

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗРЯДНОГО ІМПУЛЬСУ

Перетятко Ю.В., к.т.н., доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Олійник В.С., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра атомних електростанцій та технічної теплофізики

**Вступ.** Визначальними параметрами електророзрядних установок, які використовують ємнісні накопичувачі електроенергії, являються частота, амплітуда, прогальність та тривалість імпульсу. Можливість регулювання цих параметрів дозволяє розширити межі використання формувачів розрядних імпульсів (ФРІ). Приміром, зменшення тривалості часу, за який передається однакова доза енергії, дозволяє збільшити імпульсну потужність у навантаженні та підвищити ефективність роботи імпульсних технологій, зокрема технологій отримання електроерозійних мікро- та нанорозмірних порошків. При використанні ФРІ у безперервних технологіях виникає необхідність зменшувати тривалість імпульсних струмів у технологічному навантаженні [1, 2].

**Мета роботи.** Визначення особливостей та закономірностей регулювання параметрів імпульсних струмів у навантаженні.

**Матеріали і результати досліджень.** На схемі рис. 1 зображений 4-контурний формувач розрядних імпульсів із накопичувальним конденсатором  $C$ , заряд якого здійснювався від формувача постійної напруги (ФПН) через тиристорні комутатори  $VT1- VT2$  та  $VT5- VT6$ , дросель індуктивністю  $L_1$  та резистор опором  $R_1$ . Розряд конденсатора відбувається на активне навантаження опором  $R_2$ , через тиристорні комутатори  $VT3-VT4$  та  $VT7-VT8$  і дросель індуктивністю  $L_2$ . Вважається, що опір навантаження не змінює свого значення з часом  $R_2 = \text{const}$ .

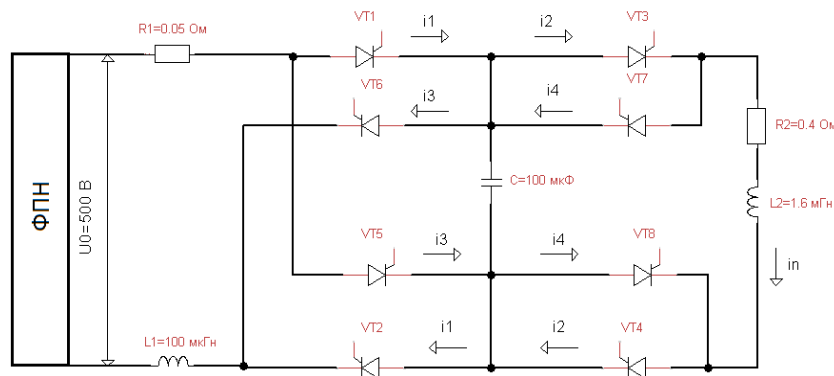


Рисунок 1 – Принципова схема установки

Запропоноване чотирьоконтурне електричне коло напівпровідникового формувача розрядних імпульсів дозволяє реалізувати формування біполярних імпульсів та регулювання їх тривалості у навантаженні. Коло містить дві пари

зарядних VT1 та VT2 (VT5 та VT6) та дві пари розрядних VT3 та VT4 (VT7, VT8) тиристорних комутатори, втратами в яких при протіканні струму нехтуємо. Використання тиристорних ключів дозволяє завершити (обірвати) як зарядний так і розрядний процеси при зміні напрямку струму у колі (тобто при зміні знака струму у колі).

Заряд накопичувального конденсатора розпочинається з моменту подачі сигналів управління на тиристорні ключі VT1 та VT2 які замикають зарядний контур накопичувального конденсатора. Через 500 мкс на керуючий електрод тиристорів VT3, VT4 подається сигнал що призводить до замикання розряду конденсатора  $C$  на навантаження  $R_2$  через індуктивність  $L_2$ . Добротність розрядного контуру  $Q = (L/C)^{0.5}/R_2 > 0,5$ , тому відбувається перезаряд конденсатора  $C$  до напруги зворотної полярності, що забезпечує надійне природне відключення розрядних комутаторів VT3+VT4 та VT7+ VT8. Через 500 мкс надходить сигнал на тиристори VT5, VT6 і починається процес заряду конденсатора  $C$ , напруга на якому  $U_0 \neq 0$ . Через 500 мкс відкриваються тиристори VT7 та VT8 і розпочинається розряд конденсатора  $C$  через  $L_2$  на  $R_2$ , після закінчення якого перший зарядно-розрядний цикл завершився.

