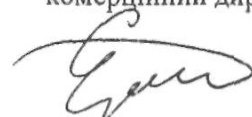
Від Інституту електродинаміки НАН України:

Від ТОВ "ГОЛДЕНСІДС"

Наук. керівник НДР за дог. № 1607-19,
зав. від. № 16, чл.-кор. НАН України

комерційний директор

 А.А. Щерба

 А.А. Євсєєв

пров.н.с., д.т.н.

 Н.І. Супруновська

КОПІЮ ЗАСВІДЧУЮ,
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР СВР



Ю. М. ГОРИСЛАВЕЦЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ



Директор Інституту електродинаміки
НАН України, академік НАН України

О.В. Кириленко
22.12.2020р.

А К Т

**використання наукових результатів провідного інженера
відділу електроживлення технологічних систем Розіскулова С.С.,
при виконанні отриманих в Інституті електродинаміки НАН України НДР:**

– НДР "Розробка та створення напівпровідникового генератора розрядних імпульсів з регульованими параметрами для електроіскрового диспергування металевих гранул у воді" за договором №1606-18 від 01.11.2018 р. з ТОВА "ГОЛДЕН СИДС" (м. Київ);

– НДР "Удосконалення принципової електричної та структурної схем електророзрядної установки, визначення оптимальних енергетичних і динамічних режимів та системи управління їхніми комутаторами, експериментальні дослідження установки для електророзрядної обробки нанорідин" за договором №1606-18 від 01.11.2018 р. з Інститутом газу НАН України (м. Київ);

– НДР "Проведення вимірювань на системі електропостачання, розробка її детальної схеми та пристроїв фільтрації вищих гармонік і компенсації реактивної потужності для виявлення резервів активних потужностей" за договором №1604-16 від 08.12.2016 р. з ТОВ "Краєвид" (Київська обл.).

В цих НДР Розіскулов С.С. був відповідальним виконавцем, який досліджував умови узгодження динамічних характеристик електротехнологічних установок, що використовують керовані напівпровідникові комутатори, з характеристиками навантаження і системи електроживлення. Всі створені в Інституті електродинаміки НАН України структурні та електричні схеми та експериментальні зразки електротехнологічних установок передано Замовникам, які на даний час їх використовують для визначення оптимальних промислових режимів.

Зав. від. № 16, чл.-кор. НАН України, д.т.н.

Пров. наук. співробітник, д.т.н.

Старш. наук. співробітник к.т.н.

А.А. Щерба

Н.І. Супруновська

М.О. Ломко

Додаток В

Аналіз характеру електроіскрового навантаження при негармонійному електричному розряді з керованою тривалістю переднього фронту

ЕІН, як зазначалось раніше, є нелінійним. Крім того, характер його нелінійності значно змінюється підчас проходження через нього ІС. Дану нелінійність необхідно враховувати при проектуванні та розробці ФРІС, особливо це стосується ФРІС мікросекундного діапазону тривалості. Як показує практика використання таких ФРІС з реальним ЕІН, форма ІС в ньому погано корелює з моделями його нелінійності поданими у вигляді нелінійного активного опору. Насамперед, це проявляється у невідповідності часових залежностей фронтів ІС, які протікають через ЕІН, відповідним отриманим за аналітичними залежностями. Тому, виникає необхідність детально розглянути перехідні електричні процеси, які проходять при протіканні ІС мікросекундного діапазону тривалості через ЕІН.

В якості ЕІН використовувалась технологічна камера для ОЕІД шару металевих гранул в діелектричному рідкому середовищі з алюмінієвими електродами шириною 95 мм та відстанню між ними 40 мм. В якості джерела ІС був використаний ФРІ керованої тривалості (0,75-3,25 мкс), побудований на базі повністю керованих НП ЕК, з величиною опорної напруги 0-500 В. Міжелектродний проміжок технологічної камери був заповнений алюмінієвими гранулами з максимальними лінійними розмірами до 15 мм. В якості діелектричної рідини була застосована водопровідна вода.

У результаті проведених експериментів була зафіксована велика кількість послідовних ІС в ЕІН з відповідним спадом напруги на ньому при різних режимах роботи ФРІ. На рис. В.1 наведено осцилограму часових залежностей стуму в ЕІН з відповідним спадом напруги на ньому при тривалості розрядних ІС 3,25 мкс та величині опорної напруги 500 В.

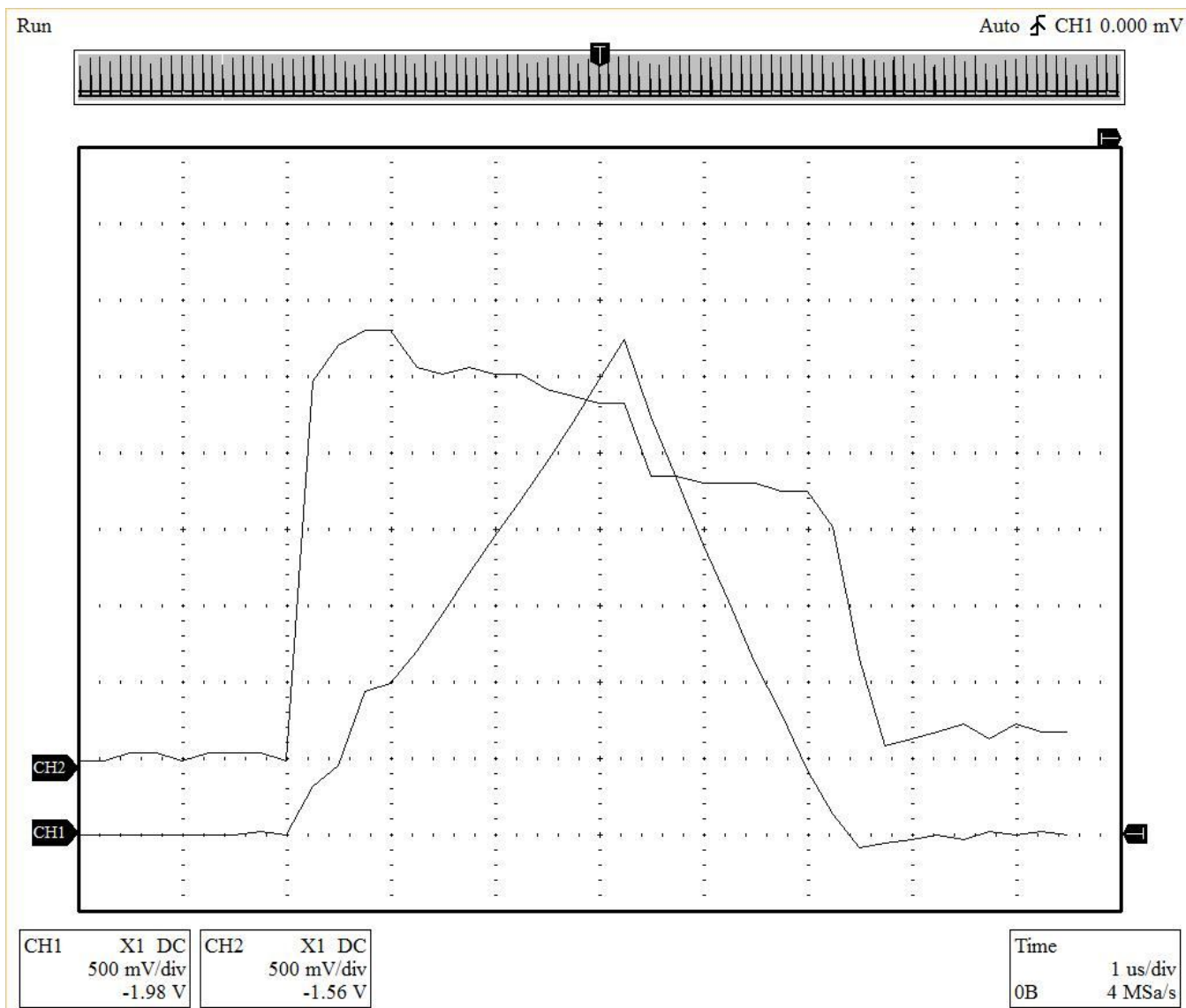


Рис. В.1 Осцилограма часової залежності ІС в ЕІН – CH1 з відповідним спадом напруги на ньому – CH2

Як можна бачити з наведеної на рис. В.1 осцилограми, форма ІС в ЕІН не збігається з формою спаду напруги на ньому. Це свідчить про непостійний характер електричного опору даного ЕН при проходженні через нього ІС.

Передній фронт ІС має майже лінійний характер. Задній фронт ІС має вид ламаної з поступовим незначним зменшенням крутизни його спадання. Передній фронт спаду напруги на ЕІН має значну початкову крутизну наростання ($970,4 \text{ В/мкс}$), по досягненні ним певного рівня (в даному випадку 252 В через $261,5 \text{ нс}$ від початку ІС)

його крутизна різко зменшується, після чого він виходить на "полицю напруги" тривалістю 246,1 нс (286 В, 746,1 нс від початку ІС). Надалі спад напруги знов починає поступово спадати до наступної "полиці" (257 В, 2 мкс від початку ІС) тривалістю 261,5 нс, після чого знов починає поступово спадати до наступної "полиці" (238 В, 3 мкс від початку ІС), яка закінчується при запиранні силового НП ЕК через 3,25 мкс від початку ІС.

Після запирання НП ЕК в розрядному колі починається вільний перехідний процес. Джерелом енергії, в даному випадку, є енергія магнітного поля, накопичена на загальній індуктивності розрядного кола підчас проходження в ньому переднього фронту ІС. Задній фронт спаду напруги на ЕІН має значну початкову швидкість спадання (171,6 В/мкс). Через 278 нс спад напруги виходить на першу "полицю напруги" (190 В) тривалістю 244,4 нс, після чого починає поступово спадати до наступної "полиці" (186 В, 777 нс з моменту запирання НП ЕК) тривалістю 552 нс. Надалі процес повторюється і спад напруги виходить на осатаню "полицю напруги" (181 В, 1,49 мкс з моменту запирання НП ЕК) тривалістю 244,4 нс. По закінченні останньої "полиці" спаду напруги, вона починає лінійно спадати до нуля декілька раз змінюючи крутизну свого спадання (97, 328 та 286 В/мкс).

На рис. В.2 наведену часову залежність зміни електричного опору міжелектродного проміжку технологічної камери при проходженні через нього ІС наведеного на рис. В.1. Апроксимаційна залежність отримана за алгоритмом де Кастельжо в системі трьохмірного комп'ютерного моделювання КОМПАС-3D v9 и наведена у виді кривої Безьє.

Як можна бачити з наведеної на рис. В.2 часової залежності зміни електричного опору ЕІН та з наведених на рис. В.1 осцилограми часових залежностей ІС в ЕІН та спаду напруги на ньому, воно має значну часову нелінійність.

На початковому етапі розвитку імпульсу струму (проміжок часу 0-0,3 мкс) в ЕІН починає наростати струм. Цей струм зростає пропорційно величині спаду напруги на ньому, а швидкість його наростання визначається величинами загальних індуктивності та активного опору розрядного кола. На даному етапі ЕІН є лінійним.

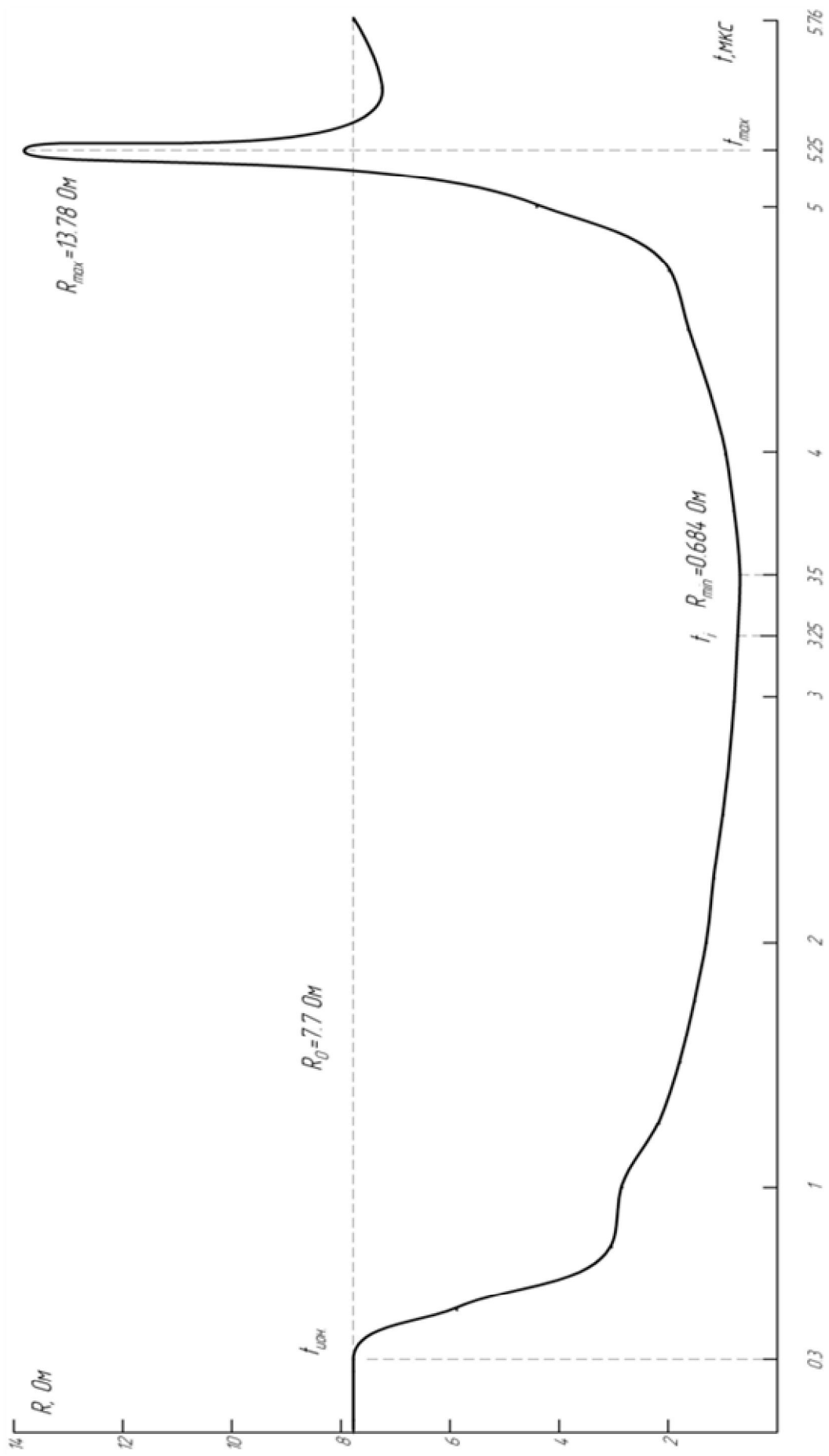


Рис. В.2 Часова залежність зміни електричного опору міжелектродного проміжку технологічної камери при проходженні через нього ІС

У момент часу, коли напруга на ЕІН досягає порогу іонізації (0,3 мкс), в ньому починає формуватися іскровий розряд, при цьому відбувається різке зменшення в часі величини його опору. Крутизна наростання струму в електроіскровому навантаженні тимчасово (проміжок часу 244–511 нс) зменшується, що обумовлено значним збільшенням постійної часу релаксації струму, одночасно відбувається зменшення і крутизни наростання спаду напруги на електроіскровому навантаженні. Подальший розвиток іскрового розряду призводить до збільшення крутизни наростання імпульсу струму та подальшого зменшення крутизни наростання спаду напруги на ЕІН.

По закінченні формування іскрового розряду в міжелектродному проміжку технологічної камери (момент часу 0,75 мкс) спад напруги виходить на першу "полицю напруги" і подальше зростання величини ІС не викликає зростання спаду напруги. При цьому, крутизна наростання ІС в ЕІН суттєво зменшується, одночасно суттєво зменшується і крутизна спаду його опору.

В момент часу закінчення полиці напруги (1 мкс від початку ІС) починається формування наступного паралельного іскрового розряду (або розгалуження першого), що призводить до зменшення спаду напруги на ЕІН. У цей же час, передній фронт ІС виходить на свою (майже) лінійну ділянку, при цьому, крутизна його наростання суттєво зростає. Крутизна спадання опору ЕІН також різко зростає.

По закінченні формування другого іскрового розряду спад напруги знов стабілізується, але вже на декілька меншим рівні. У момент часу закінчення другої "полиці напруги" на ЕІН (момент часу 2,3 мкс від початку ІС) починається формування наступного паралельного іскрового розряду, або розгалуження вже існуючих. Спад напруги на ЕІН знов починає поступово зменшуватись до його виходу на наступну (останню для переднього фронту ІС) "полицю напруги" (момент часу 3 мкс від початку ІС), яка закінчується в момент часу (3,25 мкс від початку ІС) при запиранні НП ЕК в ФРІ. Весь цей час величина електричного опору ЕІН продовжує монотонно спадати з поступовим зменшенням крутизни.

У момент запирання НП ЕК у ФРІ вимушений перехідний процес закінчується, замість нього починається новий вільний. Відбувається різка зміна крутизни ІС в ЕІН з додатної на від'ємну. Так як на початку вільного перехідного процесу, крутиз-

на спадання ІС декілька менша за крутизну спадання спаду напруги, то величина опору електроіскрового навантаження ще деякий час продовжує зменшуватись (від 3,25 до 3,5 мкс від початку ІС). При досягненні спаду напруги першої "полиці напруги" по задньому фронту ІС (момент часу 3,5 мкс від початку ІС) електричний опір ЕІН досягає свого мінімального значення (0,684 Ом), після чого починає поступово зростати.

По закінченні першої "полиці напруги" по задньому фронту ІС (момент часу 3,8 мкс від початку ІС) починається процес загасання одного з трьох паралельних іскрових розрядів (або процес загасання одного з розгалужень). При цьому, спад напруги на ЕІН починає зменшуватись з одночасним зменшенням крутизни спадання ІС, електричний опір ЕІН починає зростати.

По закінченні процесу загасання одного з паралельних електроіскрових розрядів (момент часу 4 мкс від початку ІС) спад напруги на ЕІН знов стабілізується, крутизна спадання ІС ще більше зменшується, в наслідок чого, відбувається зростання крутизни електричного опору ЕІН.

У момент часу закінчення другої "полиці напруги" по задньому фронту ІС (4,55 мкс від початку ІС) починається процес загасання ще одного з двох, що лишились, паралельних іскрових розрядів (або процес загасання розгалуження). Спад напруги на ЕІН знов починає зменшуватись, одночасно з цим зменшується і крутизна спадання ІС, що призводить до зменшення крутизни наростання ЕІН.

У момент часу виходу спаду напруги на останню "полицю напруги" по задньому фронту ІС (4,75 мкс від початку ІС) відбувається наступне зменшення крутизни спадання ІС та значне зростання крутизни опору ЕІН. По закінченні останньої "полиці напруги" по задньому фронту ІС (5 мкс від початку ІС) починається процес загасання останнього електроіскрового розряду в ЕІН. Під час протікання даного процесу відбувається зменшення величини спаду напруги на ЕІН зі значною крутизною його фронту, також відбувається чергове зменшення крутизни спадання ІС, що призводить до різкого зростання крутизни наростання опору ЕІН.

У момент часу загасання останнього електроіскрового розряду в ЕІН (5,25 мкс від початку ІС) відбувається чергове незначне зменшення крутизни спадання ІС, од-

ночасно з цим відбувається значне зростання крутизни спадання спаду напруги на ЕІН. Відбувається стрибкоподібне зростання опору ЕІН, який, в момент часу 5,5 мкс від початку ІС, досягає свого максимального значення 13,78 Ом, яке значно перевищує його початкове значення (7,7 Ом). ІС в ЕІН в цей момент часу спадає майже до нуля, відбувається зменшення крутизни спадання спаду напруги та стрибкоподібне зменшення величини опору ЕІН до свого початкового значення (5,75 мкс від початку ІС).

Для подальшого розгляду фізичних процесів, що протікають в ЕІН під час проходження через нього ІС, доцільно також побудувати і вольт-амперну характеристику перехідного процесу наведеного на рис. В.1. На рис. В.3 наведено вольт-амперну характеристику даного перехідного процесу.

На вольт-амперній характеристиці, наведеної на рис. В.3, ділянка 0-1 відповідає за початкове пропорційне величині спаду напруги зростання величини ІС в ЕІН. Точка 2 відповідає пороговій напрузі - напрузі іонізації. На ділянці 1-2 відбувається формування першого електроіскрового розряду. Ділянка 2-3 відповідає стадії розвитку електроіскрового розряду на якій величина спаду напруги на ЕІН майже не залежить від величини ІС, що протікає через нього – "полиця напруги". На ділянці 3-4 відбувається формування другого електроіскрового розряду. Ділянка 4-5 відповідає другій "полиці напруги". На ділянці 5-6 відбувається формування третього електроіскрового розряду. Ділянка 6-7 відповідає третій "полиці напруги". В точці 7 відбувається запирання НП ЕК ФРІ. Ділянка 7-8 - перехідна між третьою та четвертою "полицею напруги". Ділянка 8-9 відповідає четвертій "полиці напруги". На ділянці 9-10 відбувається загасання одного з трьох електроіскрових розрядів. Ділянка 10-11 відповідає п'ятій "полиці напруги". На ділянці 11-12 відбувається загасання одного з двох, що лишились, електроіскрових розрядів. Ділянка 12-13 відповідає шостій "полиці напруги". На ділянці 13-14-15 відбувається загасання останнього електроіскрового розряду. На ділянці 13-14 відбувається різке зростання опору електроіскрового навантаження, а на ділянці 14-15 відбувається його спад до початкового рівня.

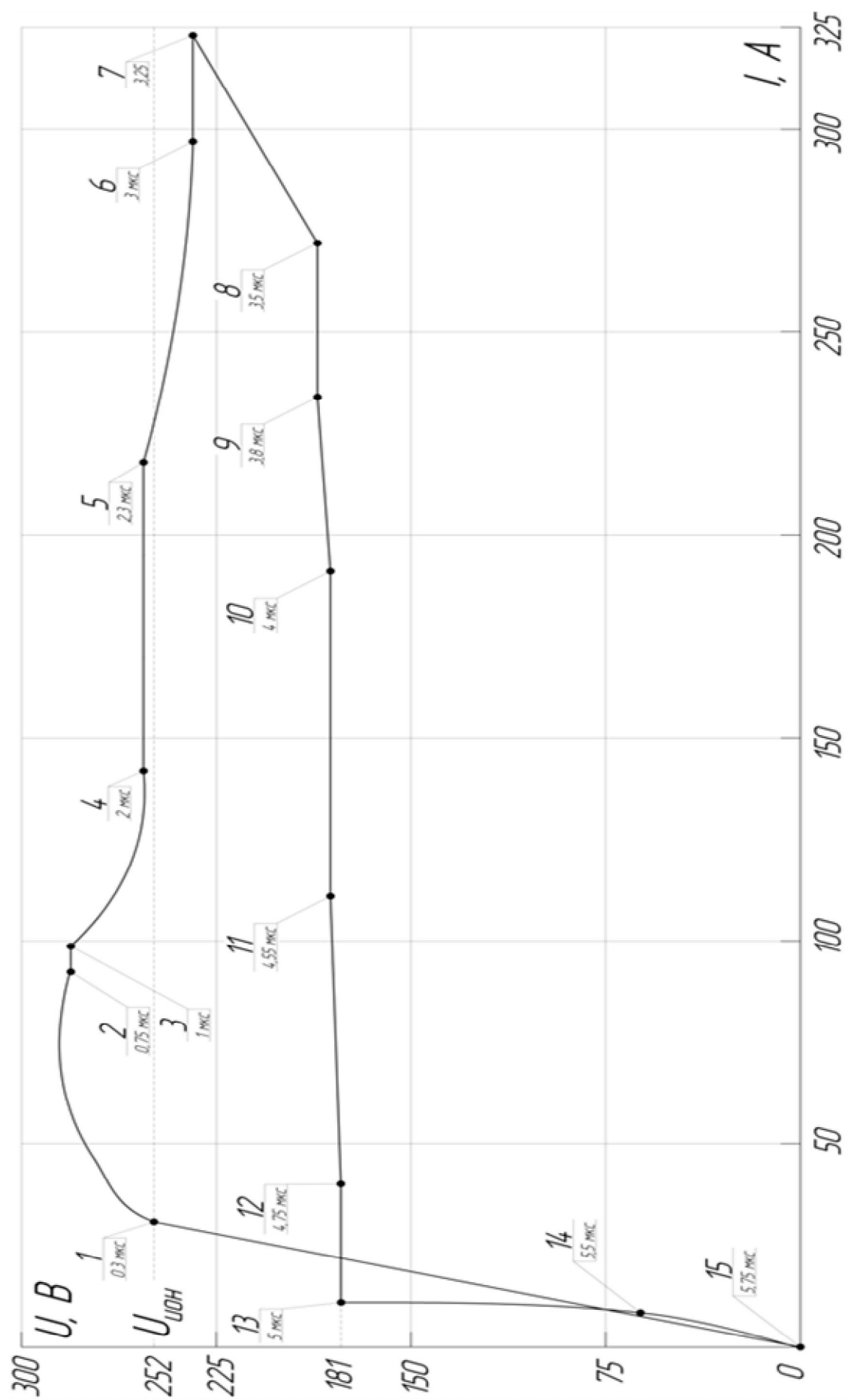


Рис. В.3 Вольт-амперна характеристика міжелектродного проміжку технологічної ка-
мери при проходженні через нього ІС

Як можна бачити з вольт-амперної характеристики наведеної на рис. В.3, поріг іонізації другого та третього електроіскрового розряду вищий за поріг іонізації першого.

