

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.3.011

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2022.63.026>

ЗАЛЕЖНІСТЬ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ УСТАНОВОК ВІД ВІДДАЛЕНOSTІ ЇХНЬОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

А.А. Щерба^{1*}, чл.-кор. НАН України, Н.І. Супруновська^{1**}, докт. техн. наук,
М.А. Щерба^{2***}, докт. техн. наук, С.С. Розіскулов^{1****}, В.В. Михайленко^{2*****}, канд. техн. наук

¹ – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: iednat1961@gmail.com.

² – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна
e-mail: m.shcherba@gmail.com

У роботі досліджено закономірності впливу віддаленості технологічного навантаження від електророзрядних установок (ЕРУ) з ємнісними накопичувачами електроенергії на динамічні характеристики імпульсних струмів у навантаженні. На основі проведення експериментальних досліджень було визначено особливості змінення таких динамічних характеристик ЕРУ, як середні швидкості наростання та спадання їхнього вихідного імпульсного струму за умови реалізації процесів об'ємного електроіскрового диспергування шару металевих гранул у діелектричних рідинах між електродами. Проведено аналіз впливу довжини таких типів з'єднувальних електропровідників, як вита пара, коаксіальний кабель і літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил, на вихідні динамічні характеристики ЕРУ. Встановлено суттєвий вплив типу з'єднувальних провідників значної довжини на вказані характеристики, особливо за незначної індуктивності контуру навантаження ЕРУ. Обґрунтовано, що у випадку значного віддалення (в декілька метрів) технологічного навантаження від ЕРУ цілком доцільним є використання силових кабелів з твердою полімерною електричною ізоляцією як з'єднувальних провідників коаксіального типу. Бібл. 10, рис. 2, табл. 2.

Ключові слова: імпульсний струм, електророзрядна установка, швидкість наростання струму, тривалість спадання струму, малоіндуктивні провідники струму.

Однією з основних проблем удосконалення формувачів імпульсних струмів (ФІ) електророзрядних установок (ЕРУ) є підвищення таких вихідних динамічних характеристик ЕРУ, як швидкість наростання їхніх вихідних струмів розряду та зменшення загальної тривалості розрядно-імпульсних струмів у технологічному навантаженні. Найвищі електродинамічні характеристики в навантаженні забезпечують ФІ, які використовують проміжні ємнісні накопичувачі електроенергії (ЄНЕ) [1–3]. Такі ФІ використовує більшість ЕРУ, в тому числі й для реалізації технологічних процесів об'ємного електроіскрового диспергування (ОЕІД) шару металевих гранул у діелектричних рідинах [4–6].

Зважаючи на те, що при протіканні розрядно-імпульсних струмів у навантаженні активна електрична потужність виділення в ньому електроенергії є прямо пропорційною величині його активного опору та квадратичному значенню розрядно-імпульсного струму, для збільшення силових впливів на технологічне навантаження необхідно здійснювати підвищення максимальних значень розрядних струмів та швидкості їхнього наростання навіть при формуванні імпульсних струмів малої тривалості [6–8]. Зокрема, в установках ОЕІД металів у діелектричних рідинах збільшенням швидкості наростання розрядних струмів і зменшенням їхньої тривалості зменшують максимальні розміри отримуваних іскроерозійних порошків [6, 7, 9].



При реалізації промислових технологій ОЕІД шару металевих гранул технологічне навантаження може бути на значній відстані (в декількох метрах) від ФРІ ЕРУ для забезпечення необхідних умов електробезпеки в обслуговуванні ЕРУ. У такому випадку на тривалість розрядних імпульсних струмів будуть суттєво впливати величини електричного активного опору навантаження та індуктивності з'єднувальних провідників розрядного контуру ФРІ.

Тому **метою даної роботи** є дослідження впливу різних з'єднувальних провідників значної довжини на динамічні характеристики розрядних імпульсних струмів у навантаженні електророзрядних установок ОЕІД металів та обґрунтування доцільності вибору типу провідників для розрядного контуру ФРІ ЕРУ з ємнісними накопичувачами електроенергії.

