

ЗМІНЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ РОЗРЯДУ КОНДЕСАТОРА ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БІПОЛЯРНИХ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ У НАВАНТАЖЕННІ

С.С. Розіскулов¹, В.В. Михайленко², канд.техн.наук, Ю.В. Перетятко², канд.техн.наук

¹ Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

E-mail: roziskulov@mail.ru

² НТУУ "Київський політехнічний інститут",

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

E-mail: peretyatko.julia@gmail.com

Запропоновано регулювати тривалість біполярних імпульсних струмів у навантаженні шляхом збільшення частоти біполярних розрядів накопичувального конденсатора електроімпульсних установок. Визначено енергетично доцільні умови змінення тривалості розрядних струмів конденсаторів та напруги їхнього заряду. Бібл. 12, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: конденсатор, розряд, перехідні процеси, тривалість, біполярні імпульси, навантаження.

Аналіз та синтез електричних кіл розрядно-імпульсних установок зазвичай спрямовується на підвищення у навантаженні імпульсної потужності [6], доз енергії [1, 11] і зменшення тривалості імпульсних струмів (ІС) [7]. Зокрема, при проектуванні установок для отримання іскроерозійних мікро- і нанопорошків [8–10] тривалість ІС у навантаженні впливає на його електричний опір [12] та розміри і структуру ерозійних частинок [2, 8]. Для послаблення гальванічних процесів у навантаженні формують біполярні ІС (БІС) почерговим розрядом двох різнополярних конденсаторів, але при цьому виникають додаткові втрати електроенергії через її перерозподіл між конденсаторами [5]. Тому **метою роботи** було визначення умов змінення перехідних процесів у колах формуваців з одним конденсатором для формування у навантаженні БІС з регульованою тривалістю.

На рис. 1 показано схему такого формувача біполярних ІС. Параметри схеми вибиралися згідно з умовами, описаними у [7, 12]. На схемі позначено: ФПН – формувач постійної напруги $U = 500$ В, VS_1 – VS_8 – керовані ключі, L_1 і R_1 – індуктивність і активний опір зарядного кола конденсатора, а L_2 і R_2 – розрядного, причому R_2 включає опір навантаження. Включенням VS_1 і VS_2 конденсатор C за час $\Delta t_1 = t_1 - t_0 \approx 45$ мс заряджався по колу "+-ФПН– L_1 – R_1 – VS_1 – C – VS_2 –"-ФПН. Поточна напруга $u_{1C}(t)$ визначалася з рівняння [3]

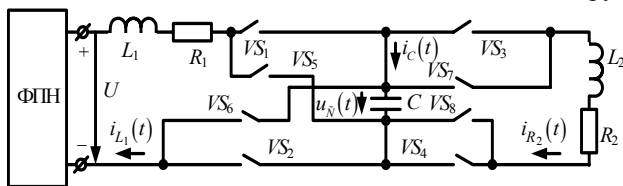


Рис. 1

$$\frac{d^2 u_{1C}(t)}{dt^2} = \frac{-R_1}{L_1} \frac{du_{1C}(t)}{dt} + \frac{U - u_{1C}(t)}{L_1 C}. \quad (1)$$

Розв'язок рівняння (1) на першому інтервалі $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ з кроком p_1 знаходився згідно з методом Рунге-Кутта у вигляді матриці U_{1C} типу [4]

$$U_{1C} = \text{rkfixed}(u_{1C}, t_0, t_1, p_1, D_{1C}), \quad (2)$$

де D_{1C} – вектор-стовпець проміжних рішень відносно

напруги $u_{1C}(t)$ на C .

Відповідно до [6, 11], при добротності зарядного контуру $Q_1 = L_1^{0.5} C^{0.5} R_1^{-1} \geq 2$ у момент часу $t_1 < t \leq t_2$ можна знайти значення $U_1 = U(U - U_0) \cdot e^{-\pi Q}$, а при $Q_1 \geq 20$ конденсатор зарядиться від ФПН до $U_1 > 960$ В.

