

## АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕХІДНИМ ПРОЦЕСОМ ЗАВАНТАЖЕННЯ БАГАТОЗОННОГО ТЕРМОАГРЕГАТУ

Запропоновано алгоритм оптимізації процесу термообробки в багатозонній дифузійній печі на основі стохастичної апроксимації одночасним збуренням (SPSA). Розглянуто модуль прогнозуючого управління, модель нагрівника, модуль апроксимації розв'язку крайової задачі, які використовуються алгоритмом оптимізації. Проаналізовано результати проведених експериментів.

### Вступ

Значну проблему мікроелектронної промисловості складає низький відсоток виробництва доброякісних схем-кристалів, з яких складають інтегральні мікросхеми (ІМС) – менше 10%. Високий рівень браку викликаний збільшенням ступеня інтеграції кристалів, яке призводить до різкого росту питомої ваги пошкоджень, пов'язаних з дефектами металізації, дифузії і потраплянням сторонніх частинок в ІМС [1,2]. Операції металізації і дифузії здійснюються в реакторі дифузійної печі при достатньо високих температурах (1000–1300 °С). Точність встановлення і підтримки температури конкретного технологічного процесу значно впливає на якість виконання згаданих операцій, а отже, й на відсоток виходу придатних кристалів [3].

Основними недоліками промислових дифузійних печей, наприклад печі СДО-125/3-12, є похибка підсистеми вимірювання і недосконала структура системи керування температурою. Ці недоліки практично усуваються новою структурою системи регулювання температури дифузійної печі і конструктивними та структурно-алгоритмічними методами, запропонованими в [4].

В даній статті розглядається оптимізація управління процесом завантаження дифузійної печі на основі удосконалення математичної моделі, запропонованої в [4], а також аналізуються отримані практичні результати.

### Постановка задачі

Розглянемо модель процесу завантаження дифузійної печі. Виходячи з того, що конструктивно як заготовка, так і піч є осесиметричними і початкові та граничні умови також забезпечують осьову симетрію, достатньо обмежитися двовимірним простором  $(r, z)$  з віссю симетрії  $A$  (рис. 1). Циліндрична піч  $F$  складається із трьох зон  $Z_1, Z_2$  та  $Z_3$ , кожна з яких обігривається власним нагрівником  $H_i, i = \overline{1,3}$ . Заготовка  $B$  переміщується із зони  $E$  перед піччю в зону  $Z_2$ . Після переходу заготовки із зони  $E$  в зону  $Z_1$ , екран  $S$  закривається, тобто збільшує свої розміри до меж, показаних пунктирною лінією. Від правої стінки печі  $F_R$  подається транспортуючий газ із постійною швидкістю  $\vec{v}_{gas}$ .

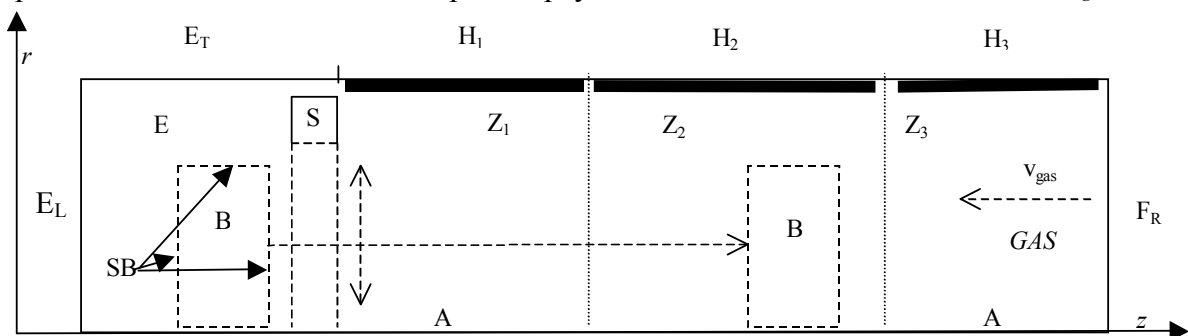


Рис. 1. Геометрія початково-крайової задачі

Поверхнею SB заготовки В простір аналізу розбивається на дві області: заготовки (i=0) та транспортуючого газу (i=1). В кожній із областей розглядається відповідна початково-крайова задача із умовами ідеального контакту на їх межі:

