

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНОГО БЕЗТРАНСФОРМАТОРНОГО РЕЗОНАНСНОГО ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА

Д.В. Вінниченко^{1*}, канд. техн. наук, Н.С. Назарова^{1**}, канд. техн. наук,
І.Л. Вінниченко^{2***}, канд. техн. наук

¹ Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України,
пр. Богоявленський, 43а, Миколаїв, 54018, Україна.

² Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова,
пр. Героїв України, 9, Миколаїв, 54007, Україна.

E-mail: vdvvs@gmil.com; nazarovanataly2000@gmail.com; i.l.vinnychenko@gmail.com.

Проаналізовано електричні характеристики високовольтного безтрансформаторного резонансного пристрою для зарядки ємнісного накопичувача. Отримано залежності вихідної напруги та зарядного струму від відносного опору навантаження та добротності резонансного кола. Проаналізовано характер зміни вихідної напруги в залежності від співвідношення добротності та відносного опору навантаження. Проведено імітаційне моделювання роботи досліджуваного перетворювача. Бібл. 11, рис. 6.

Ключові слова: високовольтний безтрансформаторний перетворювач, резонансний зарядний пристрій, добротність резонансного кола.

Електророзрядні технології обробки матеріалів і середовищ (природних та штучних), що функціонують на базі високовольтних імпульсних джерел енергії, мають тривалу історію успішного промислового застосування, посідаючи чинне місце за показниками ефективності, ресурсо- та енергоємності у різноманітті сучасних аналогів, а подекуди слугують і як єдино можливий, безальтернативний засіб впливу на структуру і властивості об'єкта обробки. Основним енергетичним елементом установок для електророзрядних технологій є генератор імпульсних струмів (ГІС). Існуючі ГІС мають базову структуру, яка принципово не змінювалася впродовж останніх десяти років (рис. 1) [1]. ГІС має в складі зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії крім випрямляча (наприклад, за схемою Ларіонова) такі матеріалоємні електромагнітні елементи, як підвищувальний трансформатор та дроселі для струмообмеження, вага яких становить від 30 % до



Рис. 1.

60 % ваги електро-технологічного обладнання, а питома масогабаритна характеристика ГІС при цьому складає від 40 кг/кВт до 250 кг/кВт відповідно з проміжним перетворенням частоти та без нього [2].

Вдосконалення генератора імпульсних струмів базується на зниженні масогабаритних показників [3], стабілізації частоти та характеристик розрядних імпульсів [4]. Але розробку електрообладнання для ГІС зазвичай спрямовано на удосконалення окремих блоків, що не дає змоги значно зменшити масогабаритні показники та енергоефективність таких установок.

Традиційним способом зменшення масогабаритних показників є підвищення частоти проміжного перетворення енергії та використання високочастотних трансформаторів. Але такі способи вже досягли своєї межі, що викликає необхідність пошуку інших принципів побудови, розробки та обґрунтування нової структури ГІС, наприклад, із використанням резонансних систем зарядки.

Резонансні інвертори з перемиканням у нулях струму та напруги зазвичай використовуються

© Вінниченко Д.В., Назарова Н.С., Вінниченко І.Л., 2023

ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0002-8894-860X>; ** <https://orcid.org/0000-0001-5506-750X>;

*** <https://orcid.org/0000-0002-3768-1060>

для м'якої комутації [5]. Добротність таких резонансних контурів невелика і висока напруга у резонансному контурі є негативним фактором. Але під час електророзрядної обробки діелектричних і напівпровідних середовищ потрібні джерела, що забезпечують високу напругу до 50 кВ. У таких випадках використовують генератори імпульсних струмів з накопичувальними конденсаторами, які формують розрядні імпульси із тривалими безструмними паузами. Ємнісні накопичувачі для електророзрядних технологій мають ємність 0,1-10 мкФ [6, 7]. Безтрансформаторні зарядні пристрої на основі резонансних систем для зарядки таких конденсаторів до напруги до 50 кВ ще не використовувалися, відповідно, їхні характеристики ще не досліджено.

