

УДК 681.51 : 537.523:661.666.4

Н. С. НАЗАРОВА, Д. В. ВІННИЧЕНКО, С. С. КОЗИРЕВ, Л. Є. ОВЧИННИКОВА, С. В. ЧУЩАК**УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОГО СИНТЕЗУ НАНОВУГЛЕЦЮ**

Проведено аналіз технологічного процесу електророзрядного синтезу нановуглецю як об'єкта керування. Побудовано узагальнену модель керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів з вуглецевмісного газу у вигляді графа, у якому технологічні підгрупи операцій відповідають гілкам, а стійкі стани – вершинам графа. Визначено координати векторів стану. Це дає змогу технологічний процес представити фрагментарно, та використовуючи метод декомпозиції, задачу керування розкласти на декілька задач різного рівня, кожна з яких відноситься до певного фрагменту технологічного процесу, незалежна, має свої критерії оптимальності та алгоритми реалізації.

Ключові слова: модель керування, координати вектору стану, гілки та вершини графа, метод декомпозиції, технологічний процес, електророзрядний синтез нановуглецю.

Проведен анализ технологического процесса электроразрядного синтеза наноуглерода как объекта управления. Построена обобщенная модель управления технологическим процессом высокочастотного электроразрядного синтеза углеродных наноматериалов с углеродсодержащего газа в виде графа, в котором технологические подгруппы операций отвечают веткам, а устойчивые состояния – вершинам графа. Определены координаты векторов состояния. Это позволяет технологический процесс представить фрагментарно, и, используя метод декомпозиции, задачу управления разложить на несколько задач различного уровня, каждая из которых относится к определенному фрагменту технологического процесса, независима, имеет свои критерии оптимальности и алгоритмы реализации.

Ключевые слова: модель управления, координаты вектора состояния, ветви и вершины графа, метод декомпозиции, технологический процесс, электроразрядный синтез наноуглерода.

The analysis of the process of an electric synthesis of nanocarbon as a control object was done. A generalized model of process control high-frequency electric-discharge synthesis of carbon nanomaterials from the carbon-containing gas in the form of a graph in which the technological operations of the subgroup responsible branches and stable states - vertices of the graph. Determine the coordinates of the state vector. This allows the process to present fragmentary, and using the decomposition method, the control problem broken down into multiple tasks of different levels, each of which relates to a specific fragment of the process is independent, has its own optimization criteria and algorithm implementation. Operator control system provides a higher level of correlation between fragments model, setting conditional transitions from one fragment to another, imposing certain restrictions on incoming and outgoing coordinates. Provides conditions under which the subsystems are functioning in the specified mode according to the base algorithm and initial conditions.

Keywords: control model, the coordinates of the state vector, branch and vertices of the graph, decomposition method, process technology, electric-discharge synthesis of nanocarbon.

Вступ. Вуглецеві наноматеріали знаходять застосування в багатьох галузях науки, промисловості, техніки та інженерії, що обумовлено великою різноманітністю їх фізико-хімічних, оптичних, механічних і електричних властивостей [1, 2]. Метод високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів (ВНМ) із вуглецевмісних газів, розроблений в ІПТ НАН України, має високі показники продуктивності та високу якість отриманих ВНМ, що задовольняє вимоги до виробництва в промислових масштабах [3, 4]. Для впровадження даного методу в промислове виробництво необхідно забезпечити керуваність технологічного процесу електророзрядного синтезу нановуглецю на всіх його стадіях.

Технологічний процес електророзрядного синтезу нановуглецю відноситься до складних систем, процеси в яких суттєво різняться за швидкостями та параметрами. Координати стану та критерії оптимальності окремих технологічних циклів різні. З метою забезпечення керуваності технологічного процесу синтезу, систематизації функцій і задач керування на усіх технологічних стадіях необхідно провести його аналіз як об'єкта керування та побудувати узагальнену модель керування.

Метою роботи є побудова узагальненої моделі керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів із вуглецевмісних газів за результатами дослідження функцій і задач керування на усіх технологічних стадіях.

Матеріали дослідження. Для побудови моделі керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу нановуглецю обрано теоретико-множинний підхід, коли параметри стану об'єкта керування задаються у вигляді множин або векторів, маркування яких визначає відповідні матриці операторів [5]. Такий підхід дає змогу узагальнити задачі керування різними технологічними циклами процесу синтезу.