$$r \cdot \rho_0 \cdot c_0 \frac{\partial T_0}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial r} (k_0 \cdot r \cdot \frac{\partial T_0}{\partial r}) - \frac{\partial}{\partial z} (k_0 \cdot r \cdot \frac{\partial T_0}{\partial z}) - v_{gas} \frac{\partial T_0}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$r \cdot \rho_1 \cdot c_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial r} (k_1 \cdot r \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r}) - \frac{\partial}{\partial z} (k_1 \cdot r \cdot \frac{\partial T_1}{\partial z}) = 0, \quad (2)$$

$$T_{0,1}(r, z, 0) = T^0, \quad (3)$$

$$T_1(r, z, \tau) |_{(r,z) \in H_{j_i}} = HT_j(\tau), \quad j = \overline{1,3}, \quad (4)$$

$$T_1(r, z, \tau) |_{(r,z) \in E_L, E_T} = T^0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_1(r, z, \tau)}{\partial n} |_{(r,z) \in A, F_R, S(\tau)} = 0, \quad (6)$$

$$T_1(r, z, \tau) |_{(r,z) \in SB(\tau)} = T_0(r, z, \tau) |_{(r,z) \in SB(\tau)}, \quad (7)$$

$$k_1 \frac{\partial T_1(r, z, \tau)}{\partial n} |_{(r,z) \in SB(\tau)} = k_0 \frac{\partial T_0(r, z, \tau)}{\partial n} |_{(r,z) \in SB(\tau)}, \quad (8)$$

де  $k_0, k_1$  – коефіцієнти теплопровідності,  $\rho_0, \rho_1$  – густина,  $c_0, c_1$  – теплоємність відповідно кремнію і транспортуючого газу,  $T_0$  – температура середовища,  $HT_i(\tau)$  – температура  $i$ -го нагрівника в момент часу  $\tau$ . Оскільки швидкість розповсюдження газу достатньо мала, з метою спрощення постановки задачі знехтуємо нею. На початковій стадії аналізу моделі також не будемо враховувати вплив теплового випромінювання нагрівників.

### Оптимізація температурного режиму

Завдання оптимального управління дифузійним процесом полягає в утримуванні технологічного режиму на заготовці протягом всього часу термообробки. Для виконання цього завдання використано критерій якості, який описується інтегралом по площі кремнієвої пластини:

$$F[HT(\tau)] = \int_{(r,z) \in SB \cap (Z_1 \cup Z_2)} [T_0(r, z, \tau) - T_{opt}]^2 dS \rightarrow \min, \quad (9)$$

де  $(r, z) \in SB \cap (Z_1 \cup Z_2)$  – означає, що кремнієва пластинка  $SB$  знаходиться в зоні  $Z_1$  або  $Z_2$  печі (рис.1),  $T_{opt}$  – температура технологічної обробки. Для визначеності в операціях металізації і дифузії будемо вважати  $T_{opt}$  рівною  $1000^\circ\text{C}$ .

Оптимізація управління за критерієм якості (9) приводить до багатовимірної оптимізації. Один із шляхів боротьби із проблемою багатовимірності оптимізації полягає у використанні стохастичних методів. Тому в запропонованому підході використано відомий алгоритм стохастичної апроксимації одночасним збуренням (SPSA), розроблений американським вченим J. С. Spall [5] із функцією втрат, яка дорівнює згаданому критерію якості. Вектор вхідних параметрів методу формують температури нагрівників  $HT_i(\tau)$ :

$$\overrightarrow{HT}(\tau) = \begin{pmatrix} HT_1(\tau) \\ HT_2(\tau) \\ HT_3(\tau) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

На кожній ітерації матриця вхідних параметрів  $\overrightarrow{HT}(t)$  модифікується аналогічно до методу Ньютона :

$$\vec{HT}^{k+1}(\tau) = \vec{HT}^k(\tau) - a_k \cdot g_k[\vec{HT}^k(\tau)], \quad (11)$$

де  $k$  – ітераційний крок,  $\tau$  – момент часу. Довжини ітераційних кроків вибираються згідно з наступним співвідношенням:

$$a_k = \frac{a}{(A + k + 1)^\beta}, \quad (12)$$

де  $a, \beta, A$  – параметри методу, що підлягають оцінці.

