

А.І. Корнійчук, к.т.н., доц.
Ю.О. Шавурський, к.т.н., доц.
Т.С. Воронова, асист.

Житомирський державний технологічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЮ ЛІНІЄЮ НА ОСНОВІ ПОСЛІДОВНОСТІ ПОДІЙ

Розроблено новий метод моделювання та аналізу процесу бінарного управління послідовністю подій для виробничої технологічної лінії. Метод поєднує математичну модель у формі рівнянь управління механізмами технологічної лінії та електронний аналог цієї моделі у формі цифрової електричної схеми, що складається з тригерів та логічних елементів. Розглянуто приклад моделювання системи управління ділянкою вибивки ливарних форм. Отримано систему рівнянь на основі булевої алгебри. Ці рівняння описують логічні умови, що визначають перехід до відпрацювання певних керуючих впливів на об'єкт управління. Розроблено функціональну електричну схему системи управління. У ній послідовність подій для управління виконавчими механізмами системи управління задається певним порядком з'єднання елементів пам'яті, ліній затримки та логічних елементів. Здійснено аналіз працездатності цієї схем у програмі схемотехнічного моделювання, що підтримує роботу з цифровими електричними схемами та побудову часових діаграм. Отримана модель може бути використана при проектуванні автоматизованих систем управління виробничими процесами.

Ключові слова: система управління; електронне моделювання; бінарне управління послідовністю подій; схемотехнічне моделювання.

Вступ. Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями. Сучасні системи управління технологічними процесами засновані на широкому застосуванні мікропроцесорів (мікроконтролерів) з програмною логікою роботи або на основі цифрових електричних схем, логіка роботи яких задається певним порядком з'єднання елементів пам'яті, ліній затримки та логічних елементів. Налагодження системи управління на конкретний технологічний процес здійснюється шляхом занесення відповідної програми в постійний запам'ятовуючий пристрій цієї системи [1–6]. Але для цього необхідно мати математичну модель управління технологічним процесом – систему рівнянь, розв'язання якої визначає, який з механізмів необхідно увімкнути, а який вимкнути в даний момент часу. Такий підхід визначає використання моделі управління технологічною лінією на основі бінарної послідовності подій, кожна з яких полягає у ввімкненні або вимкненні певного виконавчого механізму [7–10].

Тому **актуальним завданням** є розробка та дослідження математичних моделей управління технологічними лініями та шляхів реалізації цих методів на основі сучасних інформаційно-комп'ютерних технологій.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Оскільки мова йде про бінарне управління технологічною лінією, то система рівнянь, яка описує алгоритм управління нею, є системою булевих рівнянь [7–9]. У [9] викладено методику отримання рівнянь управління такими об'єктами. Програмування мікроконтролера [4, 5] системи управління за отриманими рівняннями без перевірки правильності останніх недоцільно, тому що вони можуть мати помилки. Ці помилки можуть виникнути через неврахування деяких особливостей управління тим чи іншим механізмом в даному технологічному процесі. Помилки можуть мати і суто механічний характер. Програмування мікроконтролерів є досить трудомісткою операцією та не може бути проведено багаторазово. Тому перед програмуванням треба бути впевненим в правильності складання алгоритму управління. Для цього потрібно перевірити математичну модель системи управління у формі рівнянь управління та відповідний алгоритм роботи мікроконтролера.

Системи бінарного управління механізмами технологічних ліній описуються булевими або рекурентними булевими рівняннями, яким відповідають схеми на логічних або цифрових елементах. Якщо розглядати цифрову електричну схему, логіка роботи якої задається певним

порядком з'єднання елементів пам'яті, ліній затримки та логічних елементів, то для її моделювання та перевірки працездатності доцільно використовувати програми схемотехнічного моделювання [11–15].