Для того, щоб зменшити час розрядного імпульсу, не вдаючись до зміни параметрів елементів схеми, доцільно зменшувати тривалість затримки включення тиристорів VT1+VT2 та VT5+VT6 відносно моменту попереднього включення розрядних тиристорних ключів, відповідно VT7+ VT8 та VT3+VT4.

Проте, при такому зменшенні тривалості імпульсного струму в навантаженні відбувається зменшення ККД зарядного контуру та зростання максимальної напруги на конденсаторі за нелінійним законом.

Коефіцієнт корисної дії електророзрядної установки визначався за формулою [3]:

$$\eta = \frac{C(U_k^2 - U_n^2)}{2CU_0(U_k - U_n)} = \frac{U_k + U_n}{2U_0},$$

де  $U_n$  та  $U_k$  – відповідно початкова та кінцева напруги на конденсаторі при його заряді від ФПН через дросель  $L_1$ ;  $U_0$  – напруга від ФПН.

Напруга  $U_n$  визначалась з виразу для максимального значення напруги на конденсаторі при коливальному процесі його заряду від ФПН:

$$\begin{aligned} U_{C_{\max}} &= U_0 - (U_0 - U_n)e^{-\frac{\pi}{2Q}} \left( \frac{1}{2Q} \sin \pi + \cos \pi \right) = \\ &= U_0 + (U_0 - U_n)e^{-\frac{\pi}{2Q}} \Rightarrow U_n = U_0 - (U_{C_{\max}} - U_0)e^{\frac{\pi}{2Q}} \end{aligned}$$

Аналіз поставленої задачі проводився із використання MathLab. Для зручності демонстрації отриманих результатів введено коефіцієнт перекриття, який відображає відсоток накладання зарядного процесу на ще не завершений розрядний процес:  $\tau_{\Delta} = \frac{\Delta}{\tau_{\text{имп}0}} 100\%$ , де  $\Delta$  – змінна величина, яка відповідає за

тривалість перекриття зарядно-розрядних циклів у результаті зміщення моменту подачі сигналів управління на зарядні тиристори відносно їх початкового моменту.

Результати моделювання зміни тривалості затримки включення зарядних тиристорів відносно розрядних тиристорів наведені у табл.1 та 2 відповідно у абсолютних та відносних одиницях.

Таблиця 1 – Параметри розрядного імпульсу

$\Delta t$ , мкс	$U_{Cmax}$ , В	$\tau_{имп}$ , мкс	$\eta$ , %
144	833	144 ( $t_{имп0}$ )	97.28
-20	1987	100	87.85
-70	5014	82	63.12
-100	8495	65	34.69

Таблиця 2 – Коефіцієнти розрядного імпульсу

$\tau_{\Delta}$ , % $\Delta / t_{имп0}$	$\gamma$ $U_{Cmax}/U_0$	$t_s$ $t_{имп}/t_{имп0}$
0	1,66	1
113	3,97	0,69
148	10,02	0,56
169	16,99	0,45

де:  $\tau_{имп}$  – тривалість розрядного імпульсу через навантаження;  $\gamma_3 = \frac{U_{Cmax}}{U_0}$  – коефіцієнт підвищення заряду, що є відношенням максимального значення напруги на конденсатора до напруги ФПН;  $\tau_{іроз} = \frac{\tau_{имп}^{var}}{\tau_{имп0}}$  – тривалість струму у розрядному контурі представлена у відносних одиницях;  $\tau_{имп}^{var}$  – змінна величина, яка відповідає за тривалість розрядного імпульсу через навантаження за умови накладання сигналів управління на тиристори;  $\tau_{имп0}$  – тривалість розрядного імпульсу через навантаження за відсутності перекриття.

Проведений аналіз показує, що змінюючи тривалість затримки включення тиристорів зарядних контурів, час розрядного імпульсу зменшується лінійно, у той час як напругу на конденсаторі та ККД електроімпульсного процесу в діапазоні перекриття  $\tau_{\Delta}=0..100\%$  можна описати за лінійним законом, а на проміжку  $\tau_{\Delta}>100\%$  за експоненційним.