Напрямок пошуку  $g$  оптимізації функції втрат  $F$  оцінюємо наступною різницевою апроксимацією градієнта із використанням випадкового напрямку  $\vec{\Delta}_k$ :

$$g_k[\vec{HT}^k(\tau)] = \frac{F(\vec{HT}^k(\tau) + c_k \vec{\Delta}_k) - F(\vec{HT}^k(\tau) - c_k \vec{\Delta}_k)}{2c_k} \cdot \begin{bmatrix} \Delta_{k1}^{-1} \\ \Delta_{k2}^{-1} \\ \Delta_{k3}^{-1} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Крок приросту аргументів визначається із спадної послідовності:

$$c_k = \frac{c}{(k + 1)^\gamma}, \quad (14)$$

де  $c, \gamma$  – коефіцієнти методу. Координати вектора одночасних перетворень (Simultaneous Perturbation)  $\vec{\Delta}_k$  формуються із дискретних випадкових величин, що з однаковою імовірністю приймають значення  $-1$  або  $+1$ :

$$\Delta_{ki} = rand[-1;1]. \quad (15)$$

На основі описаного методу SPSA неважко побудувати алгоритм оптимізації завантаження дифузійної печі згідно з критерієм якості (9) (див рис.2). Динамічність процесу зумовлюється рухом заготовки всередині печі, що приводить до зміни геометрії початково-крайової задачі (1)-(8). Тому часовий період, відведений для процесу завантаження,

процесу завантаження, покривається рівномірною сіткою вузлів, в кожному з яких розв'язується своя оптимізаційна задача щодо температур нагрівників печі на основі розв'язку початково-крайової задачі (1)-(8). Початковими умовами крайової задачі в першій часовій точці служать початкові умови задачі (1)-(8), а в наступних часових точках початковий розподіл температур прирівнюється до температурного розподілу, отриманого на попередньому кроці.

Розв'язання кожної оптимізаційної задачі методом SPSA розпочинається із присвоєння початкових стандартних значень керуючим параметрам. Далі, згідно зі співвідношенням (15), гене



Рис. 2. Алгоритм управління перехідним процесом з оптимізацією температурного режиму

рується випадковий вектор збурень керуючих параметрів та обчислюється пара значень функції втрат, за допомогою якої згідно зі співвідношеннями (11)-(13) уточнюються значення керуючих параметрів. Ітераційне уточнення відбувається деяке наперед задане число разів.

Ключовим елементом описаного алгоритму служить процедура обчислення функції втрат. Вона базується на програмному засобі PDE Toolbox пакету MatLab. Для використання стандартної процедури пакету, що розв'язує початково-крайові задачі методом скінченних елементів, необхідно конкретизувати геометрію задачі, яка визначається положенням заготовки, значення керуючих параметрів, які поступають від алгоритму SPSA, та початкові умови, які визначаються в попередній часовій точці (рис. 2).

Оптимізаційний алгоритм, який розглянуто вище, можна вдосконалити, заклавши в нього ковзаючу одночасну оптимізацію в  $n+1$  часових точках. Це приведе до росту обчислювальних затрат, оскільки на кожному кроці, крім оптимізації його параметрів управління, доведеться додатково підбирати параметри ще для  $n$  точок. Однак така модифікація алгоритму надає оптимізації певні прогностичні властивості та дозволяє уникнути явища перерегулювання, що буде продемонстровано на подальших чисельних прикладах. При даній модифікації алгоритму вектор вхідних параметрів SPSA розширюють до матриці:

$$\vec{HT}(\tau) = \begin{pmatrix} HT_1(\tau) & HT_1(\tau + \Delta\tau) & \dots & HT_1(\tau + n\Delta\tau) \\ HT_2(\tau) & HT_2(\tau + \Delta\tau) & \dots & HT_2(\tau + n\Delta\tau) \\ HT_3(\tau) & HT_3(\tau + \Delta\tau) & \dots & HT_3(\tau + n\Delta\tau) \end{pmatrix}. \quad (16)$$

### Модель резистивного нагрівника

Значним недоліком описаної моделі управління є відсутність обмежень щодо динаміки нагрівання і охолодження нагрівника при оптимізації. Така модель може дати результати, які неможливо відтворити на справжній печі. Одним із способів виправлення цього недоліку є заміна прямого управління температурою нагрівника на опосередковане управління, що враховує інерційність його розігріву та охолодження.