У роботі було проведено експериментальне дослідження для визначення впливу різних типів з'єднувальних провідників на динамічні характеристики розрядного імпульсного струму в експериментальній установці ОЕІД металів.

Оскільки опір іскроерозійного навантаження може стохастично змінюватися в процесі розряду, то для аналізу перехідних процесів у розрядному колі ФРІ вводилося ефективне значення активного опору іскроерозійного навантаження $R_n = \text{const}$, на якому за час одного розрядного імпульсу розсіюється така ж енергія, як і на реальному опорі шару струмопровідних гранул [10].

На рис. 1 наведено електричну принципову схему розрядного кола ЕРУ з іскроерозійним навантаженням, представленим резистором $R_n = \text{const}$. У експерименті використовувався високочастотний IGBT транзистор як повністю керований напівпровідниковий комутатор K . Власні індуктивність і активний опір розрядного кола представлено значеннями $L_{рк}$ і $R_{рк}$. Індуктивність і активний опір додаткових з'єднувальних провідників значної довжини, якими ФРІ підключається до навантаження R_n , представлено відповідними значеннями $L_{зп}$ і $R_{зп}$. У розрахунках приймалися припущення, що всі напівпровідникові елементи є ідеальними (тобто їхні активні опори у відкритому стані приймалися рівними нулю) і комутація здійснювалася миттєво.

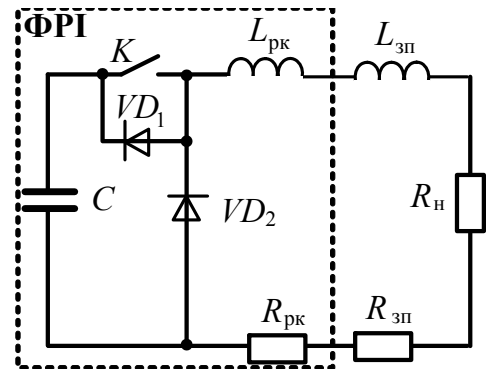


Рис. 1

З метою підвищення швидкості наростання імпульсного струму в навантаженні, в якості накопичувального конденсатора ФРІ було використано низькоімпедансний електростатичний конденсатор з великою ємністю (300 мкФ). Енергоємність такого конденсатора на декілька порядків перевищувала енергію, що віддавалась у навантаження протягом одного імпульсу струму (і напруга на виході ФРІ за цей час практично не змінювалась), тому при аналізі перехідних процесів у розрядному колі ЕРУ можна вважати, що напруга на виході ФРІ була незмінною $U_{ФРІ} = \text{const}$. Зважаючи на це, прийнято допущення, що перехідний процес після замикання ключа K можна розглядати як підключення RL -кола до джерела постійної електро рушійної сили з напругою $U_{ФРІ}$.

Для проведення експериментальних досліджень використовувались: вимірювач струму, дільник напруги, двопроменевий запам'ятовувальний цифровий осцилограф НАМЕГ-НМ-1507 та з'єднувальні провідники типу вита пара, коаксіальний кабель та літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Вихідні електричні параметри та межі роботи такого ФРІ було визначено експериментальним шляхом. Індуктивність $L_{рк}$ розрядного кола ФРІ було визначено автоколивальним методом, згідно з яким до вихідних клем ФРІ паралельно підключали RC ланцюг з відомими параметрами (які вибиралися такими, щоб у колі виникав коливальний процес без перенапруг). Експериментально визначено, що індуктивність складає $L_{рк} = 0,46$ мкГн.

Активний опір розрядного кола $R_{рк}$ визначався за методом короткого замикання. Для цього вихідні клеми ФРІ з'єднувались між собою короткою, яка проходила через вимірювальний трансформатор струму, приєднаний до осцилографа. З осцилограм визначалась постійна часу такого розрядного кола τ ($\tau = 37,08$ мкс), а розрахований опір становив $R_{рк} = 12,4$ мОм.

