

Д. В. ВІННИЧЕНКО, м.н.с.; Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України;
Н. С. НАЗАРОВА, канд.техн.наук, доцент, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України

РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ РЕЖИМНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОГО СИНТЕЗУ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ

Вступ. Спосіб електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів (ВНМ) із вуглецевовмісних газів, який розвинуто в Інституті імпульсних процесів і технологій НАН України [1], має високі показники продуктивності і якості отриманих ВНМ [2], що можливо за стабілізацією і керуванням електричних характеристик процесу синтезу. Оптимальними режимними параметрами за якими досягаються екстремуми критеріїв ефективності цільових технологічних параметрів є довжина міжелектродного проміжку і вихідний середньоквадратичний струм електротехнічної системи [3]. В промисловості широко використовуються системи незмінного синусоїдального струму [4], але задача керування величиною вихідного струму інвертору із послідовним резонансним контуром вперше постала для розроблюваної системи для забезпечення екстремуму критерію ефективності технологічного процесу. Тому розвиток принципів керування режимними параметрами електротехнічної системи для електророзрядного синтезу нановуглецю є актуальною задачею.

Метою роботи є розробка принципу керування вихідним середньоквадратичним струмом інвертору напруги з послідовним резонансним контуром для забезпечення оптимальних режимних параметрів електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів.

Матеріали дослідження.

Дослідження процесу електророзрядного синтезу дозволило сформулювати ключові вимоги для створення ефективної системи живлення [5]. Вони полягають в тому, що система повинна забезпечувати стабілізацію величини розрядного струму при багатократній зміні електричного опору технологічного навантаження та напруги розрядних імпульсів. В [5] обґрунтована можливість використання інвертору напруги з резонансним послідовним контуром в якості джерела живлення електророзрядної системи зі стабілізацією струму у навантаженні. Показано, що така електротехнічна система дозволяє реалізовувати нестабільність струму не більше 1 % при багатократному змінненні вихідної напруги.

Обґрунтовано, що створення нерівноважної плазми, необхідної для синтезу нановуглецю, доцільно забезпечувати створенням умов для тліючого газового розряду за рахунок високої частоти імпульсів в діапазоні від 1 до 100 кГц.

Наступним етапом досліджень постала задача забезпечення екстремуму критерію ефективності технологічного процесу, яка може бути розв'язана за допомогою керування величиною вихідного струму електротехнічної системи, тобто інвертору із послідовним резонансним контуром.

В роботі запропоновано використовувати принцип частотозалежності реактивного опору індуктивних елементів, або керування зміною частотозалежних параметрів струмоформуючої схеми на базі резонансного контуру. Перевага такого підходу полягає в здійснюванні принципу параметричної стабілізації струму, що є найбільш простим і надійним в технологіях побудови силових пристроїв.

Для аналізу схеми інвертору напруги з послідовним резонансним контуром (рис.1), математичну модель якої наведено в [5] введемо такі позначення. Відношення реактивних опорів за частотами відмінними від резонансної:

$$q^* = \frac{\omega_1}{\omega_0}; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \omega_0^2 = \frac{\omega_1^2}{q^*{}^2}; \frac{\omega_1^2}{q^*{}^2} = \frac{1}{LC}; \omega_1 L = q^*{}^2 \frac{1}{\omega_1 C}; X_C = \frac{X_L}{q^*{}^2}, \quad (1)$$

де q^* - приведена до резонансної безрозмірна частота комутації силових вентилів інвертора.

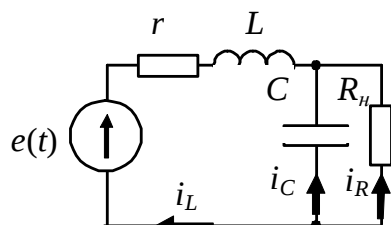


Рис. 1

Для аналізу використовуємо рівняння для струму на частоті резонансу [5] ($X_C = X_L$, синусоїдальна вхідна напруга):

$$i_R = e(t) \frac{jX_L}{X_L^2 + jR(X_L - X_C)} = \frac{e(t) \cdot j}{X_L} \quad (2)$$

Звідки отримуємо:

$$i_R = \frac{\Delta_{i_R}}{\Delta} = \frac{e(t) \cdot jX_C}{X_C X_L + jR(X_L - X_C)}, \quad (3)$$