На другому інтервалі часу $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ всі ключі розімкнені, а напруги $u_{2C}(t_2) = u_{1C}(t_1) = U_1 > 960$ В. На третьому інтервалі $\Delta t_3 = t_3 - t_2$ включенням VS_3 і VS_4 конденсатор розряджається на навантаження R_2 . Значення C , L_2 та R_2 вибирають такими, щоб виконувалася нерівність $0,5 < Q_2 = L_2^{0.5} C^{0.5} R_2^{-1} \geq 4$ і розряд конденсатора був слабо коливальним. Тоді поточну напругу $u_{3C}(t)$ на конденсаторі можна знайти з рівняння [12]

$$\frac{d^2 u_{3C}(t)}{dt^2} = \frac{-R_2}{L_2} \frac{du_{3C}(t)}{dt} - \frac{u_{3C}(t)}{L_2 C}. \quad (3)$$

Його розв'язок на інтервалі Δt_3 з кроком p_3 можна знайти у вигляді матриці U_{3C} типу [3, 4]

$$U_{3C} = \text{rkfixed}(u_{3C}, t_2, t_3, p_3, D_{3C}), \quad (4)$$

де D_{3C} – вектор-стовпець проміжних рішень відносно напруги $u_{3C}(t)$ на конденсаторі C .

На четвертому інтервалі $\Delta t_4 = t_4 - t_3$ всі ключі є розімкненими і значення напруги $U_4 = U_3 > -300$ В. На п'ятому інтервалі включенням VS_5 і VS_6 конденсатор за $\Delta t_5 = t_5 - t_4 \approx 45$ мс заряджається до напруги U_5 , яку можна знайти з рівняння, аналогічного (1). Так як його початкова напруга $U_4 < 300$ В, то конденсатор заряджається до напруги $|U_5| < |U_1|$, реалізуючи від'ємний зв'язок між напругами його заряду і попереднього розряду.

Електромагнітні процеси на шостому – восьмому інтервалах будуть аналогічними процесам на другому – четвертому інтервалах. Якщо на кожному з восьми інтервалів напругу на конденсаторі позначити як $u_{kC}(t)$, (де $k = 1, 2, \dots, 8$), то для струмів через конденсатор C і через опір навантаження R_2 будуть справедливі вирази

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}; \quad i_{R_2}(t) = C \left(\frac{du_{2C}(t)}{dt} + \frac{du_{4C}(t)}{dt} \right). \quad (5)$$

На основі виразів (1) – (5) з використанням пакету програм Matlab/Simulink побудовано діаграми напруг $u_C(t)$, струмів $i_C(t)$ та $i_{R_2}(t)$ при $U = 500$ В, $C = 10^{-4}$ Ф, $L_1 = 10^{-4}$ Гн, $L_2 = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Гн, $R_1 = 5$ МОм, $R_2 = 0,4$ Ом та частоті

повного 8-етапного циклу $f_{IM}=500$ Гц (рис. 2) та $f_{IM} = 909$ Гц (рис. 3).

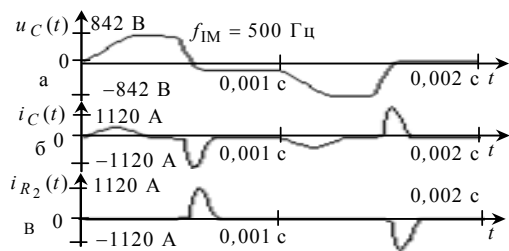


Рис. 2

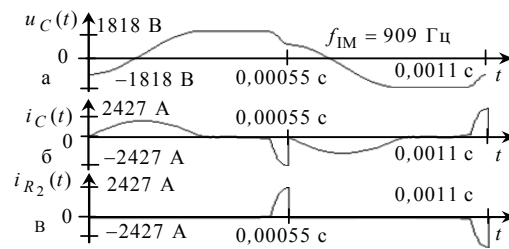


Рис. 3

Тривалість ІС через ключі VS_1, VS_2, VS_5 та VS_6 була сталою, а через VS_3, VS_4, VS_7 та VS_8 – залежною від частоти повторення повного циклу (суми восьми інтервалів часу). У таблиці наведено розрахункові параметри ІС при змінній інтервалу часу між включенням зарядних і розрядних ключів від 140 до 50 мкс.

Δt , мкс	f_{IM} , Гц	$I_{R2 \max}$, А	$U_{C \max}$, В	W_{R2} , Дж	$W_C = CU_C^2/2$, Дж	P_{R2} , Вт $\cdot 10^6$	η , %
140	500	1124	842	33,06	35,448	0,236	95,20
90	848	1356	1016	42,42	51,613	0,472	82,64
50	909	2427	1820	58,25	165,62	1,165	35,17

У таблиці позначено: $I_{R2 \max}$ – максимальний струм через опір R_2 ; $U_{C \max}$ – максимальне напруга на конденсаторі; W_{R2} – доза енергії, яка виділяється у опорі R_2 ; W_C – доза енергії, яка накопичується у конденсаторі; P_{R2} – потужність, яка виділяється в опорі R_2 ; η – коефіцієнт корисної дії (ККД), який дорівнює відношенню W_{R2} до дози енергії, яка відібрана від конденсатора при його розряді.