Розігрів нагрівника відбувається внаслідок збільшення його внутрішньої енергії при подачі електричного струму. Згідно з законом Джоуля-Ленца:

$$Q_i^+(\tau) = I_i(\tau)^2 \cdot R_i \cdot \Delta\tau, \quad (17)$$

де  $Q_i^+(\tau)$  – приріст внутрішньої енергії  $i$ -го нагрівника (Дж),  $I_i(\tau)$  – сила струму, яка подається на  $i$ -й нагрівник (А),  $R_i$  – опір обмотки  $i$ -го нагрівника (Ом),  $\Delta\tau$  – тривалість дискретного відрізка часу (сек.). Внаслідок теплообміну нагрівник охолоджується, тобто втрачає внутрішню енергію:

$$Q_i^-(\tau) = -k \frac{T_i(\tau - \Delta\tau) - T^0}{d} \cdot 2\pi r l \cdot \Delta\tau, \quad (18)$$

де  $Q_i^-(\tau)$  – зміна внутрішньої енергії  $i$ -го нагрівника внаслідок теплообміну (Дж),  $k$  – коефіцієнт теплопровідності обшивки печі ( $\frac{Bm}{m \cdot ^\circ C}$ ),  $d$  – товщина обшивки печі (м),  $T_i$  – температура  $i$ -го нагрівника ( $^\circ C$ ),  $r, l$  – радіус та довжина зони циліндричної печі (м),  $\Delta\tau$  – тривалість дискретного відрізка часу (сек.).

Згідно з формулою Джоуля:

$$\Delta T_i(\tau) = \frac{Q_i^+(\tau) + Q_i^-(\tau)}{c_i \cdot m_i}, \quad (19)$$

де  $c_i$  – питома теплоємність  $i$ -го нагрівника (Дж / (кг · °C)),  $m_i$  – маса  $i$ -го нагрівника (кг),  $\Delta T_i(\tau)$  – зміна температури  $i$ -го нагрівника (°C). На основі останнього співвідношення визначаємо температури нагрівників:

$$HT_i(\tau) = HT_i(\tau - \Delta\tau) + \Delta T_i(\tau). \quad (20)$$

За формулами (17)-(20) можна визначити температуру нагрівника в кожен момент часу в залежності від струму, який проходить по його обмотці. При цьому матриця вхідних параметрів алгоритму SPSA замість значень температур нагрівника міститиме значення сил струму, що подаються на нагрівники:

$$\overrightarrow{HT}(\tau) = \begin{pmatrix} I_1(\tau) I_1(\tau + \Delta\tau) & \dots & I_1(\tau + n\Delta\tau) \\ I_2(\tau) I_2(\tau + \Delta\tau) & \dots & I_2(\tau + n\Delta\tau) \\ I_3(\tau) I_3(\tau + \Delta\tau) & \dots & I_3(\tau + n\Delta\tau) \end{pmatrix}, \quad (21)$$

і алгоритм оптимізації будуватиме оптимальне управління силами струму на них.

### Апроксимація розв’язків допоміжних задач

Важливою проблемою побудованих модифікацій оптимізаційних прогнозуючих алгоритмів є значні затрати часу розв’язку задачі. Вони обумовлені тим, що крім оптимізації функціоналу якості в поточній точці, ця оптимізація проводиться на кожному прогнозованому кроці. Оптимізація ж функціоналу за допомогою алгоритму SPSA на кожному кроці вимагає багаторазового розв’язку задач в частинних похідних (partial differential equations - PDE). Уникнути повторного розв’язання задач в частинних похідних можна за рахунок побудови апроксимації значень функціоналу якості управління (тобто функції втрат в термінології SPSA).

Зрозуміло, що побудова самої апроксимації змушує розв’язувати велику кількість PDE задач. Але після цього розв’язання оптимізаційної задачі радикально пришвидшиться. Такий підхід робить прийнятною процедуру підбору численних параметрів оптимізаційного алгоритму в ході чисельних експериментів.

Значення функціоналу якості в кожній часовій точці визначається розподілом температурного поля на заготовці. Цей розподіл обумовлений положенням заготовки в печі (тобто часом її руху) та розподілом температурного поля в печі. Останній обумовлений температурним полем в попередній момент часу а також поточним значенням струму, що подається на нагрівник. На основі цих міркувань степеневу апроксимацію функції втрат можна будувати в наступному виді:

$$F[HT(\tau - \Delta\tau), I] = \int_{(r,z) \in SB \cap (Z_1 \cup Z_2)} [T_0(r, z, \tau) - T_{opt}]^2 dS \approx \\ \approx a_0(HT(\tau - \Delta\tau)) + a_1(HT(\tau - \Delta\tau)) \cdot I + \dots + a_k(HT(\tau - \Delta\tau)) \cdot I^k. \quad (22)$$

Для побудови апроксимації діапазони допустимих значень температури нагрівників, сил струму на них та часу завантаження заготовки покриваємо рівномірними сітками. В кожній часовій точці для кожного значення температури нагрівників в попередній момент часу розглядаємо допустимі значення сил струму. Кожний із температур в момент часу  $\tau - \Delta\tau$  відповідає розподіл теплового поля всередині печі, який для першої часової точки береться з початкової умови, а для наступних часових точок - із розв’язання відповідної PDE задачі.

