

## **ВИБІР МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОМАТИЧНОЮ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНОЮ ЛІНІЄЮ ОБРОБКИ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ**

### **1. Вступ**

Процес термічної обробки залежить від цілої групи різних по своєму фізичному сенсу, але взаємозв'язаних параметрів тих, що впливають на якість продукції, що виготовляється. Як об'єкт управління електротермічна лінія розпадається на множину менших об'єктів, кожен з яких пов'язаний з останніми. Електротермічну лінію складно однозначно віднести до дискретних або безперервних систем, оскільки в електротермічній лінії протікають як дискретні процеси, так і безперервні. Відзначимо, що безперервними процесами в системі є процеси, пов'язані із зміною температур і швидкостей, тобто робота двигунів конвеєрів і нагрівачів в печах. Решта всіх процесів (відкриття/закриття клапанів, заслінок гартівної печі, вкл/викл будь-яких пристроїв електротермічної лінії) є дискретними.

Більшість процесів що протікають в пристроях електротермічної лінії, є дискретними. Очевидно, що для управління пристроями лінії слід застосувати дискретно-логічне управління, оскільки для будь-якого пристрою електротермічної лінії є група дискретних станів, в яких воно може знаходитися, а переходи між станами відбуваються за умовами, які можна представити тільки як дискретні сигнали.

### **2. Огляд літературних джерел та постановка задачі дослідження**

Залежно від задачі, що вирішується, для синтезу логічного апарату можна застосувати наступні методи логічного синтезу: метод синтезу дискретно-логічних систем управління на основі циклограм роботи механізмів і метод орієнтованих графів [1, 2]. Застосовуватимемо як основний – метод орієнтованих графів і теорію кінцевих автоматів [3], оскільки при синтезі логічного апарату на основі циклограм неможливо врахувати аварійні стани об'єкту і отже отримати повні алгоритми роботи пристроїв для будь-яких ситуацій можливих в роботі.

Систему логічного управління можна представити за допомогою двох взаємодіючих моделей: моделі керованої системи (у нашому випадку пристроїв електротермічної лінії) моделі системи управління (АСУ ЕЛТА). Алгоритм логічного управління синтезується по моделі поведінки об'єкту управління. Можна використовувати наступну послідовність синтезу алгоритму управління:

- моделювання поведінки об'єкту управління;
- опис зв'язку змінних моделі поведінки об'єкту і пристрою управління;
- синтез алгоритму логічного управління як моделі поведінки пристрою управління.

### **3. Вибір методів управління пристроями електротермічної лінії**

Виберемо як апарат моделювання поведінки ОУ теорію кінцевих автоматів, в якій

кінцевий автомат представляється кортежем множин:

$$\langle X, S, Y, f_{\text{перех}}, f_{\text{вих}} \rangle;$$

де  $X$  – множина вхідних змінних;  $S$  – множина внутрішніх змінних стану;  $Y$  – множина вихідних змінних;  $F_{\text{перех}}$  – функція переходів;  $F_{\text{вих}}$  – функція виходів.

Таким чином, моделювання поведінки об'єкту управління зведеться до перерахування множин  $X, Y, S$  і визначенню функцій переходів і виходів.

Стани елементів електротермічної лінії залежать від внутрішніх станів пристроїв і вхідних змінних, для опису таких об'єктів застосовується кінцевий автомат четвертого роду – автомат Міллі.

Структура автомата Міллі представлена на рис. 1.

Використовуємо поняття «стан», «підстан» і «спостереження» при складанні алгоритмів, для того, щоб наочно представляти поведінку автоматів, що управляють, і композицій з них. У роботі розглядатимемо два види станів:

- бажані, тобто стани пов'язані з нормальною роботою системи;
- аварійні, пов'язані з порушенням алгоритмів нормальної роботи електротермічної лінії.

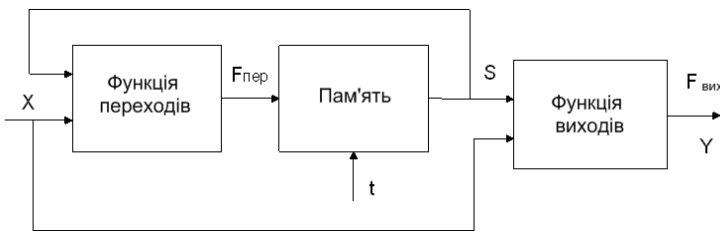


Рис. 1 – Автомат Міллі

Найбільш важливим завданням при проектуванні системи автоматизації електротермічною лінією є управління температурою, оскільки якість оброблюваної продукції, безпосередньо пов'язаний з точність підтримки температури в

гартівній і відпускній печах. Для того, щоб визначити характер процесів нагріву, що протікають в печах і оцінити їх якість, необхідно побудувати математичну модель нагріву.