Для гармонійного випадку:

$$i_R = \frac{U_m \cos(q\omega_0 t)}{q\omega_0 L} \frac{1}{\sqrt{1+k^2(q^{*2}-1)^2}}. \quad (4)$$

$$u_R = \frac{U_m \cos(q^* \omega_0 t) R}{q^* \omega_0 L} \frac{1}{\sqrt{1+k^2(q^{*2}-1)^2}}. \quad (5)$$

Амплітуда напруг на навантаженні:

$$U_{Rm} = \frac{U_m R}{q^* \omega_0 L} \frac{1}{\sqrt{1+k^2(q^{*2}-1)^2}}. \quad (6)$$

Передатна функція контуру

$$W(q) = \frac{U_{Rm}}{U_m} = \frac{R}{q^* \omega_0 L} \frac{1}{\sqrt{1+k^2(q^{*2}-1)^2}}. \quad (7)$$

Із [5] для негармонійного випадку

$$i_R = \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t)}{n \sqrt{(n\omega L)^2 + (k\omega L)^2 (n^2 - 1)^2}} = \frac{4 \cdot U_m}{\pi \omega L} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\omega t)}{n \sqrt{n^2 + k^2 (n^2 - 1)^2}}, n = 1, 3, 5, \dots \quad (8)$$

отримуємо на виході резонансного контуру

$$I_{RES_OUT} = i_R = \frac{4 \cdot U_m}{\pi q^* \omega_0 L} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(nq\omega t)}{n \sqrt{n^2 + k^2 (q^{*2} n^2 - 1)^2}}, n = 1, 3, 5, \dots \quad (9)$$

$$U_R = \frac{4 \cdot U_m R}{\pi q^* \omega_0 L} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(nq\omega t)}{n \sqrt{n^2 + k^2 (q^{*2} n^2 - 1)^2}}, n = 1, 3, 5, \dots \quad (10)$$

$$U_{Rm} = \frac{4 \cdot U_m R}{\pi q^* \omega_0 L} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \sqrt{n^2 + k^2 (q^{*2} n^2 - 1)^2}}, n = 1, 3, 5, \dots \quad (11)$$

$$\frac{U_{Rm}}{U_m} = \frac{4R}{\pi q^* \omega_0 L} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n \sqrt{n^2 + k^2 (q^{*2} n^2 - 1)^2}}, n = 1, 3, 5, \dots \quad (12)$$

Використання (9) дозволяє задавати вихідний струм, змінюючи частоту комутації силових вентилів інвертора за законом

$$q^* = \frac{4 \cdot U_m}{\pi \omega_0 L I_{RES_OUT_OPT}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(nq\omega t)}{n \sqrt{n^2 + k^2 (q^{*2} n^2 - 1)^2}}, n = 1, 3, 5, \dots \quad (13)$$

Закон регулювання вихідного середньоквадратичного струму (9) може бути представлено в безрозмірному виді, приведені до базової величини

$$I_{RES_OUT}^* = \frac{i_R}{I_{RES_OUT_max}^*} \quad (14)$$

Математичне моделювання вихідного струму в околі резонансної частоти

Керування вихідним струмом за допомогою частоти комутації силових ключів (9) призводить до відходу від резонансного режиму, при якому може порушитися стабілізація середньоквадратичного вихідного струму. Тому проведено математичне моделювання вихідного струму в околі резонансної частоти.

Вихідними даними моделювання є емпіричні залежності. Середньовадратичний розрядний струм, за яким здійснюється продуктивний синтез нановуглецю $I_{RES_OUT}^* = I_{CH_RMS_OPT}^*$, повинен підтримуватися відповідно до системи базових величин, в діапазоні від 0,87 до 1,0, напруга U_{CH}^* - в діапазоні від 0,8 до 1,0. Еквівалентний опір навантаження R^* при цьому складає від 0,92 до 1.

Проведемо розрахунок діапазону струмообмеження, необхідного для отримання середньовадратичного розрядного струму, за яким здійснюється продуктивний синтез нановуглецю.

Напруга на вході резонансного контуру, приведена до вторинної обмотки трансформатора, відповідно до системи базових величин, дорівнює $U_{in}^* = k_T U_{in}^* = k_T$, де k_T - коефіцієнт трансформації. Необхідне струмообмеження визначається за формулою

$$\omega L'^* = \frac{U_{in}^*}{I_{CH_RMS_OPT}^*} \quad \text{і дорівнює від } \omega L'^* = k_T \quad \text{до}$$

$$\omega L'^* = \frac{k_T}{I_{CH_RMS_OPT}^*} = \frac{k_T}{0,87}.$$

Коефіцієнт навантаження, приведений до вторинної обмотки трансформатора, який використовується в математичній моделі резонансного контуру і визначається як $k=R/\omega L'$, буде знаходитися в діапазоні від $1/k_T$ до $0,8/k_T$.