Отже, метою роботи є отримання залежностей характеристик високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача від його параметрів та добротності резонансного кола.

Для визначення залежності вихідної напруги та зарядного струму від відносного опору навантаження k та добротності резонансного кола Q проаналізовано схеми заміщення, наведені на рис. 2.

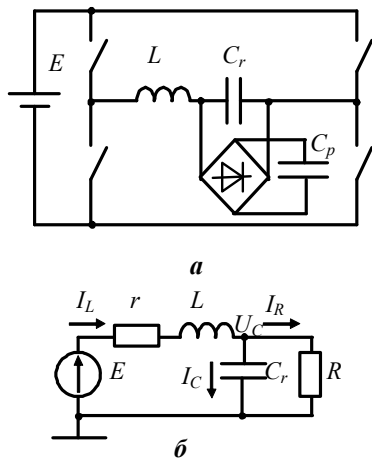


Рис. 2.

На рис. 2, а наведено схему високовольтного інверторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії C_p . Резонансне коло утворюють індуктивність L та ємність C_r . Напруга U на ємності C_r обмежується напругою на ємності C_p (перевищує на величину напруги відкритих діодів). З урахуванням того, що струм I крізь навантаження, що підключене паралельно C_r , не залежить від опору навантаження, є стабілізованим та визначається тільки опором індуктивного елемента резонансного кола [9, 11]. Напругу U , що встановилася на ємності C_r , можна задати як падіння напруги на активному опорі R [8], якій розраховується з виразу $R=U/I$. Слід відмітити, що потужність $p_{Cp}=u_{Cp}i$ зарядки конденсатора C_p має активний характер, тому що добуток напруги на конденсаторі u_{Cp} та струму i крізь нього завжди позитивний. За рахунок спрощення схеми, замінивши послідовно з'єднані випрямляч та ємнісний накопичувач C_p на активний опір R (рис. 2, б), отримуємо більш грубу модель, яка надасть змогу одержати зручні для аналізу залежності характеристик високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного при-

строю ємнісного накопичувача від його параметрів та добротності резонансного кола. В наведеній на рис. 2, а схемі напруга на ємності C_p в процесі зарядки зростає, і кожному відповідному значенню напруги U на ємності C_r відповідає окреме значення R (рис. 2, б) і навпаки. В спрощеній моделі (рис. 2, б) інвертор модельовано джерелом живлення змінного струму з прямокутною напругою. З урахуванням того, що будь-яку періодичну напругу можна розкласти в ряд Фур'є, а резонансне коло відфільтровує гармоніки, частота яких вища за першу (резонансну) частоту, то джерело напруги E в моделі (рис. 2, б) можна вважати синусоїдальним.

Для моделі, наведеної на рис. 2, а, не враховується активний опір, що є паразитним параметром резонансного кола. Такі системи детально розглянуто, наприклад, у [9, 10], де показано, що вони є джерелом незмінного струму для навантаження. Але результати імітаційного моделювання, наведені в [11] свідчать, що у разі зростання опору навантаження спостерігається відхилення вихідного струму резонансного кола від стабілізованого значення, що вимагає використання спеціальної системи керування. Задля визначення причини такого відхилення в модель (рис. 2, б) додано резистор r , який враховує сумарний активний опір резонансного кола, суттєву частину якого складає активний опір індуктивного дроселя.

Залежність струмів в резонансному колі від його добротності.

Умова резонансу в резонансному колі (рис. 2, б)

$$\omega L = \frac{1}{\omega C_r}. \quad (1)$$

Введемо позначення для випадку резонансної частоти, тобто у разі виконання умови (1)

$$k = \frac{R}{\omega L} = \omega C_r R, \quad Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{1}{\omega C_r r}. \quad (2, 3)$$

Величина k , представлена виразом (2), є відносним опором навантаження. Величина Q ,

представлена виразом (3), є добротністю резонансного кола.