Для побудови моделі розглянемо гартівну піч як об'єкт управління. Гартівна піч складається з трьох зон нагріву, в кожній з яких повинна підтримувати постійна температура. У кожній із зон нагріву розташовується нагрівач, чий спіралі розташовуються на стінах печі. Через всі зони печі рухається конвеєр. Кожна із зон нагріву гартівної печі можна представити як теплову систему, що складається з нагрівача, атмосфери зони, стінок печі. Оскільки зони нагріву гартівної печі майже ідентичні, досить побудувати модель однієї зони гартівної печі.

$$\Phi_u dt = C_T \cdot dT, \quad (1)$$

де  $C_T$  – питома теплоємність речовини в якому розповсюджується тепловий потік  $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$ ;  $\Phi_i$  – тепловий потік витрачається на нагрів речовини,  $Дж/с$ .

Компонентне рівняння дисипативного елемента для теплової системи в загальному випадку виглядає таким чином:

$$\Phi_\partial = \mu_T \cdot T_\partial, \quad (2)$$

де  $T_\partial$  – різниця між температурою тіла, що нагрівається, і температурою середовища у яку

розсівається теплова енергія  $^{\circ}C$ ;  $mT$  – коефіцієнт конвективного теплообміну  $\frac{Дж}{c \cdot ^{\circ}C}$ ;  $\Phi_0$  – тепловий потік, що розсіюється нагрітим тілом,  $Дж/с$ .

На поверхнях контакту твердого тіла з рідинним або газовим середовищем здійснюється конвективний теплообмін. Для конвективного теплообміну коефіцієнт теплового опору визначається по формулі:

$$\mu_T = \alpha A, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт конвективного теплообміну  $\frac{Вт}{м^2 \cdot ^{\circ}C}$ ;  $A$  – площа контакту твердого тіла з газом або рідиною,  $м^2$ .

Для отримання повної математичної моделі технічної системи необхідно об'єднати всі компонентні рівняння елементів в загальну систему рівнянь. Об'єднання здійснюється на основі фізичних законів тих, що виражають, умови рівноваги і безперервності фізичних змінних. Рівняння цих законів називають топологічними рівняннями. Вони описують характер взаємодії між простими елементами, встановлюючи співвідношення між однотипними змінними.

Умови рівноваги записуються для фазової змінної типу потенціалу (у даній системі температура):

$$\sum_k T_k = 0, \quad (4)$$

Умови безперервності – для змінних типу потоку (для даної системи тепловий потік):

$$\sum_i \Phi_i = 0, \quad (5).$$

Для побудови моделі скористаємося методом електроаналогій [4, 5]. Метод електроаналогії – це один з методів імітаційного моделювання що спирається на одноманітність фізичних законів. Оскільки саме електричні схеми володіють найбільшою наочністю і вивченою, то завдяки єдності форми рівнянь математичного представлення об'єктів різної фізичної природи, дослідження явищ в неелектричній системі може бути замінене дослідженням процесів в електричному ланцюзі. Порівнюючи компонентні і топологічні рівняння можна відзначити очевидність динамічних аналогій між тепловою і електричною системами. Для топологічних рівнянь теплової системи аналогами є закони Кірхгофа. Для компонентних рівнянь теплової системи - закон Ома і рівняння конденсатора:

$$U_y = \frac{1}{C} \cdot \int i_y dt, \quad (6)$$

де  $U_y$  – напруга,  $В$ ;  $I$  – струм,  $А$ ;  $C$  – ємність,  $мкФ$ .

В результаті моделювання були отримані графіки перехідного процесу регулювання температури, що протікає в замкнутому контурі, в зоні нагріву гартівної печі, при нагріві від температури цеху до мінімальної робочої ( $810^{\circ}C$ ). Графік перехідного процесу в системі при нагріві представлений на рис. 2.

З графіка можна визначити, що час нагріву печі від початкової температури

(температура в цеху) до мінімальної робочої температури складає близько двох з половиною годин. Перерегулювання відсутнє.