Використання підвищуючого трансформатора з коефіцієнтом трансформації вище 50 зумовлює діапазон k від 0,16 до 0,2.

Задаємо значення відносної частоти комутації силових ключів $q^*=f/f_{рез}$ і засобами MathCad проводимо розрахунок відхилення вихідного струму для різних q^* від його розрахункового значення, що відповідає $q^*=1$ в умовах зміни навантаження (коефіцієнта навантаження).

По-перше, розрахунок проведемо за формулою для першої гармоніки (4), який дає високу точність в умовах резонансного режиму і характеризується спрощеним записом.

Результати розрахунку наведено на рис. 2, де показано залежність коефіцієнту стабілізації вихідного середньоквадратичного струму для першої гармоніки від навантаження k . Для зручності аналізу значення струмів приведені до їх значення в точці $k=0$. Аналіз результатів показав, що для найбільшого навантаження $k=0,2$, відхилення струму від його розрахункового значення, виконаного за формулою для першої гармоніки (4) відрізняється від очікуваного значення, зумовленого стабілізацією середньоквадратичного струму, менше ніж на 0,3%.

В таблиці 1 наведено прийняті позначення, які використовуються на рисунках, де наведено результати моделювання.

По-друге, розрахунок проведемо за формулою для суми десяти гармонік (9), який дає високу точність в будь-яких умовах. Результати розрахунку наведено на рис. 3, де показано залежність коефіцієнту стабілізації вихідного середньоквадратичного струму для десяти гармонік від навантаження k . Позначення, які використовуються на рисунках, де наведено результати моделювання, наведено в таблиці 1. Для зручності аналізу значення струму приведені до їх значення в точці $k=0$. Аналіз результатів показав, що для найбільшого навантаження $k=0,2$ відхилення струму від його розрахункового значення, виконаного за формулою (9) для суми десяти гармонік відрізняється від очікуваного значення, зумовленого стабілізацією середньоквадратичного струму менше ніж на 1%.

Таблиця 1.

Позначення	Q							
	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,5	2
Середньоквад- ра-тичний струм першої гармоні- ки Irrqms(k) для навантаження k	Irrqms0(k)	Irrqms1(k)	Irrqms2(k)	Irrqms3(k)	Irrqms4(k)	Irrqms5(k)	Irrqms6(k)	Irrqms7(k)
Відношення Irrqms(k)/ Irrqms(0)	kst0(k)	kst1(k)	kst2(k)	kst3(k)	kst4(k)	kst5(k)	kst6(k)	kst7(k)
Середньоквад- ра-тичний струм перших десяти гармонік Irkk(k) для наванта- ження k	Irkk0(k)	Irkk1(k)	Irkk2(k)	Irkk3(k)	Irkk4(k)	Irkk5(k)	Irkk6(k)	Irkk7(k)
Відношення Irkk(k)/ Irkk(0)	kstk0(k)	kstk1(k)	kstk2(k)	kstk3(k)	kstk4(k)	kstk5(k)	kstk6(k)	kstk7(k)
Середньоквад- ра-тичний струм в колі RL Irrls(k) для наванта- ження k	Irrls0(k)	Irrls1(k)	Irrls2(k)	Irrls3(k)	Irrls4(k)	Irrls5(k)	Irrls6(k)	Irrls7(k)
Відношення Irrls(k)/ Irrls (0)	krlls0(k)	krlls1(k)	krlls2(k)	krlls3(k)	krlls4(k)	krlls5(k)	krlls6(k)	krlls7(k)

Фрагмент лістингу

$$Irrqms0(k) := \sqrt{\frac{q \cdot \omega 0}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} \left[\frac{Um}{q \cdot \omega 0 \cdot Lg} \cdot \frac{\cos(q \cdot \omega 0 \cdot t)}{\sqrt{1 + k^2 \cdot (q^2 - 1)^2}} \right]^2 dt} \quad kst0(k) := \frac{Irrqms0(k)}{Irrqms0(0)}$$

