

ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ КООРДИНАТ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ УСТАНОВОК ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОЇ ОБРОБКИ ВУГЛЕЦЕВМІСНИХ ГАЗІВ

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

¹Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України,
пр. Богоявленський, 43-а, Миколаїв, 54018, Україна. E-mail: vdvvvs@gmail.com

²Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова,
пр. Героїв України, 9, Миколаїв, 54025, Україна. E-mail: i.l.vinnychenko@gmail.com

Визначено інформаційні координати системи керування задля здійснення автоматичного регулювання вихідних характеристик високовольтного формувача розрядних струмів високовольтних установок електророзрядної обробки вуглецевмісних газів. Проаналізовано особливості роботи, які притаманні високовольтним електророзрядним установкам, та показано, що інформаційною координатою системи керування є вхідна потужність джерела живлення установок електророзрядної обробки вуглецевмісних газів, а за стабілізованій вхідній напрузі – діюче значення струму на вході. Це дає змогу оперативно визначати поточне значення довжини міжелектродного проміжку для підтримки режиму роботи високо-вольтних установок електророзрядної обробки вуглецевмісних газів з максимальною продуктивністю за мінімальних питомих енерговитрат на одиницю маси вихідного продукту. Бібл. 9.

Ключові слова: інформаційна координата, потужність, діючий струм, міжелектродний проміжок, режим роботи, продуктивність, питомі енерговитрати.

Вступ. У разі високовольтній електророзрядній обробці вуглецевмісних газів з метою отримання вуглецевих наноматеріалів широкого спектру використання виникає проблема оперативного визначення поточного значення довжини міжелектродного проміжку l_{ED} . Під час обробки вуглецевмісних газів в високовольтних електророзрядних установках простір між електродами забруднюється струмопровідними вуглецевими утвореннями, що зменшують l_{ED} . Як показано в [1] від довжини міжелектродного проміжку залежить продуктивність високовольтних установок електророзрядної обробки вуглецевмісних газів і питомі енерговитрати на одиницю маси вихідного продукту. Тому дуже важливо вирішити **задачу** визначення l_{ED} у реальному часі задля здійснення автоматичного регулювання вихідних характеристик високовольтного формувача розрядних струмів установок електророзрядної обробки вуглецевмісних газів. Але задля замкнення кола зворотного зв'язку системи керування установкою потрібно визначити зв'язок між електричними характеристиками її джерела живлення і l_{ED} та визначити інформаційні координати. Тому **метою** роботи є визначення цього зв'язку та інформаційних координат системи керування.

Задля здійснення автоматичного регулювання вихідних характеристик формувача високовольтних розрядних імпульсів необхідно, щоб система регулювання була замкненою [2,3], тобто була повинна здійснювати керуючі впливи відповідно до розроблених законів [4] на основі значень інформаційних координат вихідного вектору системи, які несуть інформацію про стан об'єкту керування. Використання та визначення інформаційних координат для високовольтних електроімпульсних систем описано в [5]. Одним із висновків [5] є те, що датчики для вимірювання фізичних величин повинні бути гальванічно ізольовані від високовольтного контуру задля зменшення завад та збільшення надійності системи визначення інформаційних координат. Тому головною **ідеєю** цієї роботи є вимірювання не вихідних характеристик системи (вихідна висока напруга та струм), а вхідних (наприклад, вхідний струм або потужність).

Основним параметром, від якого залежать напруга на каналі розряду і оптимальний розрядний струм, є довжина міжелектродного проміжку. Як показано у [6], l_{ED} постійно змінюється, тому необхідно визначити методи її контролю. Тому проведено визначення інформаційних координат вихідного вектору системи керування режимними параметрами, які дають змогу контролювати довжину міжелектродного проміжку.

Цільові технологічні характеристики K_p (продуктивність), W_{Π} (питомі енерговитрати) мають функціональні залежності від вихідної потужності [1]. Тобто задля ефективної роботи система повинна забезпечувати задану потужність у кожному стані електророзрядного процесу. В області розрядних струмів, які відповідають мінімальним питомим енерговитратам, напруга на каналі розряду визначається в основному його довжиною і не залежить від струму [1].

На перший погляд, найбільш ефективними інформаційними координатами повинні виступати вихідні характеристики системи живлення (струм каналу розряду, напруга на каналі, вихідна потужність). Але при цьому потрібно звернути увагу на наступні особливості роботи, які притаманні як високовольтним електророзрядним установкам взагалі, так і системам високовольтної обробки вуглецевмісних газів:

- вхідний струм із промислової мережі живлення має частоту (50 Гц), що мінімум у 200 разів менше, ніж мінімальна частота розрядного струму (10 кГц) [1] на виході високовольтного джерела живлення. Тому виміряти діюче значення вхідного струму значно простіше як з боку апаратної реалізації (для вимірювання низькочастотного змінного струму потрібна система з невеликою швидкодією), так і з боку безпеки [5] (немає втручання в високовольтне коло);

- вхідна напруга джерела живлення є стабілізованою величиною (на вході системи, з боку промислової мережі, є стабілізатор напруги та коректор коефіцієнту потужності);

