

**О. І. Денисенко, к. т. н., доц.; С. К. Мещанінов, д. т. н., проф.**

## **ПРОГРАМНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОГО ПРИБОРУ ДЛЯ СИНТЕЗУ МІКРО- ТА НАНОСТРУКТУРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Програмно-апаратні комплекси для синтезу мікро- та наноструктурних композиційних матеріалів в частині керування енерговиділенням електротермічних пристроїв відносяться до техніки керування і регулювання температури з використанням електричних засобів. Актуальність забезпечення оперативності комп'ютерних діагностики стану і керування енерговиділенням електротермічних пристроїв програмно-апаратних дослідницьких комплексів в різних енергетичних умовах призводить до необхідності визначення сукупності параметрів, які б вичерпно характеризували миттєвий стан електротермічного пристрою в довільний момент часу, а також сукупності комфортно комп'ютерно вимірюваних інформативних факторів для плинного розрахунку на їх основі визначених параметрів. Відношення миттєвого значення термозалежного опору електронагрівача до внутрішнього опору джерела живлення визнано визначальним параметром щодо формування діапазону досяжних величин енерговиділення і, як наслідок, діапазону досяжних температур. Запропоновано для характеристики стану електронагрівача користуватись сукупністю миттєвих значень його відносних теплової потужності і опору. Сукупність миттєвих значень двох параметрів – електричних напруг на термозалежному опорі електронагрівача і на послідовному його з'єднанні з термостабілізованим (еталонним) опором виділена в якості комфортно комп'ютерно реєструємих інформативних факторів для подальшого програмного визначення з них стану електронагрівача. Встановлено можливість і запропоновано спосіб програмного визначення стану електронагрівача виключно на основі комп'ютерного керування ЕРС джерела живлення і реєстрації в послідовні моменти часу одночасно вимірюваних напруг на термозалежному опорі електронагрівача і на послідовному його з'єднанні з термостабілізованим опором.*

**Ключові слова:** електротермічний пристрій, миттєвий стан, програмно-апаратний комплекс, мікро- та нанокомпозит.

### **Вступ**

Відомо, що програмно-апаратні комплекси для дослідження технологій синтезу металокомпозиту [1] і наноструктурних композиційних матеріалів в частині керування енерговиділенням електротермічних пристроїв [2] відносяться до техніки керування і регулювання температури з використанням електричних засобів, зокрема до способів програмного керування температурою об'єкта по заданій програмі. Інтенсивності енерговиділення в таких програмно керуємих електротермічних пристроях, як нагрівачі підкладок для вакуумної конденсації матеріалів, вакуумні випарники матеріалів, анемометричні вимірювачі, нагрівачі транспортуючого газу і приповерхневих шарів металевої стрічки перед інжекцією в її поверхню мікрочастинок, тощо, є технологічними факторами, що визначають як саму можливість, так і продуктивність процесу синтезу наноструктурних композиційних матеріалів.

Для керування виділенням теплової енергії електротермічними пристроями зі зворотнім зв'язком за температурою, що відслідковується, використовуються регулювання параметрів імпульсів силової напруги (амплітуда, тривалість, форма) і їхніх послідовностей (модуляція скважності), в колі змінного струму – регулювання кута вмикання напруги, в колі сталого струму – регулювання напруги [3]. В певній групі автоматичних регуляторів температури

роль чутливого елемента електротермічного пристрою виконує безпосередньо сам нагрівальний елемент, електричний опір якого вимірюють між циклами подачі на нього потужності [4]. До недоліків електронних регуляторів відносяться крім необхідності вимикання подачі потужності до нагрівального елемента на час виміру його електричного опору (для деяких) ще й низька гнучкість відносно формування змінного в часі оперативних режиму керування і реєстрації звітної інформації, що відстежувала б енерговиділення.

Для відстежування енерговиділення доцільно визначення сукупності максимально швидко і порівняно просто вимірюваних, з використанням сучасних периферійних комп'ютерних пристроїв, параметрів, які б характеризували миттєвий стан пристрою, що діагностується. В основу розроблюваного напрямку програмного визначення стану електротермічних пристроїв програмно-апаратного комплексу в процесі їх функціонування укладений принцип сполучення у часі трьох операцій – керування нагріванням, визначення величин термозалежного опору нагрівача і розсіюваної ним теплової потужності.