Система рівнянь та її розв'язок з урахуванням позначень, прийнятих для випадку резонансної частоти

$$\begin{cases} I_L \cdot (r + j\omega L) + I_C \cdot \frac{1}{j\omega C_r} = E; \\ I_L \cdot (r + j\omega L) + I_R \cdot R = E; \\ I_L - I_C - I_R = 0; \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} (r + j\omega L) & \frac{1}{j\omega C_r} & 0 \\ (r + j\omega L) & 0 & R \\ 1 & -1 & -1 \end{vmatrix} = R \cdot r + \frac{r}{j\omega C_r} + \frac{j\omega L}{j\omega C_r} = \frac{j\omega L}{j\omega C_r} \cdot Q^{-1} \cdot (k + Q - j); \quad (5)$$

$$\Delta_L = \begin{vmatrix} E & \frac{1}{j\omega C_r} & 0 \\ E & 0 & R \\ 0 & -1 & -1 \end{vmatrix} = \frac{E}{j\omega C_r} \cdot (Rj\omega C_r + 1) = \frac{E}{j\omega C_r} \cdot (jk + 1); \quad (6)$$

$$\Delta_C = \begin{vmatrix} (r + j\omega L) & E & 0 \\ (r + j\omega L) & E & R \\ 1 & 0 & -1 \end{vmatrix} = E \cdot R; \quad \Delta_R = \begin{vmatrix} (r + j\omega L) & \frac{1}{j\omega C_r} & E \\ (r + j\omega L) & 0 & E \\ 1 & -1 & 0 \end{vmatrix} = \frac{E}{j\omega C_r}; \quad (7, 8)$$

$$I_L = \frac{\Delta_L}{\Delta} = \frac{Q \cdot E \cdot (jk + 1)}{j\omega L \cdot (k + Q - j)} = \frac{Q \cdot E \cdot \sqrt{k^2 + 1} \cdot \exp\left(j\left(\arctg(k) + \arctg\left(\frac{1}{k + Q}\right) - 90^\circ\right)\right)}{\omega L \cdot \sqrt{(k + Q)^2 + 1}}; \quad (9)$$

$$I_R = \frac{\Delta_R}{\Delta} = \frac{Q \cdot E}{j\omega L \cdot (k + Q - j)} = \frac{Q \cdot E \cdot \exp\left(j\left(\arctg\left(\frac{1}{k + Q}\right) - 90^\circ\right)\right)}{\omega L \cdot \sqrt{(k + Q)^2 + 1}}; \quad (10)$$

$$I_C = \frac{\Delta_C}{\Delta} = \frac{Q \cdot E \cdot R \cdot j\omega C}{j\omega L \cdot (k + Q - j)} = \frac{Q \cdot E \cdot k \cdot \exp\left(j\left(\arctg\left(\frac{1}{k + Q}\right)\right)\right)}{\omega L \cdot \sqrt{(k + Q)^2 + 1}}. \quad (11)$$

Векторну діаграму струмів в дисипативній резонансній системі з активним навантаженням наведено на рис. 3.

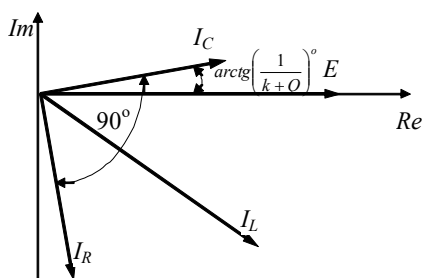


Рис. 3.