На основі аналізу алгоритму роботи високовольтної електророзрядної установки для синтезу нановуглецю [6] виділено наступні складові частини керованого технологічного процесу: допоміжні операції з подачі сировини й збору синтезованого продукту та базові операції, що безпосередньо забезпечують процес синтезу нановуглецю в реакційному об'ємі.

Допоміжні операції забезпечують додаткові умови, необхідні для підготовки до досягнення технологі-

чного результату за допомогою керованого електро-розряду, та включають в себе подачу сировини з підтриманням необхідних параметрів та регулюванням витрат, виведення газоподібних продуктів реакції, фільтрацію твердих продуктів синтезу, збір продуктів синтезу.

На етапі виконання допоміжних технологічних операцій змінними стану об'єкта керування є положення клапанів газової системи, регуляторів керованих редукторів, рівень наповнення відстійника з фільтром та ін. Координатами цих змінних будуть стани датчиків положення, а керуючими впливами – сигнали включення виконавчих механізмів і пристроїв. Для моделі цієї стадії простір станів і простір керувань являють собою дві множини, або дві матриці (матриця стану й матриця керування), елементами яких будуть відповідно стани датчиків положення виконавчих механізмів й команди включення виконавчих механізмів. Завданням системи керування є забезпечення відповідності елементів множин, що задаються циклограмою роботи механізмів і пристроїв та діаграмою стану датчиків.

Базові технологічні операції забезпечують синтез нановуглецю з вуглецевмісного газу, що відбувається в нерівноважній плазмі електричного газового розряду, який формується в міжелектродному проміжку, розташованому в реакторі, заповненому вуглецевмісним газом, за допомогою високовольтного генератора розрядних імпульсів. До задач керування на даному технологічному етапі відноситься забезпечення необхідного режиму роботи високовольтного високочастотного генератора, який генерує розрядні імпульси з заданими параметрами, забезпечення реакційних параметрів вуглецевмісного газу в розрядному реакторі та заданого режиму розряду, забезпечення необхідної величини міжелектродного проміжку, шляхом керування рухом електродної системи.

Узагальнена модель керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів з вуглецевмісного газу може бути представлена у вигляді графа (рис. 1), у якому виділені групи операцій відповідають гілкам, а стійкі стани – вершинам графа.

Стійкі стани (вершини графа) описуються окремими моделями фрагментів технологічного процесу: Q_j – допоміжні операції; Z – режими роботи високовольтного високочастотного генератора імпульсів; R – режими розряду в газовому середовищі реакційного об'єму; D – траєкторії руху електродної системи.

Відповідно до теоретико-множинного підходу вони утворюють множину станів об'єкта керування, який можна позначити вектором $M = \{Q, D, Z, R\}$. Вихідний вектор Y_j і поточний стан об'єкта M_j залежать від набору вхідних сигналів або координат вхідного вектора X_j і попереднього стану об'єкта M_{j-1} . Перехід від одного стійкого стану до іншого визначають умовні переходи – X_j/Y_j .

Для відбиття узагальною моделлю процесів, що відбуваються в генераторі імпульсів, відображення режимів розряду в газонаповненому реакційному об'ємі та руху електродної системи до графа введені

спеціальні умовні переходи, що підключають модель керування режимом роботи генератора Z , режимом розряду R і рухом електродної системи D .