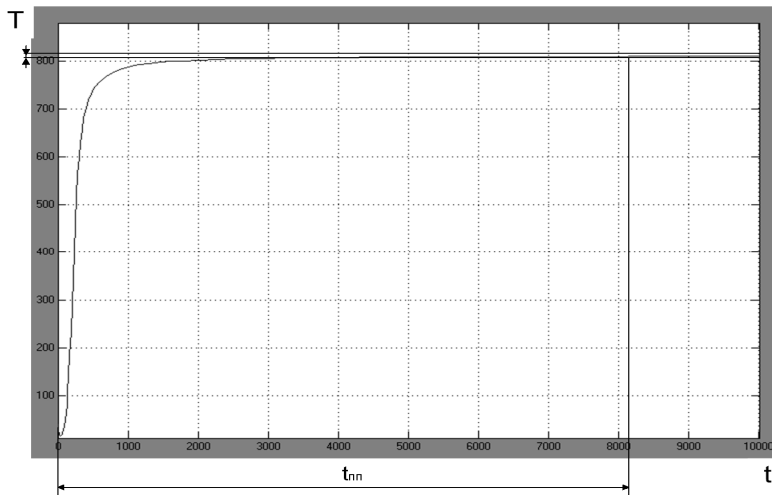


Рис. 2 – Графіки переходного процесу в зоні нагріву гартівної печі

Розглянемо також перехідні процеси, що протікають в системі при появі збурюючих дій. Як збурюючі дії виступають зниження температури в печі, пов'язані з втратою тепла при відкритті заслінок шлюзування, з метою завантаження деталей в піч. Втрати тепла при одноразовому відкритті заслінок шлюзування малі, але оскільки відкриття заслінок шлюзування

відбувається багато разів, то слід упевнитися в тому що температура в печі не вийде за допустимі межі ( $\pm 5^\circ\text{C}$  від сталого значення). Процеси, що протікають в системі при подачі таких збурень, представлені на рис. 3.

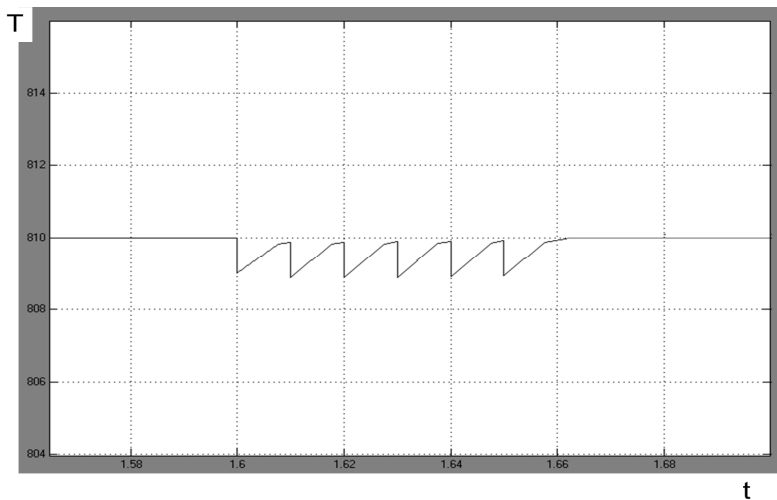


Рис. 3 – Перехідний процес, що протікає в системі при появі збурюючих дій

Відзначимо, що при появі серії стрибкоподібних збурень температура в печі не вийшла за межі допустимих значень ( $\pm 5^\circ\text{C}$  від сталого значення).

Спираючись на отримані характеристики можна зробити висновок, що система не потребує застосування додаткового регулятора, оскільки показники якості процесу цілком задовольняють вимогам, вказаним в технічному завданні. Для

управління температурою доцільно буде застосувати широтно-імпульсне регулювання, оскільки широтно-імпульсне регулювання дозволяє забезпечити високу плавність регулювання [1].

Імпульсні методи регулювання засновані на зміні кількості енергії, що підводиться до об'єкту управління (у нашому випадку до нагрівача). В цьому випадку до нагрівача підводиться послідовність імпульсів незмінної напруги ( $U$ ) і робота нагрівача складається з періодів  $T$  (нагрівачу – охолодження). Необхідний нагрів повинен відповідати середньому значенню за період  $T$  і визначатиметься відносною тривалістю включення (шпаруватістю) імпульсів грамом:

$$\gamma = \frac{t_{II}}{t_{II} + t_{II}} = \frac{t_{II}}{T}, \quad (7)$$

де  $t_{II}$  – тривалість імпульсу;  $t_{II}$  – тривалість паузи.