На основі попереднього значення температури нагрівників та поточних сил струму на них обчислюється поточна температура нагрівника, тобто граничні умови для нової PDE задачі. При цьому положення заготовки відповідно перераховуються. Після розв’язання всіх PDE задач для деякої часової точки аналізуються отримані температури нагрівників. Температурний розподіл всередині печі для того із значень, що найближче до певної вузлової температури нагрівника, асоціюється із нею. Таким

чином, в кожній часовій точці фіксується постійна кількість вузлових температур, розподілів температурних полів та сил струмів, які подаються на нагрівник. Для цих значень на основі розв’язку відповідної PDE задачі обчислюється значення критерію якості.

Таким чином, набирається експериментальна база для побудови апроксимації (22) методом найменших квадратів. В результаті для кожної часової точки  $\tau_s$  та фіксованої температури нагрівника  $HT_m$  будується набір апроксимаційних коефіцієнтів  $\{a_l^{s,m}\}_{l=0}^k$ . При наближенні функціоналу якості в часовій точці  $\tau_s$  і значенні температури нагрівника  $HT \in [HT_{m-1}, HT_m]$  використовується лінійна інтерполяція виду:

$$F[HT(\tau_{s-1}), I] = \gamma_0 \cdot P_k^{s,m-1}(I) + \gamma_1 \cdot P_k^{s,m}(I), \quad (23)$$

де

$$P_k^{s,m} = a_0^{s,m} + a_1^{s,m} \cdot I + \dots + a_k^{s,m} \cdot I^k, \quad (24)$$

$$\begin{cases} \gamma_0 = \frac{HT_m - HT}{HT_m - HT_{m-1}}; \\ \gamma_1 = \frac{HT - HT_{m-1}}{HT_m - HT_{m-1}}. \end{cases} \quad (25)$$

### Результати експериментів

Описані варіанти оптимізаційного алгоритму програмно реалізовані за допомогою інструментального засобу PDE Toolbox в пакеті MatLab. В проведених експериментах швидкість руху пластини дорівнює  $v = 2$  мм/сек, температура середовища  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ . Режим прогрівання заготовки без оптимізації досягнуто при значеннях,  $HT_1 = HT_2 = HT_3 = 1000^\circ\text{C} = \text{const}$ .

Під час експериментів виявилось, що пряма оптимізація температури нагрівників дифузійної печі вимагає різких змін цієї температури. Таку швидкість перепадів температур в справжній печі забезпечити вкрай проблематично. Цей висновок ілюструють графіки зміни температури нагрівника та заготовки, подані на рис.3, 4.

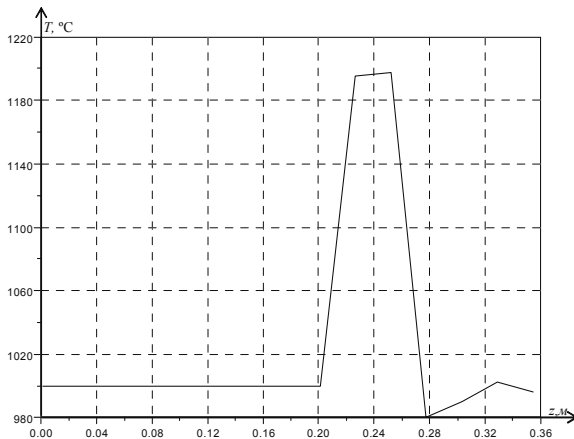


Рис. 3. Динаміка зміни температури нагрівника

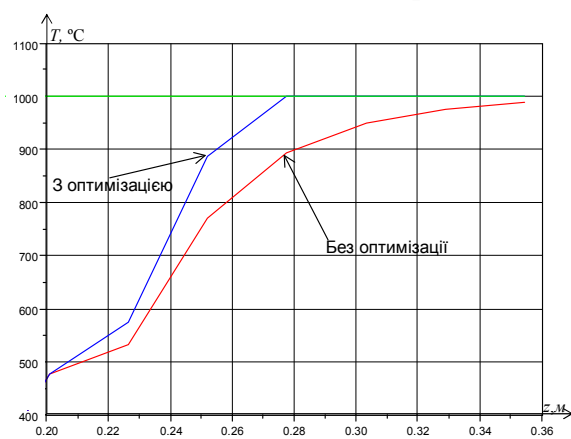


Рис. 4. Зміна температури на заготовці

Було здійснено спробу усунути стрибкоподібну зміну температури нагрівника (амплітуда  $218.5^\circ\text{C}$  (див.рис.3)) за допомогою включення в оптимізаційний алгоритм прогнозних кроків. Проведені експерименти з 4-кроковим прогнозним алгоритмом виявили не зменшення, а збільшення перепадів та появу осциляцій (рис. 5), при ефективнішому виході на технологічну температуру (рис. 6) в порівнянні з попереднім підходом.