Аналіз значної кількості експериментально отриманих осцилограм імпульсів струму в електроіскровому навантаженні та спаду напруги на ній з великою ймовірністю дозволяє зробити наступні висновки:

1. При негармонійному характері розряду в ЕІН затримка часу між моментом подачі напруги на нього та виникненням в ньому першого електроіскрового струмопровідного каналу носить суто імовірнісний характер. У деяких випадках він взагалі не встигає виникнути.

2. Кількість паралельно виникаючих електроіскрових каналів в ЕІН носить суто імовірнісний характер, при цьому потенціал іонізації кожного наступного електроіскрового каналу менший за попередній, але, при цьому, майже завжди більший ніж у першого. Тому, чим більший потенціал іонізації виникнення першого електроіскрового каналу тим більша імовірність виникнення паралельних йому каналів.

3. Виникаючи в електроіскровому навантаженні паралельні електроіскрові канали мають різний час існування. При цьому найбільш імовірно, що останніми загасають електроіскрові канали які мають найменший потенціал іонізації. Таким чином в більшості випадків останнім згасає канал який виникнув першим.

4. Електричний струм, що протікає в розрядному колі під час проходження переднього фронту ІС, змінюється в часі за лінійним законом, або має слабо виражений вид ламаної лінії, за виключенням часу формування першого електроіскрового каналу. Даний вид часової залежності струму обумовлений від'ємним приростом в часі опору електроіскрового навантаження.

5. Часова залежність електричного струму, що протікає в розрядному колі під час проходження заднього фронту ІС, має вид ламаної лінії. На першій ділянці ламаної відбувається вільний перехідний процес перетворення, накопиченої на розподілений індуктивності розрядного кола, енергії магнітного поля на теплову в ЕІН, якій закінчується при досягненні спадом напруги на електроіскровому навантаженні мінімально необхідного рівня для підтримки існування в ньому електроіскрових ка-

налів. По мірі поступового послідовного затухання даних каналів відбувається поступове зростання опору ЕІН і, як наслідок, відбувається зменшення крутизни спадання ІС ньому. Останні ділянки ламаної відповідають процесу затухання останнього електроіскрового каналу та відновлення опору ЕІН.

5. Так як, розрядне коло володіє розподіленою індуктивністю виникнення електроіскрового каналу в ЕІН викликає зменшення спаду напруги на ньому. Таким чином, виникнення кожного наступного паралельного електроіскрового каналу в ЕІН зменшує вірогідність виникнення наступного.

Додаток Г

Визначення вихідних електричних параметрів формувача розрядних імпульсів

Для визначення видимої індуктивності формувача імпульсних струмів був застосований автоколивальний метод. До вихідних клем ФРІ були приєднані низькоімпедансний конденсатор (0,15 мкФ) та безіндуктивний резистор (108 Ом) відомих величин. Даний конденсатор утворює з вхідною індуктивністю ФРІ послідовний коливальний контур. Резистор задає необхідну добротність коливального контуру для уникнення появи можливих перенапруг на його реактивних елементах. Струм, що протікає через конденсатор, вимірювався за допомогою вимірювального трансформатора приєданого до осцилографа. Результати вимірювання даного стуму представлені на рис. Г.1.

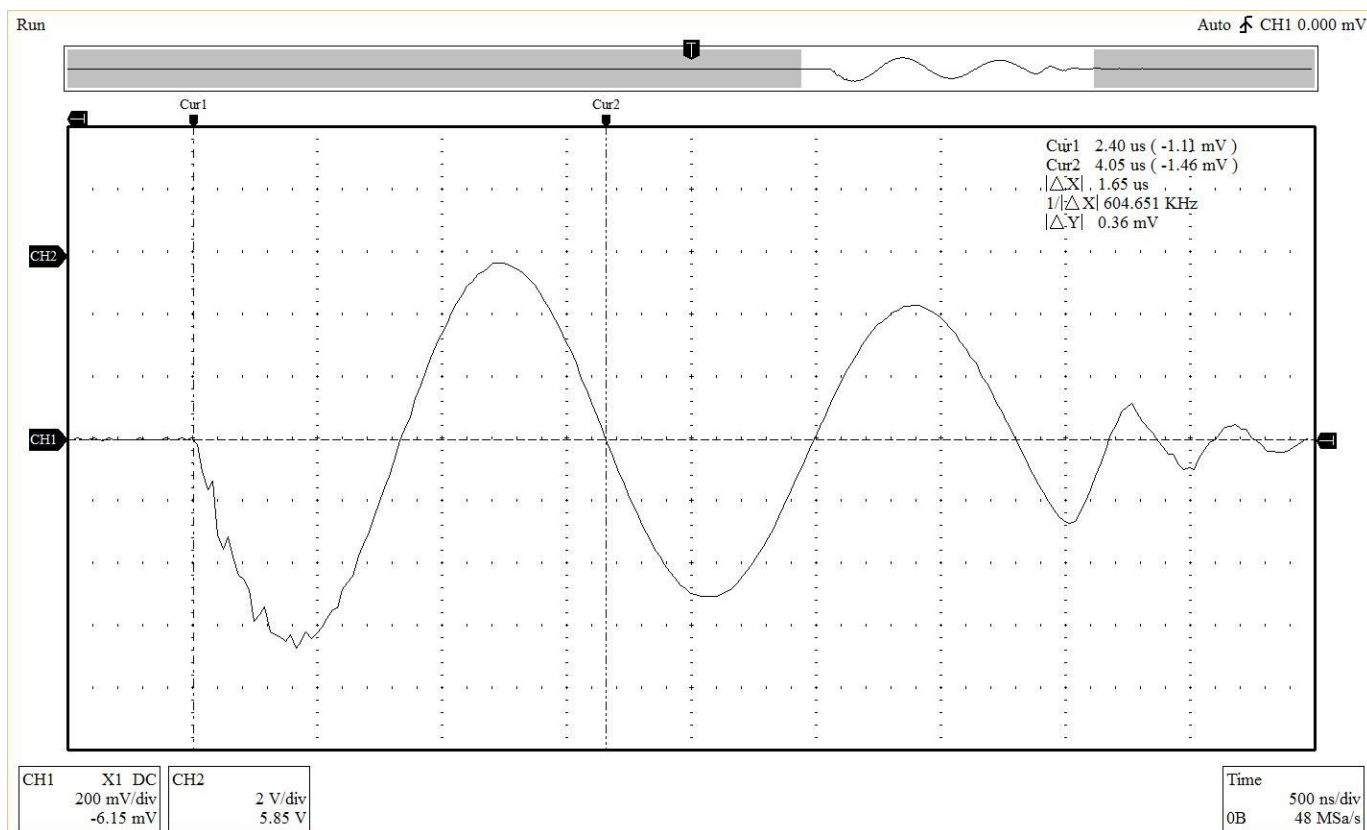


Рис. Г.1 Осцилограма автоколивань вихідної індуктивності ФРІ з ємнісним навантаженням (1 В відповідає 100 А)

У даному випадку елементами коливального контуру виступали конденсатор з відомою ємністю та індуктивність розрядного контуру ФРІ невідомої величини. За відомим значенням ємності конденсатора і періоду автоколивань стає можливим визначити невідому величину вхідної індуктивності ФРІ за відомою аналітичною залежністю

$$T = 2\pi\sqrt{L_0C}, \quad (\text{Г.1})$$

де T – період автоколивань, L_0 – вихідна індуктивність ФРІ, C – ємність конденсатора, звідки

$$L_0 = \frac{T^2}{4\pi^2C} = \frac{1.65^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot 0.15} 10^{-6} = 0.46, \text{ мкГн.} \quad (\text{Г.2})$$

Слід зазначити, що характер автоколивань затухаючий, тому, для підвищення точності визначення періоду автоколивань, період автоколивань визначався шляхом множення на чотири першої півчверті періоду автоколивань.

Для визначення відхідного активного опору ФРІ було застосовано метод короткого замикання. Вихідні клеми формувача імпульсних струмів були з'єднанні між собою закороткою, яка проходила через вимірювальний трансформатор струму приєднаний до осцилографа. Результати вимірювань струму короткого замикання ФРІ представлені на рис. Г.2.

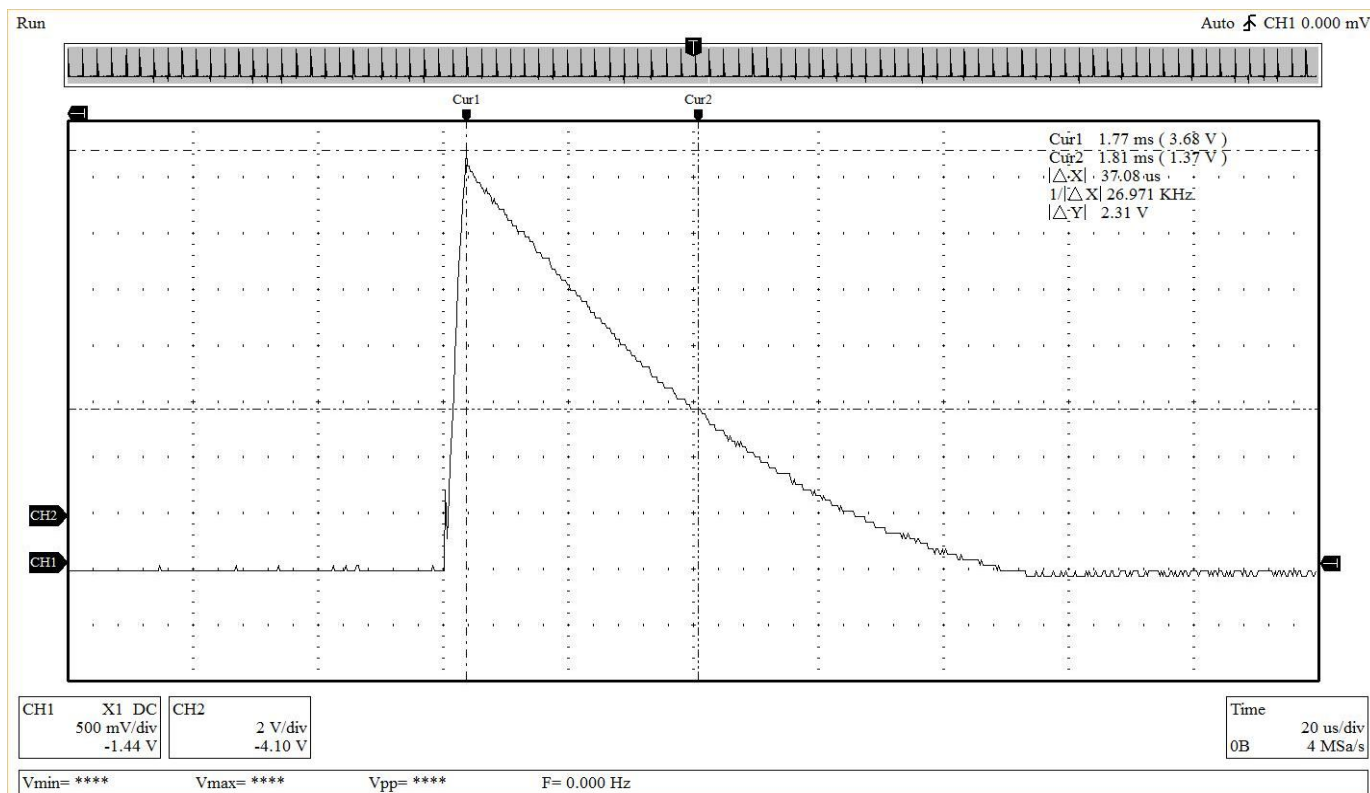


Рис. Г.2 Осцилограма струму короткого замикання ФРІ при напрузі на НК 66 В (1 В відповідає 100 А)

Так як, представлений на рис. Г.2 перехідний процес по передньому фронту ІС не встиг закінчиться до моменту запирання НП ЕК, внаслідок чого ІС не встиг досягти свого максимально можливого значення в даному режимі, вихідний активний опір ФРІ визначимо по вільному перехідному процесу, тобто по задньому фронту ІС. Для цього, за допомогою наведеної осцилограми визначимо постійну часу заднього фронту та за відомою залежністю, при відомій вихідній індуктивності ФРІ, визначимо значення його вихідного активного опору

$$\tau = \frac{L}{R}, \quad (\text{Г.3})$$

де τ – постійна часу релаксації струму в L - R контурі, звідки

$$R = \frac{L}{\tau} = \frac{0,46 \cdot 10^{-6}}{37,08 \cdot 10^{-6}} = 12,4, \text{ мОм.} \quad (\text{Г.4})$$

Додаток Д

Розрахунок погонної індуктивності з'єднувальних провідників

Для визначення погонних опорів ЗП спочатку було необхідно визначити загальну індуктивність розрядного контуру ФРІ. Для цього, в якості електричного навантаження був використаний паралельний $R-C$ ланцюг (0,15 мкФ, 108 Ом), приєднаний до ФРІ через досліджувані ЗП.

На рис. Д.1 наведена осцилограма затухаючого автоколивального процесу для електричного кола ФРІ – ЗП типу віта пара ($2 \times 50 \text{ мм}^2$) – паралельний $R-C$ ланцюг.

На рис. Д.2 наведена осцилограма затухаючого автоколивального процесу для електричного кола ФРІ – ЗП типу коаксіальний кабель ($70+16 \text{ мм}^2$) в коаксіальному режимі роботи – паралельний $R-C$ ланцюг.

На рис. Д.3 наведена осцилограма затухаючого автоколивального процесу для електричного кола ФРІ – ЗП типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил ($2 \times 7 \text{ мм}^2$) – паралельний $R-C$ ланцюг.

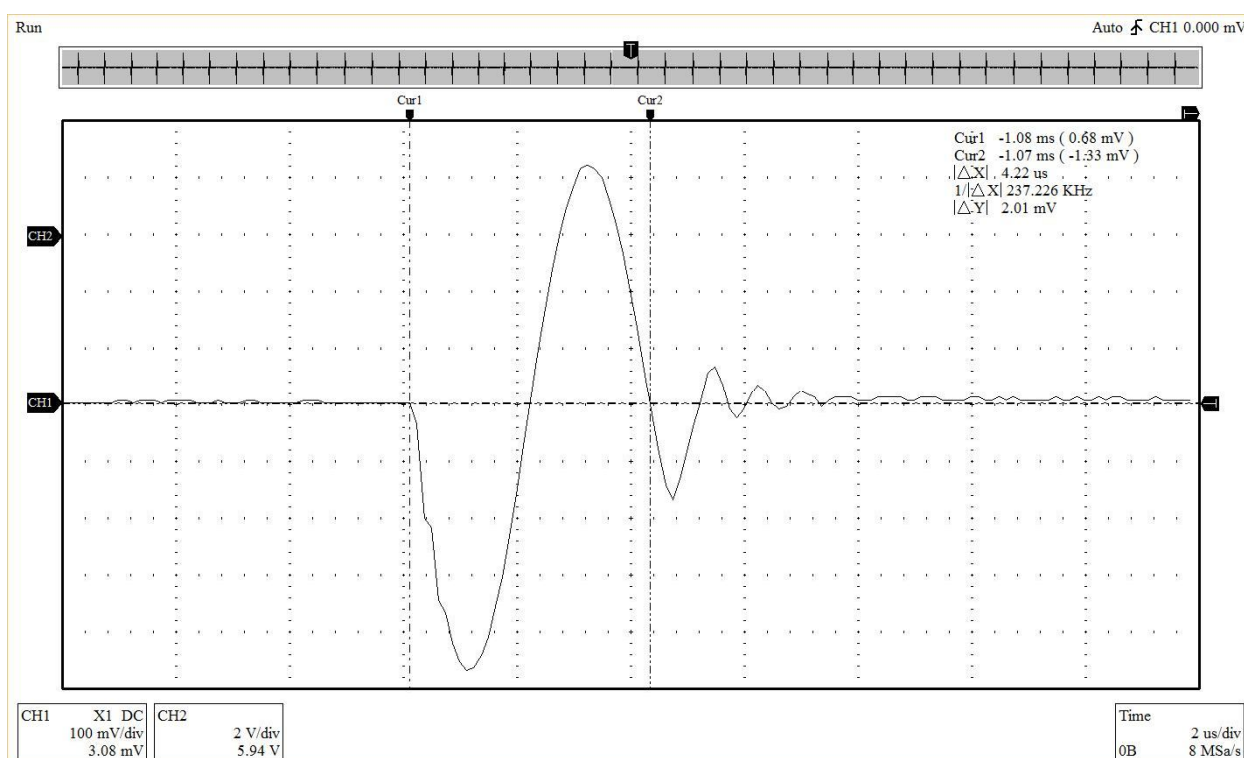


Рис. Д.1 Осцилограма затухаючого автоколивального процесу з кабелем типу віта пара в якості ЗП

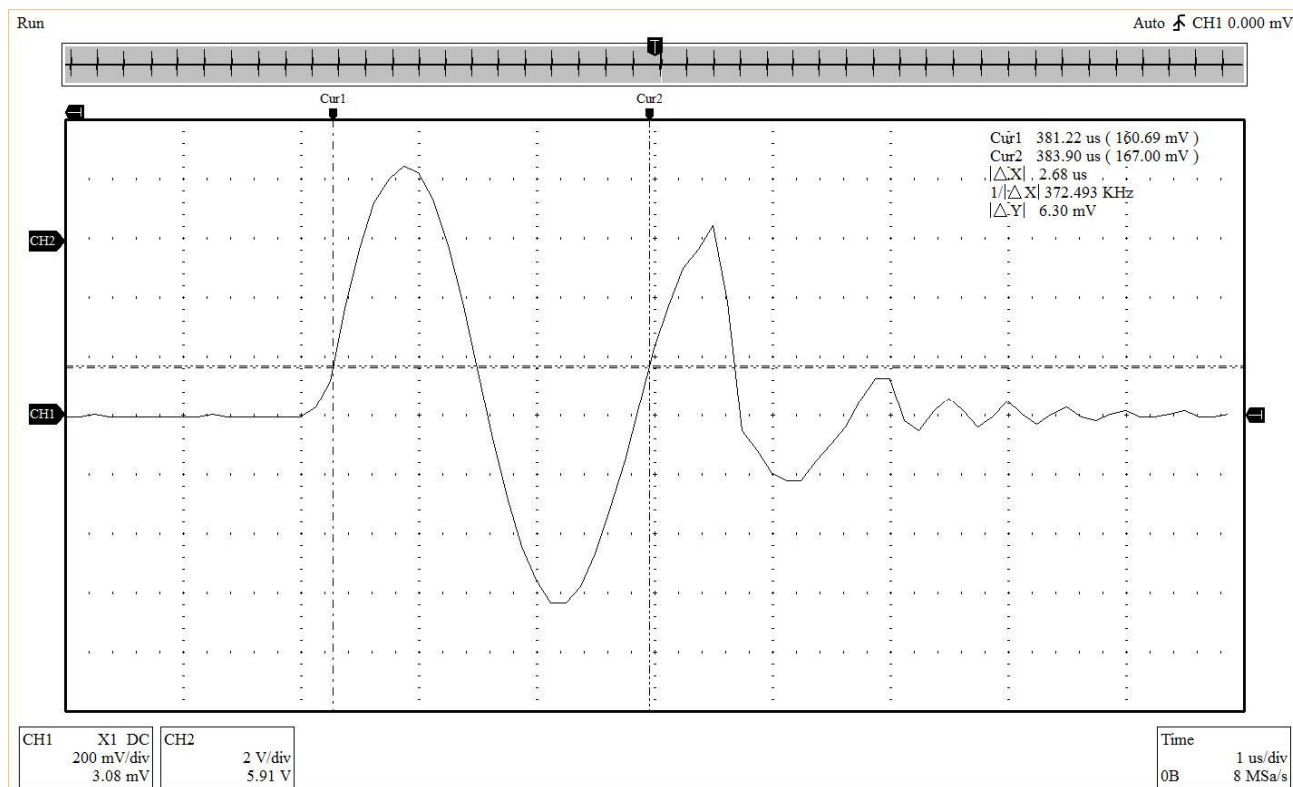


Рис. Д.2 Осцилограма затухаючого автоколивального процесу з коаксіальним кабелем в якості ЗП

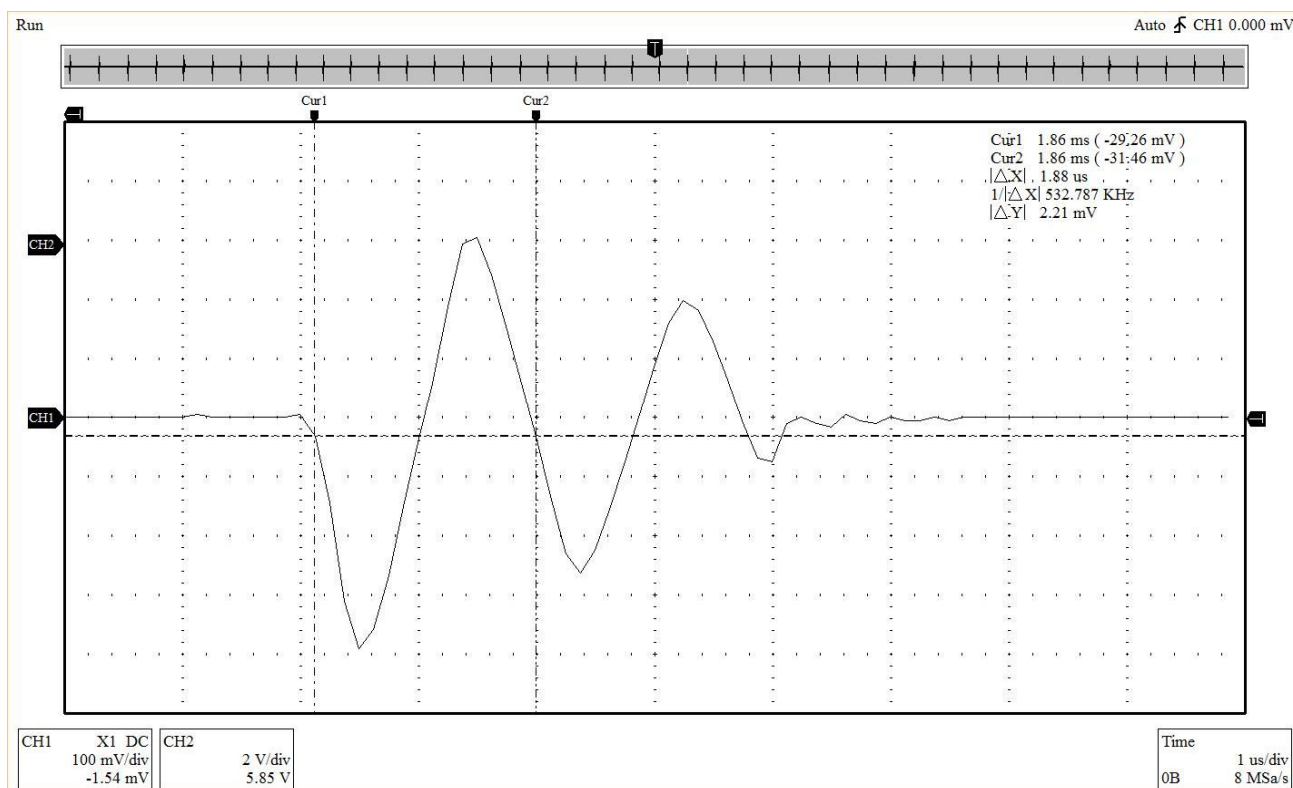


Рис. Д.3 Осцилограма затухаючого автоколивального процесу з кабелем типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил в якості ЗП

Як можна бачити з наведених вище осцилограм, найбільшу частоту автоколивань має електричне коло з кабелем типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил в якості ЗП, що свідчить про мінімальну загальну індуктивність даного кола відносно інших. Найменша частота автоколивань у кола з кабелем типу вита пара в якості ЗП, що свідчить про максимальну загальну індуктивність даного кола відносно інших.

Розрахунок погонної індуктивності з'єднувальних провідників виконано за наступною аналітичною залежністю

$$L_n = \frac{1}{l} \left(\frac{T^2}{4\pi^2 C} - L_0 \right), \quad (\text{Д.1})$$

де l – довжина кабелю, T - період автоколивань, C - ємність конденсатора, L_0 - вихідна індуктивність ФРІ.

Додаток Е

Розрахунок активного опору та ефективного перерізу з'єднувальних провідників

На рис. Е.1 наведена осцилограма опиту короткого замикання ФРІ на кабель типу віта пара; на рис. Е.2 наведена осцилограма опиту короткого замикання ФРІ на коаксіальний кабель; на рис. Е.3 наведена осцилограма опиту короткого замикання ФРІ на кабель типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил.