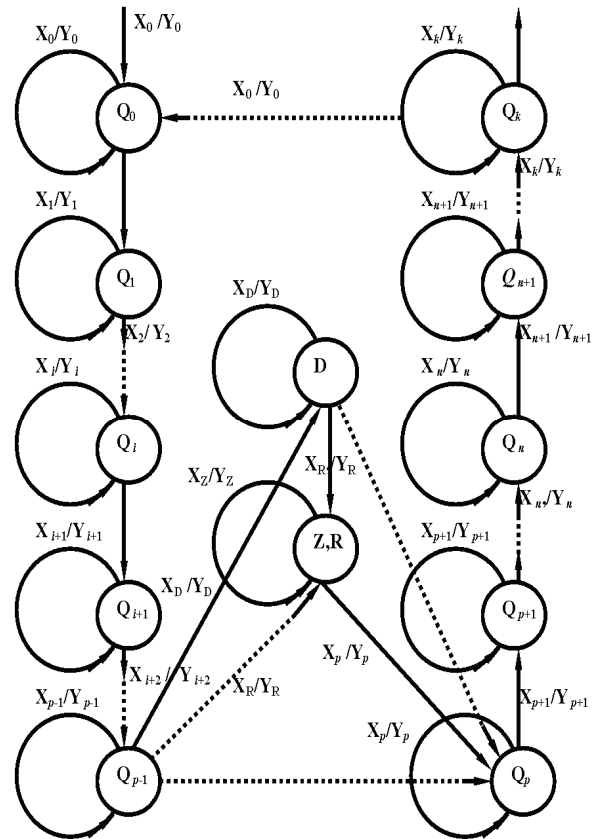


Рисунок 1 – Узагальнена модель керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів

Зв'язок між координатами вхідного й вихідного векторів X, Y у загальному вигляді описується наступним виразом:

$$Y = A X,$$

де $Y = \{Y_Q, Y_D, Y_Z, Y_R\}$; $X = \{X_Q, X_D, X_Z, X_R\}$; Y_Q, Y_D, Y_Z, Y_R ; X_Q, X_D, X_Z, X_R – координати вихідного Y та вхідного X векторів; A – оператор, що реалізується системою керування вищого рівня та забезпечує взаємозв'язок між фрагментами моделі, задаючи умовні переходи від одного фрагменту до іншого, накладаючи певні обмеження на вхідні та вихідні координати. Забезпечує умови, при яких підсистеми функціонують в заданих режимах відповідно до бази алгоритмів та початкових умов.

Для ефективного розв'язання завдань керування вищого рівня необхідно синтезувати локальні алгоритми керування нижніх рівнів. Кожен етап технологічного процесу електророзрядного синтезу нановуглецю має свої критерії оптимальності, реалізується в умовах дії зовнішніх впливів та невизначеностей, має змінні параметри, тому вимагає розробки адаптивних підсистем керування.

Набір допоміжних операцій залежить від конструкції технологічного обладнання, від типу газової системи та її елементів. Саме набір допоміжних операцій та стан їх виконання зумовлює кількість стійких

станів (вершини графа Q_j) та умовних переходів X_j/Y_j і відповідно – розмір матриць стану й керування даного фрагменту узагальненої моделі. Алгоритм підсистеми керування допоміжними операціями повинен забезпечувати відповідність елементів множини станів виконавчих механізмів, що задається циклограмою роботи, та множини станів датчиків, заданих у вигляді діаграми положення датчиків.

Підсистеми керування базовими операціями, що забезпечують процес синтезу нановуглецю в реакційному об'ємі, визначаються моделями керування режимом роботи генератора (вершина графа Z), режимом розряду (вершина графа R) і рухом електродної системи (вершина графа D). Вершини графа Z і R взаємопов'язані, оскільки режим роботи генератора безпосередньо впливає на режим розряду.

В якості координат вектору стану Z , що відображає роботу генератора імпульсів, керуючись попередніми дослідженнями [7, 8], можна прийняти наступні параметри: $U_{вих}$ – вихідна напруга; W – енергія накопичувача, p – вихідна потужність; L – індуктивність розрядного контуру, f – частота проходження імпульсів; u – поточна напруга (миттєве значення); k_u – коефіцієнт форми імпульсів напруги.

Координатами вектору стану R , що визначає режим розряду в реакційному об'ємі та забезпечує технологічний результат синтезу ВНМ, керуючись дослідженнями електрофізичних характеристик високовольтної обробки газоподібних вуглеводнів [8, 9], можна вважати наступні параметри: U_p – напруга пробою; U_r – робоча напруга синтезу; I_{max} – максимальне значення струму; i – поточне значення струму; k_i – коефіцієнт форми імпульсів струму; T , P – температура та тиск в реакційному об'ємі. Залежність коефіцієнтів форми імпульсів від довжини міжелектродного проміжку досліджено в [9]. Для отримання залежностей між технологічними параметрами процесу синтезу ВНМ і електричними характеристиками розряду можна використовувати зручні для аналізу функціонали, описані в [9], які є засобами формального опису форми вольт-амперних характеристик, що мають складну форму та залежать від співвідношення довжини каналу розряду і потужністю в ньому.