Аналіз діаграм на рис. 3 і таблиці показує, що зі збільшенням частоти зарядно-розрядних циклів і відповідним зменшенням тривалості паузи між включенням розрядних і зарядних ключів (тобто між $VS_7 + VS_8$ і $VS_1 + VS_2$ та $VS_3 + VS_4$ і $VS_5 + VS_6$) напруга заряду конденсатора й імпульсний струм у навантаженні збільшуються, а його тривалість зменшується. Зокрема, зі збільшенням частоти циклів у 1,8 рази і зменшенням вказаної паузи у 2,8 рази, напруга заряду конденсатора і струм у навантаженні збільшуються у $\approx 2,2$ рази, енергія в конденсаторі – у $\approx 4,7$ рази, а доза енергії у навантаженні – у $\approx 1,8$ рази. При цьому імпульсна потужність у навантаженні зростає майже у 5 разів, але коефіцієнт η передачі енергії від конденсатора у навантаження зменшується в $\approx 2,42$ рази.

Розрахунки проводилися при зменшенні тривалості паузи Δt до 5 мкс. Максимум імпульсної потужності $P_{R2} \approx 3$ МВт виникав при $\Delta t \approx 20$ мкс, але коефіцієнт η зменшувався майже у 3 рази, що пояснюється вимиканням ключів при великих струмах в індуктивності розрядного кола. Було визначено, що енергетично найбільш доцільним у такій схемі зменшувати тривалість струму в навантаженні від 140 до 90 мкс ($y \approx 1,5$ рази), при цьому коефіцієнт η зменшується з 95% до 83%, а імпульсна потужність P_{R2} зростає більше, ніж у 2 рази.

Висновок. Запропонована схема формувача здатна формувати біполярні імпульсні струми, тривалість яких у навантаженні при збільшенні частоти зарядно-розрядних циклів може зменшуватися майже у 3 рази, але енергетично найбільш доцільним є зменшення тривалості імпульсного струму в навантаженні в 1,55 рази, при якому коефіцієнт η зменшується з 95% до 83%, а імпульсна потужність P_{R2} зростає більше, ніж у 2 рази.

При регулюванні тривалості імпульсних струмів у навантаженні схема формувача буде забезпечувати такі корисні властивості, як від'ємний зв'язок між напругами заряду і попереднього перезаряду його конденсатора (що зменшує нестабільність режимних параметрів формувача) та формування у навантаженні біполярних струмів (що значно послаблює гальванічні процеси у навантаженні).

1. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий // Збірн. наук. праць Національного університету кораблебудування. – 2010. – № 4. – С. 118–124.
2. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекос А.Е., Залуцкий В.П., Козырский В.В., Лопатко К.Г. Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозионных частиц // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 6. – № 5 (60). – С. 66–72.
3. Макаренко М.П., Михайленко В.В. Деякі аспекти системного аналізу електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії // Вест. НТУ "Харьковский политехнический институт". "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – 2005. – Вып. 45. – С. 384–385.
4. Макаренко Н.П. Метод системного макромоделирования процессов у напівпровідникових перетворювачах модуляційного типу // Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. – 2003. – № 1 (4). – С. 54–61.
5. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 3–11.
6. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 1. – С. 3–11.
7. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Синицин В.К., Иващенко Д.С. Аперiodические и колебательные процессы разряда конденсатора при принудительном ограничении длительности токов в нагрузке // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 9–10.
8. Nguyen P.-K., Jin S., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion // Journal of Applied Physics. 15, 17A756. – March, 2014.

9. Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrskyy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zaharchenko S.M., Portier R. Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2009. – T. 31. – No 5. – Pp. 603–614.
10. Monastyrskyy G.E., Yakovenko P.A., Kolomytsev V.I., Koval Yu.N., Shcherba A.A., Portier R. Characterization of spark-eroded shape memory alloy powders obtained in cryogenic liquids // *Materials Science and Engineering A*. – 2008. – Vol. 481-482. – Iss. 1-2. – Pp. 643–646.
11. Rezinkina, M., Bydianskaya, E., Shcherba, A. Alteration of brain electrical activity by electromagnetic field // *Environmentalist*. – 2007. – Vol. 27. – No 4. – Pp. 417–422.
12. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load // 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2014 – Conference Proceedings. – 2014. – Pp. 50–54.