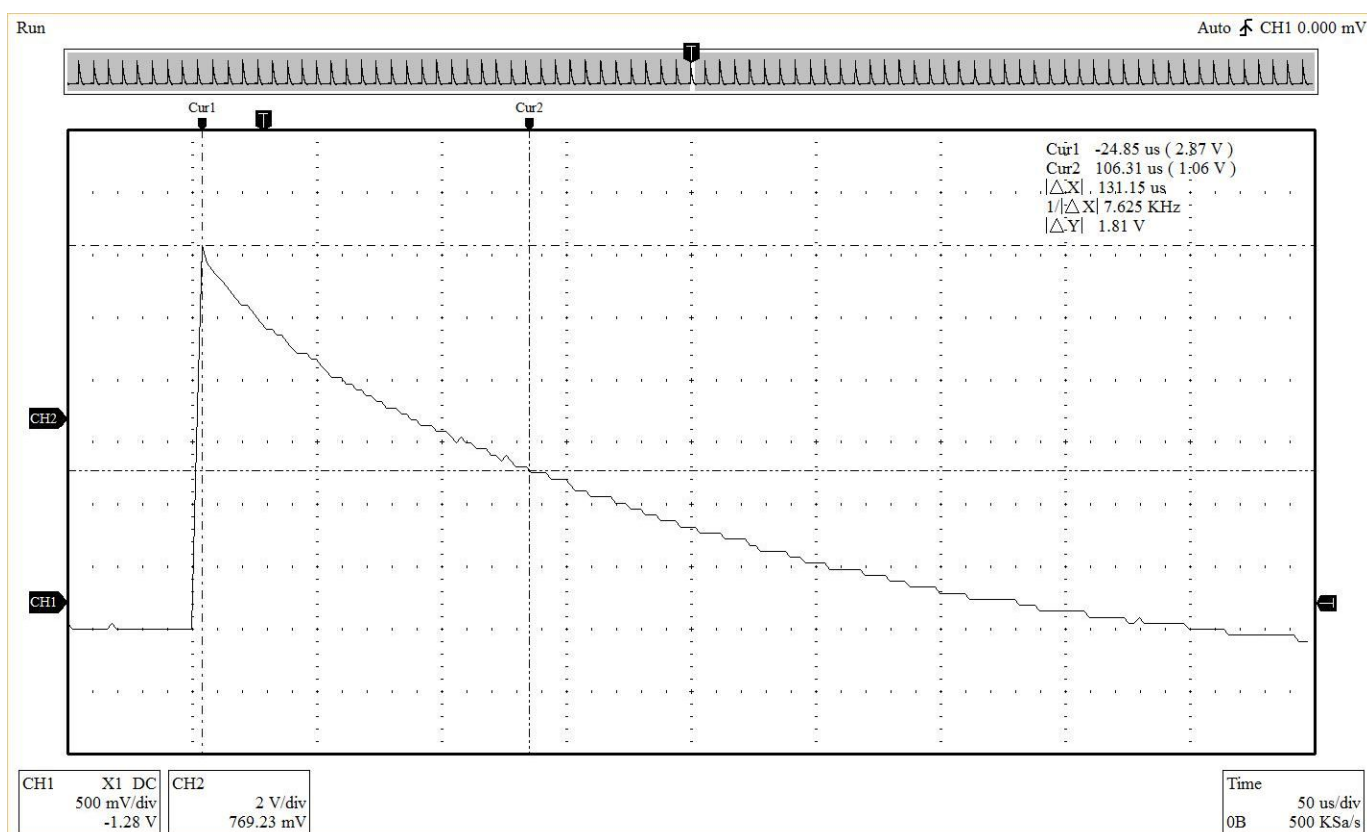


Рис. Е.1 Осцилограма опиту короткого замикання ФРІ на кабель типу віта пара
(1 В відповідає 100 А)

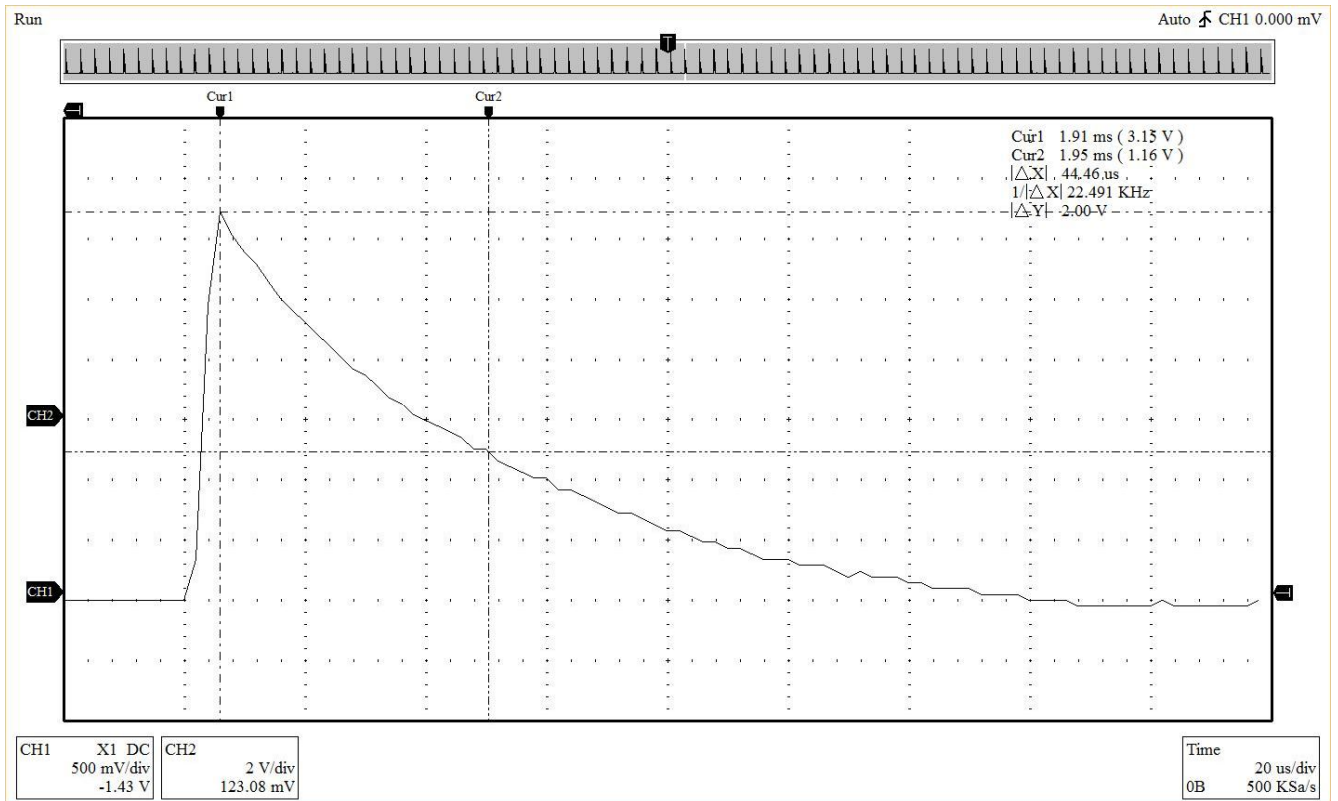


Рис. Е.2 Осцилограма опиту короткого замикання ФРІ на кабель типу віта пара (1 В відповідає 100 А)

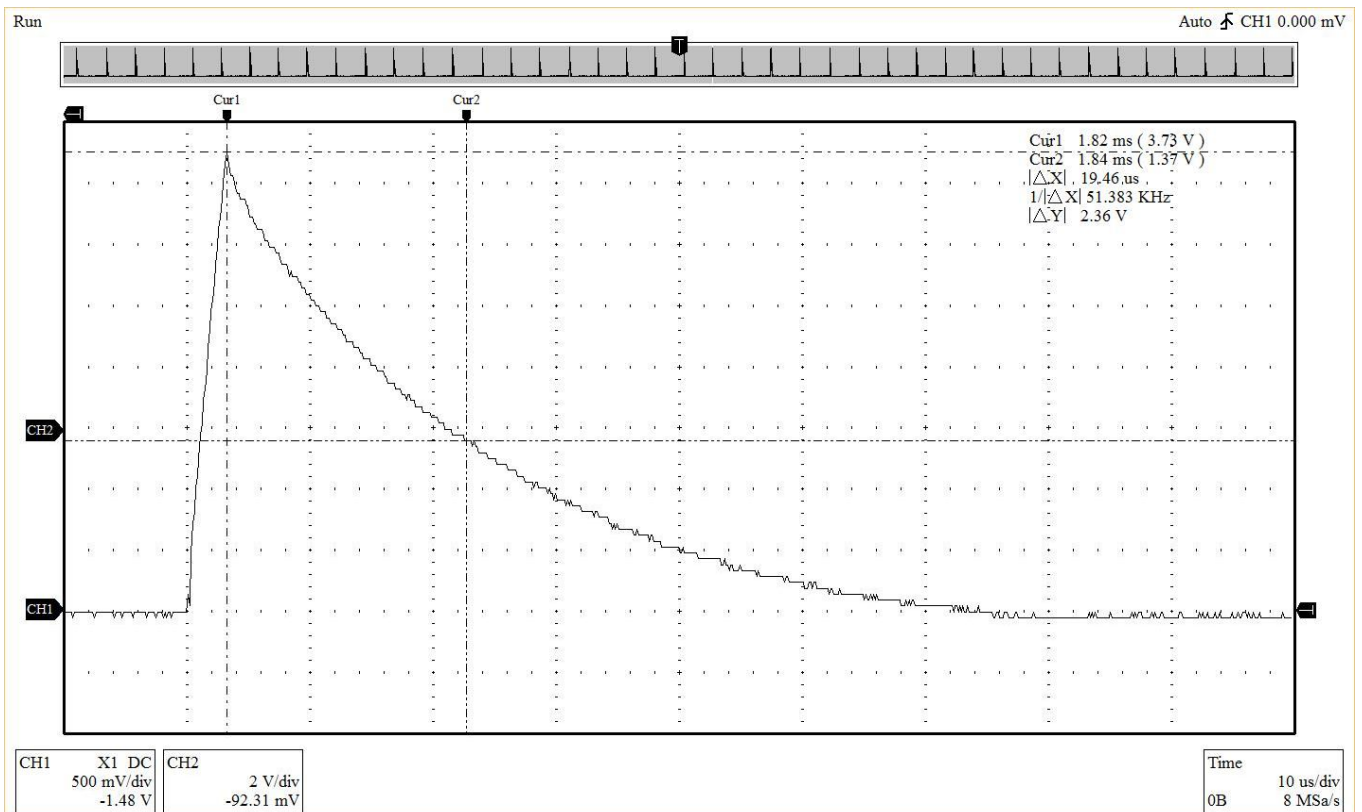


Рис. Е.3 Осцилограма опиту короткого замикання ФРІ на кабель типу літцентрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил (1 В відповідає 100 А)

З осцилограм представлених на рис. Е.1–Е.3 за наступною аналітичною залежністю

$$R_n = \frac{1}{l} \left(\frac{L}{\tau} - R_0 \right), \quad (\text{Е.1})$$

де l – довжина кабелю, L - індуктивність розрядного кола, τ - постійна часу релаксації ІС, R_0 – вихідний активний опір ФРІ, було визначено активні погонні опори кабелів що досліджуються.

Ефективний переріз струмопровідних жил даних кабелів визначався за наступною аналітичною залежністю

$$S_e = \frac{\rho l \tau}{L - \tau R_0}, \quad (\text{Е.2})$$

де ρ – питомий електричний опір (для міді становить $0,0175 \cdot 10^{-6}$ Ом·м).

Додаток Ж

Осцилограми імпульсних струмів в безіндукційному резистивному навантаженні

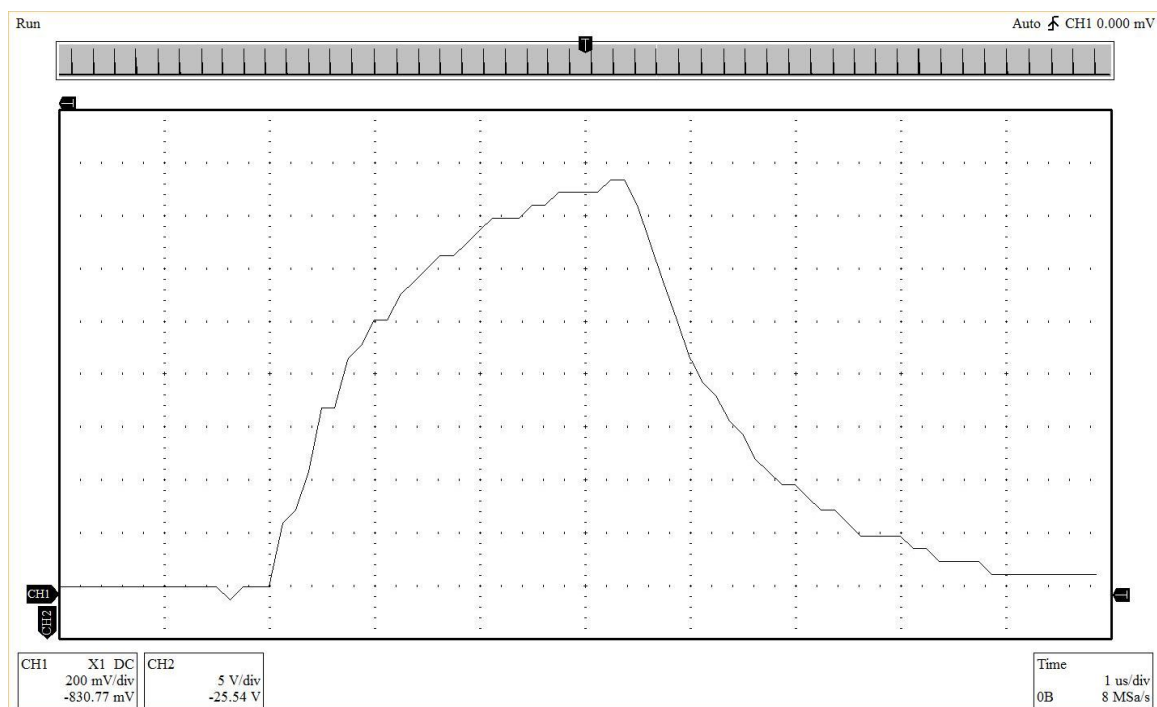


Рис. Ж.1 Осцилограма ІС в ЕН 3 Ом при його з'єднанні з ФРІ ЗП типу віта пара
(1 В відповідає 100 А)

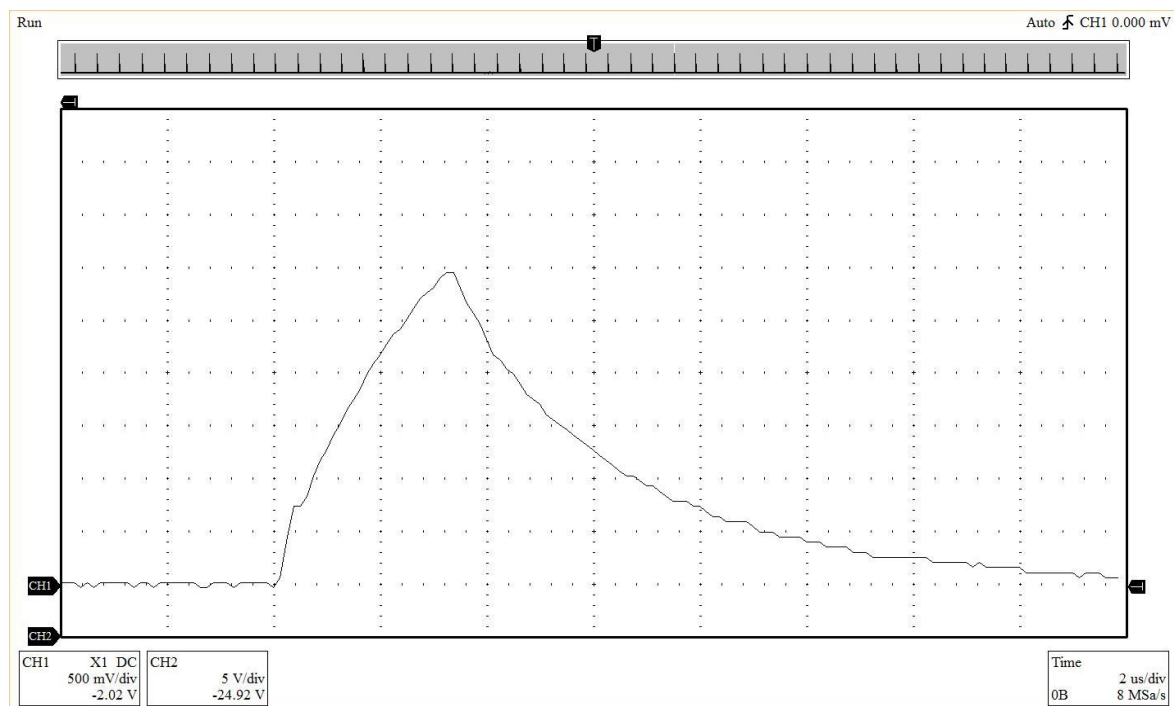


Рис. Ж.2 Осцилограма ІС в ЕН 1 Ом при його з'єднанні з ФРІ ЗП типу віта пара
(1 В відповідає 100 А)

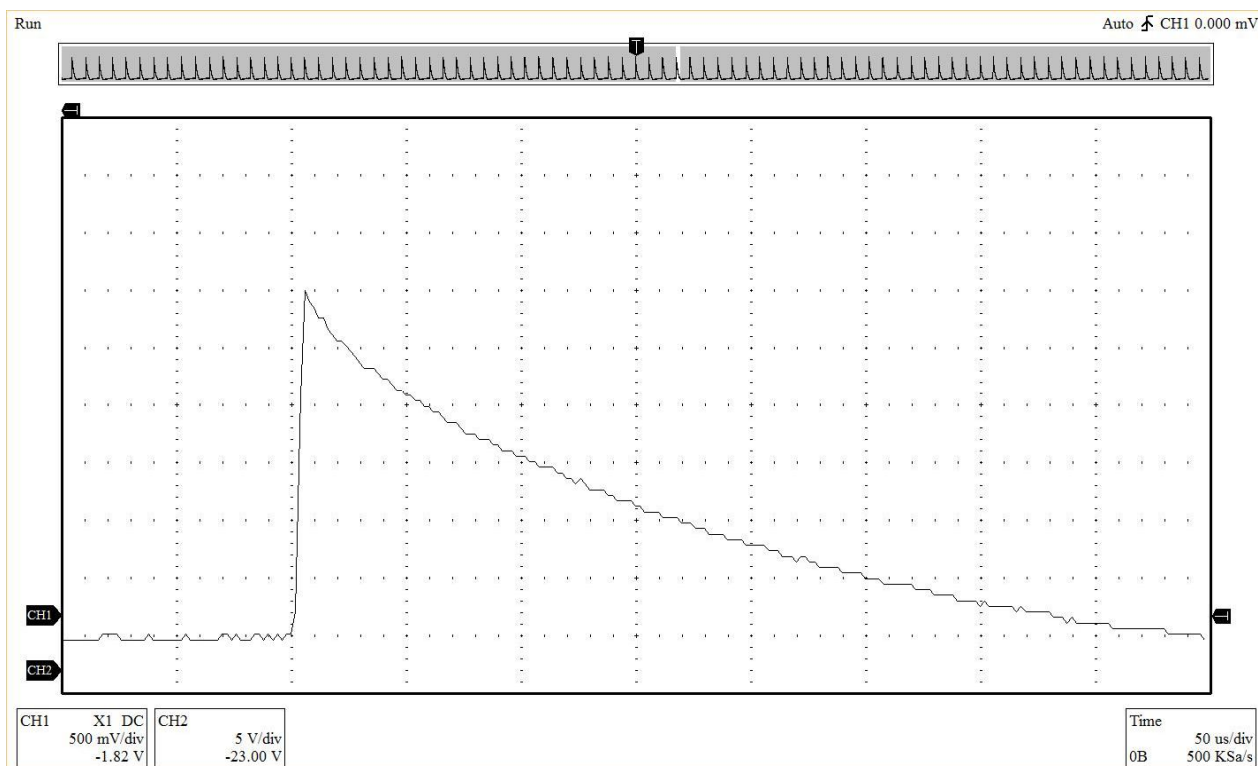


Рис. Ж.3 Осцилограма ІС при короткому замиканні ФРІ на ЗП типу віта пара
(1 В відповідає 100 А)

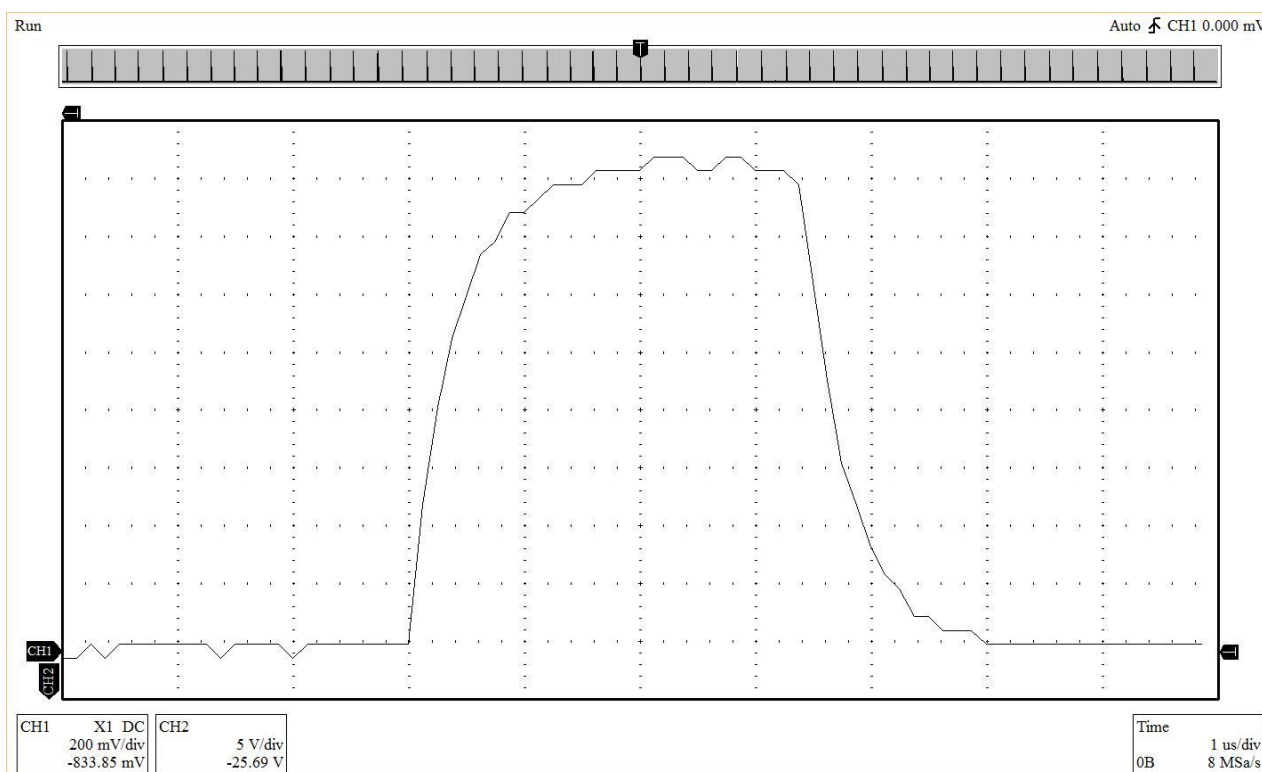


Рис. Ж.4 Осцилограма ІС в ЕН 3 Ом при його з'єднанні з ФРІ ЗП типу СВКК
(1 В відповідає 100 А)

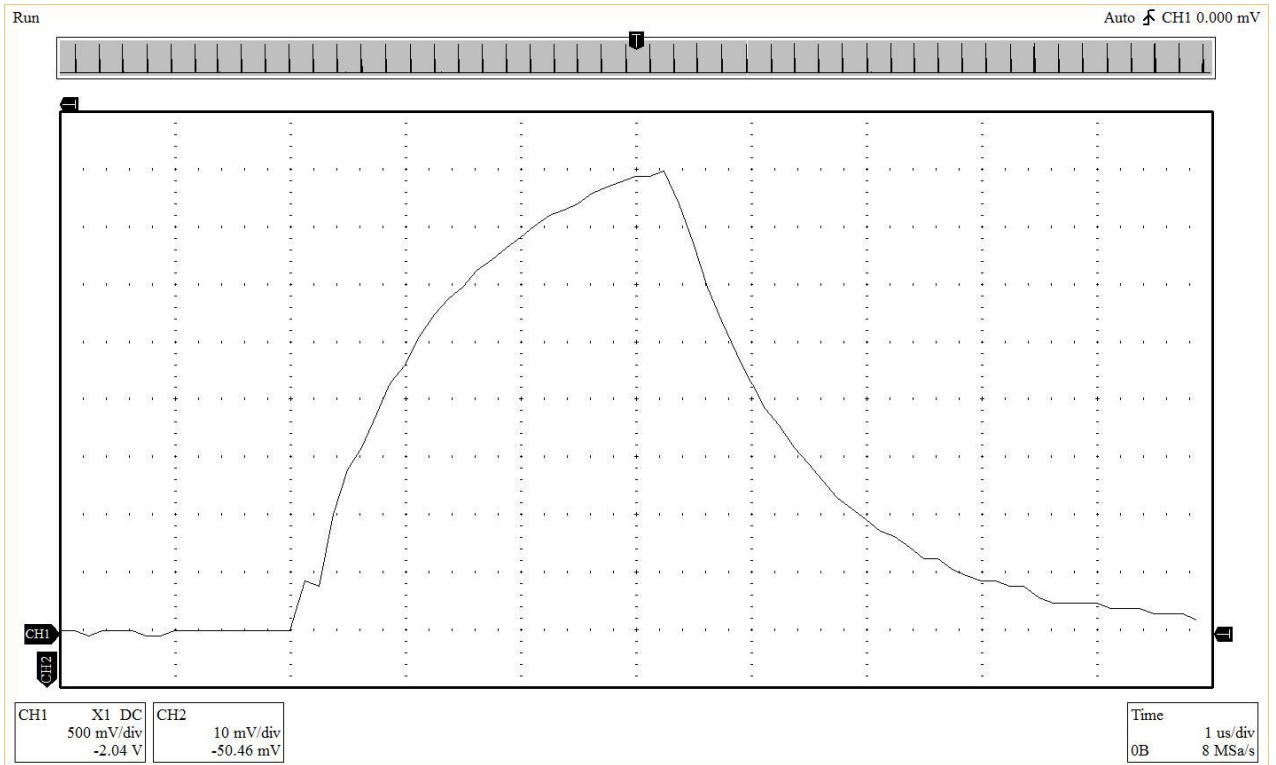


Рис. Ж.5 Осцилограма ІС в ЕН 1 Ом при його з'єднанні з ФРІ ЗП типу СВКК
(1 В відповідає 100 А)