При імпульсному управлінні миттєве значення теплового потоку безперервно коливатиметься в певних межах. При цьому розмах коливань буде тим менше, чим більше теплоємності до періоду проходження імпульсів. Отже, із зростанням частоти імпульсів, що управляють, розмах коливань теплового потоку зменшується. Відзначимо, що середнє значення теплового при цьому залишається незмінним, що найбільш важливе з погляду підтримки температури в печі. Воно може бути змінене тільки шляхом зміни шпаруватості імпульсів  $\gamma$  за рахунок зміни їх тривалості (7). Із зростанням шпаруватості імпульсів, що подаються на нагрівач, середнє значення температури в печі також росте.

У електротермічній лінії застосовуються асинхронні двигуни, це обумовлено рядом переваг асинхронних двигунів, таких як висока надійність, низька вартість, простота виготовлення і експлуатації [1].

З теорії електроприводу відомо, що швидкість обертання валу асинхронного двигуна залежить від конструктивних параметрів електродвигуна, моменту навантаження і частоти напруги живлячої мережі, це витікає з рівнянь механічної характеристики асинхронного двигуна (8) і формули (9):

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2] \cdot s}, \quad (8)$$

де  $\omega_0$  – синхронна кутова швидкість (швидкість холостого ходу), рад/с;  $U_{\phi}$  – первинна фазна напруга, В;  $X_1$  – первинний приведений реактивний опір, Ом;  $X_2'$  – вторинний приведений реактивний опір, Ом;  $R_1$  – первинний приведений активний опір, Ом;  $R_2'$  – вторинний приведений активний опір, Ом;

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (9)$$

де  $s$  – ковзання;  $p$  – число пар полюсів асинхронного двигуна;  $f$  – частота живлячої мережі, Гц.

Очевидно, для отримання якісного регулювання необхідно змінювати останній параметр, тобто частоту живлення. Для цієї мети застосовуються перетворювачі частоти. Перетворювач частоти – це пристрій, що перетворює електричну енергію з параметрами  $U_1$ ,  $f_1$  (у нашому випадку 380 В, 50 Гц) в електричну енергію з параметрами  $U_2$ ,  $f_2$ . Частотні перетворювачі можна розділити на перетворювачі частоти з скалярним і векторним управлінням. Таке ділення обумовлене необхідністю, управляти не тільки частотою на виході перетворювача, але і напругою. Алгоритм обчислення значення напруги і визначає спосіб управління. У перетворювачах частоти з скалярним управлінням значення напруги визначається із залежності  $U(f)$ , яка, як правило, розраховується методом лінійної інтерполяції по декількох базових точках. Є можливість змінювати значення цих точок.

У перетворювачах частоти з векторним управлінням значення напруги розраховується методом моделювання процесів, що проходять в асинхронному двигуні. В цьому випадку

користувачеві необхідно задати параметри двигуна. Очевидно, що другий спосіб управління дозволяє здійснювати якісніший управління електродвигуном. Проте налаштування такого перетворювача частоти вимагає досить глибоких пізнань в області електроприводу і електричних машин. Скалярний же спосіб управління забезпечує достатньо хороша якість регулювання, навіть з використанням заводських налаштувань частотного перетворювача. Використання векторного управління електроприводами конвеєрів навряд чи дасть істотний вигравш порівняно з скалярним. Отже, застосування векторного управління в нашому випадку є недоцільним. Для управління швидкостями конвеєрів використовуватимемо скалярне управління.

Основу перетворювача частоти складає трифазний інвертор напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Система управління перетворювача виконана на базі програмованого мікропроцесорного контролера (МК). У АІН перетворення постійної напруги в трифазне змінне здійснюється в мостовому транзисторному інверторі, зібраному на трьох транзисторно-діодних модулях. Кожен модуль містить два IGBT-транзистора з шунтуючими зворотними діодами. IGBT-транзистори перемикаються багато разів протягом періоду вихідної частоти відповідно до ШІМ-алгоритмом МК.

Алгоритм ШІМ-управління підтримує необхідне регулювання частоти і значення основної гармоніки вихідної напруги, що діє, забезпечуючи при цьому синусоїдальність форми струму навантаження.