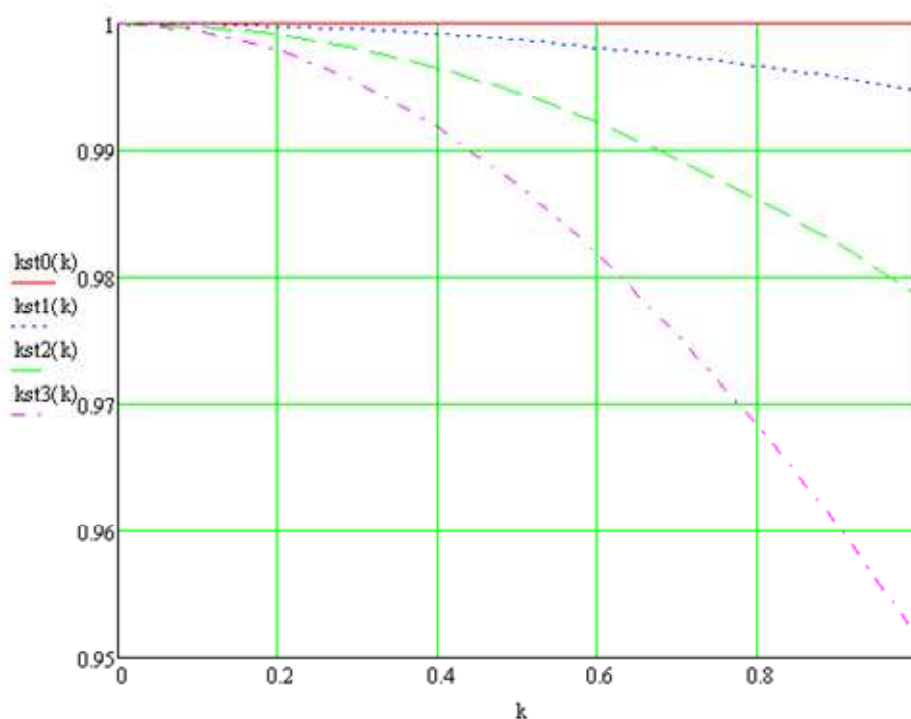


Рис. 2

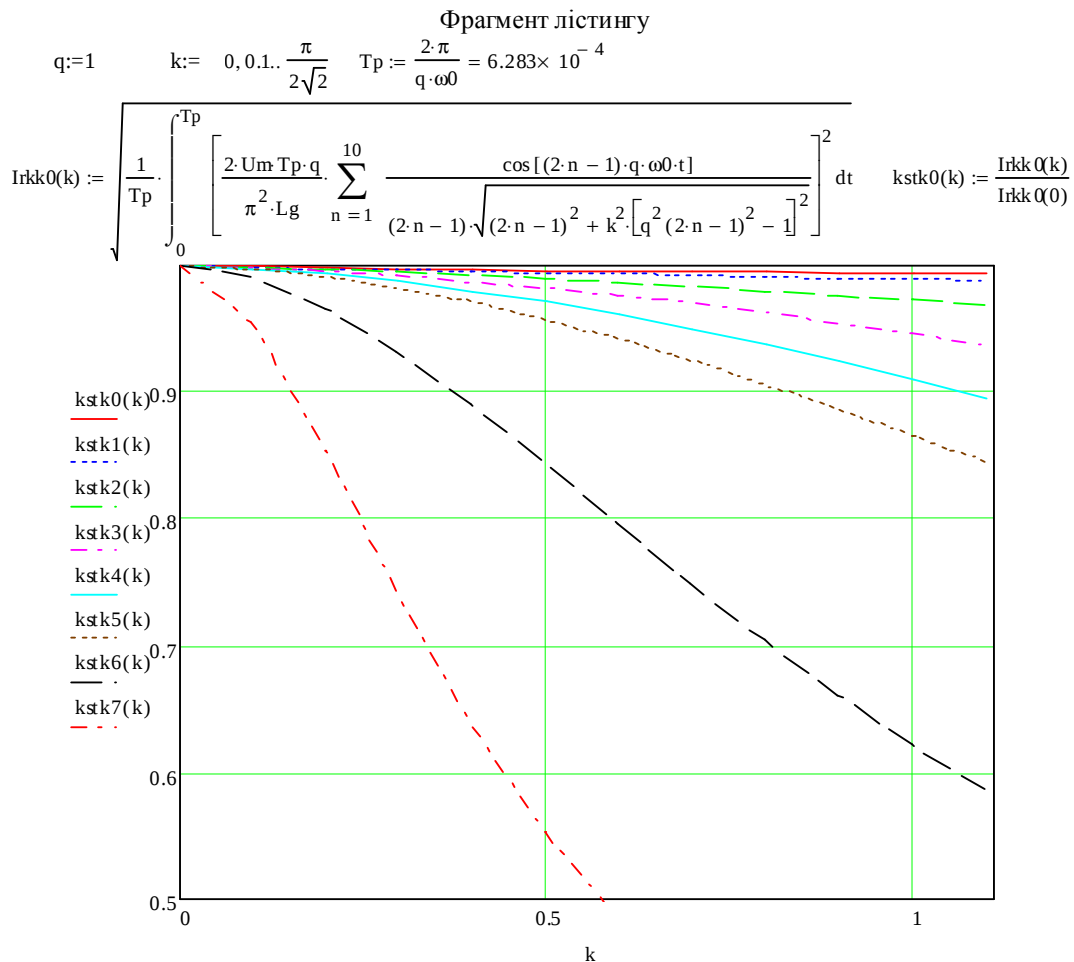


Рис. 3

Тобто розрахунок вихідного струму можна виконувати для частоти першої гармоніки при відхиленні частоти комутації силових ключів інвертора до 15% в кожну сторону. За перевищенням частотою межі в 15% доцільно змінити вільну частоту коливальних резонансного контуру, наприклад перемиканням дроселів.

Для порівняння з отриманими результатами проведено розрахунок струму при індуктивному струмообмеженні, тобто при використанні RL -кола.

На рис.4. показано залежності коефіцієнта стабілізації вихідного середньоквадратичного струму для резонансного контуру $kstk2(k)$ і RL -кола $kstls2(k)$. Позначення, які використовуються на рисунках, де наведено результати моделювання, наведено в таблиці 1. Порівняння результатів показує, що за використанням резонансного контуру, стабілізація вихідного струму значно краща і відрізняється від очікуваного значення, зумовленого стабілізацією середньоквадратичного струму, менше ніж на 1%.

Проведене комп'ютерне моделювання чисельними методами вихідного струму в околі резонансної частоти показало високу точність (до 1%) і коректність розроблених принципів і способів регулювання режимних параметрів електротехнічної системи.

В пакеті прикладних програм LTSpice також проведено комп'ютерне моделювання імітаційної моделі високовольтної системи живлення, яке показало високий ступінь стабілізації вихідного середньоквадратичного струму (відхилення до 1%) за багатократною зміною навантаження.

Таким чином, вперше розроблено принципи і способи регулювання режимних параметрів електротехнічної системи для ефективного синтезу нановуглецю. Вперше отримано закон регулювання вихідного середньоквадратичного струму за допомогою зміни частоти розрядних імпульсів $I_{RES_OUT}^* = F(q^*)$, де q^* - приведена частота комутації силових вентилів інвертора, що дозволить здійснювати плавне регулювання вихідного струму для забезпечення його оптимального значення відповідно до стану процесу синтезу.

Фрагмент лістингу

$$I_{rrls0}(k) := \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \left[\frac{2 \cdot U_m \cdot T_p \cdot q}{\pi^2 \cdot L_g} \sum_{n=1}^{10} \frac{\sin[(2n-1) \cdot q \cdot \omega_0 \cdot t]}{(2n-1) \cdot \sqrt{k^2 + [q^2(2n-1)^2]}} \right]^2 dt$$