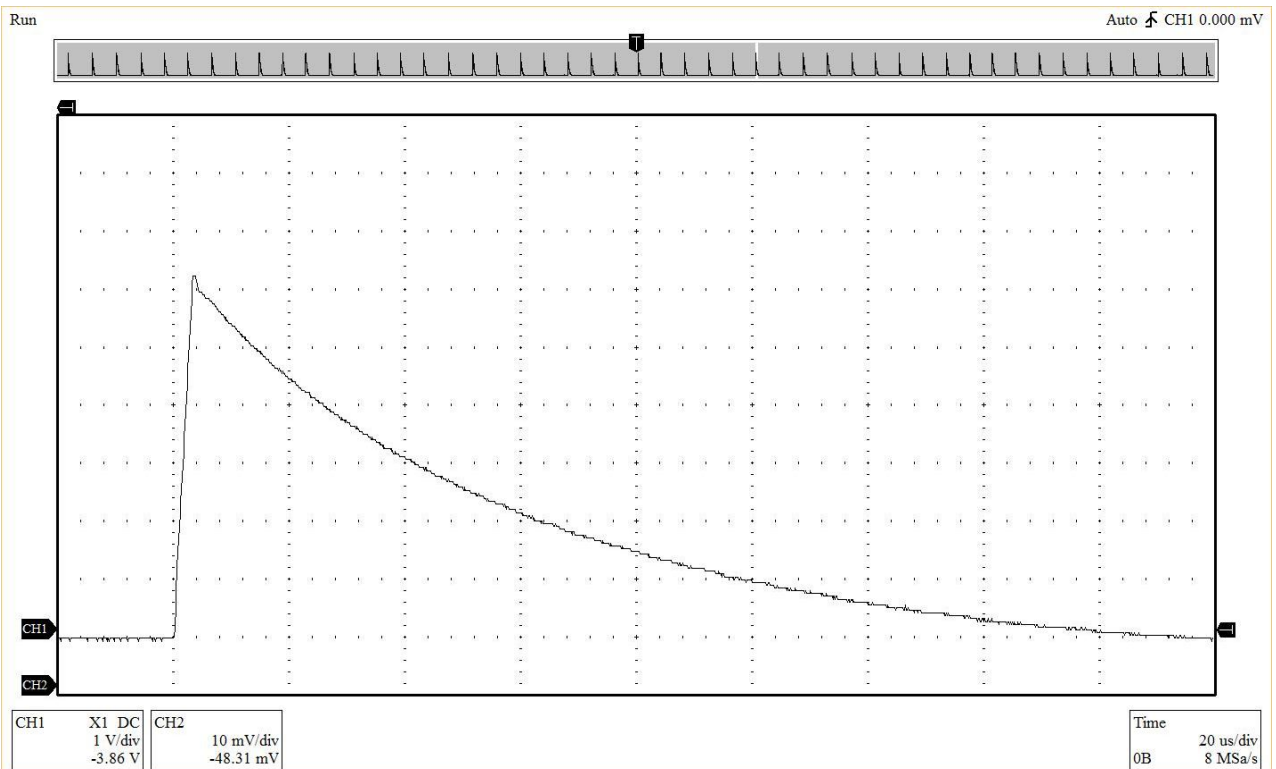


Рис. Ж.6 Осцилограма ІС при короткому замиканні ФРІ на ЗП типу СВКК
(1 В відповідає 100 А)

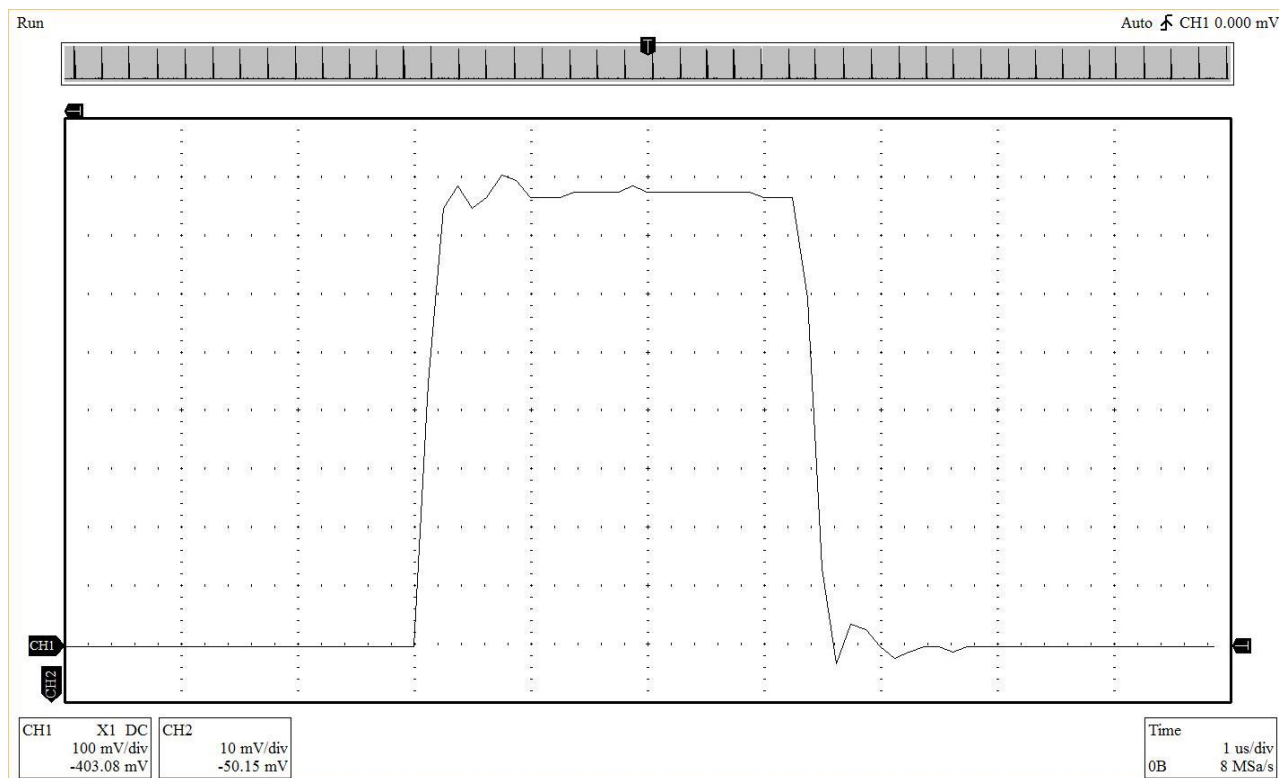


Рис. Ж.7 Осцилограма ІС в ЕН 3 Ом при його з'єднанні з ФРІ ЗП типу літцентрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил (1 В відповідає 100 А)

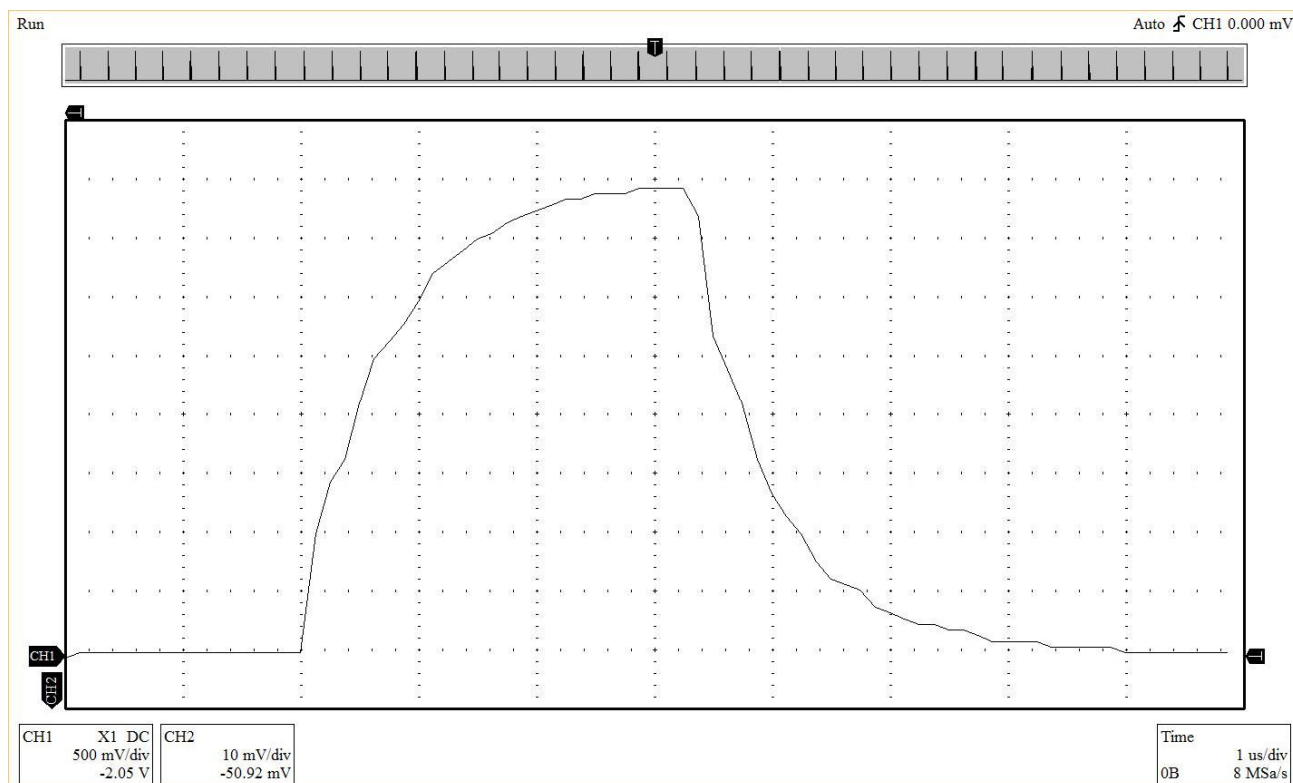


Рис. Ж.8 Осцилограма ІС в ЕН 1 Ом при його з'єднанні з ФРІ ЗП типу літцентрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил (1 В відповідає 100 А)

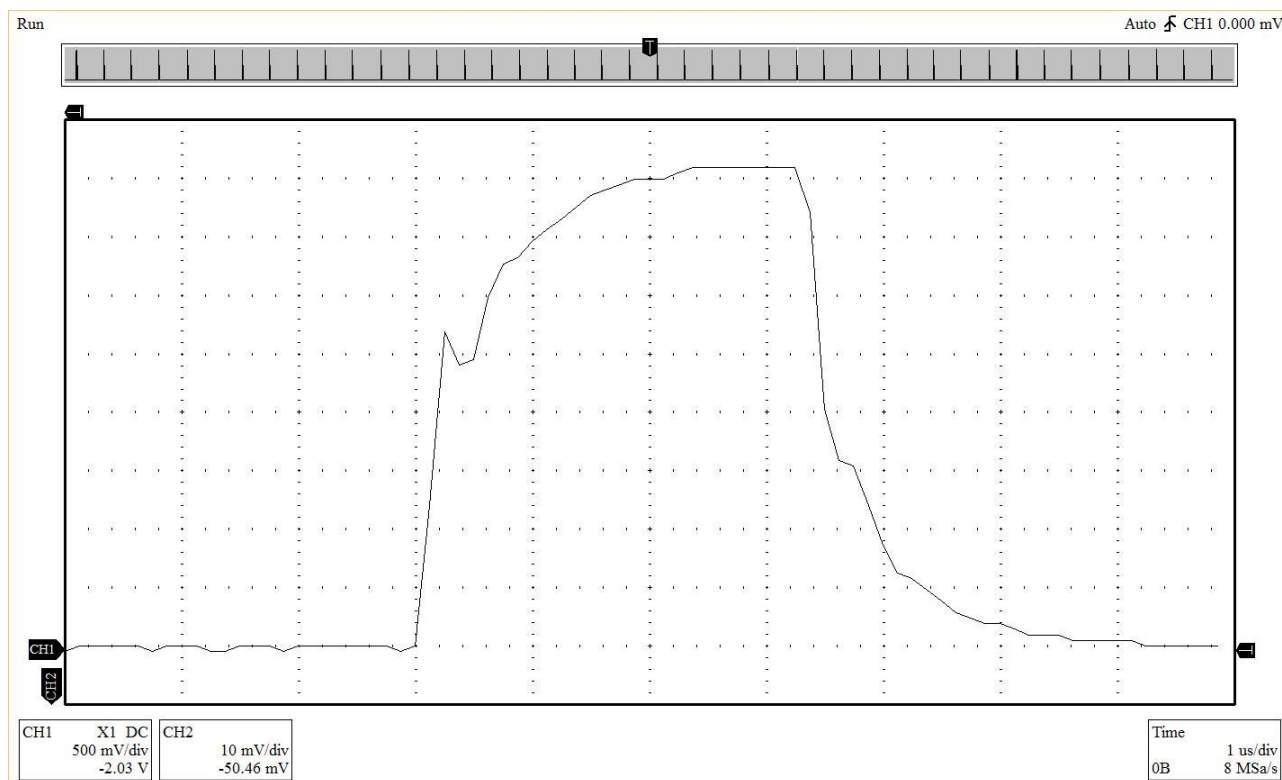


Рис. Ж.9 Осцилограма ІС в ЕН 1 Ом при його з'єднанні з ФРІ ЗП типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил (2 паралель) (1 В відповідає 100 А)

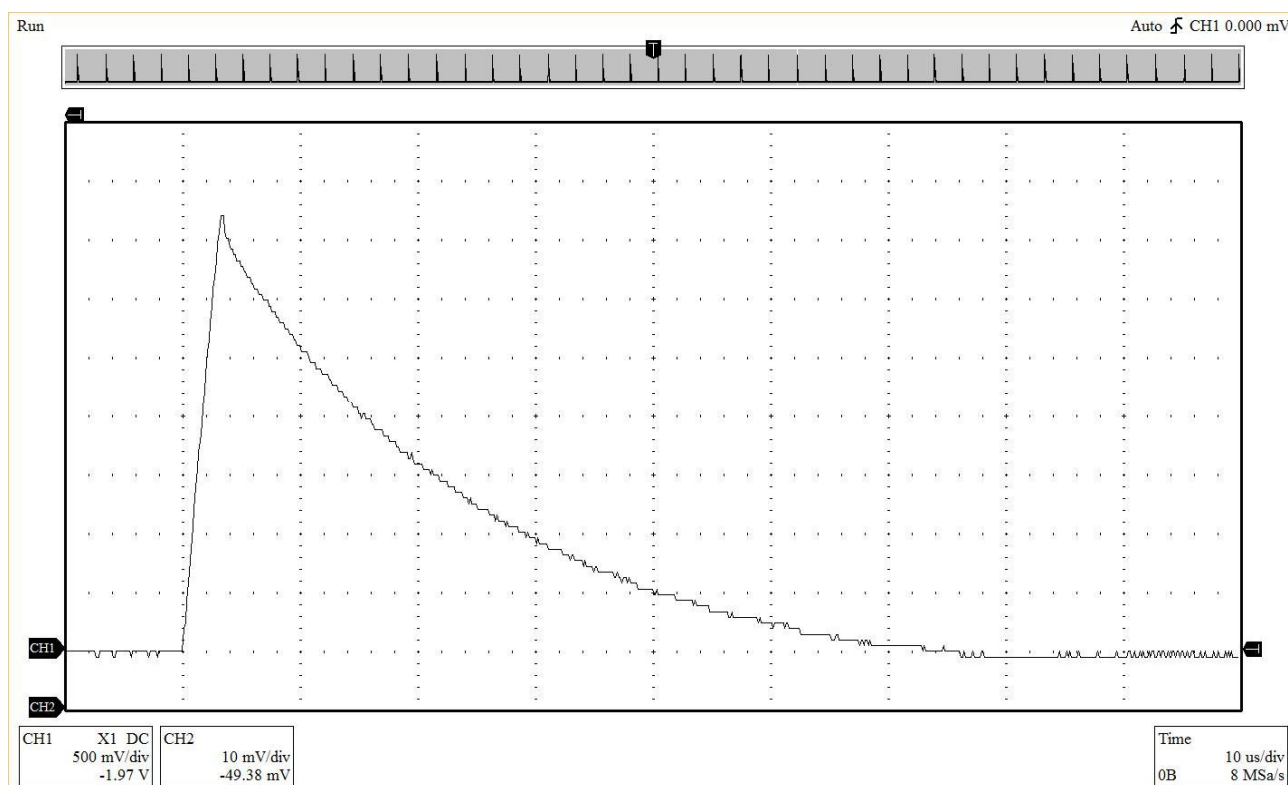


Рис. Ж.10 Осцилограма ІС при короткому замиканні ФРІ на ЗП типу літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил (1 В відповідає 100 А)

Додаток И

Вимірювання індуктивності технологічної камери

Власна індуктивність технологічної камери, як і у випадку ЗП, визначалась автоколивальним методом. Для цього було проведено два опити. У першому опиті, до виводів СВКК, в якості ЕН, був приєднаний електростатичний конденсатор з відомою ємністю (0,145 мкФ). У другому опиті, даний конденсатор був приєднаний до електродів технологічної камери, які, в свою чергу, були приєднані до струмопровідних жил СВКК. Інші два СВКК були приєднані до вивідних клем ФРІ. При навантаженні розрядного кола ФРІ на ємнісне навантаження в ньому виникає коливний затухаючий перехідний процес, частота автоколивань якого визначається величиною ємності електростатичного конденсатора та загальною індуктивністю розрядного кола.

На рис. И.1 та И.2 наведені осцилограми струму в розрядному колі ФРІ з ємнісним електричним навантаженням відповідно при відсутній та наявній технологічній камері в даному колі.

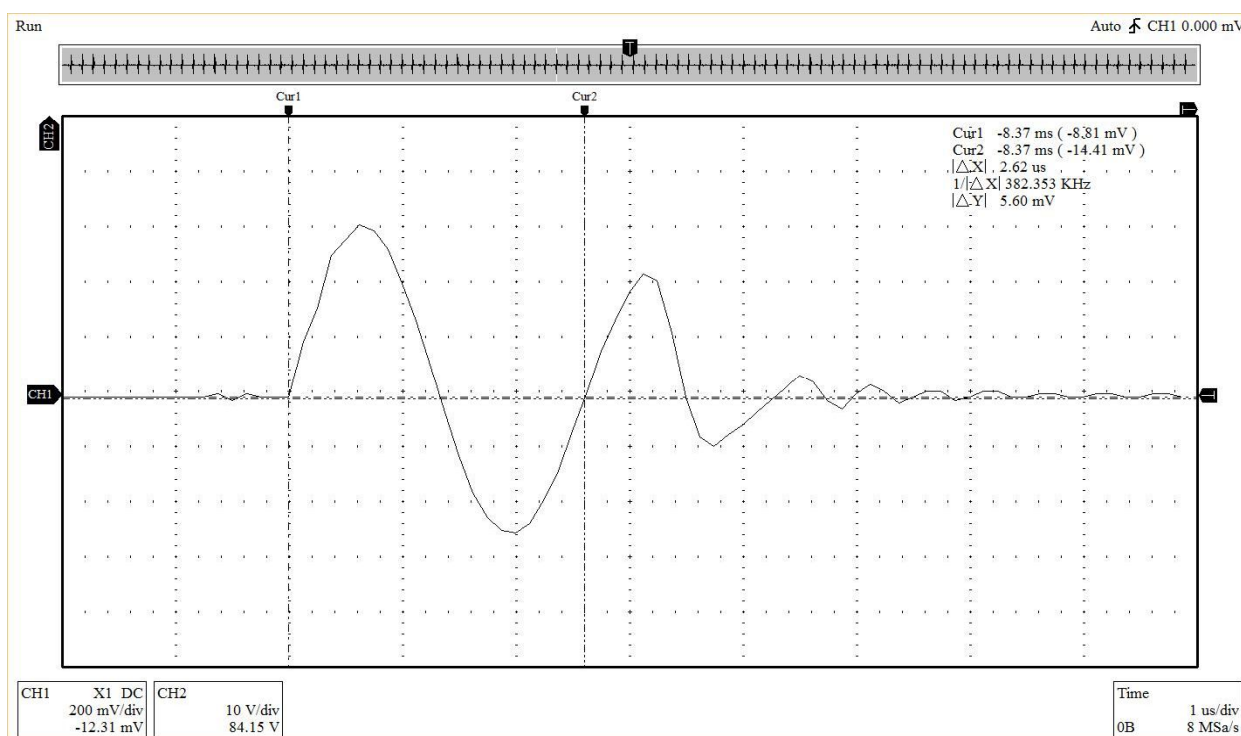


Рис. И.1 Осцилограма струму в розрядному колі ФРІ з відсутньою технологічною камерою (1 В відповідає 100 А)

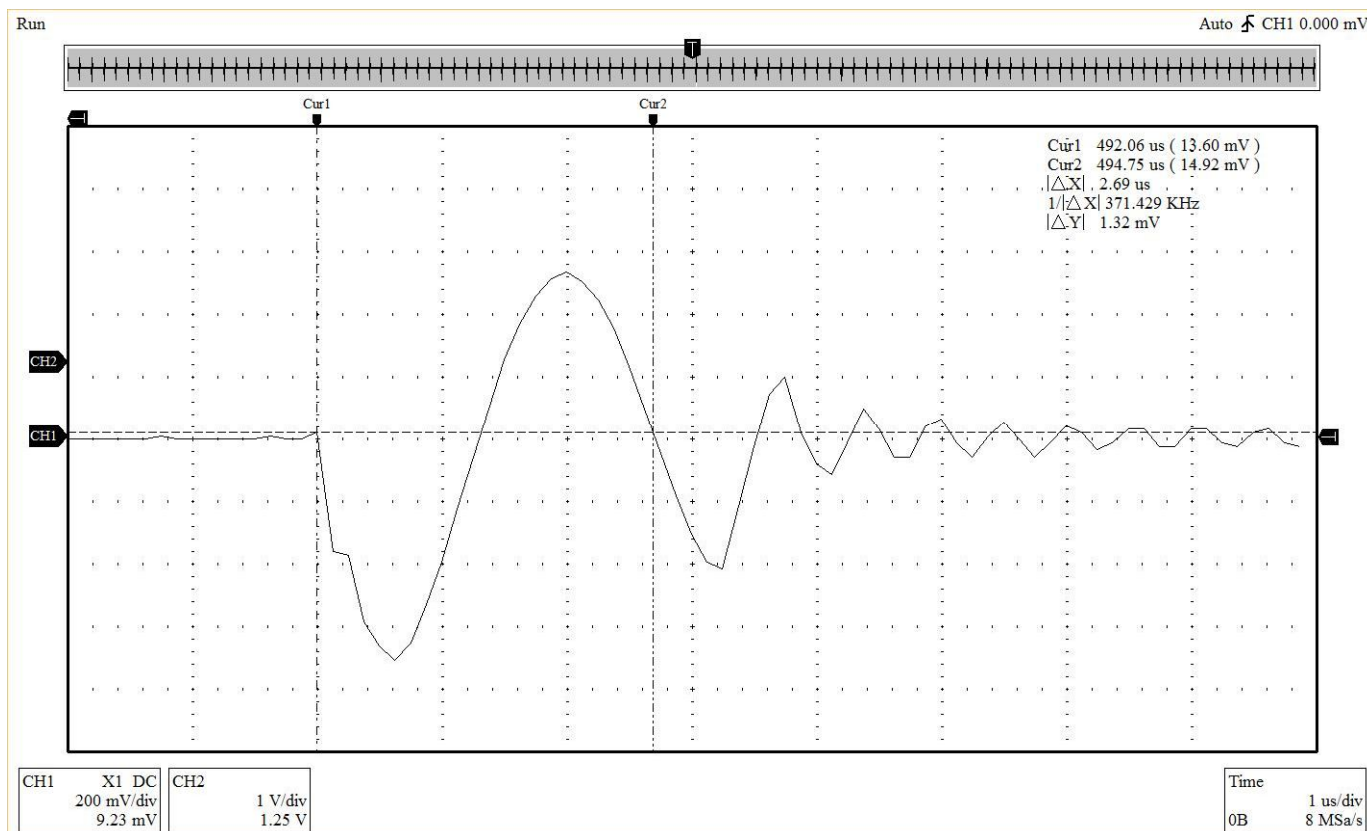


Рис. И.2 Осцилограма струму в розрядному колі ФРІ з наявною технологічною камерою (1 В відповідає 100 А)

Визначити власну індуктивність технологічної камери можна через період автоколивань у розрядному колі

$$L_{TK} = \frac{T_2^2 - T_1^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot C} = \frac{(2.69 \cdot 10^{-6})^2 - (2.62 \cdot 10^{-6})^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot 0.145 \cdot 10^{-6}} = 65 \text{ нГн}, \quad (\text{И.1})$$

де T_1 та T_2 – періоди автоколивань в розрядному колі з відсутньою та наявною технологічною камерою відповідно, C – величина електричної ємності навантаження.