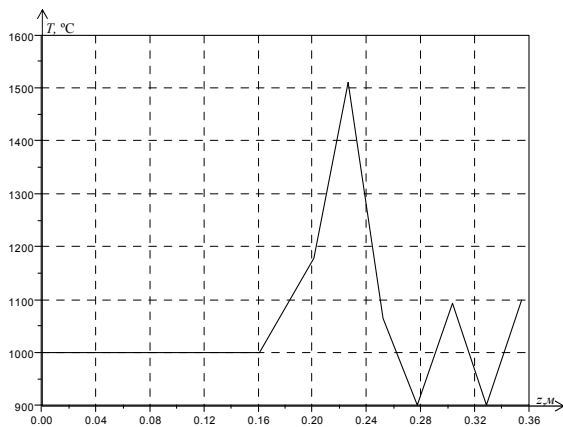


Рис. 5. Динаміка зміни температури на нагрівнику з 4-ма прогнозними кроками

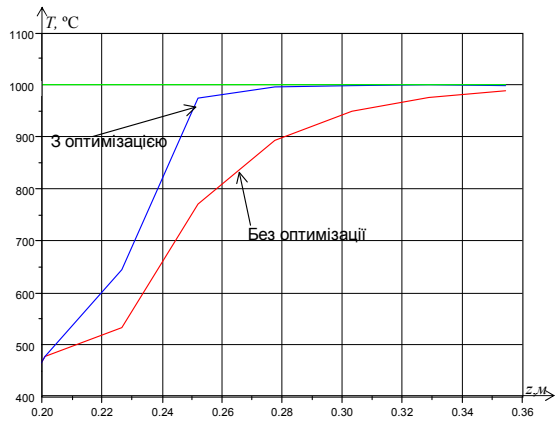


Рис. 6. Зміна температури на заготовці з 4-ма прогнозними кроками

Введення в оптимізаційний алгоритм моделі нагрівника призвело до усунення перепадів температур та осциляцій (рис.7, 9). При оптимізації з моделлю нагрівника більший перепад спостерігається при нагріванні, а не при охолодженні (як в двох попередніх випадках), що відповідає фізичній природі процесу. Однак використання моделі нагрівника без прогнозуючих співвідношень приводить до перегрівання заготовки (рис. 8).

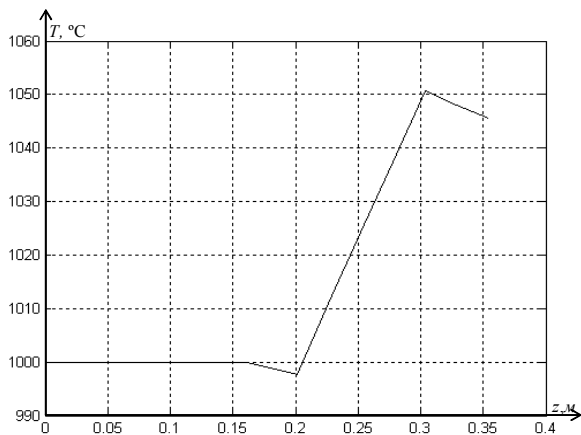


Рис. 7. Динаміка зміни температури нагрівника з моделлю нагрівника без прогнозу

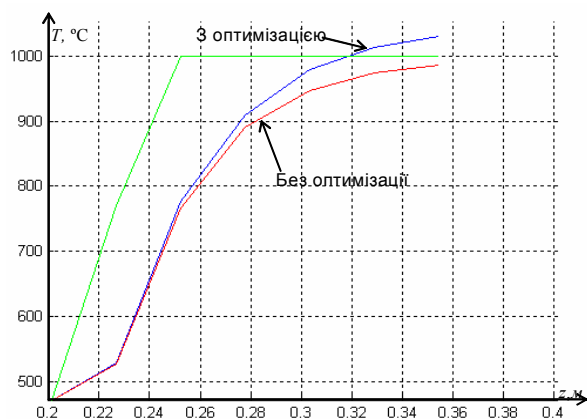


Рис. 8. Зміна температури на заготовці з моделлю нагрівника без прогнозу

На рис.11 показано графік сили струму, що відповідає температурному режиму нагрівника, який подано на рис.9, а детальний аналіз динаміки цього температурного режиму подано в таблиці 1.