Таким чином, поставлене завдання зводиться до зображення алгоритму та рівнянь управління у вигляді електронної логічної схеми та здійснення її моделювання. Для аналізу отриманих рівнянь управління доцільно застосовувати стандартні програми схемотехнічного моделювання. Найбільш професійною серед них є програма Micro-Cap [12–14]. Ця програма призначена для аналізу електронних схем як аналогових, так і логічних (цифрових).

Метою проведених досліджень є дослідження методу моделювання та аналізу процесу бінарного управління послідовністю подій для виробничої технологічної лінії. Метод поєднує математичну модель в формі рівнянь управління механізмами технологічної лінії й електронний аналог цієї моделі в формі цифрової електричної схеми, що складається з тригерів та логічних елементів.

Викладення основного матеріалу дослідження. При розробці методики складання рівнянь управління механізмами технологічних ліній будемо вважати, що в основу математичної моделі управління покладено RS-тригер [9]. У моделі можуть бути три типи таких тригерів: контрольний тригер ТК, тригер управління ТУ та додаткові тригери (математичні датчики).

Контрольний тригер ТК має одну команду, яка переводить його в одиничний стан. Ця команда надходить, як правило, від оператора, від пускової кнопки “Попередній запуск”. Решта команд цього тригера є команди на вимкнення при порушенні того чи іншого параметра механізму або його приводу. Якщо вважати, що тригер має один R-вхід, то всі команди на вимкнення необхідно об'єднати елементом “АБО”.

Логіка роботи контрольної частини досить проста і зводиться до наступного: подати сигнал оператору про порушення якогось з контрольних параметрів; вимкнути механізм при порушенні якогось з його параметрів, якщо він був увімкнений; не вмикатити механізм при порушенні якогось з його параметрів, якщо він не був увімкнений.

Таким чином, для аналізу алгоритму управління достатньо враховувати лише управляючу частину математичної моделі, яка складається з тригерів управління ТУ. Крім них, до математичних моделей можуть входити додаткові тригери, які імітують датчики або виконують роль пам'яті про виконання механізмом тих чи інших дій.

Кожне рівняння увімкнення або вимкнення цих тригерів є кон'юнкція тих чи інших змінних, тому необхідно вводити до електронної моделі елементи “І”. Якщо є декілька рівнянь увімкнення або декілька рівнянь вимкнення одного і того самого тригера, то необхідно ввести в електронну модель елементи “АБО”.

Вхідними сигналами отриманої електронної схеми в загальному випадку будуть такі змінні: стан диспетчерських ключів для визначення режиму роботи механізмів або технологічної ділянки; стан операторських кнопок управління; стан датчиків положення механізмів та технологічного матеріалу.

Якщо система нормально працює в автоматичному режимі, то перевіряти здатність до роботи в ручному режимі немає потреби. Тому диспетчерські та операторські змінні можна виключити. Залишаються лише датчики положення механізмів та датчики положення технологічного матеріалу.

У технологічному вузлі, як правило, датчик технологічного матеріалу визначає певний цикл роботи механізмів цього вузла. При виконанні механізмами певної операції цей датчик змінює свій стан на протилежний. Але перехід в початковий стан повинен здійснюватися лише під дією технологічного матеріалу. Тому його стан повинен задаватися при аналізі роботи системи управління. Імітатором (моделлю) технологічного матеріалу може бути генератор імпульсів, який вмикає (вимикає) датчик технологічного матеріалу. Можна ввести в програму режим, за якого цей датчик приймає початковий стан тоді, коли всі механізми виконали необхідні операції і повернулися в початкове положення. Тому зміна стану датчика технологічного матеріалу повинна проводитися через певний час, який пропорційний реальному часу роботи механізмів вузла. Такий режим аналізу дозволяє проглянути декілька циклів роботи механізмів.