З виразів (9) – (11) слідує, що модулі комплексів струмів пов'язані співвідношеннями

$$|I_R| = \frac{Q \cdot E}{\omega L \cdot \sqrt{(k + Q)^2 + 1}}; \quad (12)$$

$$|I_C| = \frac{Q \cdot E \cdot k}{\omega L \cdot \sqrt{(k + Q)^2 + 1}} = |I_R| \cdot k; \quad (13)$$

$$|I_L| = \sqrt{|I_R|^2 + |I_C|^2}. \quad (14)$$

Введемо позначення струму крізь індуктивність L у

випадку короткого замикання конденсатора резонансного кола C_r з урахуванням того, що $r \ll \omega L$, $R=0$:

$$I_{SC} = \frac{E}{\omega L} = E\omega C_r. \quad (15)$$

Вирази для модулів струмів приймуть вигляд

$$|I_R| = \frac{Q \cdot I_{SC}}{\sqrt{(k+Q)^2 + 1}}; \quad |I_C| = \frac{Q \cdot I_{SC} \cdot k}{\sqrt{(k+Q)^2 + 1}} = |I_R| \cdot k. \quad (16, 17)$$

Залежність вихідної напруги від добротності резонансного кола.

З виразів (12) та (16) слідує, що зі збільшенням відносного опору навантаження k струм навантаження зменшується, та цей ефект тим менше, чим більше добротність резонансного кола Q .

Напруга на конденсаторі та навантаженні

$$U_C = \frac{Q \cdot E \cdot R}{j\omega L \cdot (k+Q-j)} = \frac{Q \cdot E \cdot k \cdot \exp\left(j\left(\arctg\left(\frac{1}{k+Q}\right) - 90^\circ\right)\right)}{\sqrt{(k+Q)^2 + 1}}; \quad |U_C| = \frac{Q \cdot E \cdot k}{\sqrt{(k+Q)^2 + 1}}. \quad (18, 19)$$

Для аналізу поведінки модуля напруги з виразу (19) у разі варіювання значень k та Q прийемо припущення, яке характерне для резонансних високовольтних зарядних систем

$$Q \gg 1. \quad (20)$$

З урахуванням виразу (20) вираз (19) прийме вигляд

$$|U_C| = \frac{E \cdot k \cdot Q}{k+Q}. \quad (21)$$

$$\text{У крайніх випадках при } k \ll Q \quad |U_C| = E \cdot k; \quad (22)$$

$$\text{при } k = Q \quad |U_C| = E \cdot Q / 2; \quad (23)$$

$$\text{при } k \gg Q \quad |U_C| = E \cdot Q. \quad (24)$$

Як сказано вище, напругу на конденсаторі, що заряджається, моделюємо за допомогою напруги на активному опорі, представленому у виразі (21) відносним опором навантаження k (див. вираз (2)). Таким чином, з виразу (22) слідує, що за невеликих k модуль напруги U_C є пропорційним до опору навантаження. Максимальне значення модуль напруги приймає у разі великого опору навантаження як слідує з виразу (24). Слід зазначити, що у такому випадку модуль напруги U_C є пропорційним до Q та не залежить від опору навантаження.

Якщо записати вираз (21) у вигляді

$$|U_C| = E \cdot k_{Uc}, \quad (25)$$

де $k_{Uc} = k \cdot Q / (k+Q)$ – коефіцієнт при E , то отримаємо залежність модуля напруги на навантаженні від відносного опору навантаження. Для наочності цю залежність наведено у координатах k/Q та $\frac{|U_C|}{EQ}$ (рис. 4).

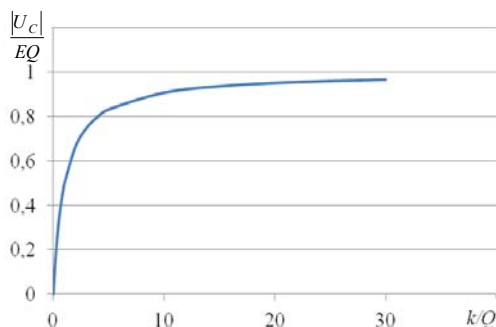


Рис. 4.

Характер залежності на рис. 4 показує, що за $k \ll Q$ вихідна напруга зростає майже пропорційно до k , тобто резонансне коло є джерелом струму для навантаження. При $k \gg Q$ вихідна напруга майже не змінюється під час зростання опору навантаження, тобто резонансне коло є джерелом напруги для навантаження. Для зсуву вихідних характеристик резонансного кола у бік джерела стабілізованого струму необхідно збільшувати добротність резонансного кола. Напруга на активному навантаженні наближається до виразу (24) у разі збільшення відношення k/Q .