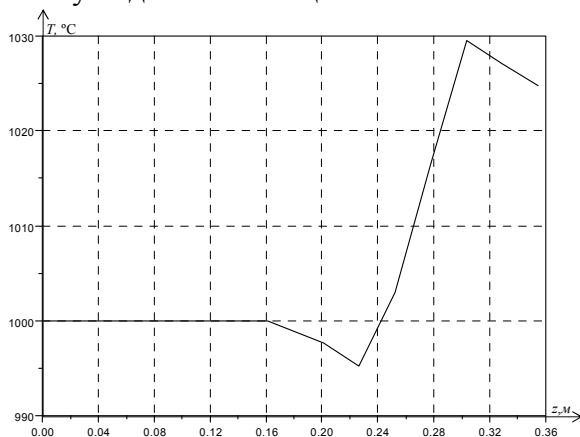


Рис. 9. Динаміка зміни температури на нагрівнику з моделлю нагрівника та 4-кроковим прогнозом наступних станів

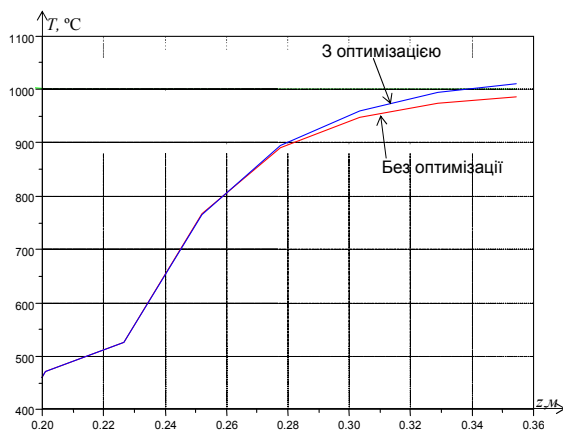


Рис. 10. Зміна температури на заготовці з моделлю нагрівника та 4-кроковим прогнозом наступних станів

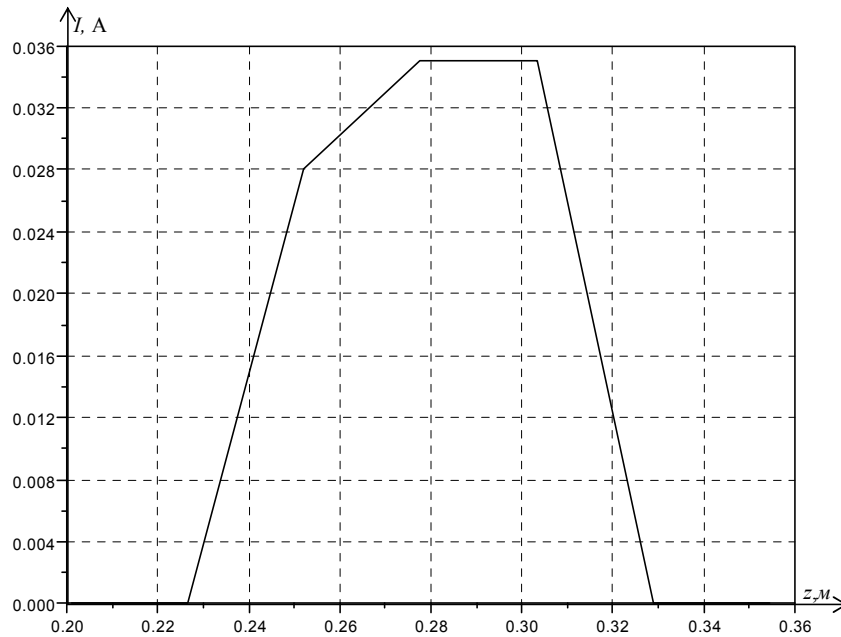


Рис. 11. Динаміка сили струму, яка подається на резистивний нагрівник

Таблиця 1

Температурна динаміка резистивної моделі нагрівника із прогнозними кроками

$s$	$HT_1(\tau_s), ^\circ\text{C}$	$\frac{\Delta HT_{1,s} = HT_1(\tau_s) - HT_1(\tau_{s-1})}{HT_1(\tau_{s-1}), ^\circ\text{C}}$	$\Delta\tau, \text{сек.}$	$\frac{\Delta HT_{1,s}}{\Delta\tau}, (^{\circ}\text{C} / \text{сек})$
1	1000	-	23,5294	-
2	1000	0	23,5294	0
3	1000	0	23,5294	0
4	1000	0	23,5294	0
5	1000	0	23,5294	0
6	997,649825	-2,35018	15,042	-0,15624
7	995,305173	-2,34465	15,042	-0,15587
8	1003,020601	7,715428	15,042	0,512926
9	1016,291473	13,27087	15,042	0,882254
10	1029,531156	13,23968	15,042	0,880181
11	1027,111578	-2,41958	15,042	-0,16085
12	1024,697685	-2,41389	15,042	-0,16048