Додаток К

**Перехідні процеси в радіально неоднорідній електричній ізоляції
силових високовольтних коаксіальних кабелів**

Якщо після від'єднання СВКК від джерела постійної напруги не робити короткочасного розряду геометричної ємності, то в його ізоляції також піде вільний перехідний процес, при якому вільний електричний заряд накопчений на жилах кабелю та в об'ємі кабельної ізоляції буде поступово стикати через електричну ізоляцію внаслідок наявної у неї електричної провідності. При цьому напруга між жилами кабелю буде поступово знижуватися, а енергія електричного поля, зосереджена в кабельній ізоляції, перетворюватись на теплову. Часова функція напруги саморозряду ємності кабелю з РНЕІ, отримана за допомогою диференційної схеми її заміщення, визначається наступним рівнянням

$$U_{cp}(t) = - \int_{r_1}^{r_2} E(r,t) \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr, \quad (K.1)$$

де $E(r,t)$ – функція радіального розподілу напруженості електричного поля в ізоляції кабелю в момент від'єднання його від джерела постійної напруги. Для моментів часу $t=0$ і $t=\infty$ дана функція приймає вигляд

$$U_{cp}(t=0) = - \frac{U}{v} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr, \quad (K.2)$$

$$U_{cp}(t=\infty) = - \frac{U}{v} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma_e}{\gamma(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr. \quad (K.3)$$

Для диференційної схеми заміщення неоднорідної електроізоляції напруга саморозряду для моментів часу $t=0$ і $t=\infty$ описується наступними рівняннями

$$U_{cp}(t_0) = \frac{U_0 R (C R_a C_a \alpha_1 + C)}{R C (2 R_a C_a \alpha_1 + 1) + C_a (R + R_a)} e^{\alpha_1 t} + \frac{U_0 R (C R_a C_a \alpha_2 + C)}{R C (2 R_a C_a \alpha_2 + 1) + C_a (R + R_a)} e^{\alpha_2 t}, \quad (K.4)$$

$$U_{cp}(t_{\infty}) = \frac{U_0 R (C R_a C_a \alpha_1 + C + C_a)}{R C (2 R_a C_a \alpha_1 + 1) + C_a (R + R_a)} e^{\alpha_1 t} + \frac{U_0 R (C R_a C_a \alpha_2 + C + C_a)}{R C (2 R_a C_a \alpha_2 + 1) + C_a (R + R_a)} e^{\alpha_2 t}. \quad (K.5)$$

Часові залежності напруги саморозряду отримані за допомогою аналітичних виразів (К.2–К.5) наведені на рис. К.1.

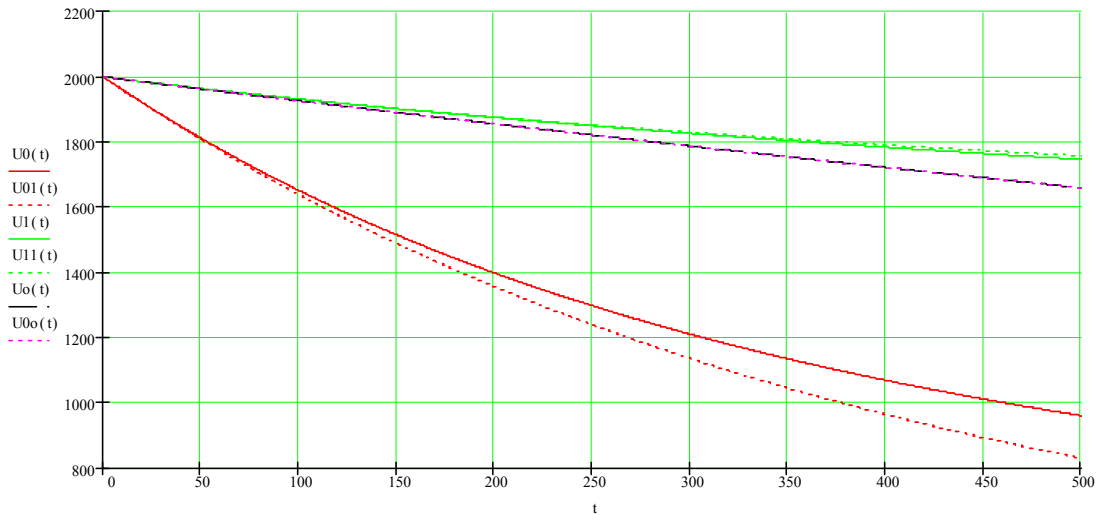


Рис. К.1 Напруги саморозряду для кабелю з еквівалентною однорідною ізоляцією та кабелю з неоднорідною ізоляцією для моментів часу $t=0$ і $t=\infty$, отриманні за допомогою інтегральної та диференційної схем заміщення ізоляції

Як можна бачити з наведених часових залежностей на рис. К.1, для кабелю з неоднорідною ізоляцією напруга саморозряду відміна від такої у кабелю з еквівалентною однорідною ізоляцією, окрім того швидкість її спадання залежить від тривалості заряду кабелю від джерела постійної напруги. Чим більший час заряду тим повільніше буде спадати напруга саморозряду. Це обумовлено накопиченням в об'ємі електричної ізоляції абсорбційного заряду. При тривалому заряді кабелю від джерела постійної напруги абсорбційний заряд в об'ємі електричної ізоляції встигає повністю накопичитись, а при короткочасному заряді абсорбційний заряд в електричній ізоляції на момент початку вільного перехідного процесу повністю відсутній.

У момент від'єднання СВКК від джерела постійної напруги електричний заряд накопичений на його жилах починає стікати через електричну ізоляцію, а напруга на його жилах починає поступово знижуватись. У випадку коли абсорбційний заряд в ізоляції кабелю встиг накопичитись, в ізоляції кабелю окрім струмів витоку в тому

же напрямку почнуть протікати струми десорбції. Внаслідок чого, напруга на жилах кабелю буде спадати повільніше ніж у еквівалентного кабелю з однорідною ізоляцією. А у разі коли абсорбційний заряд в ізоляції кабелю на момент початку перехідного процесу повністю відсутній почнеться процес його накопичення. Даний процес відбувається з поглинанням енергії, тому напруга на жилах кабелю почне спадати швидше ніж у еквівалентного кабелю з однорідною ізоляцією. В деякий момент часу абсорбція електричного заряду зміниться на десорбцію в наслідок чого швидкість спадання напруги на жилах кабелю починає знижуватись.

У контексті диференційної схеми заміщення РНЕІ, після від'єднання СВКК від джерела постійної напруги відбувається процес саморозряду елементарних ємностей через відповідні їм елементарні опори, а напруга між жилами кабелю є сумою спадів напруги на елементарних опорах. Стуми, які протікають через елементарні шари кабельної ізоляції, в даному випадку можна визначити через відомі функції радіального розподілу напруженості електричного поля та питомої електричної провідності:

$$E_0(r, t) = E_0(r) e^{-\frac{t}{\tau(r)}} = \frac{U}{rv} \cdot \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon(r)} e^{-\frac{t}{\tau(r)}}, \quad (\text{K.6})$$

$$E_\infty(r, t) = E_\infty(r) e^{-\frac{t}{\tau(r)}} = \frac{U}{rv} \cdot \frac{\gamma_e}{\gamma(r)} e^{-\frac{t}{\tau(r)}}, \quad (\text{K.7})$$

звідки

$$i_0(r, t) = E_0(r, t) \gamma(r) S(r) = \frac{2\pi l U}{v} \cdot \frac{\varepsilon_e \gamma(r)}{\varepsilon(r)} e^{-\frac{t}{\tau(r)}}, \quad (\text{K.8})$$

$$i_\infty(r, t) = E_\infty(r, t) \gamma(r) S(r) = \frac{2\pi l U}{v} \cdot \gamma_e e^{-\frac{t}{\tau(r)}}. \quad (\text{K.9})$$

Тепер стає можливим визначити часові залежності функцій радіального розподілу струмів абсорбції в ізоляції кабелю при його саморозряді

$$i_{a0}(r, t) = i_0(r, t) - i_{\infty 0}(t) = \frac{2\pi l U \varepsilon_e}{v} \left(\frac{\gamma(r)}{\varepsilon(r)} e^{-\frac{t}{\tau(r)}} + \frac{\gamma_e}{v} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\varepsilon(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr \right), \quad (\text{K.10})$$

$$i_{a\infty}(r, t) = i_{\infty}(r, t) - i_{\infty\infty}(t) = \frac{2\pi l U \gamma_e}{v} \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau(r)}} + \frac{\gamma_e}{v} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\gamma(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr \right), \quad (\text{K.11})$$

де $i_{\infty 0}(t) = \frac{2\pi l U \gamma_e}{v^2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr$ та $i_{\infty\infty}(t) = \frac{2\pi l U \gamma_e}{v^2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma_e}{\gamma(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr$ – функції зміни в

часі струмів витоку через електричну ізоляцію кабелю при часах зарядки абсорбційної ємності кабелю від джерела постійної напруги $t = 0$ і $t = \infty$ відповідно.

Зміну в часі дефекту електричного поля який виникає при саморозряді ємності кабелю можна визначити через відомі часові залежності струмів абсорбції та функції радіального розподілу питомої електричної провідності

$$\Delta E_{cp0}(r, t) = \frac{i_{a0}(r, t)}{S(r)\gamma(r)} = \frac{U \varepsilon_e}{rv} \left(\frac{1}{\varepsilon(r)} e^{-\frac{t}{\tau(r)}} + \frac{\gamma_e}{\gamma(r)v} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\varepsilon(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr \right), \quad (\text{K.12})$$

$$\Delta E_{cp\infty}(r, t) = \frac{i_{a\infty}(r, t)}{S(r)\gamma(r)} = \frac{U}{rv} \frac{\gamma_e}{\gamma(r)} \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau(r)}} + \frac{\gamma_e}{v} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\gamma(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr \right), \quad (\text{K.13})$$

а момент часу змінення абсорбції електричного заряду на десорбцію можна визначити для кожного елементарного шару ізоляції прирівняв похідну по часу дефекту електричного поля до нуля

$$\frac{d}{dt} \Delta E_{cp0}(r, t) = -\frac{U \varepsilon_e}{\varepsilon_0 rv} \left(\frac{\gamma(r)}{\varepsilon(r)^2} e^{-\frac{t}{\tau(r)}} + \frac{\gamma_e}{\gamma(r)v} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma(r)}{\varepsilon(r)^2 r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr \right), \quad (\text{K.14})$$

звідки

$$\frac{\gamma(r)^2 v}{\varepsilon(r)^2 \gamma_e} e^{-\frac{t}{\tau(r)}} = \int_{r_2}^{r_1} \frac{\gamma(r)}{\varepsilon(r)^2 r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr. \quad (\text{K.15})$$

В якості найбільш інформативних параметрів, які освідчать про якість (ступінь неоднорідності) електроізоляційного матеріалу кабелю, можуть виступати відношення постійних часу саморозряду кабелю при часах заряду його абсорбційної ємності $t = \infty$ та $t = 0$ відповідно

$$k_{cp} = \frac{\tau_{cp}(t = \infty)}{\tau_{cp}(t = 0)}, \quad (\text{K.16})$$

які можна визначити із наступних рівнянь

$$\tau_{cp}(t = \infty) = t \text{ при } \int_{r_2}^{r_1} \frac{1}{\gamma(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr = \frac{v}{\gamma_e \cdot e^1}, \quad (\text{K.17})$$

$$\tau_{cp}(t = 0) = t \text{ при } \int_{r_2}^{r_1} \frac{1}{\varepsilon(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr = \frac{v}{\varepsilon_e \cdot e^1}, \quad (\text{K.18})$$

та (або) відношенням початкових швидкостей спадання напруги на його жилах

$$\delta V_{cp} = \frac{\frac{d}{dt} U_{cp}(t = \infty)}{\frac{d}{dt} U_{cp}(t = 0)} = \frac{\gamma_e \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{\varepsilon(r)r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr}{\varepsilon_e \int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma(r)}{\varepsilon(r)^2 r} \cdot e^{-\frac{t}{\tau(r)}} dr}, \quad (\text{K.19})$$

звідси при $t = 0$ отримуємо

$$\delta V_{0cp} = \frac{\gamma_e}{\varepsilon_e^2} \frac{v}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma(r)}{\varepsilon(r)^2 r} dr}. \quad (\text{K.20})$$

Для однорідної ізоляції дані параметри дорівнюють одиниці та зростають з ростом неоднорідності електричної ізоляції кабелю.

При реальному вимірюванні вищерозглянутих часових залежностей вимірювальні прилади приєднуються безпосередньо до жил кабелю та стають частиною електричного кола. Враховуючи що, електрична ізоляція СВКК з ТПІ володіє електричним опором струмам витоку співвідносним з вхідними опорами вимірювальних приладів, виникає необхідність проаналізувати вплив електричних параметрів цих приладів на характер протікання деяких розглянутих вище перехідних процесів.

При вимірюванні струмів релаксації силовий високовольтний кабель приєднується до джерела постійної напруги через вимірювальний прилад. Джерело постійної напруги та вимірювальний прилад мають певний внутрішній електричний опір - опір зовнішнього кола R_0 . Даний опір ввімкнений послідовно з електричною ізоляцією кабелю, це неминує впливає як на характер протікання перехідного процесу безпосередньо в кабельній ізоляції так і на результат вимірювання струму релаксації.

Для оцінки впливу величини опору зовнішнього кола на характер протікання перехідного процесу в кабельній ізоляції скористаємось методом контурних струмів в операторній формі та диференційною схемою заміщення неоднорідної електричної ізоляції кабелю.

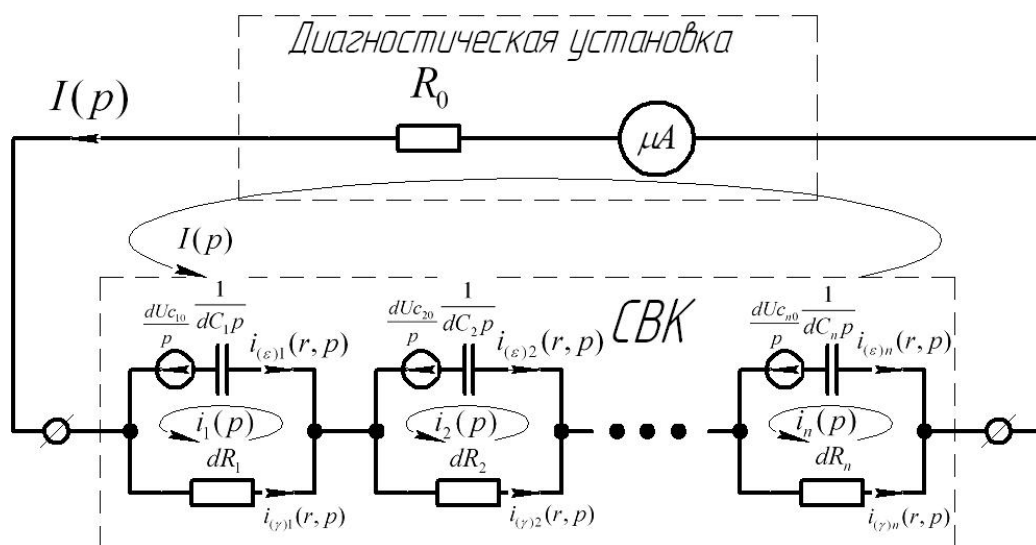


Рис. К.2 Зображення електричної схеми вимірювання струму релаксації

При підключенні СВКК з РНЕІ до джерела постійної напруги U через опір зовнішнього кола R_0 в його ізоляції почнеться вимушений перехідний процес. Даний перехідний процес описується наступною системою диференціальних рівнянь поданих у операторній формі

$$\begin{cases} I(p)\left(R_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{dC_j p}\right) - \sum_{j=1}^{\infty} i_j(p) \frac{1}{dC_j p} = \frac{U}{p}, \\ -I(p) \frac{1}{dC_j p} + i_j(p) \left(dR_j + \frac{1}{dC_j p}\right) = 0 \end{cases} \quad (\text{К.21})$$

який буде відрізнятися від того який був розглянутий у розділі 3. Після перетворення дана система диференціальних рівнянь набуває вигляду

$$\begin{cases} I(p)\left(R_0 + \frac{1}{Cp}\right) - \int_{r_1}^{r_2} \frac{i(r,p)}{dC(r)} = \frac{U}{p}, \\ -I(p) \frac{1}{dC(r)p} + i(r,p) \left(dR(r) + \frac{1}{dC(r)p}\right) = 0, \end{cases} \quad (\text{К.23})$$

розв'язок якої відносно $I(p)$ та $i(r,p)$ має вид відмінний від системи диференціальних рівнянь (3.33)

$$\begin{cases} I(p) = \frac{2\pi U \varepsilon_0 \varepsilon_e}{R_0 \varepsilon_0 \varepsilon_e p - f(p) + v}, \\ i(r,p) = \frac{2\pi U \varepsilon_0 \varepsilon_e \gamma(r)}{R_0 \varepsilon_0^2 \varepsilon_e \varepsilon(r) p^2 + (R_0 \varepsilon_0 \varepsilon_e \gamma(r) + v \varepsilon_0 \varepsilon(r) - \varepsilon_0 \varepsilon(r) f(p)) p - \gamma(r) f(p) + v \gamma(r)}. \end{cases} \quad (\text{К.24})$$

Результат комп'ютерного моделювання даного перехідного процесу для різних значень опору зовнішнього кола R_0 наведено на рис. К.3.

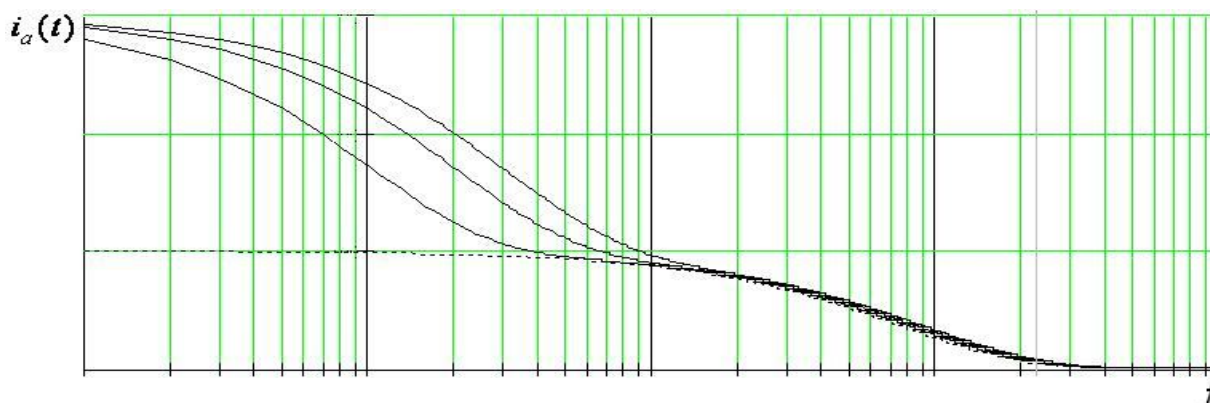


Рис. К.3 Результати комп'ютерного моделювання часової залежності струму релаксації кабелю при різних значеннях величини електричного опору зовнішнього кола R_0

Як можна бачити з наведених на рис. К.3 кривих, опір зовнішнього кола значною мірою впливає на характер протікання даного перехідного процесу. На ньому пунктирною кривою позначений струм в зовнішньому колі при нульовому значенні його опору (ідеалізований перехідний процес), а суцільними позначені струми при різних значеннях опору зовнішнього кола. Найбільший вплив цей опір має на початкову фазу перехідного процесу та поступово знижується по мірі його проходження. У певний момент часу струми майже співпадають з ідеалізованим струмом.

Якщо на даний перехідний процес подивитися в контексті інтегральної схеми заміщення неоднорідної електричної ізоляції кабелю, то при приєднанні кабелю до джерела постійної напруги в початковий момент часу почнеться перехідний процес заряду його геометричної ємності C через опір зовнішнього кола R_0 від джерела постійної напруги U . У зовнішньому колі почне протікати електричний струм $i(t)$, а на геометричній ємності кабелю почне поступово накопичуватися електричний заряд та зростати напруга. Одночасно з цим через опір ізоляції почне протікати струм витоку, пропорційний напрузі між жилами, та струм абсорбції.

По мірі зарядження геометричної ємності струм, обумовлений її зарядженням, поступово спадає, а струми витоку та абсорбції поступово зростають. В деякий момент часу напруга на геометричній ємності стає близькою до напруги джерела, а струм її зарядження близьким до нуля. У цей час у зовнішньому колі буде протікати

струм який є сумою майже незмінного в часі струму витоку та струму релаксації, при цьому на опорі зовнішнього кола буде спадати незначна напруга.

З вищезазначеного слідує, що фізично не можливо визначити початкове значення струму релаксації i , як наслідок, величину абсорбційного заряду накопиченого в електроізоляційному матеріалі кабелю. Експериментальні дані, отриманні на початку перехідного процесу, не є інформативними, але дані, отримані вже після закінчення зарядження геометричної ємності кабелю, близькі до достовірних.

Опір електричної ізоляції кабелю, при умові що він значно більший за опір зовнішнього кола ($R \gg R_0$), експериментально можна визначити через відомі значення струму в зовнішньому колі по закінченні перехідного процесу (при $t = \infty$) та величини прикладеної постійної напруги

$$R = \frac{U}{i_{t=\infty}}. \quad (\text{K.25})$$

Для визначення абсорбційної ємності кабелю необхідно знайти функціональну залежність зміни в часі струму релаксації. Як відомо, даний струм спадає в часі за експонентним законом. Тому, для визначення часової залежності струму релаксації, достатнім стає визначити початкове значення струму релаксації та постійної часу заряду абсорбційної ємності. Але, як зазначалось вище, з експериментальних кривих це зробити не можливо. Тому значення цих величин слід розраховувати аналітично. Для цього достатньо взяти на кривій часової залежності струму в зовнішньому колі два будь-які значення струму з відповідними їм значеннями часу, при умові що перехідний процес заряду геометричної ємності вже закінчився. Відняти від них значення незмінного в часі струму витоку та з отриманої системи рівнянь визначити шукані величини

$$\begin{cases} i(t_1) - \frac{U}{R} = i_{p0} e^{-\frac{t_1}{\tau}}, \\ i(t_2) - \frac{U}{R} = i_{p0} e^{-\frac{t_2}{\tau}}, \end{cases} \quad (\text{K.26})$$

де $i(t_1)$ та $i(t_2)$ – струм в зовнішньому колі в моменти часу t_1 та t_2 відповідно. Звідки визначається початкове значення струму релаксації

$$i_{p0} = \frac{i(t_1) - \frac{U}{R}}{e^{-\frac{t_1}{\tau}}} \text{ або } i_{p0} = \frac{i(t_2) - \frac{U}{R}}{e^{-\frac{t_2}{\tau}}}, \quad (\text{К.27})$$

де постійна часу заряду абсорбційної ємності τ є додатнім коренем наступного квадратного рівняння

$$\tau^2 + t_1 \cdot \ln \frac{i(t_1) - \frac{U}{R}}{i(t_2) - \frac{U}{R}} \cdot \tau + t_1 \cdot t_2 = 0. \quad (\text{К.28})$$

При відомій часовій залежності струму в зовнішньому колі стає можливим визначити величини абсорбційного заряду та ємності

$$q_a = \int_0^{\infty} i(t) - \frac{U}{R} dt = i_{p0} \cdot \tau, \quad C_a = \frac{q_a}{U} = \frac{i_{p0} \cdot \tau}{U}, \quad (\text{К.29})$$

а через відомі значення абсорбційної ємності та постійної часу релаксації і абсорбційний опір електричної ізоляції кабелю

$$R_a = \frac{\tau}{C_a} = \frac{U}{i_{p0}}. \quad (\text{К.30})$$

Геометрична ємність кабелю, під час його тривалої експлуатації, майже не змінюється, тому її можна вважати сталою величиною та визначати через довідникові данні

$$C = C_n \cdot l, \quad (\text{К.31})$$

де C_n – погонна ємність кабелю.

Слід також зазначити, що використання запропонованої методики експериментального визначення електричних параметрів неоднорідної кабельної ізоляції можливо тільки при умові значного перевищення величини постійної часу заряду абсорбційної ємності над величиною постійною часу заряду геометричної ємності ($R_a C_a \gg R_0 C$).

При вимірюванні часової залежності величини поверненої напруги $U_n(t)$ жили кабелю приєднуються до вимірювального пристрою з деяким кінцевим значенням внутрішнього опору R_B . Який, в контексті інтегральної схеми заміщення, вмикається паралельно до опору ізоляції струмам витoku R . Це, в свою чергу, викликає суттєві зміни в характері протікання вільного перехідного процесу. Для визначення цього впливу скористаємось методом контурних струмів поданим в операторній формі та диференційною схемою заміщення РНЕІ СВКК.