Виходячи з цієї тенденції можна зробити висновок, що ефективний діапазон зміни часу тривалості затримки зарядних тиристорів лежить в межах  $\tau_{\Delta}=80-140\%$ . Подальша зміна часу затримки призводить до стрімкого падіння ККД та, водночас, росту максимальної напруги на конденсаторі, що може призвести до нерентабельності роботи та падіння надійності електророзрядної установки. Попри це, даний спосіб регулювання параметрів імпульсу є універсальним для ФРІ будь-якого призначення, оскільки не супроводжується зміною форми розрядного струму.

Детальний аналіз зарядно-розрядного кола накопичувального конденсатора у якому заряд конденсатора відбувається від ФПН через тиристорний комутатор, дросель та резистор, а розряд на активне навантаження через тиристорний комутатор та котушку індуктивності представлено у роботі [1].

## Регулювання параметрів імпульсу шляхом зміни добротності зарядного за умови перекриття зарядно-розрядних процесів.

На рис. 2-4 відповідно представлені залежності впливу відсотку перекриття вмикання зарядних тиристорів під час протікання розрядного процесу на тривалість розрядного імпульсу через навантаження  $\tau(\tau_{\Delta})$ , коефіцієнт підвищення заряду  $\gamma(\tau_{\Delta})$  та ККД  $\eta(\tau_{\Delta})$ .

З графіків видно, що зміна добротності зарядного контуру впливає на параметри розрядного імпульсу. Енергоефективність установки при цьому не змінюється. Так, встановлено, що при різних значеннях добротності зарядного контуру такі параметри імпульсу як тривалість та ККД співпадають при різних ступенях перекриття, значення якого наближено можна подати залежністю:

$\tau_{\Delta 1} = \tau_{\Delta 0} + 4|\Delta Q|$ , де  $\tau_{\Delta 1}$  – ступінь перекриття при обчислюваній добротності,  $\tau_{\Delta 0}$  – ступінь перекриття, при якому спостерігається відповідність  $\eta$  та  $\tau$  при відомій добротності,  $\Delta Q$  – різниця добротності відомої та обчислюваної.

Таким чином, ці точки можна вважати відповідними з єдиною відмінністю в енергії імпульсу, яка при зростанні добротності збільшується.

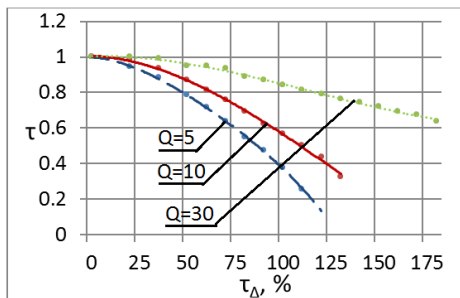


Рисунок 2 - залежність тривалості імпульсу від ступеня перекриття

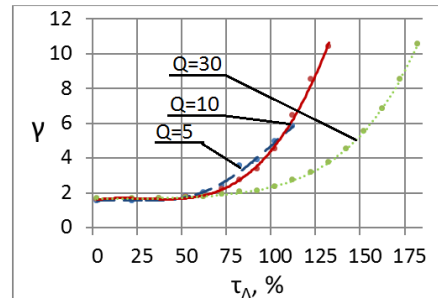


Рисунок 3 - залежність напруги на конденсаторі від ступеня перекриття

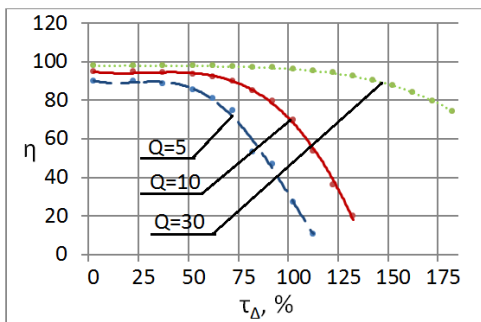


Рисунок 4 - залежність ККД від ступеня перекриття

Плавна зміна параметрів імпульсу при високій добротності пов'язана з тривалим зарядом конденсатора від ФПН, тому при перекритті процесів розряду та заряду конденсатор недоотримує енергію від ФПН і діапазон регулювання обмежується високою напругою, проте зі збереженням високого ККД.

## Регулювання параметрів імпульсу шляхом зміни добротності розрядного контуру за умови перекриття зарядно-розрядних процесів.