Вхідними сигналами електронної схеми будуть також сигнали датчиків положення механізмів. Стан датчиків змінюється при роботі механізмів. Тому такі датчики необхідно імітувати за допомогою тригерів. Якщо стан датчика змінюється відразу після увімкнення

механізму, то цей тригер повинен змінити свій стан при появі сигналу вимкнення механізму. Якщо датчик переключється в кінці руху механізму, то переключення тригера повинно відбуватися із затримкою, яка пропорційна часу руху цього механізму. Якщо порушити деякі зв'язки цього тригера, то можна імітувати пошкодження датчика і перевірити роботу механізмів при цьому пошкодженні.

Таким чином, електронна модель алгоритму управління механізмами технологічних ліній є схемою на зворотних зв'язках.

Подібний аналіз алгоритму управління можна проводити не лише для реальних систем, а й для тих технологічних ліній, які лише проектується. Такий аналіз дозволяє перевірити роботу всіх "встановлених" на лінії механізмів, знайти той вузол або механізм, який визначає продуктивність роботи всієї лінії. Це дозволяє визначити рівняння управління такою лінією ще до її монтажу і значно скоротити час на провадження системи управління. Це особливо важливо для фірм, які виготовляють як технологічні лінії, так і системи управління для них.

Розглянемо практичний приклад аналізу роботи технологічної ділянки. Нехай маємо технологічну ділянку для вибивки ливарних форм (рис. 1).

Форми з відлитими деталями переміщуються транспортером. Коли форма опиниться в зоні дії реверсивного механізму М1-2 ($X_1 = 1$), останній переміщує її на проміжний стіл № 1 і повертається в початкове положення. Коли форма опиниться на проміжному столі, а механізм М1-2 повернеться в початкове положення, реверсивний механізм М3-4 переміщує її на вібростіл і повертається в початкове положення.

Наступна форма буде переміщена на проміжний стіл № 1. Механізм М3-4, переміщуючи наступну форму на вібростіл, перемістить попередню на проміжний стіл № 2. Після цього реверсивний механізм М5-6 перемістить порожню форму на транспортер.

Дозволяється одночасна робота механізмів М1-2 та М5-6. Решта механізмів одночасно працювати не може.

Датчик X_1 визначає положення форми. Решта датчиків визначають положення механізмів.

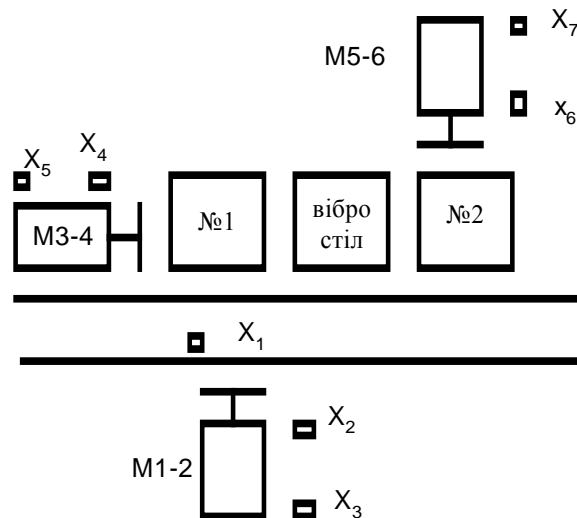


Рис. 1. Технологічна ділянка вибивки ливарних форм

Складемо рівняння управління механізмом М1. Його можна увімкнути, якщо:

- форма на транспортері ($X_1 = 1$);
- механізм М2 вимкнений ($2T\bar{U} = 0$);
- механізм М3 знаходиться в крайньому положенні ($X_5 = 1$) і не увімкнений ($3T\bar{U} = 0$).

Тоді рівняння увімкнення механізму М1 має вигляд:

$$1T\bar{U}_S = X_1 \cdot 2T\bar{U} \cdot X_5 \cdot 3T\bar{U}.$$

Механізм М1 вимикається тоді, коли він буде у крайньому положенні ($X_2 = 1$).

Рівняння вимкнення має вигляд:

$$1T\bar{U}_R = X_2.$$

Механізм М2 вмикається тоді, коли $X_2 = 1$ при вимкненому механізмі М1 ($1T_U = 0$), а вимикається при $X_3 = 1$.