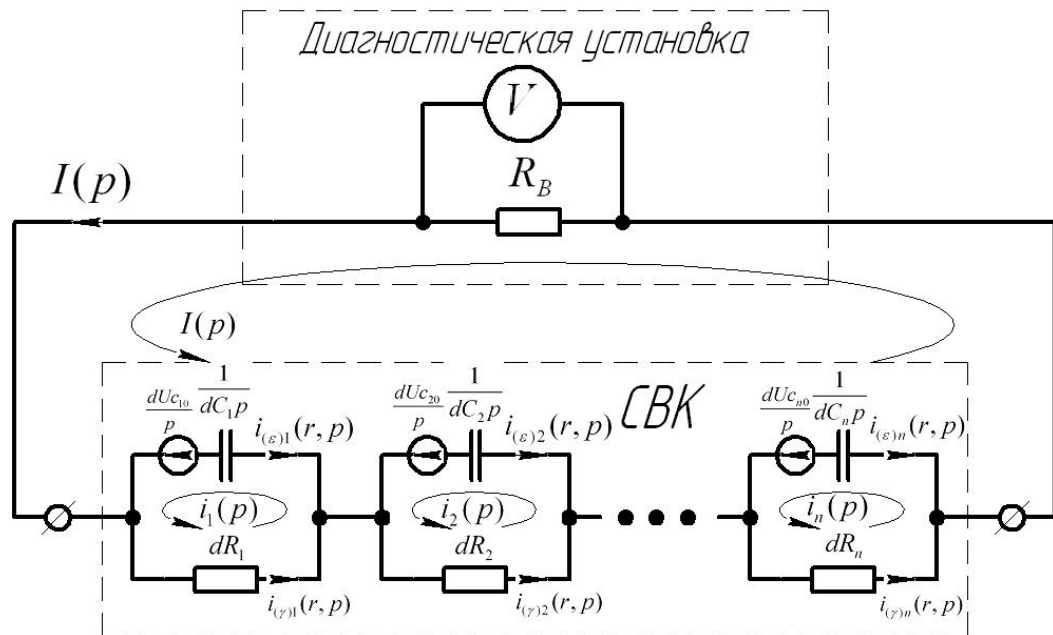


Рис. К.4 Зображення електричної схеми вимірювання часової залежності величини поверненої напруги

По завершенні вимушеного перехідного процесу, при від'єднанні струмопровідних жил кабелю від джерела постійної напруги U , та після їх короткочасного замикання між собою в ізоляції кабелю починається новий вільний перехідний процес. Внаслідок якого на жилах кабелю знову з'являється напруга $U_n(t)$. Даний перехідний процес, з урахуванням вхідного опору вимірювального пристрою R_B , описується наступною системою рівнянь поданих у операторній формі

$$\begin{cases} I(p) \left(R_g + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{dC_j p} \right) - \sum_{j=1}^{\infty} i_j(p) \frac{1}{dC_j p} = 0, \\ -I(p) \frac{1}{dC_j p} + i_j(p) \left(dR_j + \frac{1}{dC_j p} \right) = \frac{\Delta E(r)}{p} dr. \end{cases} \quad (\text{K.32})$$

Після перетворення дана система рівнянь набуває виду

$$\begin{cases} I(p) \left(R_g + \frac{1}{Cp} \right) - \int_{r_1}^{r_2} \frac{i(r, p)}{dC(r)} = 0, \\ -I(p) \frac{1}{dC(r)p} + i(r, p) \left(dR(r) + \frac{1}{dC(r)p} \right) = \frac{\Delta E(r)}{p} dr, \end{cases} \quad (\text{K.33})$$

розв'язок якої відносно $I(p)$ має вид

$$I(p) = \frac{2\pi l U \varepsilon_0 \varepsilon_e}{R_g \varepsilon_0 \varepsilon_e p - f(p) + \nu}. \quad (\text{K.34})$$

Даний струм, виходячи із схеми поданої на рис.К.1, являє собою струм у зовнішньому контурі. Він протікає через вхідний опір вимірювального пристрою спад напруги на якому i є величиною оберненої напруги

$$U_n(p) = I(p) R_g = \frac{2\pi l U R_g \varepsilon_0 \varepsilon_e}{R_g \varepsilon_0 \varepsilon_e p - f(p) + \nu}. \quad (\text{K.35})$$

Розв'язок даного рівняння при відомих функціях розподілу електрофізичних параметрів ізоляції кабелю та знаходження його оригіналу дозволяє отримати часову залежність величини поверненої напруги $U_n(t)$.

Результати комп'ютерного моделювання часової залежності величини поверненої напруги при різних значеннях вхідного опору вимірювального приладу наведені на рис. К.5.



Рис. К.5 Часової залежності величини поверненої напруги при різних значеннях вхідного опору вимірювального приладу, чорна крива - ідеалізована, фіолетова, синя та червона криві для значень внутрішнього опору вимірювального приладу $(10, 1$ і $0,1) \cdot R$ відповідно

Як можна бачити з часових залежностей поверненої напруги наведених на рис. К.5, вхідний опір вимірювального приладу досить суттєво впливає на результат вимірювання та характер протікання перехідного процесу в безпосередньо в самій неоднорідній ізоляції кабелю. Зі зменшенням вхідного опору вимірювального приладу зменшуються максимальне значення та час досягнення максимуму поверненої напруги, крім того зростає крутизна її спаду після досягнення нею максимального значення. При цьому, початкова швидкість наростання поверненої напруги зовсім не залежить від величини вхідного опору вимірювального приладу. Це, в свою чергу, свідчить про рівність початкових значень похідних по часу часових функцій поверненої напруги при різних значеннях вхідного опору вимірювального приладу.

Наявність зовнішнього контуру з деяким кінцевим значенням його електричного опору, викликає значну зміну характеру протікання перехідного процесу безпосередньо в неоднорідному електроізоляційному матеріалі кабелю. При його відсутності в неоднорідній електричній ізоляції кабелю будуть протикати лише стуми десор-

бції, а при його наявності ще і наскрізний струм. На протікання наскрізного струму витрачається частина енергії електричного поля зосередженого в ізоляції кабелю

$$\Delta W = \frac{2\pi l \varepsilon_0 U^2}{v^2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{(\varepsilon_e \gamma(r) - \gamma_e \varepsilon(r))^2}{\gamma^2(r) \varepsilon(r) r} dr, \quad (\text{K.36})$$

яку чисельно можна оцінити за допомогою наступного виразу

$$W_n = \frac{R + R_g}{R_g^2} \int_0^{\infty} U_n^2(t) dt, \quad (\text{K.37})$$

що і викликає зміни в характері протікання даного перехідного процесу.

Точність вимірювання часової залежності величини поверненої напруги зростає з ростом електричного опору вимірювального приладу. Цей опір для досягнення максимально достовірного результату вимірювань повинен бути безмежно великим, що є недосяжним. Прийнятну достовірність вимірювання можуть забезпечити вимірювальні прилади з вхідним опором перевищуючим опір електричної ізоляції струмам витоку. На практиці, вхідний опір більшості вимірювальних приладів значно менший за опір кабельної ізоляції струмам витоку. Тому, для коректної інтерпретації результатів вимірювання часової залежності величини поверненої напруги, вони повинні або нормуватись під певний вхідний опір вимірювального приладу, або корегуватись будь-яким іншим способом.

Радіальний розподіл напруженості електричного в неоднорідній ізоляції при впливі на неї синусоїдальною напругою

Розглянемо вплив на РНЕІ дії змінного синусоїдального електричного поля. Для аналізу цього впливу, насамперед необхідно визначити повний комплексний опір елементарного ланцюга диференційної схеми заміщення РНЕІ протіканню через неї змінного синусоїдального струму з кутовою частотою ω

$$d \dot{Z}(r, \omega) = \frac{dR(r) dX^2(r, \omega)}{dR^2(r) + dX^2(r, \omega)} - j \frac{dR^2(r) dX(r, \omega)}{dR^2(r) + dX^2(r, \omega)}, \quad (\text{K.38})$$

де $dR(r) = \frac{dr}{S(r)\gamma(r)}$ та $dX(r, \omega) = \frac{dr}{\omega\varepsilon_0\varepsilon(r)S(r)}$ – активний та ємнісний опір елементарного шару електричної ізоляції кабелю

протіканню змінного синусоїдального струму відповідно. Після підстановки у даний вираз функціональних залежностей $dR(r)$ та $dX(r)$ він набуває наступного виду

$$d\dot{Z}(r, \omega) = \frac{\gamma(r)dr}{S(r)(\omega^2\varepsilon_0^2\varepsilon^2(r) + \gamma^2(r))} - j \frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon(r)dr}{S(r)(\omega^2\varepsilon_0^2\varepsilon^2(r) + \gamma^2(r))}. \quad (\text{K.39})$$

Повний комплексний опір електричної ізоляції кабелю, протіканню через нього змінного синусоїдального струму, являє собою сумарний опір всіх послідовно з'єднаних елементарних ланок

$$\dot{Z}(\omega) = \int_{r_1}^{r_2} dZ(r)dr = \frac{1}{2\pi l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{(\gamma(r) - j\omega\varepsilon_0\varepsilon(r))}{(\omega\varepsilon_0\varepsilon(r))^2 + \gamma^2(r)} \frac{dr}{r}. \quad (\text{K.40})$$

Визначивши повний комплексний опір ізоляції, стає можливим визначити і радіальний розподіл напруженості електричного поля безпосередньо в неоднорідній електричній ізоляції кабелю при протіканні через неї змінного синусоїдального струму з кутовою частотою ω

$$\dot{E}(r, \omega) = \frac{U}{r(\gamma(r) - j\omega\varepsilon_0\varepsilon(r)) \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{(\gamma(r) - j\omega\varepsilon_0\varepsilon(r))}{(\omega\varepsilon_0\varepsilon(r))^2 + \gamma^2(r)} \frac{dr}{r}}. \quad (\text{K.41})$$

Дана радіальна напруженість електричного поля визначається не лише функціями радіального розподілу електрофізичних параметрів кабельної ізоляції, а і частотою прикладеної до неї синусоїдальної напруги. При зростанні частоти радіальний розподіл напруженості електричного поля в кабельній ізоляції буде все більшою мірою визначатися її діелектричними властивостями, а при зменшенні – провідними.

Зі зростанням частоти змінної синусоїдальної напруги, прикладеної до неоднорідної кабельної ізоляції, розподіл радіальної напруженості електричного поля в кабельній ізоляції прямує до розподілу який визначається аналітичною залежністю (3.12), тобто функцією розподілу $\varepsilon(r)$, а при зменшенні до розподілу який визначається аналітичною залежністю (3.17), тобто функцією розподілу $\gamma(r)$, та, в самому загальному випадку, відрізняється від розподілу напруженості електричного поля в однорідній еквівалентній кабельній ізоляції, яка є виключно радіальною функцією і не залежить від частоти прикладеної напруги.

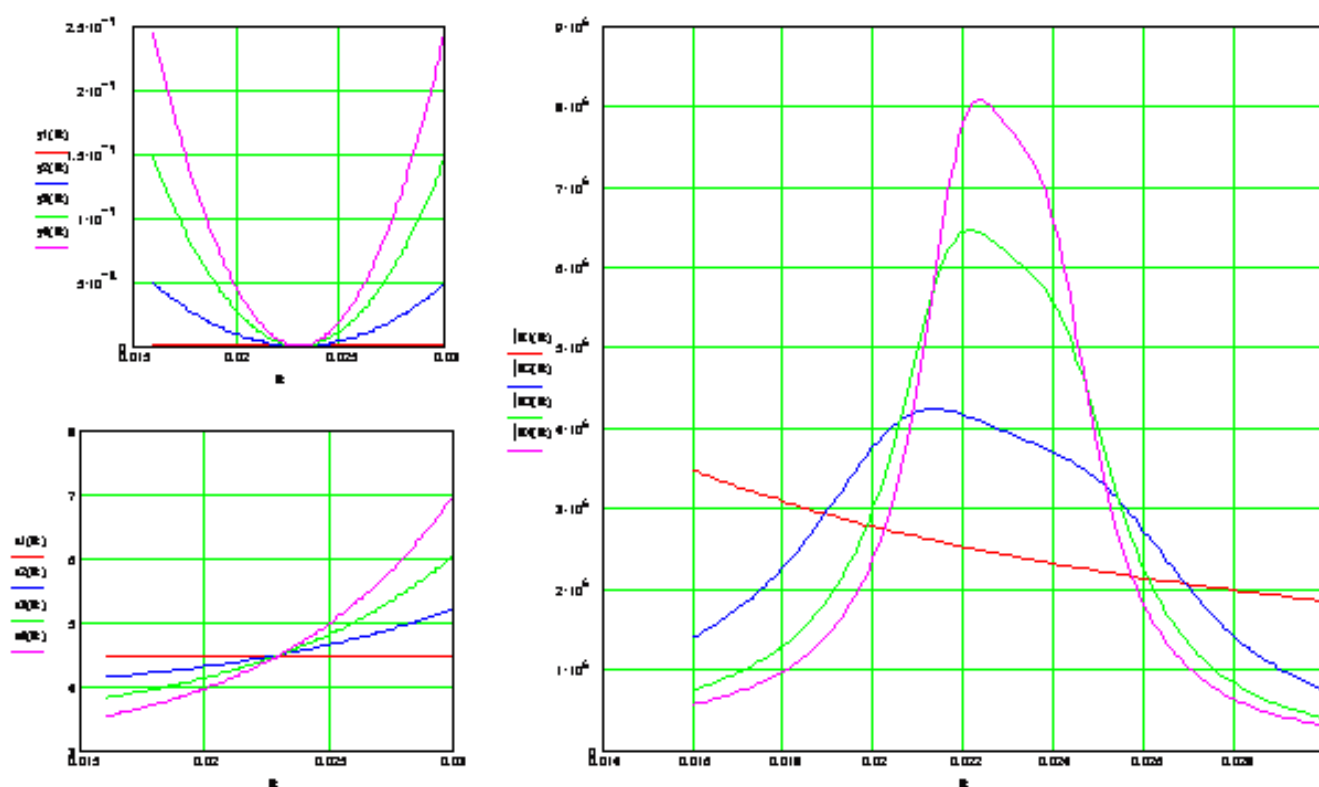


Рис. К.6 Радіальний розподіл напруженості електричного поля в електричній ізоляції з різним ступенем неоднорідності при протіканні через неї змінного синусоїдального струму промислової частоти (50 Гц)

Визначення тангенсу кута діелектричних втрат радіально неоднорідної ізоляції

Для визначення тангенсу кута діелектричних втрат радіально неоднорідної кабельної ізоляції визначимо параметри еквівалентного паралельного електричного R - C ланцюга до повного комплексного електричного опору ізоляції кабелю, для цього скористаємося наступною системою рівнянь

$$\begin{cases} R_e(\omega) = \frac{\operatorname{Re}(\dot{Z}(\omega))^2 + \operatorname{Im}(\dot{Z}(\omega))^2}{\operatorname{Re}(Z)}, \\ X_e(\omega) = \frac{\operatorname{Re}(\dot{Z}(\omega))^2 + \operatorname{Im}(\dot{Z}(\omega))^2}{\operatorname{Im}(Z(\omega))}, \end{cases} \quad (\text{K.42})$$

де $R_e(\omega)$ та $X_e(\omega)$ – відповідно еквівалентні активний та ємнісний опори неоднорідної електричної ізоляції кабелю на частоті змінного синусоїдального струму ω , $\operatorname{Re}(\dot{Z}(\omega))$ та $\operatorname{Im}(\dot{Z}(\omega))$ – відповідно дійсна та мніма частини повного комплексного електричного опору неоднорідної електричної ізоляції кабелю на частоті змінного синусоїдального струму ω , звідки

$$\operatorname{tg} \delta(\omega) = \frac{X_e(\omega)}{R_e(\omega)} = \frac{1}{\omega \varepsilon_0} \frac{\int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma(r)}{(\omega \varepsilon_0 \varepsilon(r))^2 + \gamma^2(r)} \frac{dr}{r}}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon(r)}{(\omega \varepsilon_0 \varepsilon(r))^2 + \gamma^2(r)} \frac{dr}{r}}. \quad (\text{K.43})$$

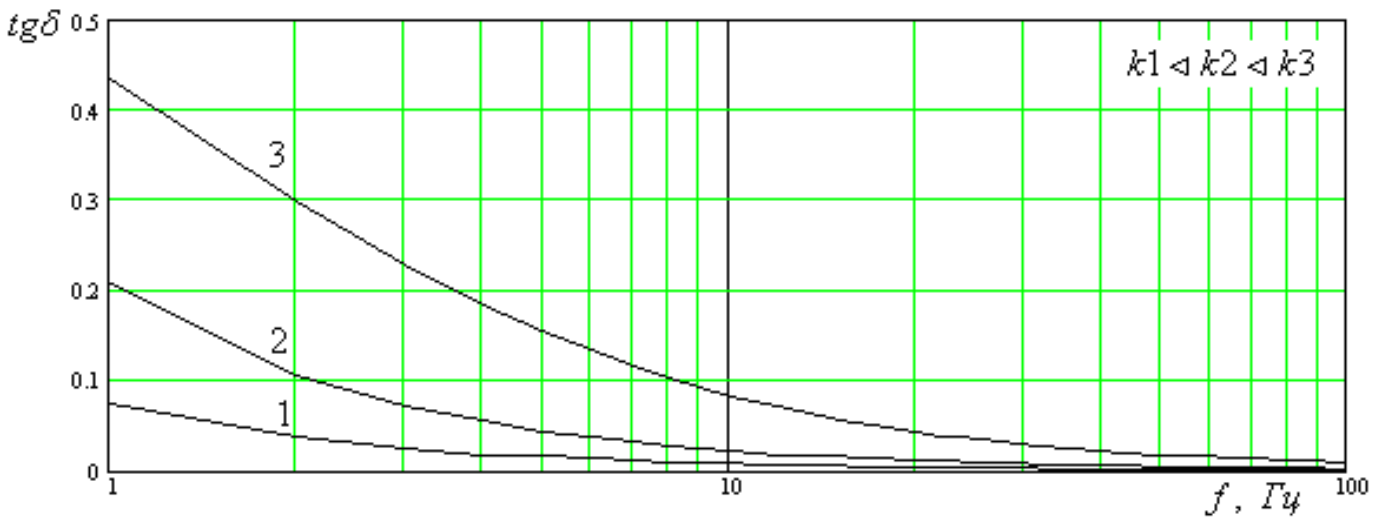


Рис. К.7 Частотні залежності тангенса кута діелектричних втрат кабельної ізоляції з різною ступінню її неоднорідності

Як можна бачити з аналітичних залежностей наведених на рис. К.7, зростання неоднорідності електроізоляційного матеріалу кабелю призводить до зростання тангенса кута діелектричних втрат його електричної ізоляції, це особливо виражено на низьких частотах змінного синусоїдального струму. На практиці, якість електроізоляційного матеріалу силових кабелів прийнято оцінювати по відношенню тангенсів кута діелектричних втрат та (або) його еквівалентної ємності на частотах змінного синусоїдального струму 2 та 50 Гц відповідно. Аналітичні залежності для даних відношень мають наступний вид

$$\text{tg}\delta_{2/50} = 25 \frac{\int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma(r)}{(4\pi\varepsilon_0\varepsilon(r))^2 + \gamma^2(r)} \frac{dr}{r} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon(r)}{(100\pi\varepsilon_0\varepsilon(r))^2 + \gamma^2(r)} \frac{dr}{r}}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{\gamma(r)}{(100\pi\varepsilon_0\varepsilon(r))^2 + \gamma^2(r)} \frac{dr}{r} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon(r)}{(4\pi\varepsilon_0\varepsilon(r))^2 + \gamma^2(r)} \frac{dr}{r}}, \quad (\text{К.44})$$

$$C_{2/50} = 625 \frac{\int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon(r)}{(100\pi\varepsilon_0\varepsilon(r))^2 + \gamma^2(r)} \frac{dr}{r}}{\int_{r_1}^{r_2} \frac{\varepsilon(r)}{(4\pi\varepsilon_0\varepsilon(r))^2 + \gamma^2(r)} \frac{dr}{r}}. \quad (\text{К.45})$$

Додаток Л

Перехідні процеси в колах електророзрядних установок з ємнісними шунтувальними ланками

З метою отримання в технологічному ЕН ІС мікросекундного діапазону тривалості зі значною крутизною переднього фронту доцільно використовувати ФРІ з повністю керованими НП силовими ЕК. При використанні даних ФРІ тривалість переднього фронту ІС в ЕН задається часом відкриття НП силових ЕК. Крутизна переднього фронту ІС, в даному випадку, визначається величиною опорної напруги та електричними параметрами розрядного кола, а саме його загальними активним опором та індуктивністю. Для досягнення значної крутизни переднього фронту імпульсів струму загальна індуктивність розрядного кола повинна бути як змога меншою, а величина опорної напруги як змога більшою.

Як зазначалось раніше, максимальна крутизна переднього фронту імпульсів струму в даних формувачах досягається при незмінній величині опорної напруги під час його проходження. Це забезпечується шляхом використання в якості накопичувача електричної енергії джерела опорної напруги формувача розрядних імпульсних струмів електростатичних конденсаторів з великою енергоємністю, яка суттєво (на порядки) перевищує енергію яку видає ДОН електричному навантаженню одиночним імпульсом струму.

Загальна тривалість імпульсу струму в електричному навантаженні визначається тривалістю його переднього та заднього фронтів, які, у випадку стабільності величини опорної напруги джерела розрядних імпульсних струмів, мають аперіодичний характер зміни в часі. При примусовому обмеженні тривалості переднього фронту імпульсу струму тривалість його заднього фронту визначається виключно постійною часу релаксації струму, тобто відношенням загальної індуктивності до загального активного опору розрядного кола. У випадках, коли технологічне навантаження значно віддалено від формувача розрядних імпульсних струмів (розрядне коло володіє значною індуктивністю та незначним активним опором), тривалість заднього фронту імпульсу струму може сягати десятків мікросекунд, що значно збільшує

його загальну тривалість. У даному випадку виникає необхідність також обмежувати і тривалість заднього фронту імпульсу струму.

Примусово обмежити тривалість заднього фронту імпульсу струму в електричному навантаженні можливо шляхом його шунтування повністю керованими електричними ключами, що було детально розглянуто у підрозділі 3.1 даної дисертаційної роботи. У даному випадку, в електричному навантаженні досягається значне скорочення тривалості заднього фронту імпульсу струму, але при цьому значно знижується енергоефективність.

Під час проходження переднього фронту імпульсу струму частина електричної енергії, яку відає ДОН в розрядне коло, передається електричному навантаженню, частина втрачається на активному опорі елементів розрядного контуру, а частина накопичується на загальній індуктивності розрядного кола у виді енергії магнітного поля. У випадку примусового обмеження тривалості заднього фронту імпульсу струму, енергія магнітного поля перетворюється на теплову на елементах розрядного контуру, що значно знижує ККД та викликає суттєвий перегрів цих елементів.

Значно підвищити енергоефективність може рекуперація енергії магнітного поля, накопиченої на індуктивностях елементів розрядного контуру, розглянута у підрозділі 4.1. Вразі рекуперації електричної енергії енергія магнітного поля, накопичена на загальній індуктивності розрядного кола, за допомогою додаткового перетворення частково повертається до джерела опорної напруги. Іншим шляхом підвищення енергоефективності роботи схеми може бути направлення енергії магнітного поля до електричного навантаження.

На рис. Л.1 наведено спрощену електричну принципову схему розрядного контуру з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту імпульсу струму, шляхом шунтування електричного навантаження повністю керованим напівпровідниковим силовим ключем, з направленням енергії магнітного поля, накопиченої у індуктивності розрядного контуру, у ЕН.

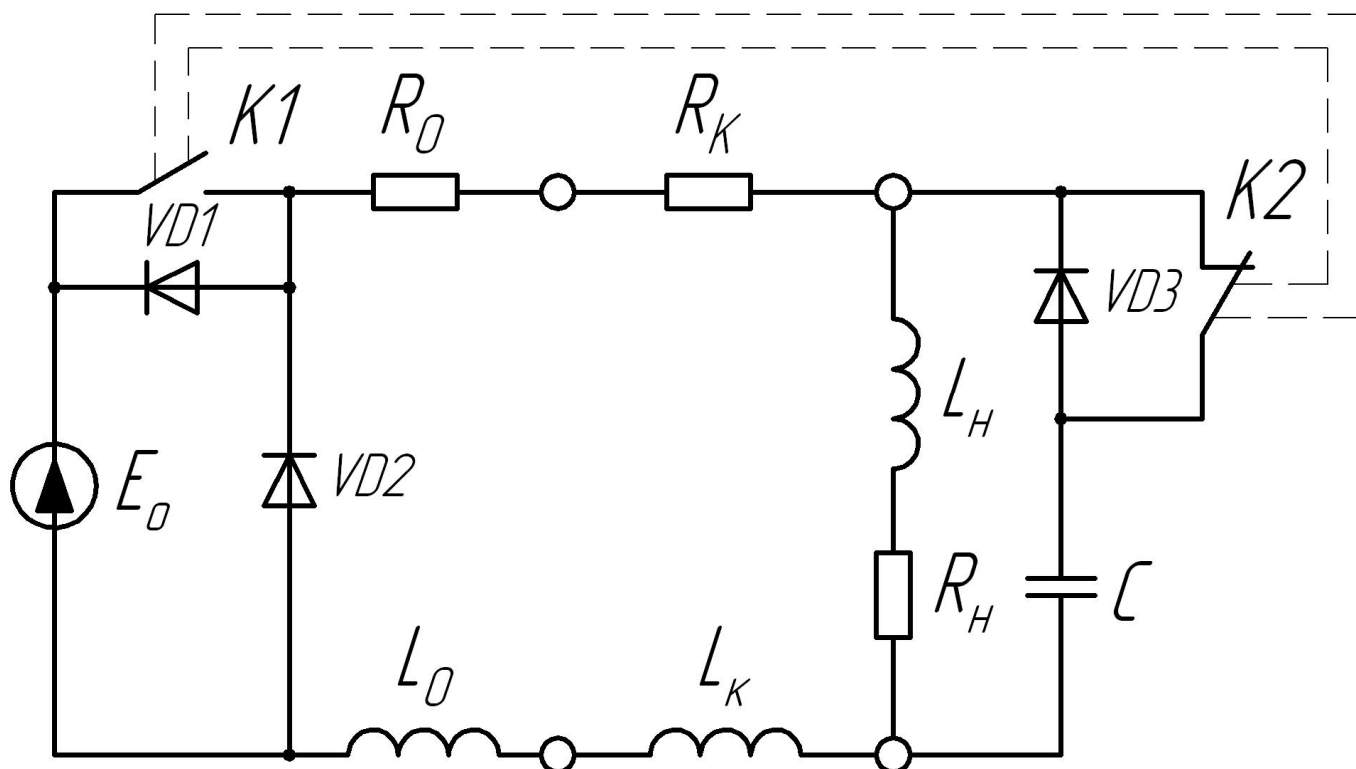


Рис. Л.1 Електрична принципова схема розрядного кола з примусовим обмеженням тривалості заднього фронту імпульсу струму

На представленій електричній принциповій схемі E_0 являє собою ДОН величиною U формувача розрядних імпульсних струмів, R_0 та L_0 – відповідно його внутрішній опір та індуктивність, R_K та L_K – відповідно активний опір та індуктивність з'єднувального кабелю, R_H та L_H – відповідно активний опір та власна індуктивність електричного навантаження, C – ємність паралельна до навантаження, $K1$ та $K2$ – повністю керовані синхронізовані між собою напівпровідникові ключі, $VD1$, $VD2$ та $VD3$ – зворотні діоди.