### Постановка завдання

Необхідність забезпечення оперативності комп'ютерних діагностики стану і керування енерговиділенням електротермічних пристроїв розроблюваних програмно-апаратних дослідницьких комплексів для дослідження і порівняння продуктивностей синтезу металокомпозиту в різних енергетичних умовах призводить до постановки задачі про визначення сукупності параметрів, які б вичерпно характеризували миттєвий стан електротермічного пристрою в довільний момент часу, а також сукупності комфортно комп'ютерно вимірюваних інформативних факторів для плинного розрахунку на їх основі визначених параметрів.

### Керування станом електротермічних пристроїв змінами електрорушійної сили джерела живлення

Виходячи з відтворення в електричному ланцюзі електротермічного пристрою з високою точністю величини електрорушійної сили (ЕРС), яка встановлюється і регулюється сигналом сучасного цифро-аналогового перетворювача (ЦАП), що керується програмно через комп'ютер, використаємо її як визначальну для всіх технологічних характеристик цього пристрою у вже сталих (урівноважених) його станах. Вважатимемо, що зміна величини ЕРС приводить після протікання перехідних процесів до нового рівноважного стану термічного пристрою з новим комплексом значень його характеристик, а також відтворенню цього комплексу характеристик при поверненнях до відповідного значення ЕРС. Припустимо також сталість електричного опору при змінах значень ЕРС тієї частини кола живлення електротермічного пристрою, що істотно не нагрівається.

У випадку забезпечення сталої ЕРС, що діє в замкненому колі послідовно з'єднаних  $R_T$  (електричний опір електротермічного пристрою) і  $r$  (внутрішній опір джерела живлення), повна на них потужність  $P$  (рис. 1, лінія 2), що виділяється, обернено пропорційна сумі цих опорів, а коефіцієнт корисної дії  $\eta$  (ККД), що характеризує частку перетворення повної потужності  $P$  в теплову потужність  $P_T$ , що виділяється на опорі  $R_T$  електротермічного пристрою, нелінійно (рис. 1, лінія 1) залежить від відношення опорів  $\frac{R_T}{r}$ . Це призводить до формування максимуму (що задовольняє умову  $R_T = r$ ) залежно величини потужності  $P_T$  (рис. 1, лінія 3) від відношення  $\frac{R_T}{r}$ .

На рис. 2 наведені розрахункові залежності гріючих лінії 7 – 15 і розсіюваних однаковими по формі стрічковими електронагрівачами різного електричного опору лінії 1 – 6 потужностей  $P$  (нормованих на максимальну), від відношення  $\frac{R_T}{r}$ . Лінії 1 – 6 відповідають наступній добірці значень відношення  $\frac{R_0}{r}$ : 1 – 0,034, 2 – 0,075, 3 – 0,15, 4 – 0,3, 5 – 0,5, 6 – 0,75, де  $R_0$  – величина опору електронагрівника за початкової температури (до першого вмикання струму). Цифрами 7 – 15 позначені залежності від відношення  $\frac{R_T}{r}$  величин гріючих потужностей  $P$  (нормованих на максимальну), що відповідають зменшенню електрорушійної сили  $E$  джерела живлення з кроком 1 В, починаючи з максимальної  $E = 11$  В (лінія 7).

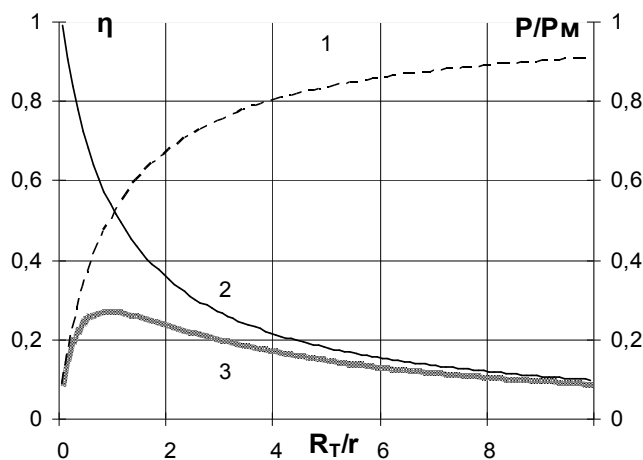


Рис. 1. Коефіцієнт корисної дії (1) і характер зміни повної (2) і корисної (3) потужностей (у відносних координатах, розраховані для певних значень ЕРС і  $r$ ) в колі електронагрівача залежно від параметру  $\frac{R_T}{r}$ .