Рівняння управління механізмом М2 мають вигляд:

$$2T_{U_S} = X_2 \cdot \overline{1T_U};$$

$$2T_{U_R} = X_3.$$

Механізм М3 повинен пересунути форму на вібростіл. Але датчика, який вказував би на наявність форми на проміжному столі, немає. Створимо його штучно. Для цього введемо тригер 1Т, який вмикається тоді, коли працює механізм М1 (без форми він не працює), а вимикається тоді, коли механізм М3-4 повертається в початкове положення.

$$1T_S = 1T_U;$$

$$1T_R = 4T_U.$$

Тепер можна скласти рівняння увімкнення механізму М3. Це відбувається, якщо:

а) працював механізм М1 ($1T = 1$);

б) механізм М1 знаходиться в початковому стані ($X_3 = 1$) і не увімкнений ($1T_U = 0$);

в) не працює механізм М4 ($4T_U = 0$).

Рівняння увімкнення М3 має вигляд:

$$3T_{U_S} = 1T \cdot X_3 \cdot \overline{1T_U} \cdot \overline{4T_U}.$$

Вимикається механізм від датчика Х4:

$$3T_{U_R} = X_4.$$

Механізм М4 вмикається тоді, коли $X_4 = 1$ при вимкненому М3, а вимикається при $X_5 = 1$.

$$4T_{U_S} = X_4 \cdot \overline{3T_U};$$

$$4T_{U_R} = X_5.$$

Механізм М5 може працювати одночасно з механізмом М1. При цьому його перше переміщення буде "холостим", тому що в його зоні ще немає форми. Але це не має принципового значення з точки зору технології. По закінченні роботи лінії на вібростолі залишиться одна форма, що теж не має значення. Рівняння управління механізмом М5 мають вигляд:

$$5T_{U_S} = 1T_U \cdot \overline{6T_U};$$

$$5T_{U_R} = X_6.$$

Рівняння управління механізмом М6 мають вигляд

$$6T_{U_S} = X_6 \cdot \overline{5T_U};$$

$$6T_{U_R} = X_7.$$

Робота механізмів М5 та М6 не обмежена станом та положенням механізмів М3 та М4, тому що при роботі механізму М1 ці умови враховані.

Таким чином, алгоритм управління механізмами технологічної ділянки описується системою булевих рівнянь:

$$1T_{U_S} = X_1 \cdot \overline{2T_U} \cdot X_5 \cdot \overline{3T_U};$$

$$1T_{U_R} = X_2;$$

$$2T_{U_S} = X_2 \cdot \overline{1T_U};$$

$$2T_{U_R} = X_3;$$

$$1T_S = 1T_U;$$

$$1T_R = 4T_U;$$

$$3T_{U_S} = 1T \cdot X_3 \cdot \overline{1T_U} \cdot \overline{4T_U};$$

$$3T_{U_R} = X_4;$$

$$4T_{U_S} = X_4 \cdot \overline{3T_U};$$

$$4T_{U_R} = X_5;$$

$$5T_{U_S} = 1T_U \cdot \overline{6T_U};$$

$$5T_{U_R} = X_6;$$

(1)

$$6T_{Y_s} = X6 \cdot \overline{5T_U} ;$$

$$6T_{Y_R} = X7 .$$

У цих моделях рівняння зі знаком “S” є рівняння включення механізму або рівняння увімкнення RS-тригера. Рівняння зі знаком “R” – рівняння вимкнення RS-тригера.

Для побудови електронної моделі необхідно отримати рівняння управління датчиками положення. Датчик X1 вмикається технологічним матеріалом. У електронній моделі імітувати технологічний матеріал може генератор імпульсів з частотою f або періодом $T = 1/f$. Форми в зоні механізму M1 будуть з'являтися через час T . Цей час повинен бути пропорційним дійсному часу появи форм.