$$k_{rrls0}(k) := \frac{I_{rrls0}(k)}{I_{rrls0}(0)}$$

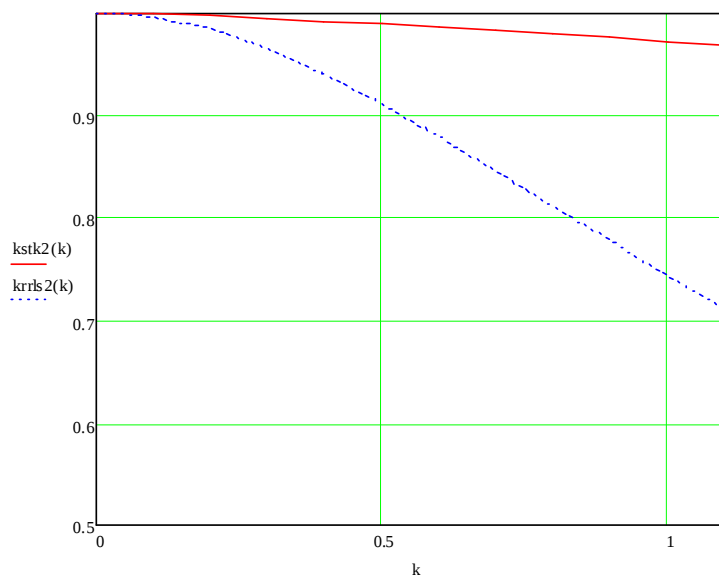


Рис. 4

Висновки. Розроблено принцип керування вихідним середньоквадратичним струмом інвертора напруги з послідовним резонансним контуром для забезпечення оптимальних режимних параметрів, який базується на керуванні частотозалежними параметрами струмоформуючої схеми на базі резонансного контуру. Перевага такого підходу полягає в здійснюванні принципу параметричної стабілізації струму, що є найбільш простим і надійним. Математичне моделювання вихідного струму в околі резонансної частоти за допомогою зміни частоти комутації ключів інвертору показало високий коефіцієнт стабілізації середньоквадратичного струму на виході електротехнічної системи для навантаження, характерного для синтезу вуглецевих наноматеріалів (відхилення не перевищує 1%).

Список літератури: 1. Пат. 95543 Україна МПК C01B 31/02 (2006.01), H05H 1/24 (2006.01), H05H 1/32 (2006.01). Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів (варіанти) / Л.З.Богуславський, Д.В.Вінниченко, Н.С.Назарова (Україна); заявник і патентовласник ІПТ НАН України. - № а 2010 01186; заявл. 05.02.2010; Опубл. 10.08.2011 р., Бюл.№ 15. -9 с. 2. Структурное состояние углеродных наноматериалов, полученных методами электроразрядной обработки углеродсодержащих газов / А.Д.Рудь, И.М.Кирия, Л.З.Богуславский и др. // Нанотехнологии и наноматериалы (Материалы III Международной научно-технической конференции) - М.: Издат. МГОУ, 2012. - С.255-258. 3. Вінниченко, Д.В. Визначення оптимальних характеристик високовольтної електророзрядної системи для реалізації технології електроімпульсного синтезу нановуглецю / Д.В. Вінниченко // Технічна електродинаміка. 2014. №4. - С. 129-131. 4. Милья А.Н Системы неизменного тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей. / А.Н. Милья., И.В. Волков // К.- Наукова Думка. - 1974. -216 с. 5. Щерба А.А. Стабілізація та регулювання режимних параметрів високовольтної електророзрядної системи для електроімпульсного синтезу нановуглецю / А.А. Щерба, Д.В. Вінниченко // Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 21 (1064) - С.141-151.

Bibliography (transliterated): 1. Pat. 95543 Ukrayina MPK C01V 31/02 (2006.01), H05H 1/24 (2006.01), H05H 1/32 (2006.01). Sposib oderzhannya vugletsevih nanomaterialiv (varianty) / L.Z.Boguslavskiy, D.V.Vinnichenko, N.S.Nazarova (Ukrayina); zavavnyk i patentovlasnyk IPT NAN Ukrayiny. - No a 2010 01186; zavavl. 05.02.2010; Opubl. 10.08.2011 r., Byul. No. 15. -9 s. 2. Strukturnoe sostoyanie uglerodnykh nanomaterialov, poluchennykh metodami elektrorazryadnoy obrabotki uglerodsoderzhashchih gazov / A.D.Rud, I.M.Kiryan, L.Z.Boguslavskiy i dr. // Nanotekhnologii i nanomaterialy (Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii) - M.: Izdat. MGOU, 2012. - S.255-258. 3. Vinnichenko, D.V. Vyznachennya optymalnykh harakteristik visokovoltnoyi elektrorazryadnoyi sistemy dlya realizatsii tekhnologii elektroimpulsnogo sintezu nanovugletsyu / D.V. Vinnichenko // Tekhnichna elektrodynamika. 2014. No. 4. - S. 129-131. 4. Milyah A.N Sistemy neizmennogo toka na osnove induktivno-emkostnykh preobrazovateley. / A.N. Milyah., I.V. Volkov // K.- Naukova Dumka. - 1974. -216 s. 5. Scherba A.A. Stabilizatsiya ta reguluyuvannya rezhimnykh parametrov vysokovoltnoyi elektrorazryadnoyi sistemy dlya elektroimpulsnogo sintezu nanovugletsyu / A.A. Scherba, D.V. Vinnichenko // Visnyk NTU «HPI». 2014. No. 21 (1064) - S.141-151.

Надійшла (received) 27.08.2015