Графіки, наведені на рис. 2, ілюструють розрахункові залежності теплової потужності, що відводиться переважно випромінюванням в стабілізованих станах стрічковими електронагрівачами з одного матеріалу, які мають майже однакові геометричні розміри і різняться тільки за товщинами. У зазначених умовах варіації товщин нагрівачів визначають варіації початкових (до початку нагрівання) величин їхніх опорів  $R_0$  і відповідних стартових величин параметра  $\frac{R_0}{r}$ .

Миттєвий стан електронагрівника в довільний момент часу вичерпно характеризується точкою на полі графіка рис. 2 у координатах відносної теплової потужності і відношення його опору  $R_T$  до внутрішнього опору  $r$  джерела живлення.

З огляду на те, що у вакуумі тепла потужність розсіюється з електронагрівника переважно випромінюванням з поверхні (визначається законом Стефана-Больцмана з урахуванням селективності поглинальної здатності матеріалу) і тепловідводом через контакти (визначається законом теплопровідності Фур'є), залежність теплової потужності, що розсіюється тим самим нагрівачем у незмінному навколишньому оточенні в стабілізованих станах є функцією температури. Вид цієї функції і числові значення похибки, з якою математична модель описує стаціонарне теплорозсіювання в електронагрівнику,

загалом залежать як від конструктивних особливостей активного елемента електронагрівника (товщина, площа поверхні, форма) так і від матеріалів, які його оточують в реакційній камері (наявність, конфігурація і теплофізичні властивості теплоізоляції, розташування, температури і конфігурації інших термічних елементів, тощо).

З наведених на рис. 2 і рис. 3 залежностей випливає, що саме відношення вихідної величини термозалежного опору електронагрівника до внутрішнього опору джерела живлення є ключовим параметром, який визначає (для кожної пари джерело струму – конструкція електротермічного пристрою) як діапазон можливих величин енерговиділення, так і, як наслідок, діапазон досяжних температур. Узгодженням величин початкового опору ( $R_0$ ) електронагрівника і внутрішнього опору ( $r$ ) джерела живлення можливе керування діапазоном енерговиділення і його оптимізація.

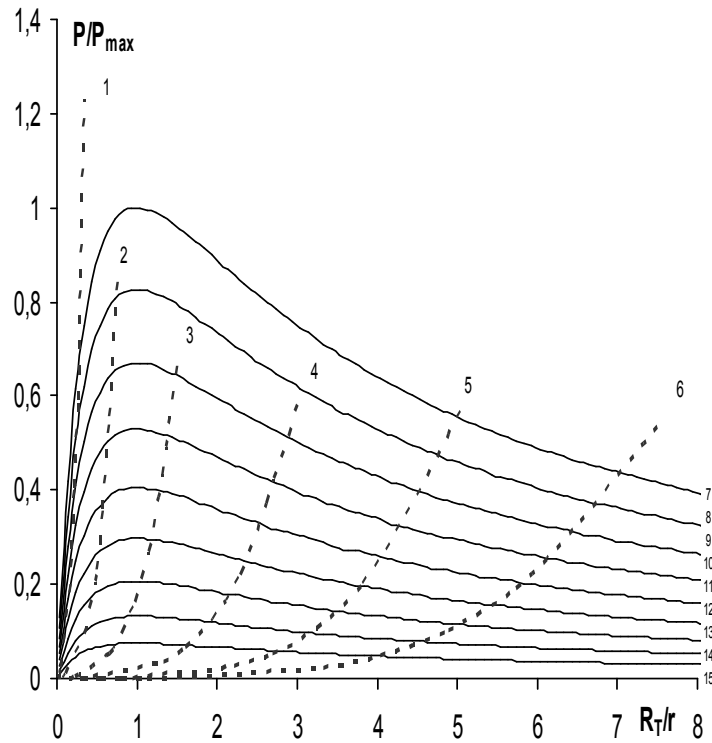


Рис. 2. Залежності гріючих лінії 7 – 15 і розсіюваних однаковими по формі стрічковими електронагрівачами різного електричного опору лінії 1 – 6 потужностей  $P$  (нормованих на максимальну), від відношення  $\frac{R_T}{r}$