Порівняти результати чотирьох запропонованих моделей можна, записавши в таблицю  $z$ -позиції виходу на технологічну температуру і максимальні перепади температур нагрівника в сусідніх часових вузлах (табл. 2).

Таблиця 2

Оцінка результатів розглянутих варіантів оптимізаційних алгоритмів

прогнозн ний алгоритм	модель нагрівни ка	$z$ -позиція виходу на технологічну температуру, м	Максимальний. Перепад температур нагрівника при охолодженні, $^{\circ}\text{C}$	Максимальний перепад температур нагрівника при нагріванні, $^{\circ}\text{C}$
-	-	0.278 (рис. 4)	-218.5 (рис. 3)	197 (рис. 3)
+	-	0.278 (рис. 6)	-451 (рис. 5)	321 (рис. 5)
-	+	перегрів		
+	+	0.338 (рис. 10)	-2,42 (рис.9)	13,27 (рис.9)



Аналіз таблиці показує, що використання прогнозного алгоритму збільшило максимальний перепад температур при охолодженні з  $-218.5$  до  $-451$  °С, а використання моделі нагрівника призвело до перегрівання заготовки.

Поєднання прогнозного алгоритму з моделлю нагрівника забезпечило вихід на технологічну температуру і вилучило ефект стрибків та осциляцій температури нагрівника.

### **Висновки**

Розроблено алгоритм управління перехідним процесом завантаження кремнієвої заготовки в дифузійну піч. Алгоритм реалізовано з використанням модуля прогнозного управління, моделі нагрівника та оптимізаційного алгоритму стохастичної апроксимації одночасним збуренням (SPSA).

Проведені експерименти показали, що лише поєднання резистивної моделі нагрівника із ковзним часовим інтервалом оптимізації (тобто прогнозними кроками) дозволяє отримати результати, що адекватні діючим процесам дифузійної печі. З метою пришвидшення оптимізації в алгоритм введено апроксимаційний підхід до розв'язку крайових задач на прогнозних кроках. Це дозволило в десятки разів скоротити час обчислень, що сприяє ефективному проведенню чисельних експериментів. В подальших дослідженнях передбачається використання інших оптимізуючих процедур та врахування нелінійних ефектів при високих температурах печі.

Описані дослідження проведені під час виконання проекту PST.CLG.977647 "Development of Precision Control System for Thermal Objects Control", який фінансується НАТО згідно з грантом Linkage Collaborative Grants Program.

*An algorithm for optimal heat treatment in multizone diffusive furnace was offered. The algorithm is based on the simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA). A module of forecasting control, a heater model, an approximation module for the initial-boundary value problem are considered. The results of conducted experiments are analysed.*

### **Література**

1. Эндерлайн, Рольф. Микроэлектроника для всех: Введение в мир интеграл. микросхем: основы функционирования, технология изготовления и применение / перевод с нем. Ю. А. Севастьянова; под ред. И. М. Ишдилькова – М.: Мир, 1989. – 190 с., ил.
2. Фомин А.В. и др. Технология, надежность и автоматизация производства БГИС и микросборок: Учеб. пособие для вузов/ А.В.Фомин, Ю.И.Боченков, В.А.Сорокопуд; Под ред.А.В.Фомина. – М.: Радио и связь, 1981. – 352 с., ил.
3. Блинов И.Г., Кожитов Л.В. Оборудование полупроводникового производства. – М.: Машиностроение, 1986. – 264с.
4. Дерлиця М.Й., Піговський Ю.Р., Пасічник Р.М., Кочан В.В.. Вдосконалена система керування багатозонними термоагрегатами // Вісник технічного університету Поділля. Науковий журнал 2.2004. Частина 1. Том 1. – Технічні науки. Хмельницький державний університет, 2004. С. 30-33.
5. Spall J. C. Implementation of the simultaneous perturbation algorithm for stochastic optimization. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 34, 1998, pp. 817-823.

*Одержано 20.12.2004 р.*