На рис. 5, 6, 7 наведено безрозмірні графіки залежності параметрів імпульсу  $\tau(\tau_{\Delta})$ ,  $\gamma(\tau_{\Delta})$ ,  $\eta(\tau_{\Delta})$

На відміну від попереднього, межі використання даного способу регулювання параметрів імпульсу обмежені формою імпульсного струму. А саме, висока добротність  $Q=1.25$ ) характеризується тривалим імпульсом ( $t_{\text{имп}0} = 173$  мкс), низькою потужністю, яка, проте, стрімко зростає зі збільшенням ступеня перекриття і при  $\tau_{\Delta} = 135\%$  набуває критичного значення  $10U_0$ .

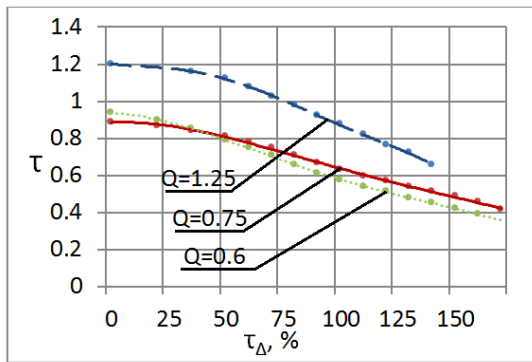


Рисунок 5 - залежність тривалості імпульсу від ступеня перекриття

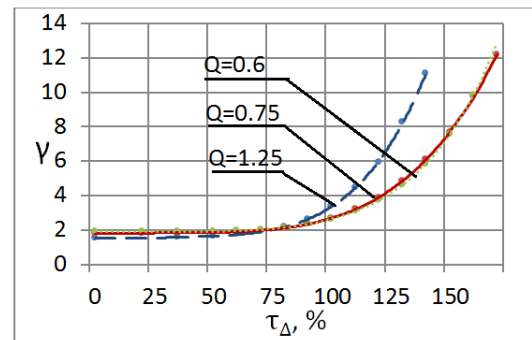


Рисунок 6 - залежність напруги на конденсаторі від ступеня перекриття

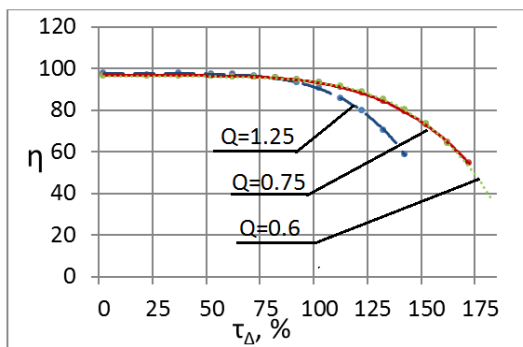


Рисунок 7 - залежність ККД від ступеня перекриття

При меншій добротності критичне значення напруги на конденсаторі настає пізніше. Параметри імпульсу ( $\tau$ ) покращуються при зменшенні добротності, проте при наближенні до критичного значення ( $Q=0.5$ ), імпульснорозрядний струм приймає вигляд експоненти з тривалим наближенням до нуля, що також викликає обмеження у використанні даного способу.

В цілому, як видно з графіків, енергоефективність імпульсу при високій добротності розрядного контуру низька, а параметри імпульсу при нижчих добротностях є практично аналогічними, тому використання даного способу регулювання параметрів імпульсу є необов'язковим і невиправданим.

**Висновки.** Аналіз впливу накладання подачі зарядних сигналів управління під час розрядного процесу на зарядно-розрядні процеси у розгалуженому колі змінної структури дозволяє зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що максимальне значення напруги на конденсаторі та відповідно максимальне значення струму зарядного контуру зростають із збільшенням ступеню перекриття за різних значень добротностей зарядного контуру.
2. Забезпечується збільшення максимального значення розрядного імпульсу через навантаження при зменшенні його тривалості.

#### Перелік посилань

1. Шидловский А. К., Щерба А. А., Супруновская Н. И. Энергетические процессы в электроимпульсных установках с емкостными накопителями энергии. – К.: Интерконтиненталь – Украина, 2009. – 207 с.
2. Щерба А. А., Супруновская Н. И. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // Техн. Електродинамика. – 2012 – №5. – С. 3–9.
3. Щерба А. А., Супруновская Н. И., Иващенко Д. С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке // Техн. Електродинамика. – 2014 – №5. – С. 23–25.