Сучасні перетворювачі частоти є інтелектуальними пристроями, що використовують мікроконтролери достатньо високої продуктивності, в сучасних перетворювачах є ряд додаткових опцій і розширень, що дозволяють створювати нескладні системи автоматичного управління без використання контролерів.

Розглянемо докладніше ряд таких розширень, які є практично у всіх сучасних перетворювачах частоти.

Аналогові виходи – дозволяють наочно представити значення якого-небудь параметра. Проте використання їх в системах автоматизації недоцільно, оскільки вони, як правило, мають малу потужність і незадовільну якість.

Аналогові входи – дозволяють подавати сигнали від датчиків безпосередньо в перетворювач частоти, без використання яких-небудь додаткових пристроїв. Як правило, використовуються уніфіковані типи сигналів (0 – 5 В, 0 – 10 В, 4 – 20 мА), так що пристрої, що погоджують, не потрібні. Крім того, є використання внутрішнього живлення перетворювача для підключення потенціометра, наприклад, для завдання частоти обертання.

Дискретні входи – дозволяють управляти перетворювачем частоти з кнопок, встановлених на лицьовій панелі шафи, або з поста управління.

Дискретні виходи – використовуються для сигналізації режимів роботи перетворювача.

У сучасних перетворювачах передбачена можливість підключення його в промислову мережу. Зазвичай використовується протокол RS-485. З'єднання перетворювачів в мережу дозволяє побудувати складнішу систему автоматичного управління технологічними процесами з використанням контролерів і промислових комп'ютерів.

До достоїнств сучасних частотних перетворювачів можна віднести нижче

перераховані чинники. Плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна дозволяє в більшості випадків відмовитися від використання редукторів, варіаторів, дроселів і іншої регулюючої апаратури, що значно спрощує керовану механічну (технологічну) систему, підвищує її надійність і знижує експлуатаційні витрати.

Частотний пуск керованого двигуна забезпечує його плавний без підвищених пускових струмів і механічних ударів розгін, що знижує навантаження на двигун і пов'язані з ним передавальні механізми, збільшує термін їх експлуатації. При цьому з'являється можливість за умовами пуску зниження потужності приводних двигунів навантажених механізмів. Вбудований мікропроцесорний ПІД-регулятор дозволяє реалізувати системи регулювання швидкості керованих двигунів і пов'язаних з ним технологічних процесів.

Застосування зворотного зв'язку системи з частотним перетворювачем забезпечує якісну підтримку швидкості двигуна або регульованого технологічного параметра при змінних навантаженнях і інших збурюючих діях.

Частотний перетворювач в комплекті з асинхронним електродвигуном може застосовуватися для заміни приводів постійного струму. Частотний перетворювач в комплекті з програмованим мікропроцесорним контролером може застосовуватися для створення багатофункціональних систем управління електроприводами, зокрема з резервуванням механічних агрегатів. Таким чином можливо добитися точної витримки швидкості двигуна використовуючи тільки можливості мікропроцесорного частотного перетворювача. Пристрої електротермічної лінії працюють відповідно до представлених нижче алгоритмів. Алгоритм блоку управління клапаном.

Блок призначений для: управління клапаном; формування слова стану клапана. На рис. 4 представлена модель блоку управління клапаном типу «чорний ящик».

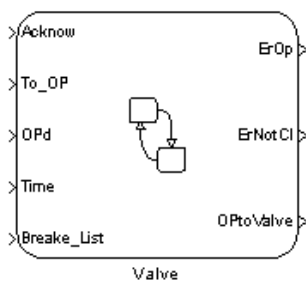


Рис. 4 – Модель блоку управління клапаном типу «чорний ящик»

Формування слова стану і управління клапаном проводиться відповідно до графа його станів представленому на рис. 5. Граф формує можливі стани клапана.