- високовольтна система живлення має резонансний контур, який складається з реактивних елементів і працює на різних частотах, але вихідна потужність однозначно визначається вхідною, з урахуванням коефіцієнтів корисної дії (η) і потужності ($\cos\phi$), тобто діюче значення вхідного струму може використовуватись для визначення потужності на її виході

$$P_{OUT} = U_{in} I_{in} \eta \cos\phi, \quad (1)$$

де U_{in} , I_{in} – діючі значення напруги промислової мережі живлення та струму, що споживається високовольтною електророзрядною системою із промислової мережі живлення, відповідно;

- вихідна потужність практично лінійно залежить від довжини міжелектродного проміжку [1] для кожного значення розрядного струму, тобто її можна використовувати задля визначення поточної величини довжини міжелектродного проміжку, яка змінюється в процесі обробки газоподібних вуглеводнів;

- необхідною умовою інформаційної координати є її операційна визначеність, тобто можливість її вимірювання. Але вихідні характеристики високовольтної системи живлення складно узгодити з низьковольтною цифровою системою керування;

- координати вектору стану є випадковими величинами, визначеними на множині реалізацій, тобто для аналізу процесів і розробки математичних моделей потрібно використовувати їхні статистичні характеристики [7].

Аналіз особливостей роботи систем високовольтної обробки вуглецевмісних газів показує доцільність використання електричних характеристик на вході системи як інформаційних координат системи керування установкою. Це вхідна активна потужність або, враховуючи стабілізоване значення вхідної напруги, вхідний діючий струм, який пропонується використовувати як інформаційну координату (сигнал зворотного зв'язку системи) у

$$y = I_{in} = \frac{P_{OUT}}{U_{in} \eta \cos\phi} = \frac{U_{OUT} I_{OUT}}{U_{in} \eta \cos\phi}. \quad (2)$$

Враховуючи, що $\cos\phi = 1$ за наявності на вході джерела живлення системи коректору коефіцієнту потужності, U_{in} – це стабілізована напруга промислової мережі живлення, а I_{OUT} – стабілізований середньоквадратичний розрядний струм, який забезпечує система живлення, зміна вихідної координати залежить тільки від зміни вихідної напруги U_{OUT} , яка, в свою чергу, залежить тільки від довжини міжелектродного проміжку [6]

$$U_{OUT} = E_{CH} I_{ED}, \quad (3)$$

де E_{CH} – питома робоча напруга каналу розряду, що отримана у [6]. Звідси

$$y = I_{in} = K_I I_{ED}, \quad (4)$$

де $K_I = (E_{CH} I_{OUT}) / (U_{in} \eta)$ – коефіцієнт пропорційності між струмом мережі живлення та довжиною міжелектродного проміжку.

Останнім важливим питанням залишається визначення в (4) коефіцієнту корисної дії (η) високовольтного джерела живлення. Як показано у [8, 9], коефіцієнт корисної дії джерел живлення,

побудованих на основі резонансних інверторів, змінюється незначно (на 1 – 2%) в робочому діапазоні навантажень та лежить в межах від 89% до 91%. Тому для високовольтних джерел живлення систем обробки газоподібних вуглеводнів можна вважати сталою величиною ($\approx 90\%$), яка не залежить від зміни параметрів навантаження.

Тобто, задля визначення довжини міжелектродного проміжку достатньо вимірювати вхідний струм за умови незмінного значення напруги живлення $I_{ed}=I_{in}/K_I=y/K_I$.

Висновки. В роботі визначено зв'язок між вхідним струмом джерела живлення та довжиною міжелектродного проміжку високовольтних електророзрядних систем обробки вуглецевмісних газів, яку можна визначити, як $I_{ed}=I_{in}/K_I=y/K_I$. Отримано інформаційні координати системи керування, якими є вхідна потужність джерела живлення установок електророзрядної обробки вуглецевмісних газів, а за стабілізованій вхідній напрузі – діюче значення струму на вході. Це дає змогу оперативно визначати поточне значення довжини міжелектродного проміжку задля підтримки режиму роботи високовольтних установок електророзрядної обробки вуглецевмісних газів з максимальною продуктивністю за мінімальних питомих енерговитратах на одиницю маси вихідного продукту.

1. Вінниченко Д.В. Вплив електричних параметрів високовольтних електророзрядних установок синтезу нановуглецю на їхню продуктивність і питомі енерговитрати. *Техн. електродинаміка*. 2016. № 4. С. 95-97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.04.095>

2. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений. *Техн. електродинаміка*. 2012. № 5. С. 3-9.

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

4. Вінниченко Д.В., Назарова Н.С. Електротехнічна система з частотно-параметричним регулюванням стабілізованого розрядного струму у вуглецевмісних газах. *Техн. електродинаміка*. 2019. №1. С. 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2019.01.025>.

5. Kozzyrev S. Control System of Discharge-Pulse Installation with Elements of Artificial Intelligence. IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2019, Lviv, Ukraine. Pp. 515-520. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879816>.