Слід відмітити, що струм I_R та напруга U_C дорівнюють вихідному струму I_{out} та напрузі U_{out} безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача.

На рис. 5 наведено модель мостового інвертора з послідовним резонансним колом (елементи $L1$ та $C39$ на рис. 5) в середовищі LTSpice. В резонансному колі задано опір ($R1$ на рис. 5), що враховує сумарний активний опір резонансного кола, суттєву частину якого складає активний опір індуктивного дроселя. Номінали елементів, вказаних в моделі, мають значення, виміряні в елементах розробленого експериментального зразку зарядного пристрою.

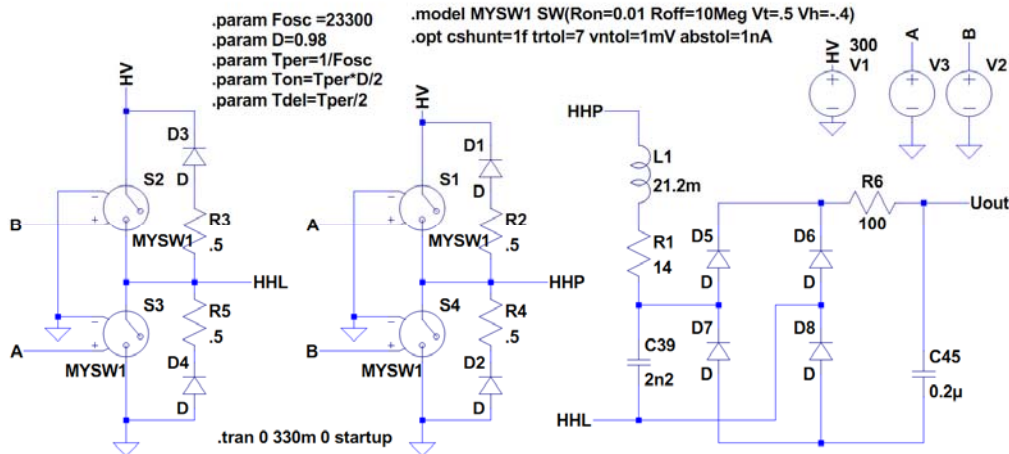


Рис. 5

На рис. 6 наведено характеристики безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою, отримані в результаті імітаційного моделювання, а саме, епоуру напруги на ємнісному накопичувачі енергії U_{out} (рис. 6, а), струм крізь індуктивність резонансного кола, отриманий в результаті імітаційного моделювання I_L LTSpice та розрахунку за виразом (14) I_L (рис. 6, б), вихідний середній струм високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою ємнісного накопичувача (крізь $C45$ на рис. 5), отриманий в результаті імітаційного моделювання I_{out_av} LTSpice та розрахунку з виразу (16) $I_{R_av} = |I_R| / 1,11$ (рис. 6, в). Необхідні для розрахунку значення k отримали з виразу (19) для заданих значень $|U_C|$ з урахуванням того, що $(k+Q)^2 \gg 1$ і одиницю можна не

враховувати, $k = \frac{Q \cdot |U_C|}{Q \cdot E - |U_C|}$.