Вмикається датчик X1 при початку руху механізму M1. Тоді рівняння, що описують роботу датчика X1, мають вигляд:

$$\begin{aligned} X1_s &= T ; \\ X1_R &= 1T_U \end{aligned} \quad (2)$$

Датчик X2 вмикається тоді, коли механізм M1 зробив свій повний хід, а вмикається відразу після початку руху механізму M2. Тоді рівняння, які описують роботу датчика X2, мають вигляд:

$$\begin{aligned} X2_s &= 1T_U \rightarrow t(p1) \rightarrow ; \\ X2_R &= 2T_U , \end{aligned} \quad (3)$$

де $\rightarrow t(p1) \rightarrow$ – часова затримка на час $t(p)$.

Час $p1$ пропорційний часу повного ходу механізму M1.

Датчик X3 вмикається на початку руху механізму M1, а вмикається тоді, коли закінчив рух механізм M2. Тоді рівняння, які описують роботу датчика X3, мають вигляд:

$$\begin{aligned} X3_s &= 2T_U \rightarrow t(p2) \rightarrow ; \\ X3_R &= 1T_U . \end{aligned} \quad (4)$$

Датчик X4 вмикається тоді, коли механізм M3 виконав свій повний хід, а вмикається тоді, коли почав рух механізм M4. Тоді рівняння, які описують роботу датчика X4, мають вигляд:

$$\begin{aligned} X4_s &= 3T_U \rightarrow t(p3) \rightarrow ; \\ X4_R &= 4T_U . \end{aligned} \quad (5)$$

Датчик X5 вмикається тоді, коли почав рух механізм M3, а вмикається тоді, коли закінчив рух механізм M4. Тоді рівняння, які описують роботу датчика X5, мають вигляд:

$$\begin{aligned} X5_s &= 3T_U ; \\ X5_R &= 4T_U \rightarrow t(p4) \rightarrow . \end{aligned} \quad (6)$$

Датчик X6 вмикається при кінці руху механізму M5, а вмикається при початку руху механізму M6. Тоді рівняння, які описують роботу датчика X6, мають вигляд:

$$\begin{aligned} X6_s &= 5T_U \rightarrow t(p5) ; \\ X6_R &= 6T_U . \end{aligned} \quad (7)$$

Датчик X7 вмикається тоді, коли закінчив рух механізм M6, а вмикається тоді, коли почав рух механізм M5. Тоді рівняння, які описують роботу датчика X7, мають вигляд:

$$\begin{aligned} X7_s &= 6T_U \rightarrow t(p6) \rightarrow ; \\ X7_R &= 5T_U . \end{aligned} \quad (8)$$

Час роботи механізмів однаковий, тому всі часові затримки однакові.

Таким чином, алгоритм роботи механізмів технологічної ділянки з урахуванням переключення датчиків описується (1)–(8).

За наведеними рівняннями можна скласти електронну модель алгоритму управління даною технологічною ділянкою (рис. 2). Опис моделі в програмі Micro-Cap має вигляд:

```
*** DIGITAL GENERATOR INPUT
.DEFINE INPUT
+0S 0
+LABEL=START
+4S INCR BY 1
+6S INCR BY 1
+20S GOTO START -1 TIMES
+1800S 0
```

```

*** DIGITAL GENERATOR RESET
.DEFINE RESET
+0mS 1
+300mS 0
+500mS 1

*** DIGITAL GENERATOR SYNC
.DEFINE SYNC
+0S 0
+3S 1
+1800S 0

*** MODELS OF DIGITAL ELEMENTS
.MODEL D1 UDLY (DLYMN=2s DLYTY=2s DLYMX=2s)
.MODEL D2 UDLY (DLYMN=100ms DLYTY=100ms
+DLYMX=100ms)
.MODEL D0_GATE UGATE ()
.MODEL D0_GFF UGFF ()
.MODEL D3 UDLY (DLYMN=0s DLYTY=0s DLYMX=0s)
Далі в програмі Micro-Cap можна виконати аналіз отриманої моделі.
    
```