Алгоритм руху електродної системи відображає вектор стану D , за координати якого можна прийняти l – величину міжелектродного проміжку, від якої залежить режим розряду; i_c – середньоквадратичне значення розрядного струму, яке може слугувати інформаційною координатою; просторові координати руху електрода.

Побудована узагальнена модель керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів з вуглецевмісного газу показала, що синтез адаптивних підсистем керування окремими фрагментами технологічного процесу, можна вести незалежно, використовуючи метод декомпозиції.

Висновки. Проведено аналіз технологічного процесу електророзрядного синтезу нановуглецю як об'єкта керування, за результатами якого його віднесено до складних систем, дослідження яких доцільно

проводити методом декомпозиції. Встановлено, що процеси в окремих технологічних циклах синтезу суттєво різняться за швидкостями та параметрами, мають різні координати стану та критерії оптимальності.

Побудовано узагальнену модель керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів з вуглецевмісного газу у вигляді графа, у якому виділені технологічні підгрупи операцій відповідають гілкам, а стійкі стани – вершинам графа.

Множину станів об'єкта керування позначено вектором $M = \{Q, D, Z, R\}$. Визначено координати векторів стану окремих технологічних циклів: Q_j – допоміжні операції; Z – режими роботи високовольтного високочастотного генератора імпульсів; R – режими розряду в газовому середовищі реакційного об'єму; D – траєкторії руху електродної системи.

Узагальнена модель керування технологічним процесом електророзрядного синтезу нановуглецю у вигляді графа дає змогу технологічний процес представити фрагментарно, та використовуючи метод декомпозиції, задачу керування розкласти на декілька задач різного рівня, кожна з яких відноситься до певного фрагменту, незалежна, має свої критерії оптимальності та алгоритми реалізації.

Список літератури

1. *Guang Feng Curvature Effect on the Capacitance of Electric Double Layers at Ionic Liquid Onion-Like Carbon Interfaces / Guang Feng, De-en Jiang, Peter T. Cummings // J. Chem. Theory Comput.* – 2012. – 8 (3). – P. 1058–1063.
2. *Song Li Cummings Molecular Dynamics Simulation Study of the Capacitive Performance of a Binary Mixture of Ionic Liquids near an Onion-like Carbon Electrode / Song Li, Guang Feng, Pasquale F. Fulvio, Patrick C. Hillesheim, Chen Liao, Sheng Dai, Peter T. // The Journal of Physical Chemistry Letters.* – 2012. – 3 (17). – P. 2465–2469.
3. 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 патентостворитель ІППТ НАН України. – № а 2010 01186; заявл. 05.02.2010; Опубл. 10.08.2011 р., Бюл. № 15. – 9 с.
4. *Богуславський, Л. З.* Физические процессы синтеза аморфного наноглерида высокочастотным электроразрядным методом из газообразных углеводородов / Л. З. Богуславський, Д. В. Винниченко, Н. С. Назарова, Л. Е. Овчинникова // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 52 (958). – С. 25–30.
5. Основы автоматического управления / Под ред. В. С. Пугачева. – М.: Наука, 1974. – 720 с.
6. *Богуславський Л. З.* Високовольтна установка для синтезу нановуглецю з onion-like структурою з системою керування електричними характеристиками газового розряду / Л. З. Богуславський, Д. В. Вінниченко, Н. С. Назарова // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – № 20 (1129). – С. 11–23.
7. *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.
8. *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.

9. Богуславський Л. З. Дослідження електрофізичних характеристик високовольотної обробки газоподібних вугледодів для отримання вуглецевих наноматеріалів / Л. З. Богуславський, Д. В. Вінниченко, Н. С. Назарова, Ю. О. Адамчук, С. В. Чушак // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – № 14 (1186). – С. 15–20.

Bibliography (transliterated)

1. Guang Feng, De-en Jiang, Peter T. Cummings Curvature Effect on the Capacitance of Electric Double Layers at Ionic Liquid Onion-Like Carbon Interfaces. *J. Chem. Theory Comput.*, 2012, 8 (3), pp. 1058–1063.

2. Song Li, Guang Feng, Pasquale F. Fulvio, Patrick C. Hillesheim, Chen Liao, Sheng Dai, Peter T. Cummings Molecular Dynamics Simulation Study of the Capacitive Performance of a Binary Mixture of Ionic Liquids near an Onion-like Carbon Electrode. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2012, 3 (17), pp. 2465–2469.