УДК 621.314

ІЗМЕНЕННЯ ДЛІТЕЛЬНОСТІ ПЕРЕХОДНИХ ПРОЦЕСІВ РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ БІПОЛЯРНИХ ІМПУЛЬСНИХ ТОКІВ В НАГРУЗКЕ

С.С. Розіскулов¹, В.В. Михайленко², канд.техн.наук, Ю.В. Перетятко², канд.техн.наук

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. E-mail: roziskulov@mail.ru

² – НТУУ "Київський політехнічний інститут", пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. E-mail: VladislavMihailenko@i.ua

Предложено регулировать продолжительность биполярных импульсных токов в нагрузке путем увеличения частоты биполярных разрядов накопительного конденсатора электроимпульсных установок. Определены энергетически целесообразные условия изменения продолжительности разрядных токов конденсаторов и напряжения их заряда. Библ. 12, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: переходные процессы, конденсатор, разряд, полупроводниковый формирователь, импульс, длительность.

CHANGE OF DURATION OF CAPACITOR DISCHARGE TRANSIENTS FOR REGULATION OF BIPOLAR PULSE CURRENT IN LOAD

S.S.Roziskulov¹, V.V.Mikhaylenko², Yu.V.Peretiatio²

¹ – Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine. E-mail: roziskulov@mail.ru

² – NTUU "Kyiv Polytechnical Institute",

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: VladislavMihailenko@i.ua

It is proposed to regulate the duration of bipolar pulse currents in the load by increasing the frequency of bipolar discharges of the storage capacitor of electro-pulse installations. Energetically expedient conditions of change both duration of capacitor discharge currents and capacitor charge voltage were defined. References 12, figures 3, table 1.

Keywords: transients, capacitor, discharge, semi-conductor shaper, pulse, duration.

1. *Vovchenko A.I., Tertilov R.V.* Synthesis of capacitive nonlinear-parametrical energy sources for discharge-pulse technologies // *Zbirnyk Naukovykh Prats Natsionalnoho Universytetu Korablebuduvannia*. – 2010. – No 4. – Pp. 118–124. (Rus)
2. *Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.Ye., Zalutsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G.* Influence of duration of discharge pulses in a layer of iron granules on the sizes and a structurally-phase state of its electro-eroded particles // *Vostochno-Evropeiskii Zhurnal Peredovykh Tekhnologii*. – 2012. – Vol. 6. – No 5 (60). – Pp. 66–72. (Rus)
3. *Makarenko M.P., Mikhaylenko V.V.* Some aspects of the system analysis of electromagnetic processes in semi-conductor converters of the electric power // *Vestnik NTU "Kharkovskii Politekhnikeskii Institut"*. "Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriia i praktika". – 2005. – Issue 45. – Pp. 384–385. (Ukr)
4. *Makarenko M.P.* Method for system macromodelling of processes in semi-conductor converters of modulation type // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2003. – No 1 (4). – Pp. 54–61. (Ukr)
5. *Suprunovska N.I., Shcherba A.A.* Processes of energy redistribution between parallel connected capacitors // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2015. – No 4. – Pp. 3–11. (Rus)
6. *Shcherba A.A., Suprunovska N.I.* Synthesis of electrical circuits with capacitive energy storages in semiconductor formers of power discharge pulses // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2014. – No 1. – Pp. 3–11. (Rus)
7. *Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Sinitsyn V.K., Ivashchenko D.S.* Aperiodic and oscillatory processes of capacitor discharge at forced limitation of duration // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2012. – No 3. – Pp. 9–10. (Rus)
8. *Nguyen P.-K., Jin S., Berkowitz A.E.* MnBi particles with high energy density made by spark erosion // *Journal of Applied Physics*. 15, 17A756. – March, 2014.
9. *Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrskyy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zaharchenko S.M., Portier R.* Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2009. – T. 31. – No 5. – Pp. 603–614.
10. *Monastyrskyy G.E., Yakovenko P.A., Kolomytsev V.I., Koval Yu.N., Shcherba A.A., Portier R.* Characterization of spark-eroded shape memory alloy powders obtained in cryogenic liquids // *Materials Science and Engineering A*. – 2008. – Vol. 481-482. – Iss. 1-2. – Pp. 643–646.
11. *Rezinkina, M., Bydianskaya, E., Shcherba, A.* Alteration of brain electrical activity by electromagnetic field // *Environmentalist*. – 2007. – Vol. 27. – No 4. – Pp. 417–422.
12. *Shcherba A.A., Suprunovska N.I.* Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load // 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2014 – Conference Proceedings. – 2014. – Pp. 50–54.

Надійшла 03.02.2016
Остаточний варіант 11.04.2016