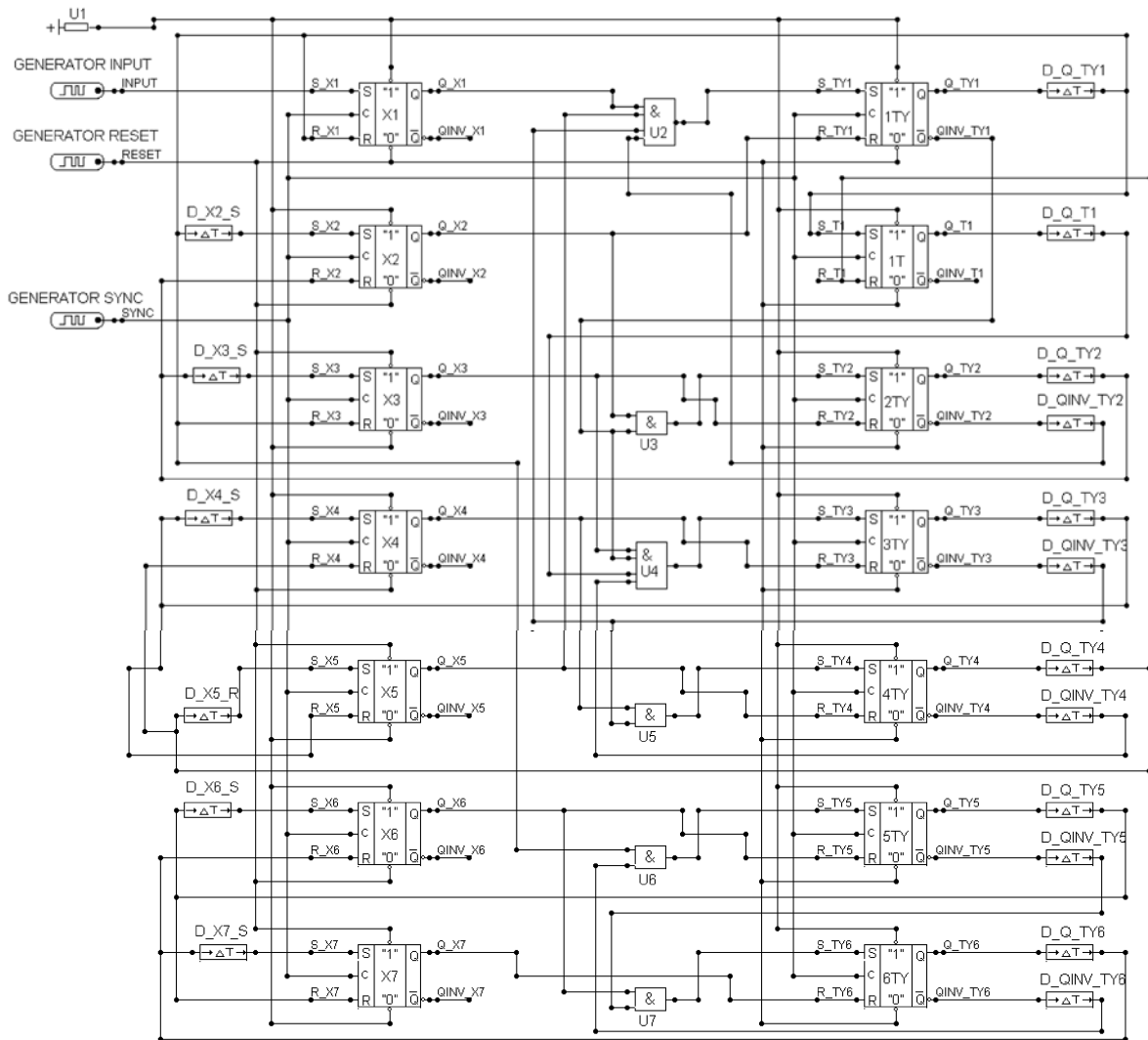


Рис. 2. Електронна модель алгоритму управління

Дослідження даної схеми в програмі Macro-Cap дозволяє побудувати часові діаграми її роботи та перевірити працездатність системи управління технологічним процесом на виробництві.