Для визначення впливу різних з'єднувальних провідників на динамічні показники розрядних імпульсних струмів у навантаженні електророзрядних установок ОЕІД металів в умовах віддаленості ФРІ і навантаження таких установок було експериментально визначено параметри (індуктивності $L_{зп}$ та активні опори $R_{зп}$) цих з'єднувальних провідників. Досліджувалися провідники трьох типів: вита пара з мідними жилами $2 \times 50 \text{ мм}^2$, коаксіальний кабель перерізом жили і екрану 70 та 16 мм^2 відповідно і літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил $2 \times 7 \text{ мм}^2$.

Для цього дані з'єднувальні провідники були приєднані до ФРІ. Їхні активні опори та індуктивності визначалися за тими ж методами, що використовувалися для розрахунку $R_{рк}$ та $L_{рк}$ (застосовувались відповідно метод короткого замикання та автоколивальний метод). Індуктивність $L_{зп}$ визначалася як

$$L_{зп} = T^2 / (4\pi^2 C_1 - L_{рк}), \quad (1)$$

де період автоколивань T визначався з осцилограм, а $C_1 = 0,15 \text{ мкФ}$ – відома ємність низькоімпедансного конденсатора, що під'єднувався до з'єднувальних провідників замість навантаження.

Опір $R_{зп}$ розраховувався за формулою

$$R_{зп} = ((L_{рк} + L_{зп}) / \tau_2) - R_{рк}, \quad (2)$$

де τ_2 – постійна часу розрядного кола ФРІ з урахуванням з'єднувальних провідників та без навантаження, яка визначалася з осцилограм.

Результати розрахунків індуктивностей і активного опору з'єднувальних провідників наведено у табл. 1. З неї видно, що найкращі показники з індуктивності струмопровідних жил має літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Коаксіальний кабель має значно меншу індуктивність порівняно з витю парою, але більшу порівняно з літцендратом з біфілярною намоткою струмопровідних жил. Тоді як показник по активному опору навпаки найкращий у виті пари. Коаксіальний кабель має більший опір, ніж вита пара, але менший, ніж літцендрат. На значення струму і швидкість його зміння впливає як величина індуктивності,

Таблиця 1

Параметри Тип провідника	Період автоколивань T , мкс	Індуктивність, $L_{зп}$, мкГн	Постійна часу кола τ_2 , мкс	Активний опір $R_{зп}$, мОм
Вита пара	4,22	2,547	131,15	11
Коаксіальний кабель	2,68	0,752	44,46	15
Літцендрат	1,88	0,114	19,46	17

так і величина активного опору з'єднувальних провідників. Збільшення активного опору та індуктивності зменшує максимально можливий струм і швидкість його зміння у навантаженні, проте ступінь таких впливів є різною. Тому було проведено експериментальне дослідження режимів роботи ЕРУ для визначення динамічних показників (швидкостей наростання та спадання розрядних імпульсних струмів у навантаженні) при з'єднанні ФРІ і навантаження таких установок за допомогою розглянутих вище з'єднувальних провідників.

Осцилограми струму в резистивному навантаженні $R_{н} = 1 \text{ Ом}$, з'єднаному з ФРІ за допомогою виті пари, коаксіального кабелю та літцендрату, показано відповідно на рис. 2 а, б, в.