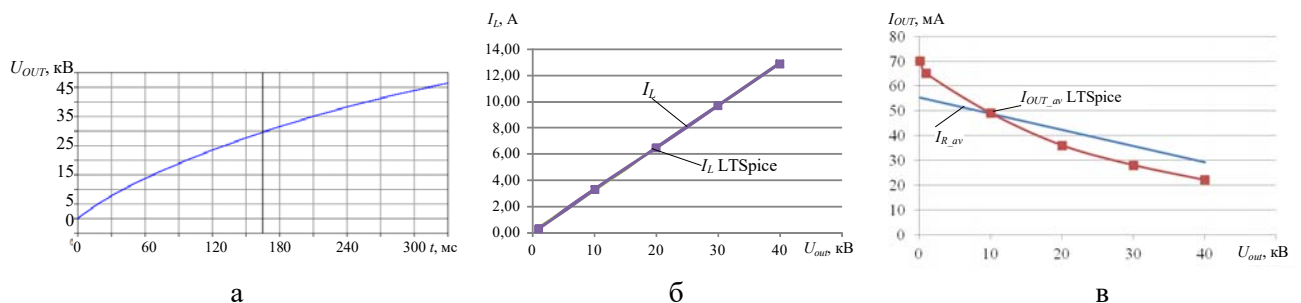


Рис. 6.

Добротність Q , розрахована за виразом (3), дорівнює 222. В процесі зарядки ємнісного накопичувача напруга на ньому зростає (рис. 6, а), що відповідає підвищенню відносного опору навантаження k , який розраховано для кожного $|U_C| = U_{out}$ за допомогою виразу (19). Спостерігається збільшення амплітуди струму крізь індуктивність резонансного кола (рис. 6, б) та зменшення

вихідного середнього зарядного струму (рис. 6, в). Співпадіння результатів розрахунку за виразами (12) – (19) та імітаційного моделювання вважаємо достатнім для оцінки впливу добротності Q на вихідну напругу та вихідний струм високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою.

Висновки. Під час моделювання роботи високовольтного безтрансформаторного резонансного зарядного пристрою отримано залежності вихідних напруги та струму від відносного опору навантаження k та добротності резонансного кола Q . Із цих залежностей слідує, що зі збільшенням k струм навантаження зменшується, та цей ефект тим менше, чим більше Q .

За невеликих k ($k \ll Q$) вихідна напруга перевищує вхідну в k разів, тобто резонансне коло є джерелом струму для навантаження. У разі $k \gg Q$ вихідна напруга перевищує вхідну в Q разів та не залежить від опору навантаження, тобто резонансне коло є джерелом напруги для навантаження. Для зсуву вихідних характеристик резонансного кола у бік джерела струму необхідно збільшувати добротність резонансного кола.

Отримані залежності вихідної напруги та зарядного струму майже повністю співпадають з результатами імітаційного моделювання зарядки конденсатора.

1. Гульй А.Г. Электрический разряд в жидкости и его применение. К.: Наукова думка, 1977. 176 с.
2. Вовченко А.И., Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.Н. Тенденции развития мощных высоковольтных генераторов импульсных токов в ИИПТ НАН Украины. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 5. С. 69-74.
3. Chakraborty A., Mankani A.K. Design concept of a high power high frequency power supply for feeding 500 kV, 100 mA Cockcroft-Walton generator. *National Power Electronics Conference (NPEC)*. Pune, India, December 18-20, 2017. Pp. 118-122. DOI: <https://doi.org/10.1109/NPEC.2017.8310445>.
4. Князев М.К., Беервальд Ш. Концепція інтелектуального електрогідролічного преса для імпульсного листового штампування. *Металофізика та новітні технології*. 2016. Т. 38. Вип. 12. С. 1669-1680. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.38.12.1669>.
5. Pavlov G., Pokrovskiy M., Vinnichenko I. Load characteristics of the serial-to-serial resonant converter with pulse-number regulation for contactless inductive energy transfer. Proc. of IEEE 3rd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine, September 10-14, 2018. Pp. 133-138. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559590>.
6. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Electric energy loss at energy exchange between capacitors as function of their initial voltages and capacitances ratio. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 9-11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.009>.
7. Щерба А.А., Супруновська Н.І., Щерба М.А., Розискулов С.С. Регулювання вихідних динамічних характеристик електророзрядних установок з накопичувальними конденсаторами. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 3. С. 3-9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.003>.
8. Мирошниченко Л.Н., Голобородько А.Н. Моделирование переходных процессов в зарядных устройствах генераторов импульсных токов. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність*. 2002. Ч. 2. С. 41-46.
9. Милях А.Н., Волков И.В. Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. К.: Наукова думка, 1974. 216 с.
10. Vinnichenko D., Nazarova N. The high-voltage electrical engineering systems of gaseous hydrocarbons electro-discharge processing design principles. Proc. of IEEE 39th International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kyiv, Ukraine, April 16-19, 2019. Pp. 678-683. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783220>.
11. Вінниченко Д.В., Назарова Н.С. Електротехнічна система з частотно-параметричним регулюванням стабілізованого розрядного струму у вуглецевісних газах. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С. 25-28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.038>.