6. Вінниченко Д.В. Визначення оптимальних характеристик високовольтної електророзрядної системи для реалізації технології електроімпульсного синтезу нановуглецю. *Техн. електродинаміка*. 2014. № 4. С. 129-131.

7. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS 2014), Kyiv, Ukraine. 2014. Pp. 50-54.

8. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Ушаков В.И. Компьютерное моделирование электротепловых процессов и термомеханических напряжений при индукционном нагреве движущихся медных слитков. *Техн. електродинаміка*. 2013. № 2. С. 10-18.

9. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. Vol. 51 (6). Pp. 581-588.

УДК 621.3.072.86

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ КООРДИНАТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ

Д.В. Винниченко¹, канд. техн. наук, И.Л. Винниченко², канд. техн. наук,

¹Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Богоявленский, 43-а, Николаев, 54018, Украина. E-mail: vdvvyvs@gmail.com

²Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова,
пр. Героев Украины, 9, Николаев, 54025, Украина. E-mail: i.l.vinnychenko@gmail.com

Определены информационные координаты системы управления для осуществления автоматического регулирования выходных характеристик высоковольтного формирователя разрядных токов высоко-вольтных установок электроразрядной обработки углеродсодержащих газов. Проанализированы особенности работы, которые присущи высоковольтным электроразрядными установкам, и показано, что информационной координатой системы управления является входная мощность источника питания установок электроразрядной

обработки углеродсодержащих газов, а при стабилизированном входном напряжении – действующее значение тока на входе. Это позволяет оперативно определять текущее значение длины межэлектродного промежутка для поддержки режима работы высоковольтных установок электроразрядной обработки углеродсодержащих газов с максимальной производительностью при минимальных удельных энергозатратах на единицу массы исходного продукта. Библ. 9.

Ключевые слова: информационная координата, мощность, действующий ток, межэлектродный промежуток, режим работы, производительность, удельные энергозатраты.

DETERMINATION OF CONTROL SYSTEM INFORMATION COORDINATES OF HIGH VOLTAGE INSTALLATIONS FOR ELECTRODISCHARGE TREATMENT OF CARBON-CONTAINING GASES

D. Vinnychenko¹, I. Vinnychenko²

¹Institute of Pulse Processes and Technologies National Academy of Science of Ukraine, Bohoyavlensky Avenue, 43a, Mykolayiv, 54018, Ukraine.

E-mail: vdvvs@gmail.com

²Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Heroes of Ukraine Avenue, 9, Mykolayiv, 54025, Ukraine.

E-mail: i.i.vinnychenko@gmail.com

The information coordinates of the control system for the automatic control of the output characteristics of the high-voltage discharge currents former of the high-voltage installations of electrodischarge treatment of carbon-containing gases are determined. The peculiarities of the work that are inherent in high-voltage electric discharge installations are analyzed and it is shown that the information coordinate of the control system is the input power of the power source of the installations for the discharge of carbon-containing gases, and with a stable input voltage, the current value at the input. This allows to fast determination of the current value of the length of the electrode gap to maintain the mode of operation of high-voltage installations for the discharge of carbon-containing gases with maximum productivity at minimum specific energy consumption per unit mass of the product. References 9.

Keywords: information coordinate, power, operating current, interelectrode gap, operating mode, productivity, specific energy consumption.

1. Vinnychenko D.V. Influence of electrical parameters of high-voltage electrical discharge installations of nanocarbon synthesis on their productivity and specific energy consumption. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2016.No 4. Pp. 95-97. (Ukr.). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.04.095>

2. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.Y. Laws of increasing the rate of rise of discharge currents in the load while limiting their maximum values. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 5. Pp. 3-9. (Rus)

3. Vovchenko A.Y., Tertylov R.V. Synthesis of parametric nonlinear capacitive energy sources for the discharge-pulse technology. *Zbirnyk naukovykh pratsi Natsionalnoho universytetu korablebuduvannya*. 2010. No 4. Pp. 118-124. (Rus)

4. Vinnychenko D.V., Nazarova N.S. Electrotechnical system with frequency-parametric regulation of stabilized discharge current in carbon-containing gases. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No 1. Pp. 25-28.

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.025>. (Ukr.).

5. Kozyrev S. Control System of Discharge-Pulse Installation with Elements of Artificial Intelligence. IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2019, Lviv, Ukraine. Pp. 515-520. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879816>

6. Vinnychenko D.V. Determination of the optimal characteristics of high voltage electric-discharge system for implementing electropulse synthesis technology of nanocarbon. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 4. Pp. 129-131. (Ukr)

7. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-Spark load. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS 2014), Kyiv, Ukraine. 2014. Pp. 50-54.

8. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M., Ushakov V.I. Computer modeling of electrothermal processes and thermomechanical stress at induction heating of moving copper ingots. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 2. Pp. 10-18. (Rus)

9. Shcherba A.A., Kosenkov V.M., Bychkov V.M. Mathematical closed model of electric and magnetic fields in the discharge chamber of an electrohydraulic installation. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. Vol. 51 (6). Pp. 581-588.

Надійшла 28.02.2020
Остаточний варіант 19.04.2020