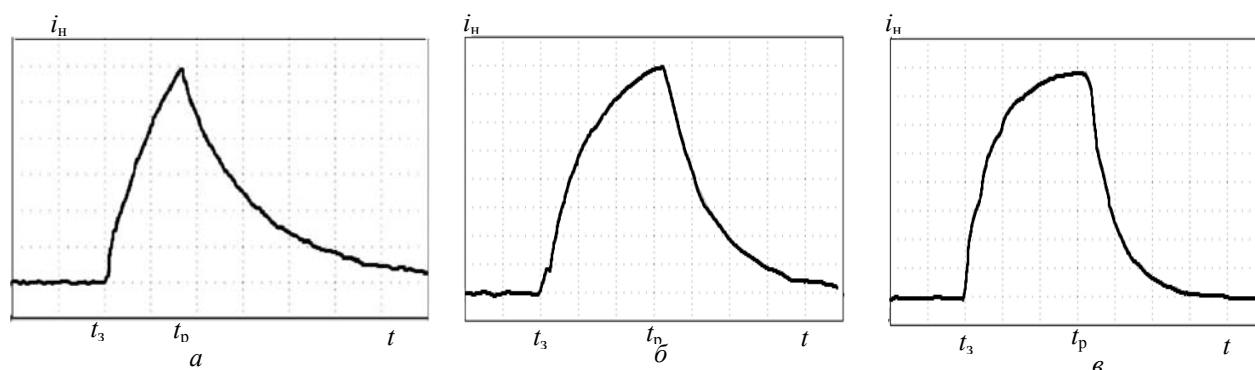


Рис. 2

Тривалість наростання струму (час $\Delta t = t_p - t_3$ між замиканням і розмиканням ключа K) становила 3,25 мкс. Вихідна напруга ФРІ становила 400 В. Ціна поділок по осі x на рис. 2 *a* складала 2 мкс/под., а на рис. 2 *б, в* – 1 мкс/под. По осі y ціна поділок для рис. 2 *a, б, в* – 50 А/под.

У табл. 2 наведено експериментальні результати динамічних характеристик: середніх швидкостей наростання імпульсних струмів у навантаженні за час $\Delta t = 3,25$ мкс та спадання струму за той же час при з'єднанні ФРІ і навантаження трьома різними типами з'єднувальних провідників.

Із експериментальних і розрахункових значень, наведених у табл. 2, видно, що середня швидкість змінення струму при використанні літцендрату з біфілярною намоткою струмопровідних жил і коаксіального кабелю приблизно однакові. І хоча порівняно з літцендратом коаксіальний кабель має вищу індуктивність $L_{зп}$ (див. табл. 2), але вона втричі нижча від індуктивності виті пари. Оскільки виготовлення літцендрату з біфілярною намоткою струмопровідних жил є надто трудомістким, а міцність його електроізоляції значно меншою за міцність сучасної ізоляції коаксіального кабелю, то на практиці більш доцільно як з'єднувальний провідник використовувати коаксіальний кабель.

Висновки. У роботі проведено експериментальне дослідження впливу таких з'єднувальних провідників, як вита пара, коаксіальний кабель та літцендрат з біфілярною намоткою струмопровідних жил, на динамічні характеристики електророзрядних установок, іскроерозійне навантаження яких повинно бути суттєво віддаленим від формувача розрядних імпульсів.

Було обґрунтовано, що при незначній (до 0,5 мкГн) власній конструктивній індуктивності електророзрядних установок для підключення суттєво віддаленого навантаження найбільш доцільним є використання силових коаксіальних кабелів із сучасною зшитою полімерною електроізоляцією, оскільки вони мають кращі динамічні характеристики (середні швидкості наростання та спадання розрядного імпульсного струму) і вищу міцність ізоляції.

Таблиця 2

Параметри Тип провідника	I_{max} , А	$I_{max}/\Delta t$, А/мкс
Вита пара	300	92
Коаксіальний кабель	400	123
Літцендрат з біфілярною намоткою	390	120

Роботу виконано за держбюджетною темою "Розвинути теорію імпульсних і високочастотних перехідних електромагнітних процесів у енергетичних і технологічних резонансних установках та високовольтних кабельних лініях електропередачі" (Шифр "ЕЛКАБ").

1. Лившиц А.Л., Отто М.Ш. *Импульсная электротехника*. М. Энергоатомиздат, 1983. 352 с.
2. Дубовенко К.В. Моделирование зарядных цепей емкостных накопителей энергии со звеном повышенной частоты. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. № 3. С. 58–63.
3. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.
4. 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. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
5. Ochir P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*, vol. 738–739, Trans Tech Publications, Ltd., Jan. 2013. Pp. 451–455. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.738-739.451.
6. Щерб А.А., Супруновская Н.И., Синицын В.К., Иващенко Д.С. Аперидические и колебательные процессы разряда конденсатора при принудительном ограничении длительности токов в нагрузке. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 9–10.
7. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекоп А.Е., Залуцкий В.П., Козірський 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.
8. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>.
9. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Перекоп А.О. Особливості розподілів за діаметрами отриманих за субмілісекундній тривалості розрядних імпульсів іскроерозійних частинок алюмінію і лунок на поверхні його гранул. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 1. С. 10–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.0010>.