Практичне користування параметром  $\frac{R_T}{r}$  ускладнюється необхідністю визначення незалежними попередніми вимірами чисельних значень початкового опору електронагрівника і внутрішнього опору джерела живлення для розрахунку відношення  $\frac{R_0}{r}$ , а також відслідковування в процесі експлуатації електротермічного пристрою чисельних значень плинної температури електронагрівника, яка (з урахуванням температурної залежності опору матеріалу його активного елемента) необхідна для визначення відношення плинних значень опору електронагрівника до внутрішнього опору джерела живлення.

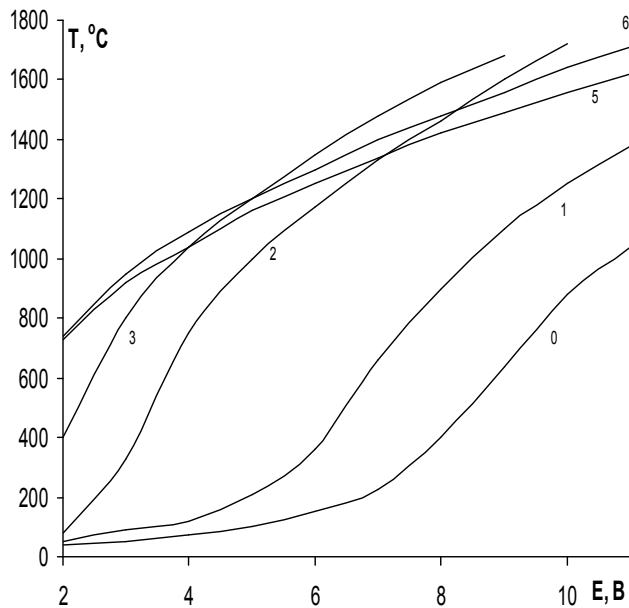


Рис. 3. Усталена температура електронагрівника залежно від величини ЕРС для ряду значень параметру  $\frac{R_0}{r}$  (0 – 0,025, 1 – 0,034, 2 – 0,075, 3 – 0,15, 5 – 0,5, 6 – 0,75).

У зв'язку із вищенаведеним була поставлена задача спрощення визначення миттєвих значень відношення опору електронагрівника до внутрішнього опору джерела живлення через усунення необхідності використання в розрахунках результатів незалежних попередніх вимірів іншими приладами чисельних значень початкового опору  $R_0$  електронагрівника, внутрішнього опору  $r$  джерела живлення і плинних чисельних значень температури електронагрівника.

#### Стан електротермічного пристрою і його оперативне програмне визначення

Для оперативного визначення стану електротермічного пристрою, який може бути вичерпно охарактеризований сукупністю відносної потужності і відношення опору електронагрівника до внутрішнього опору джерела живлення (рис. 2), було розроблено спосіб його програмного визначення [5], який включає комп'ютерне керування електрорушійною силою джерела живлення і базується на одночасних вимірах напруг  $U_T$  на електронагрівникові і  $U_n$  на послідовному його з'єднанні з термостабілізованим електричним опором. Програмне визначення стану електронагрівника може бути здійснено згідно з розробленим способом у такій послідовності. Після вмикання джерела живлення і стабілізації температури електронагрівника в режимі з коефіцієнтом корисної дії, що не перевищує 0,5, перемиканням збільшують електрорушійну силу, реєструють вимірні значення  $U_{T_0}$  і  $U_{n_0}$  відразу після перемикання, вибирають значення  $U_{T_1}$  і  $U_{n_1}$  в режимі з коефіцієнтом корисної дії, що не нижче за 0,5, які задовольняють умові:

$$\frac{U_{T_0}(U_{n_0} - U_{T_0})}{U_{T_1}(U_{n_1} - U_{T_1})} = 1,$$

(1) розраховують параметр:

$$\alpha = \sqrt{\frac{(U_{n1} - U_{T1}) \cdot (U_{n0} - U_{T0})}{U_{T0} \cdot U_{T1}}}$$