RESEARCH OF CHARACTERISTICS OF HIGH VOLTAGE TRANSFORMERLESS RESONANT CHARGER OF CAPACITARY STORAGE DEVICE

D.V. Vinnichenko¹, N.S. Nazarova¹, I.L. Vinnichenko²

¹Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, pr. Bohoyavlenskii, 43a, Mykolaiv, 54018, Ukraine.

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding, pr. Heroiv Ukrainy, 9, Mykoliv, 54007, Ukraine.

E-mail: vdvvvs@gmail.com, nazarovanataly2000@gmail.com, i.l.vinnichenko@gmail.com.

Electromagnetic processes in a high-voltage transformerless resonant device for charging capacitor are analyzed. The dependences of the output voltage and charging current on the relative load and the quality factor of the resonant circuit are obtained. The nature of the change in output voltage depending on the quality factor and relative load ratio is analyzed. Simulation of the researched converter operation is carried out. References 11, figures 6.

Keywords: high-voltage transformerless converter, resonant charger, resonant circuit quality factor.

1. Gulyi A.G. Electric discharge in liquid and its application. Kyiv: Naukova Dumka, 1977. 176 p. (Rus)
2. Vovchenko A.I., Boguslavsky L.Z., Mirosnichenko L.N. Trends in the development of high-power high-voltage pulse current generators at the Institute of IPPT of NAS of Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No 5. Pp. 69-74 (Rus).
3. Chakraborty A., Mankani A.K. Design concept of a high power high frequency power supply for feeding 500 kV, 100 mA Cockcroft-Walton generator. *National Power Electronics Conference (NPEC)*. Pune, India, December 18-20, 2017. Pp. 118-122. DOI: <https://doi.org/10.1109/NPEC.2017.8310445>.
4. Knyazev M.K., Beierwald Sh. The concept of an intelligent electric hydraulic press for pulsed sheet stamping. *Metalofizyka ta novitni tekhnologii*. 2016. Vol. 38. Vyp. 12. Pp. 1669-1680 (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.38.12.1669>.
5. Pavlov G., Pokrovskiy M., Vinnichenko I. Load characteristics of the serial-to-serial resonant converter with pulse-number regulation for contactless inductive energy transfer. Proc. Of IEEE 3rd International Conference on *Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine, September 10-14, 2018. Pp. 133-138. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559590>.
6. 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>.
7. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A., Roziskulov S.S. Regulation of output dynamic characteristics of electric discharge installations with storage capacitors. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 3. Pp. 3-9. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.003>. (Ukr).
8. Mirosnichenko L.N., Goloborodko A.N. Simulation of transient processes in chargers of pulse current generators. *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk: Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist*. 2002. Part 2. Pp. 41-46. (Rus).
9. Milyakh A.N., Volkov I.V. Constant current systems based on inductive-capacitive transducers. Kyiv: Naukova Dumka, 1974. 216 p. (Rus).
10. Vinnychenko D., Nazarova N. The high-voltage electrical engineering systems of gaseous hydrocarbons electro-discharge processing design principles. Proc.of IEEE 39th International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kyiv, Ukraine, April 16-19, 2019. Pp. 678-683. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783220>.
11. Vinnychenko D.V., Nazarova N.S. Source of the stabilized discharge current in carbon-containing gases with frequency-parametric regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 1. Pp. 25-28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.038>. (Ukr).

Надійшла 01.06.2022

Остаточний варіант 02.02.2023