Розглянемо детально роботу наведеної електричної схеми. У момент подання керуючого сигналу на напівпровідникові електричні ключі $K1$ та $K2$, $K1$ – замикається, а $K2$ – розмикається, при цьому утворюється замкнуте електричне коло між джерелом електрорушійної сили та електричним навантаженням через (ЗП). В електричному колі починається вимушений перехідний електричний процес. У всіх його елементах починає протікати рівний по величині для кожного моменту часу електричний струм $i_n(t)$ – струм переднього фронту, який змінюється в часі за експоненційним законом аналогічно до випадку розглянутому в підрозділі 3.1.

У момент комутації керованих електричних ключів $K1$ та $K2$ ($K1$ – розмикається, а $K2$ – замикається), що відповідає заданій тривалості розрядних імпульсів t_i , ЕН ключем $K1$ від'єднується від джерела електрорушійної сили E_0 з одночасним замиканням його на електричну ємність C ключем $K2$. При цьому, в розрядному контурі починається новий вільний перехідний процес. Напруга на електричному навантаженні стає рівною нулю і струм через нього майже миттєво спадає до нуля. Так як, згідно з законом комутації, струм в індуктивних елементах розрядного кола не може стрибкоподібно змінитися він, в момент часу початку вільного перехідного процесу, цілком замикається на ємність C через ЕК $K2$ та зворотній діод $VD2$. Напруга на конденсаторі C починає наростати. Пропорційно цій напрузі в електричному навантаженні починає наростати струм. В момент часу коли струм у розрядному контурі зрівняється зі струмом в електричному навантаженні напруга на конденсаторі досягне свого максимального значення. В цей момент часу струм, що протікає в розрядному контурі, цілком замкнеться через ЕН, а ємність C через зворотній діод $VD2$ почне розряджатися. Струми в розрядному контурі, електричному навантаженні та ємності починають спадати до нуля.

Для розгляду перехідних електричних процесів, що відбувається в розрядному колі формувача розрядних імпульсних струмів в момент комутації керованих напівпровідникових ключів, в даному випадку зручно скористуватися методом контурних струмів в операторній формі розрахунку. Для знаходження шуканих часових залежностей струмів в елементах електричного кола представленою на рисунку 1, насамперед необхідно знайти його операторне зображення.

На рис. Л.2 приведені спрощена електрична принципова схема розрядного кола та її операторне зображення в момент часу комутації електричних ключів ($K1$ – розімкнений, $K2$ – замкнений).

На даних схемах $R = R_0 + R_K$ – зображено активний опір розрядного контуру без врахування опору електричного навантаження, $L = L_0 + L_K$ – зображено індуктивність розрядного контуру, R_H – активний опір електричного навантаження, C –

паралельна до електричного навантаження ємність, $i(0) = \frac{U}{R + R_H} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right)$ – струм в розрядному контурі на момент комутації електричних ключів, $\tau_n = \frac{L}{R + R_H}$ – постійна часу релаксації переднього фронту імпульсу струму.

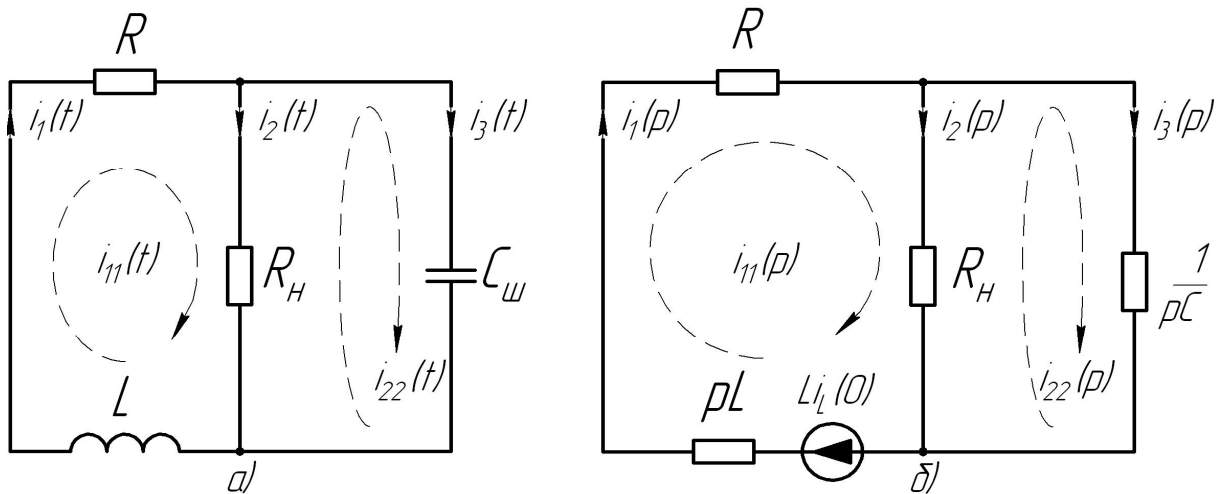


Рис. 1.2 Спрощена електрична принципова схема розрядного контуру
– а та її зображення в операторній формі – б

Складемо систему рівнянь для контурних струмів згідно другого закону Кірхгофа в операторній формі

$$\begin{cases} i_{11}(p) \cdot (R + R_H + Lp) - i_{22}(p) \cdot R_H = L \cdot i(t_i), \\ -i_{11}(p) \cdot R_H + i_{22}(p) \cdot (R_H + \frac{1}{Cp}) = 0. \end{cases} \quad (1.1)$$

Виразимо зображення контурних струмів одне через одне в кожному з рівнянь отриманої системи

$$\begin{cases} i_{11}(p) = \frac{i_{22}(p) \cdot R_H + L \cdot i_L(t_i)}{R + R_H + Lp}, \\ i_{22}(p) = \frac{i_{11}(p) \cdot R_H}{R_H + \frac{1}{Cp}} \end{cases} \quad (\text{Л.2})$$

і підставимо їх у протилежні рівняння. Далі, приведемо їх до загального знаменника та стандартного вигляду. Розділимо чисельник та знаменник отриманих рівнянь на Cp , після чого виразимо шуканні зображення контурних струмів

$$\begin{cases} i_{11}(p) = \frac{L \cdot i(t_i) R_H Cp + L \cdot i(t_i)}{R_H LCp^2 + p(RR_H C + L) + R + R_H}, \\ i_{22}(p) = \frac{L \cdot i(t_i) R_H Cp}{R_H LCp^2 + p(RR_H C + L) + R + R_H}. \end{cases} \quad (\text{Л.3})$$

Прирівняємо знаменник отриманих зображень контурних струмів до нуля та знайдемо корені квадратного рівняння

$$\alpha_{1,2} = \frac{-(RR_H C + L) \pm \sqrt{(RR_H C + L)^2 - 4(R_H LC \cdot (R + R_H))}}{2R_H LC}. \quad (\text{Л.4})$$

Для визначення оригіналів контурних струмів як функції часу скористаємося теоремою подібності. Для цього визначимо похідну по p знаменнику отриманих зображень контурних струмів

$$\frac{d}{dp} (R_H LCp^2 + p(RR_H C + L) + R + R_H) = 2LCp + RR_H C + L \quad (\text{Л.5})$$

та визначимо їх оригінали

$$\begin{cases} i_{11}(t) = \frac{U}{R + R_H} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \left(\frac{R_H LC \alpha_1 + L}{2LC \alpha_1 + RR_H C + L} e^{\alpha_1 t} + \frac{R_H LC \alpha_2 + L}{2LC \alpha_2 + RR_H C + L} e^{\alpha_2 t} \right), \\ i_{22}(t) = \frac{U}{R + R_H} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \left(\frac{R_H LC \alpha_1}{2LC \alpha_1 + RR_H C + L} e^{\alpha_1 t} + \frac{R_H LC \alpha_2}{2LC \alpha_2 + RR_H C + L} e^{\alpha_2 t} \right). \end{cases} \quad (\text{Л.6})$$

Тепер, коли сталі відомі часові залежності контурних струмів, стає можливим визначити часові залежності струмів у всіх ланках електричної схеми наведеної на рис. Л.1 та Л.2

$$\begin{aligned} i_{K2}(t) = i_1(t) = i_{11}(t - t_i), \quad i_{H2}(t) = i_2(t) = i_{11}(t - t_i) - i_{22}(t - t_i), \\ i_{C2}(t) = i_3(t) = i_{22}(t - t_i), \end{aligned} \quad (\text{Л.7})$$

де $i_{K2}(t)$, $i_{H2}(t)$ та $i_{C2}(t)$ – часові залежності струмів в розрядному контурі формувача розрядних імпульсних струмів, в електричному навантаженні та в електростатичному конденсаторі на другому етапі перехідного процесу.

За допомогою отриманих аналітичних залежностей струмів у ланках даної електричної схеми побудуємо їх часові залежності. На рис. Л.3 наведені часові залежності струмів у розрядному контурі, електричному навантаженні та електростатичному конденсаторі для величин активного опору електричного навантаження та розрядного контуру 1 та 0,02 Ом відповідно, індуктивності розрядного контуру 1,5 мкГн, тривалості переднього фронту імпульсу струму 1 мкс, опорної напруги 500 В, при ємності електростатичного конденсатора 1 мкФ.

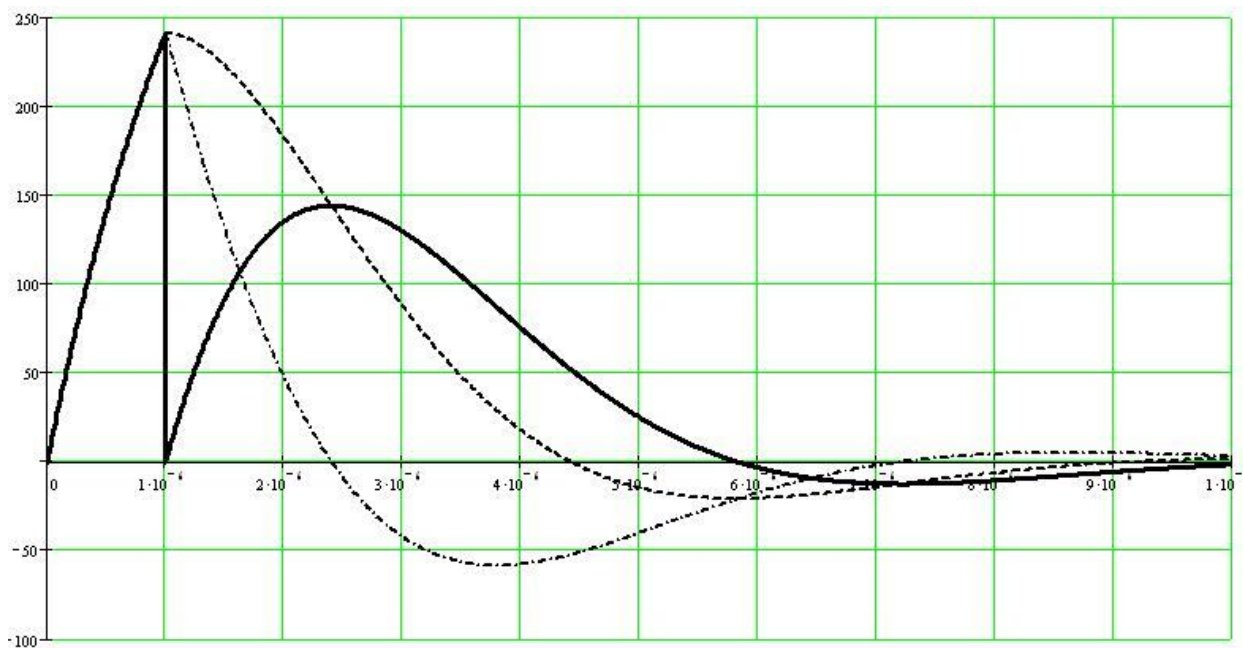


Рис. Л.3 Часові залежності струмів в електричному навантаженні – суцільна крива, в розрядному контурі – штрихова крива та в електростатичному конденсаторі – штрих-пунктирна крива

З наведеної на рис. Л.3 часової залежності струму в електричному навантаженні видно що його задній фронт, при заданих параметрах електричного кола, має слабо-коливний характер. Згідно електричної схеми наведеної на рис. Л.1, в момент часу досягнення струмом розрядного контуру нульового значення відбудеться запирання напівпровідникового діоду $VD2$, після чого протікання струму в розрядному контурі припиниться. Почнеться новий вільний перехідний процес розрядження електростатичного конденсатора через ЕН. Час початку даного перехідного процесу можна визначити прирівняв часову залежність струму в розрядному контурі до нуля

$$\frac{U}{R + R_H} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{\tau_n}} \right) \left(\frac{R_H LC \alpha_1 + L}{2LC \alpha_1 + RR_H C + L} e^{\alpha_1(t-t_i)} + \frac{R_H LC \alpha_2 + L}{2LC \alpha_2 + RR_H C + L} e^{\alpha_2(t-t_i)} \right) = 0. \quad (\text{Л.8})$$

У випадках, коли корені характеристичного рівняння дійсні величини, стум в розрядному контурі являє собою суперпозицію двох аперіодично спадаючих стру-

мів. Даний перехідний процес буде мати місце при електричній добротності отриманого паралельного $R-L-C$ контуру менше 0,5

$$Q = (R_H + R_K) \sqrt{\frac{C}{L}} \leq \frac{1}{2}. \quad (\text{Л.9})$$

У даних випадках рівняння для визначення часу початку вільного перехідного процесу, розрядження ємності на ЕН, має одне дійсне рішення яке відповідає моменту часу $t_B = \infty$. Це означає, що при величинах ємності електростатичного конденсатора

$$C \leq \frac{1}{4} \frac{L}{(R_H + R_K)^2} \quad (\text{Л.10})$$

третьої етапу перехідного процесу буде відсутній.

У випадках, коли корені характеристичного рівняння комплексні величини, стум в розрядному контурі буде являти собою суперпозицію двох затухаючих гармонійних коливань. Даний перехідний процес буде мати місце при електричній добротності отриманого паралельного $R-L-C$ контуру більше 0,5, тобто при величинах ємності електростатичного конденсатора

$$C > \frac{1}{4} \frac{L}{(R_H + R_K)^2}. \quad (\text{Л.11})$$

У даному випадку рівняння для знаходження часу початку третьої стадії перехідного процесу набуває наступного виду

$$\begin{aligned} & \frac{R_H LC \alpha_1 + L}{2LC \alpha_1 + RR_H C + L} e^{\text{Re}(\alpha_1)(t-t_i)} \cos(\text{Im}(\alpha_1)(t-t_i)) + \\ & + \frac{R_H LC \alpha_2 + L}{2LC \alpha_2 + RR_H C + L} e^{\text{Re}(\alpha_2)(t-t_i)} \cos(\text{Im}(\alpha_2)(t-t_i)) = 0, \end{aligned} \quad (\text{Л.12})$$

де $\operatorname{Re}(\alpha_1) = \frac{\alpha_1 + \bar{\alpha}_1}{2}$, $\operatorname{Re}(\alpha_2) = \frac{\alpha_2 + \bar{\alpha}_2}{2}$ та $\operatorname{Im}(\alpha_1) = \frac{\alpha_1 - \bar{\alpha}_1}{2j}$, $\operatorname{Im}(\alpha_2) = \frac{\alpha_2 - \bar{\alpha}_2}{2j}$ – відповідно дійсні та мнімі частини коренів характеристичного рівняння. Після перетворення дане рівняння набуває виду

$$\frac{\cos(\operatorname{Im}(\alpha_1)(t - t_i))}{\cos(\operatorname{Im}(\alpha_2)(t - t_i))} e^{\operatorname{Re}(\alpha_1 - \alpha_2)(t - t_i)} = -\frac{R_H LC \alpha_2 + L}{2LC \alpha_2 + RR_H C + L} \cdot \frac{2LC \alpha_1 + RR_H C + L}{R_H LC \alpha_1 + L}. \quad (\text{Л.13})$$

Дане рівняння має безмежну кількість розв'язків відносно t , але має єдиний дійсний корінь який відповідає першому більшому за t_i значенню t . Враховуючи складність отриманого рівняння його розв'язок, при заданих електричних параметрах розрядного кола, здійснено за допомогою пакету програмного забезпечення Mathcad Professional графічним методом. Для цього побудуємо криву часової залежності частини рівняння (Л.12) та знайдемо її перший перетин з віссю абсцис.

З кривої приведеної на рис. Л.4 визначаємо час початку третього етапу перехідного процесу $t_B = 4,41$ мкс.



Рис. Л.4 Крива для знаходження часу початку третього етапу перехідного процесу

По закінченні другого етапу перехідного процесу струм в розрядному контурі стає рівним нулю. Почнеться третій етап перехідного процесу при якому електрична енергія, накопичена електростатичним конденсатором, буде віддаватися в ЕН. За другим законом Кіргхофа запишемо рівняння в операторній формі для отриманого R - C кола

$$i_{H3}(p) \left(R_H + \frac{1}{Cp} \right) = \frac{U_C(t_B)}{p}, \quad (\text{Л.14})$$

де $i_{H2}(p)$ – зображення струму в електричному навантаженні на третьому етапі перехідного процесу, $U_C(t_B)$ – напруга на електростатичному конденсаторі в момент початку третього етапу перехідного процесу, яку можна визначити через спад напруги на електричному навантаженні в момент часу $t = t_B$

$$U_C(t_i + t_B) = R_H \cdot i_{H2}(t_i + t_B). \quad (\text{Л.15})$$

Звідки виражаємо зображення струму на третьому етапі перехідного процесу

$$i_{H3}(p) = \frac{U_C(t_B)}{R_H p + \frac{1}{C}}. \quad (\text{Л.16})$$

Визначимо корінь характеристичного рівняння отриманого виразу

$$R_H p + \frac{1}{C} = 0, \quad p = -\frac{1}{R_H C} \quad (\text{Л.17})$$

та, скориставшись теоремою подібності, знайдемо його оригінал як функцію часу

$$i_{H3}(t) = \frac{U_C(t_B)}{\frac{d}{dp} \left(R_H p + \frac{1}{C} \right)} e^{pt} = \frac{U_C(t_B)}{R_H} e^{-\frac{t-t_B}{\tau_3}}, \quad (\text{Л.18})$$

де $\tau_3 = R_H C$ – постійна часу релаксації струму в електричному навантаженні на третьому етапі перехідного процесу.

Тепер, коли сталі відомі часові залежності струму в електричному навантаженні на всіх трьох етапах проходження перехідного процесу, стає можливим побудувати його часову залежність при заданих електричних параметрах розрядного контуру ($Q = 0,833$).

Як можна бачити часових залежностей струмів наведених на рис. Л.5, задній фронт другого імпульсу струму в електричному навантаженні в момент часу t_B прий-

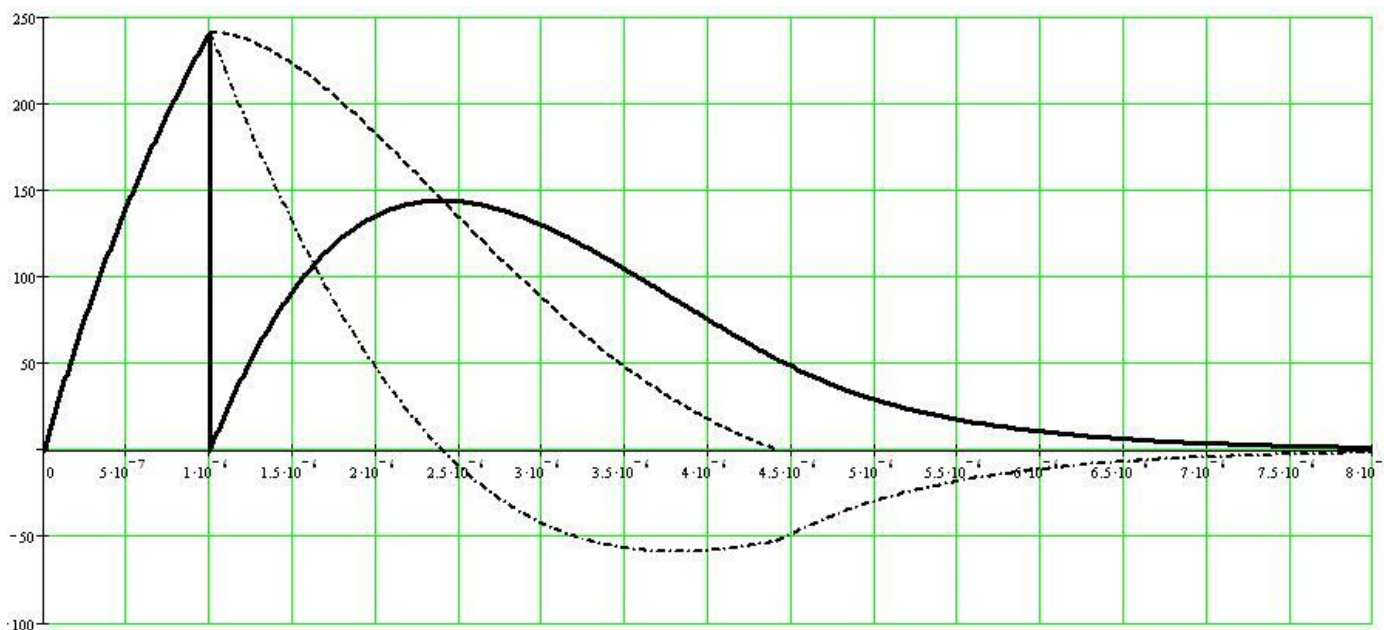


Рис. Л.5 Часові залежності струмів в електричному навантаженні – суцільна крива, в розрядному контурі - штрихова крива та в електростатичному конденсаторі – штрих-пунктирна крива ($Q = 0,833$)

має аперіодичний характер, що значно збільшує загальну тривалість імпульсу струму. Тому виникає необхідність знайти оптимальну величину ємності електростатичного конденсатора при якій тривалість заднього фронту другого імпульсу струму буде мінімальною.

Як зазначалось вище, при електричній добротності розрядного контуру меншою за 0,5 третій аперіодичний етап перехідного процесу не відбувається. Виходячи з цього, стає доцільним розглянути перехідний процес у розрядному контурі при його електричній добротності меншій за 0,5. На рис. Л.6 наведені часові залежності струмів в електричному навантаженні, в розрядному контурі та в електростатичному

конденсаторі при його електричній ємності $0,1 \text{ мкФ}$, що відповідає добротності розрядного контуру $Q = 0,263$.

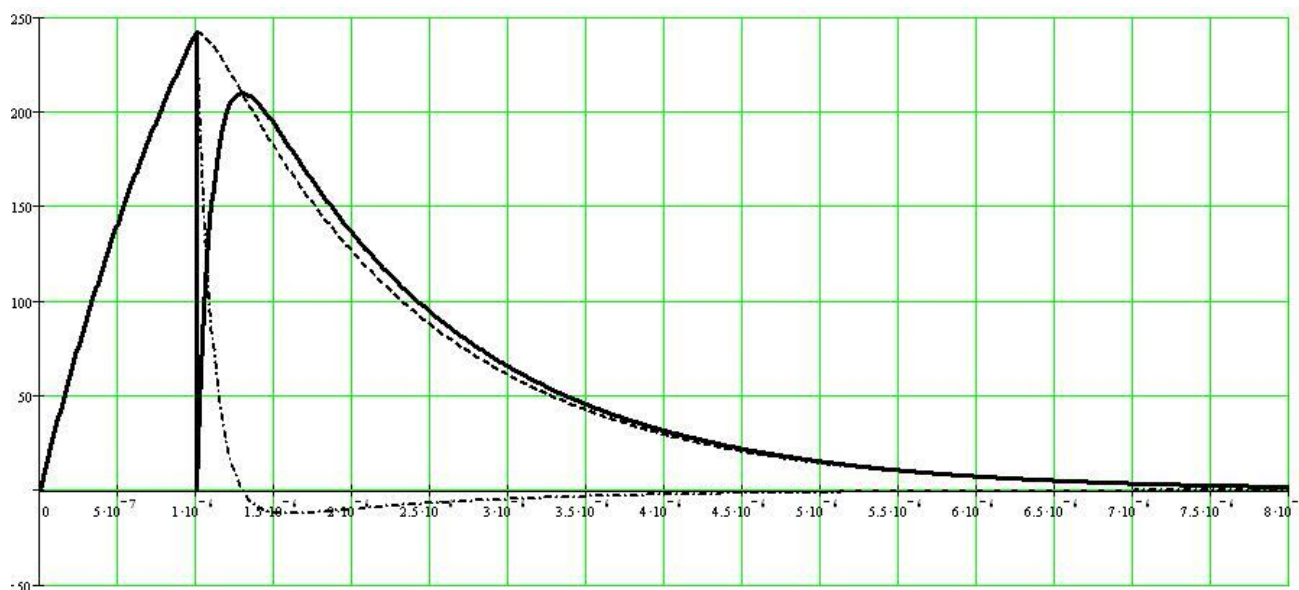


Рис. Л.6 Часові залежності струмів в електричному навантаженні – суцільна крива, в розрядному контурі – штрихова крива та в електростатичному конденсаторі – штрих-пунктирна крива ($Q = 0,263$)

Як можна бачити з часової залежності струму в електричному навантаженні, при малих значеннях електричної добротності розрядного контуру загальна тривалість розрядного імпульсу майже не змінилась. При цьому значно збільшилось амплітудне значення величини другого імпульсу струму в електричному навантаженні, а також збільшилась крутизна його наростання по передньому фронту.