(2)

$i$  визначають стан електронагрівника для будь якого  $i$ -го моменту часу сукупністю відносного опору  $\frac{R_i}{r}$  і відносної теплової потужності  $\frac{P_i}{P_{T1}}$ , які програмно розраховуються за формулами:

$$\frac{R_i}{r} = \frac{\alpha \cdot U_{Ti}}{U_{ni} - U_{Ti}} \quad \text{і} \quad \frac{P_i}{P_{T1}} = \frac{U_{Ti} (U_{ni} - U_{Ti})}{U_{T1} (U_{n1} - U_{T1})},$$

(3)

де  $R_i$  – невідомий опір електронагрівника, що відповідає миттєвим значенням вимірюваних напруг  $U_{Ti}$  і  $U_{ni}$ , а  $r$  – невідомий внутрішній опір джерела живлення.

З використанням співвідношень (3) по точках стаціонарного теплорозсіювання з електронагрівника, зафіксованих при різних значеннях електрорушійної сили джерела живлення, встановлюється залежність розсіюваної досліджуванним нагрівачем теплової потужності від параметру  $\frac{R}{r}$  і формулюються висновки щодо можливості і шляхів її оптимізації.

### Висновки

Відношення величин термозалежного опору нагрівника електротермічного пристрою і внутрішнього опору джерела живлення визнано визначальним щодо формування діапазону досяжних величин енерговиділення в активному елементі нагрівника і, як наслідок, діапазону досяжних температур нагрівників програмно-апаратних комплексів для синтезу мікро- та наноструктурних композиційних матеріалів.

Програмне визначення плинного стану електронагрівника електротермічного пристрою може бути реалізоване виключно на основі комп'ютерного керування ЕРС джерела живлення і реєстрації в послідовні моменти часу одночасно вимірюваних напруг  $U_T$  і  $U_n$  на термозалежному опорі електронагрівника і на послідовному його з'єднанні з термостабілізованим (еталонним) опором.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Денисенко А. И. Система автоматизации установки инъекционного формирования металлокомпозиата / А. И. Денисенко, Е. П. Калинушкин // Матеріали XIV Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2007). – Севастополь, 2007, СНУЯЄтаП. – Ч. 1. – С. 136 – 138.
2. Денисенко О. І. Особливості і діагностичні критерії енерговиділення забезпечуючих пристроїв при синтезі наноструктур / О. І. Денисенко, С. О. Денисенко // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики: Збірник наукових праць. – Кривий Ріг. – 2006. – Т. 2. – С. 211 – 215.
3. Денисенко А. И. К управлению греющей мощностью термических устройств для вакуумного синтеза наноструктур / А. И. Денисенко, С. А. Денисенко // Зб. праць II Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні наукові дослідження – ‘2006’”. – 2006. – Т. 16. – С. 8 – 12.
4. Патент 2225993 Российская Федерация, МКИ G 05 D 23/24. Способ регулирования температуры электронагревательных приборов / Ермачков В. В.; заявитель и патентообладатель Ермачков В. В. – № 2002104000/09 ; заявл. 13.02.2002 ; опубл. 20.03.2004, Бюл. №8.
5. Патент 83073 Україна, МПК<sup>7</sup>, G 05 D 23/19, G 05 D 23/20. Спосіб програмного визначення стану електронагрівача / Денисенко О. І., Денисенко С. О., Калинушкін Є. П. ; заявник і патентовласник Національна металургійна академія України. – № а200604659 ; заявл. 26.04.2006 ; опубл. 10.06.2008, Бюл. № 11.

Стаття надійшла до редакції 22.05.2018 р.  
Стаття пройшла рецензування 28.05.2018 р.

*Денисенко Олександр Іванович* – к. т. н., доцент кафедри фізики.  
Національна металургійна академія України.

*Мещанінов Сергій Кармінович* – д. т. н., професор, завідувач кафедри електроніки.  
Дніпровський державний технічний університет.