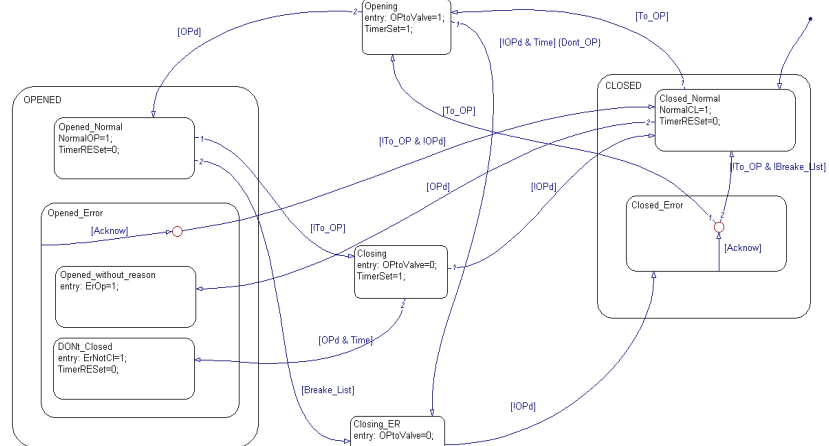


Рис. 5 – Граф - алгоритм роботи блоку управління клапаном

Алгоритм блоку управління конвеєром.

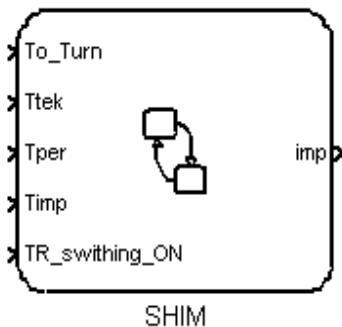
Блок призначений для: управління конвеєром; формування слова стану конвеєра. На





Алгоритм блоку широтно-імпульсної модуляції.

Блок ШІМ призначений для генерування послідовності імпульсів заданої тривалості відповідно до завдання. На рис. 10 представлена модель блоку управління ШІМ типу «Чорний ящик».



**Рис. 10** – модель блоку ШІМ типу «чорний ящик»

Блок ШІМ функціонує відповідно до графа його станів.

### Висновки

Проведено аналіз проблемної ситуації, аналіз технологічного процесу як об'єкту управління. Були проаналізовані теплові процеси, що протікають в печах електротермічної лінії. Здійснено вибір принципів управління пристроями електротермічної лінії, управління температурою в печах і управління швидкостями конвеєрів електротермічної лінії.

### Список використаних джерел:

1. Крючков В. Г. Построение информационных портретов объектов программного управления / В. Г. Крючков // Автоматизированные технологические и мехатронные системы в машиностроении : сб. науч. тр. / УГАТУ. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 1997. – 78 с.
2. Курс лекций по дисциплине «Моделирование систем управления» : учеб. пособие / под. ред. Н. Г. Чикуров. – Уфа: Изд-во УГАТУ, 2001. – 146 с. - Harel D. Statechart: A VISUAL FORMALISM FOR COMPLEX SYSTEMS.
3. Теория автоматического управления / под ред. А. В. Нетушила. – 2-е изд. – М. : Высшая школа, 1976. – 486 с.
4. Чикуров Н. Г. Логический синтез дискретных систем управления : учеб. пособие / Н. Г. Чикуров ; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : Изд-во УГАТУ, 2003. – 132 с.
5. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М. : Высшая школа, 1985. – 372 с.

**Скрип'юк Р.Б.** «Вибір методів управління для системи керування автоматичною електротермічною лінією обробки металевих виробів».

Проводиться аналіз проблемної ситуації та аналіз технологічного процесу як об'єкту управління. Аналізуються теплові процеси, що протікають в печах електротермічної лінії. Здійснюється вибір принципів управління пристроями електротермічної лінії, управління температурою в печах і управління швидкостями конвеєрів електротермічної лінії.

**Ключові слова:** термічна обробка, електротермічна лінія, система управління.

**Скрип'юк Р.Б.** «Выбор методов управления для системы управления автоматической электротермической линией обработки металлических изделий».

Проводится анализ проблемной ситуации и анализ технологического процесса как

объекта управления. Анализируются тепловые процессы, протекающие в печах электротермической линии. Осуществляется выбор принципов управления устройствами электротермической линии, управление температурой в печах и управления скоростями конвейеров электротермической линии.

**Ключевые слова:** термическая обработка, электротермическая линия, система управления.

**Skrip'juk R.B.** “The choice of methods for the control system of the automatic line electrothermal treatment of metal products”.

The analysis of the problem situation and analysis of operation process as an object of management are made. Thermal processes occurring in the furnace electro-thermal line are analyzed. The choice of principles of electro-line devices, temperature control in ovens and conveyor speed control electro line is made.

**Key words:** thermal treatment, electrothermal line control system.

Стаття надійшла до редакції 2 грудня 2013 р.