Розглянемо випадок при критичній електричній добротності розрядного контуру ($Q = 0,5$), яка відповідає ємності електростатичного конденсатора $0,36 \text{ мкФ}$.

На рис. Л.7 наведені часові залежності струмів в електричному навантаженні, в розрядному контурі та в електростатичному конденсаторі при його електричній ємності $0,36 \text{ мкФ}$, що відповідає добротності розрядного контуру $Q = 0,5$. Тонкою лінією наведено задній фронт імпульсу струму у випадку відсутності шунтувального ланцюга.

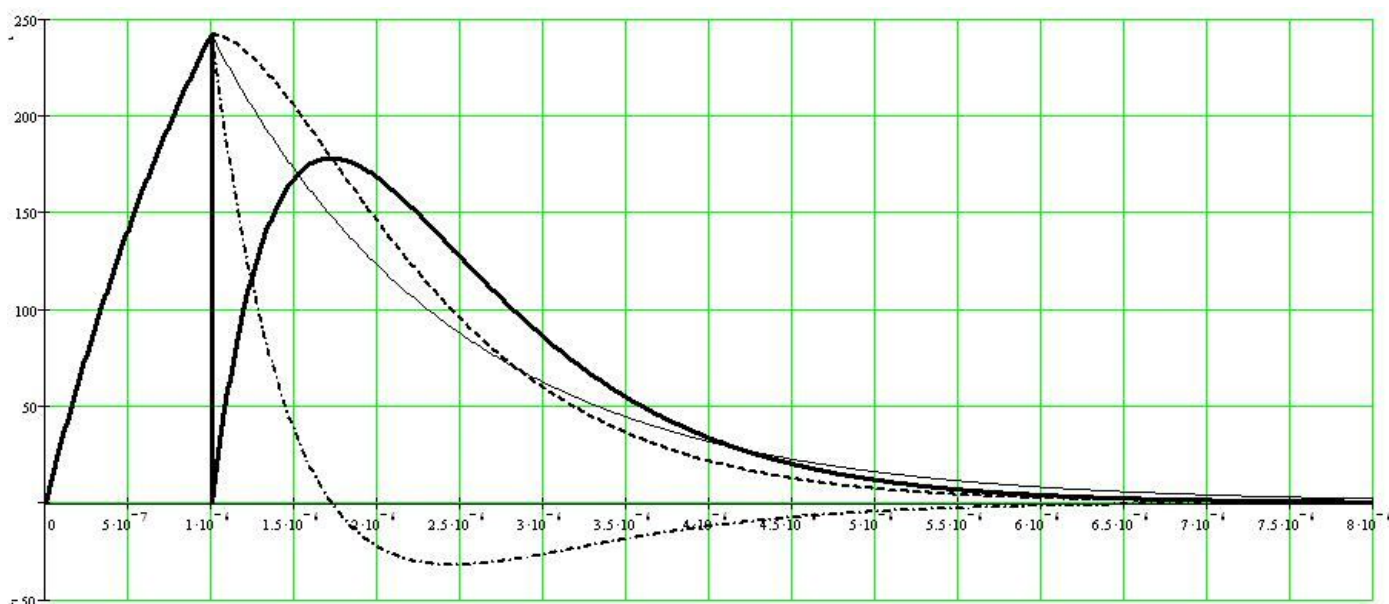


Рис. Л.7 Часові залежності струмів в електричному навантаженні – суцільна крива, в розрядному контурі – штрихова крива та в електростатичному конденсаторі – штрих-пунктирна крива ($Q = 0,5$)

Як можна бачити, з представленої на рис. Л.7 часової залежності імпульсу струму в електричному навантаженні, його загальна тривалість, порівняно з аналогічними для добротностей розрядного контуру 0,833 та 0,263, помітно скоротилась. Амплітудне значення другого імпульсу струму, порівняно з випадком при добротності розрядного контуру 0,263, декілька зменшилось, а, порівняно з випадком при добротності розрядного контуру 0,833, декілька збільшилось.

У табл. Л.1 наведені розрахункові дані параметрів другого імпульсу струму в електричному навантаженні при різних значеннях добротності розрядного контуру. У даній таблиці $t_{0,1-0,1}$ – загальна тривалість імпульсу струму в електричному навантаженні по рівню 0,1 пікового значення струму,

$\frac{i_{2\max}}{i_{1\max}}$ – відношення пікового значення другого імпульсу струму до першого, $t_{2\max}$ – час досягнення максимуму другого імпульсу струму,

$\frac{i_{2\max}}{t_{2\max} - t_i}$ – середня швидкість наростання струму переднього фронту другого імпульсу струму.

Розрахункові данні параметрів другого імпульсу струму

Q	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,75	1	2	3	4	5
C , мкФ	0,014	0,058	0,13	0,231	0,36	0,811	1,442	5,767	12,98	23,16	36,04
$t_{0,1-0,1}$, мкс	4,31	4,29	4,49	4,21	4,2	4,73	5,99	12,7	19,7	24,8	28,9
$\frac{i_{2\max}}{i_{1\max}}$	0,964	0,905	0,845	0,788	0,736	0,627	0,544	0,351	0,255	0,199	0,163
$t_{2\max}$, мкс	1,071	1,187	1,359	1,545	1,742	2,264	2,645	5,245	7,167	9,33	11,15
$\frac{i_{2\max}}{t_{2\max} - t_i}$, кА/мкс	3,33	1,17	0,57	0,35	0,24	0,12	0,08	0,02	0,01	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
t_B , мкс	-	-	-	-	-	4,45	4,56	6,47	8,63	10,8	13

На основі аналізу аналітичних залежностей перехідного процесу та отриманих розрахункових даних, наведених у табл. Л.1, можна зробити наступні висновки.

1. Мінімальна загальна тривалість імпульсу струму досягається при величині електричної добротності розрядного кола 0,5.

2. Зменшення електричної добротності розрядного кола призводить до збільшення пікового значення та крутизни наростання струму переднього фронту другого імпульсу струму в електричному навантаженні.

3. Збільшення електричної добротності розрядного кола більше 0,5 призводить до зменшення крутизни фронтів другого імпульсу струму в електричному навантаженні та збільшує його тривалість.

Таким чином, в залежності від бажаного результату, оптимальне величина ємності електростатичного конденсатора шунтувальної ланки електричної схеми наведеної на рис. Л.1 може бути значно різною.

У випадках, коли потрібно досягти мінімальної загальної тривалості двох послідовних імпульсів струму в електричному навантаженні, ємність електростатичного конденсатора вибирається таким чином щоб величина електричної добротності розрядного кола відповідала 0,5.

У випадках, коли потрібно досягти максимальних величин пікового значення та крутизни переднього фронту другого імпульсу струму в електричному навантаженні, ємність електростатичного конденсатора вибирається як змога меншою. У даному випадку, загальна тривалість та форма імпульсу струму в електричному навантаженні лишається майже незмінною, порівняно з випадком відсутності шунтувальної ланки, але з'являється короткочасна безструмова пауза. У даному випадку, задній фронт першого та передній фронт другого імпульсів струму будуть мати значно більшу крутизну наростання струму ніж передній фронт першого імпульсу струму. На практиці, крутизна спадання струму заднього фронту першого та наростання переднього фронту другого імпульсів струму буде обмежуватись швидкодією силових напівпровідникових електричних ключів (порядку 100 нс) та наявними власними індуктивностями електричного навантаження і шунтувальної ланки.

У випадках, коли в електричному навантаженні потрібно отримати одиночний ІС заданої тривалості, ємність електростатичного конденсатора вибирається як змога більшою. У даному випадку в усталеному режимі роботи даної електричної схеми, другий ІС в ЕН буде майже відсутній, замість нього, в залежності від величини електричної ємності та коефіцієнту заповнення ІС, в ЕН заявиться або постійна складова струму незначної величини, або аперіодична зі значною постійною часу релаксації. При цьому, на відміну від випадку з відсутньою ємністю в шунтувальній ланці, енергія магнітного поля, накопичена на індуктивностях елементів розрядного контуру, майже повністю передається в ЕН і не спричиняє перегріву елементів розрядного контуру формувача розрядних імпульсних струмів.

Також слід зазначити, що ККД даної електричної схеми майже не залежить від величини добротності розрядного контуру та визначається відношенням активного опору електричного навантаження до загального активного опору розрядного кола

$$\eta = \frac{R_H}{R_0 + R_K + R_H} \quad (\text{Л.19})$$

і для заданих електричних параметрів елементів кола становить 0,98.

Для підтвердження достовірності результатів отриманих аналітичним методом та шляхом комп'ютерного моделювання була побудована малопотужна фізична модель схеми наведеної на рис. Л.1. В якості електричного навантаження були застосовані малоіндуктивні резистори з загальним електричним опором 1 Ом, загальна індуктивність розрядного контуру становить приблизно 2 мкГн.

На рис. Л.8 наведено осцилограму імпульсів струму в електричному навантаженні з вимкненою шунтувальною ланкою. Міжімпульсний період становить приблизно 6,25 мкс при заданій тривалості переднього фронту розрядного імпульсу струму 0,878 мкс, що відповідає коефіцієнту заповнення $S = 0,14$.

На рис. Л.9 – Л.11 наведені осцилограми струму в резистивному ЕН з ввімкненою шунтувальною ланкою з величинами електричної ємності електростатичного конденсатора в ній 22 нФ, 0,47 та 1000 мкФ відповідно.

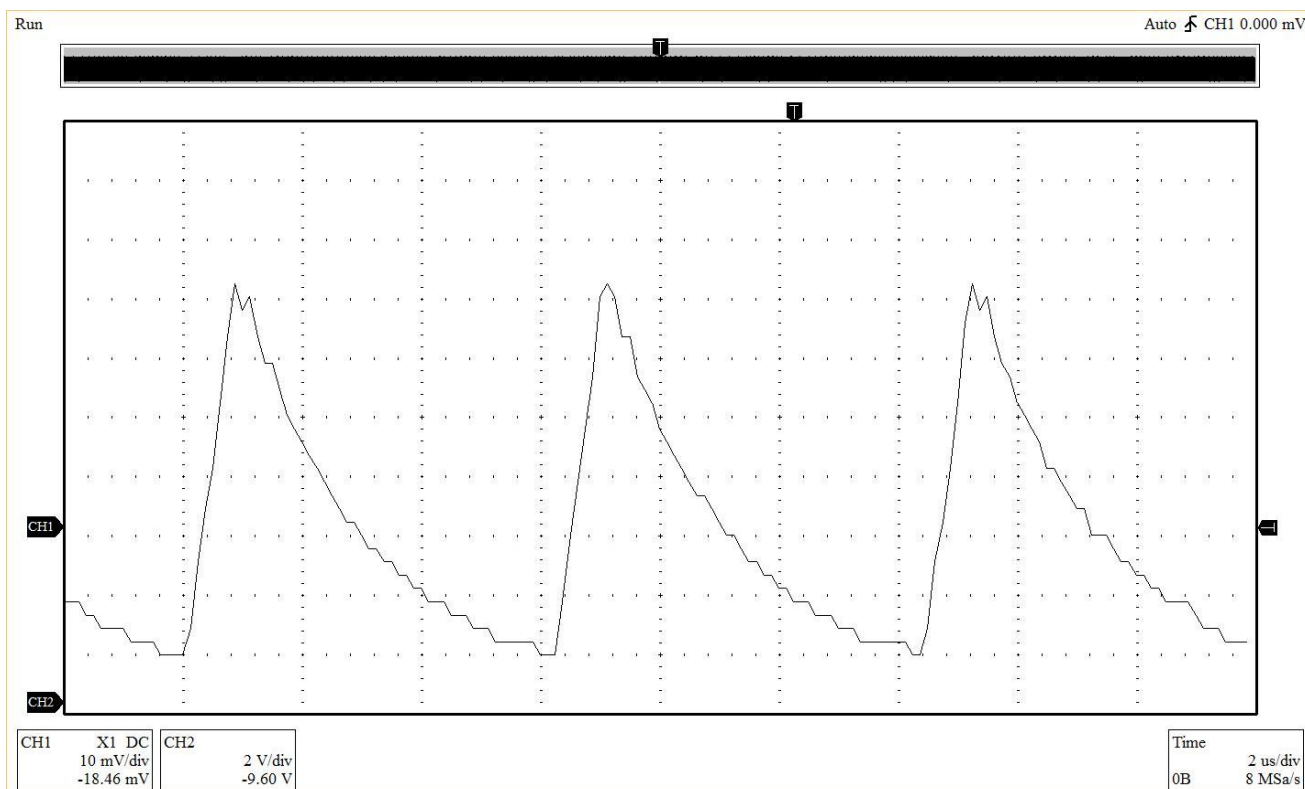


Рис. Л.8 Осцилограма ІС в електричному навантаженні з вимкненою шунтувальною ланкою

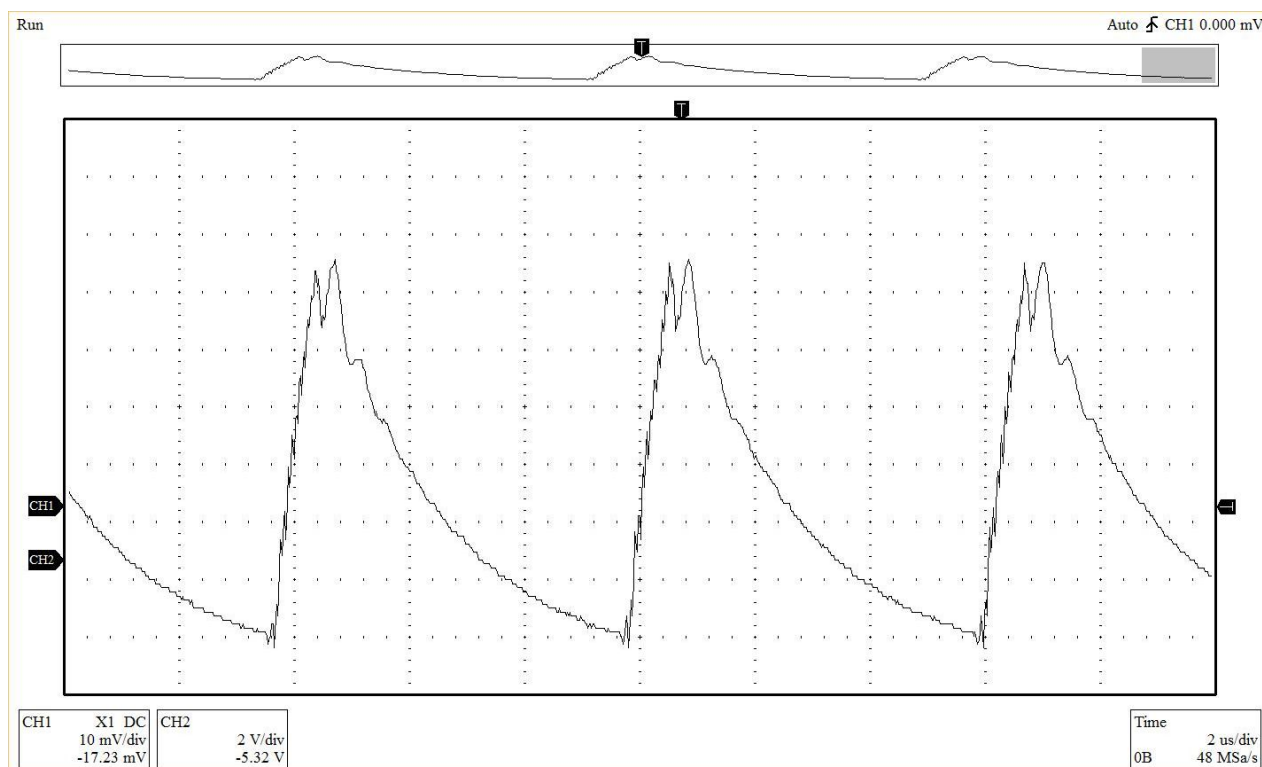


Рис. Л.9 Осцилограма ІС в резистивному ЕН з ввімкненою шунтувальною ланкою з величиною електричної ємності в ній 22 нФ

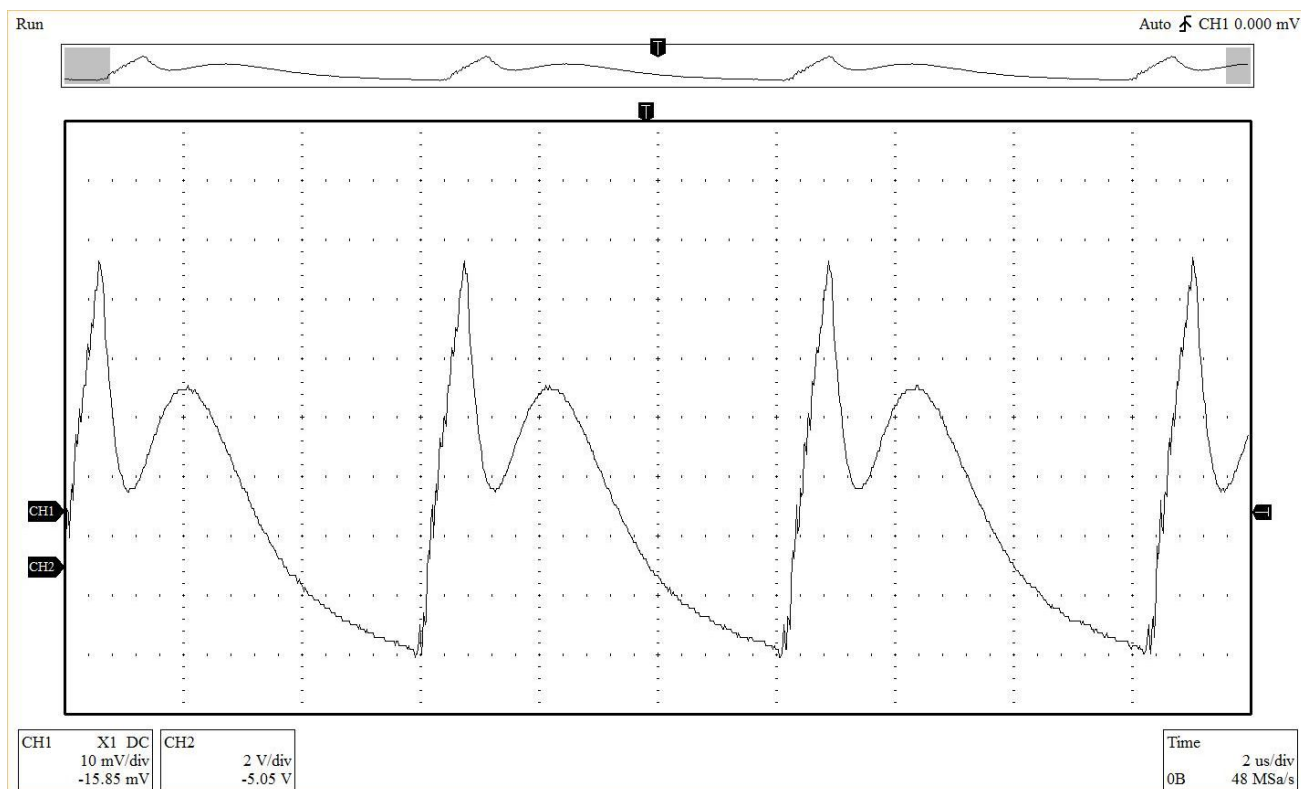


Рис. Л.10 Осцилограма ІС в резистивному ЕН з ввімкненою шунтувальною ланкою з величиною електричної ємності в ній 0,47 мкФ

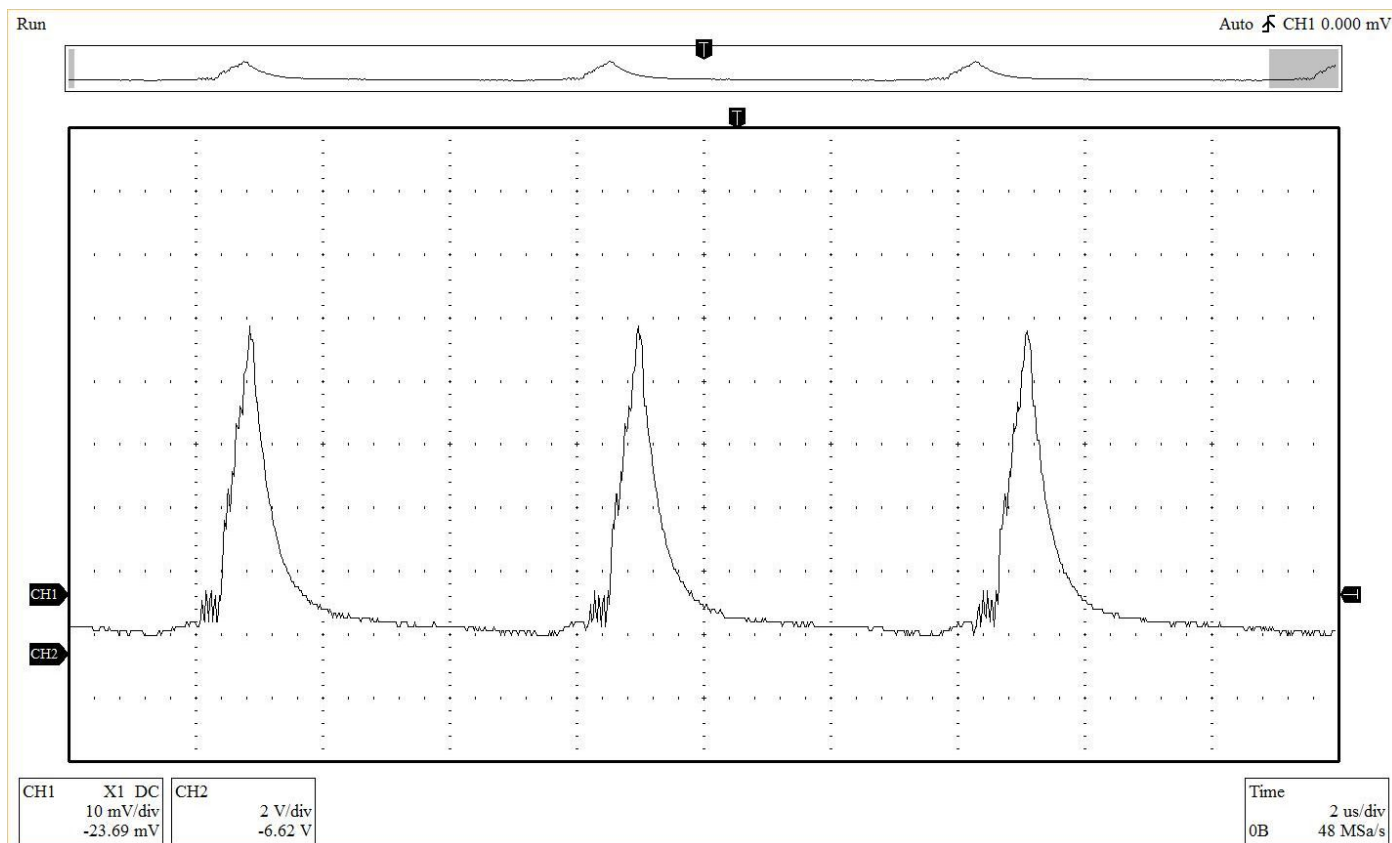


Рис. Л.11 Осцилограма ІС в резистивному ЕН з ввімкненою шунтувальною ланкою з величиною електричної ємності в ній 1000 мкФ

Як можна бачити з наведених на рис. Л.9 – Л.11 осцилограм ІС в ЕН, результати отримані аналітичним шляхом та шляхом комп'ютерного моделювання добре збігаються з результатами фізичного моделювання.

Струм в ЕН в момент часу комутації електричних ключів ($K1$ – розмикається, $K2$ – замикається) не спадає до нуля внаслідок наявної індуктивності в колі ЕН, яка складається з власної індуктивності ЕН, індуктивності вимірювального трансформатора струму та індуктивності з'єднувальних провідників.

За часовими залежностями ІС в ЕН, отриманими експериментальним шляхом, можна зробити висновок, що в реальних умовах за допомогою даної електричної схеми отримати міжструмову паузу в електричному навантаженні при незначних величинах електричної ємності шунтувального конденсатора практично не можливо.

Додаток М
Електророзрядні установки



а



б



в

Рис. М.1 Регульованні тиристорні електророзрядні установки
ЭРУ-6-0,5/1– *а* (одноканальна), ЭРУ-5-0,8/1,5 – *б* (одноканальна)
та ЭРУ-0-1,2/0,3 – *в* (двоканальна)

*a**б*

Рис. М.1 Регульованні транзисторні електророзрядні установки
ЭРУ-5-0,5/1 – *a* та ЭРУ- 3-0,3/0,5 – *б*