10. Вовченко А.И., Тертилов Р.В. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно импульсных технологий. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. 2010. № 4. С. 118–124.

DEPENDENCE OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PULSE CURRENTS OF ELECTRICAL DISCHARGE INSTALLATIONS ON THE DISTANCE OF THEIR TECHNOLOGICAL LOAD

A.A. Shcherba¹, N.I. Suprunovska¹, M.A. Shcherba², S.S. Roziskulov¹, V.V. Mihaylenko²

¹ – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: iednat1961@gmail.com

² – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

e-mail: m.shcherba@gmail.com

The paper investigates the influence of the distant technological load from electric discharge installations (EDIs) with capacitive storage of electricity on the dynamic characteristics of impulse currents in the load. On the basis of experimental studies, the peculiarities of changing the dynamic characteristics of EDIs, such as the average rate of rise and fall of their output pulse current during the implementation of volumetric spark dispersion of a layer of metal granules in dielectric liquids between electrodes, were determined. The influence of the length of such types of connecting conductors as twisted pair, coaxial cable, and litzendraht with bifilar winding of current-carrying conductors on the output dynamic characteristics of the EDI was analyzed. A significant influence of the type of connecting conductors of considerable length on the indicated characteristics has been established, especially in the case of a low-inductance of the load circuit of the EDI. It is substantiated that when the technological load is significantly distant (several meters) from the EDI, it is quite appropriate to use power cables with solid polymer electrical insulation as connecting conductors of the coaxial type. Ref. 10, fig. 2, tables 2.

Key words: impulse current, electric discharge installation, rate of current rise, duration of current decrease, low-inductance current conductors.

1. Livshits A.L., Otto M.Sh. Impulse electrical engineering. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 352 p. (Rus)
2. Dubovenko K.V. Simulation of capacitor storage charging circuits with a high frequency loop. *Elektrotekhnika ta elektroenergetyka*. 2006. No 3. Pp. 58–63. (Rus)
3. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric Energy Loss at Energy Exchange Between Capacitors as Function of Their Initial Voltages and Capacitances Ratio. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. Pp. 9–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.
4. 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. Pp. 17A756-1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>.
5. Ochinnikov P., Gilchuk A.V., Monastyrsky G.E., Koval Y., Shcherba A.A., Zaharchenko S.N. Martensitic Transformation in Spark Plasma Sintered Compacts of Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark Erosion Method in Cryogenic Liquids. *Materials Science Forum*, vol. 738–739, Trans Tech Publications, Ltd., Jan. 2013. Pp. 451–455. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.738-739.451.
6. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Synytsin V.K., Ivashchenko D.S. Aperiodic and oscillatory processes of capacitor discharge at forced limitation of current duration in load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 9–10. (Rus)
7. Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.E., Zalutsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G. Influence of discharge pulses duration in a layer of iron granules on the size and structurally-phase conditions of its electro-erosion particles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. Vol. 6. No 5 (60). Pp. 66–72. (Rus)
8. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>.
9. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Perekos A.O. Peculiarities of the diameter distributions obtained at sub-millisecond duration of discharge pulses spark-erosive aluminum particles and caverns on the surface of its granules. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 1. Pp. 10–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.01.0010>. (Ukr)
10. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Synthesis of capacitive non-linear- parametrical energy sources for discharge-pulse technologies. *Zbirnyk naukovykh pratz Natsionalnogo universytetu korablebuduvannya*. 2010. No 4. Pp. 118–124. (Rus)

Надійшла: 04.08.2022

Прийнята: 15.08.2022

Submitted: 04.08.2022

Accepted: 15.08.2022