3. Pat. 95543 Ukrayina MPK C01V 31/02 (2006.01), H05H 1/24 (2006.01), H05H 1/32 (2006.01). Sposib odezhanannya vugletsevykh nanomaterialiv (varianti). L. Z. Boguslavskiy, D. V. Vinnichenko, N. S. Nazarova; zayavnik i patentovlasnik IPT NAN Ukraini. No a 2010 01186; zayavl. 05.02.2010; Opubl. 10.08.2011 r., Byul. No 15. 9 p.

4. Boguslavskiy L. Z., Vinnichenko D. V., Nazarova N. S.,

Ovchinnikova L. E. Fizicheskie protsessyi sinteza amorfnoho nanougleroda vyisokochastotnym elektrorazryadnym metodom iz gazoobraznykh uglevodorodov. *Visnik NTU «HPI»*, 2012, No. 52 (958), pp. 25–30.

5. Osnovy avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. V. S. Pugacheva. Moscow: Nauka, 1974, 720 p.

6. Bohuslavskiy L. Z., Vinnichenko D. V., Nazarova N. S. Vysokovoltna ustanovka dlia syntezu nanovuhletsiu z onion-like strukturoiu z systemoiu keruvannya elektrichnymy kharakterystykamy hazovoho rozriadu. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2015, No 20 (1129), pp. 11–23.

7. Shcherba A. A., Vinnichenko D. V. Stabilizatsiya ta rehulyuvannya rezhymnykh parametriv vysokovoltnoyi elektro-rozryadnoyi systemy dlia elektroimpul'snoho syntezu nanovuhletsyu. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2014, No 21 (1064), pp. 141–151.

8. Vinnichenko D. V. Vyznachennia optymalnykh kharakterystyk vysokovoltnoi elektrorozryadnoi systemy dlia realizatsii tekhnolohii elektroimpul'snoho syntezu nanovuhletsiu. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2014, No 4, pp. 129–131.

9. Boguslavskiy L. Z., Vinnichenko D. V., Nazarova N. S., Adamchuk J. O., Chuschak S. V. Doslidzhennia elektrofizychnykh kharakterystyk vysokovoltnoi obrobky hazopodibnykh vuhlevodniv dlia otrymannia vuhletsevykh nanomaterialiv. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2016, 14 (1186), pp. 15–20.

Hadziuvna (received) 02.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Узагальнена модель керування технологічним процесом електророзрядного синтезу нановуглецю / Н. С. Назарова, Д. В. Вінниченко, С. С. Козирев, Л. Є. Овчинникова, С. В. Чушак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 66–69. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Обобщенная модель управления технологическим процессом электроразрядного синтеза нанougлерода / Н. С. Назарова, Д. В. Винниченко, С. С. Козырев, Л. Е. Овчинникова, С. В. Чушак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 66–69. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Generalized model of control process of an electric-discharge synthesis of nanocarbon / N. S. Nazarova, D. V. Vinnichenko, S. S. Kozirev, L. Y. Ovchinnikova, S. V. Chushchak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 66–69. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Назарова Наталя Станіславівна – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв.

Назарова Наталя Станіславівна – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, г. Николаев.

Nazarova Natalia Stanislavivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) NAS of Ukraine, Mykolayiv.

Вінниченко Дмитро Валерійович – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

Вінниченко Дмитрій Валерьевич – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, г. Николаев, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

Vinnichenko Dmitro Valerijovich – Junior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) NAS of Ukraine, Mykolayiv, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

Козирев Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв, e-mail: skozurev@gmail.com.

Козырев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет кораблестроения, г. Николаев, e-mail: skozurev@gmail.com.

Kozurev Serhiy Serhiyovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, National University of Shipbuilding, e-mail: skozurev@gmail.com.

Овчинникова Лариса Єфремівна – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв, e-mail: lora947@gmail.com.

Овчинникова Лариса Ефремовна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, г. Николаев, e-mail: lora947@gmail.com.

Ovchinnikova larysa Yefremivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) NAS of Ukraine, Mykolayiv, e-mail: lora947@gmail.com.

Чушак Сергій Володимирович – інженер, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв.

Чушак Сергей Владимирович – инженер, Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, г. Николаев.

Chushchak Serhiy Volodymyrovych – Engineer, Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) NAS of Ukraine, Mykolayiv.