Висновки. Розроблено новий метод моделювання та аналізу процесу бінарного управління послідовністю подій для виробничої технологічної лінії. Системи бінарного управління механізмами технологічних ліній описуються булевими або рекурентними булевими рівняннями, яким відповідають схеми на логічних або цифрових елементах. Метод поєднує математичну модель у формі рівнянь управління механізмами технологічної лінії та електронний аналог цієї моделі у формі цифрової електричної схеми, що складається з тригерів та логічних елементів.

Розглянуто приклад моделювання системи управління ділянкою вибивки ливарних форм. Отримано систему рівнянь на основі булевої алгебри. Ці рівняння описують логічні умови, що визначають перехід до відпрацювання певних керуючих впливів на об'єкт управління. Розроблено функціональну електричну схему системи управління. У цій схемі послідовність подій для управління виконавчими механізмами системи управління задається певним порядком з'єднання елементів пам'яті, ліній затримки та логічних елементів. В основу математичної моделі управління покладено RS-тригер. В цілому в моделі системи управління можуть бути три типи таких тригерів: контрольний тригер ТК, тригер управління ТУ та додаткові тригери.

Встановлено, що для моделювання та перевірки працездатності цифрової електричної схеми, логіка роботи якої задається певним порядком з'єднання елементів пам'яті, ліній затримки та логічних елементів, доцільно використовувати програму схемотехнічного моделювання Micro-Cap. Здійснено аналіз працездатності цієї схеми у програмі схемотехнічного моделювання Micro-Cap, що підтримує роботу з цифровими електричними схемами та побудову часових діаграм. Отримана модель та методика перевірки працездатності елементів систем управління може бути використана при проектуванні автоматизованих систем управління виробничими процесами.

Список використаної літератури:

1. Бродин В.Б. Микроконтроллеры. Архитектура, программирование, интерфейс / В.Б. Бродин, И.И. Шагурин. – М. : Издательство Эком, 1999.
2. Баранов В.Н. Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы / В.Н. Баранов. – 2-ое изд. – М. : Додэка, 2006.
3. Гребнев В.В. Микроконтроллеры семейства AVR фирмы Atmel / В.В. Гребнев. – М. : РадиоСофт, 2002.
4. Васильев А.В. Микроконтроллеры. Разработка встраиваемых приложений / А.Е. Васильев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008.
5. Предко М. PIC-микроконтроллеры. Архитектура и программирование / М.Предко. – М. : ДМК Пресс, 2009.
6. Широков Л.А. Исследование систем управления : учеб. пособие / Л.А. Широков. – М. : МГИУ, 2010. – 168 с.
7. Линейные логические операторы в виде схем и графов / И.Д. Вечирская, З.В. Дударь, А.А. Иванов, В.А. Лещинский // Бионика интеллекта. – 2004. – № 1 (61). – С. 38–41.
8. Ефимова И.А. О методе построения моделей бинарных логических сетей / И.А. Ефимова, В.А. Лещинский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 4. – С. 121–124.
9. Корнійчук А.І. Методика складання рівнянь управління логічних об'єктів / А.І. Корнійчук. – Житомир : ЖІТІ, 2000. – 196 с.
10. Олссон Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г.Олссон, Д.Пиани. – СПб. : Невский диалект, 2001. – 557 с.
11. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap 5 / В.Д. Разевиг. – М. : СОЛОН, 1997. – 274 с.
12. Амелина М.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8 / М.А. Амелина, С.А. Амелин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 464 с.

13. *Разевиг В.Д.* Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7 / *В.Д. Разевиг.* – М. : Горячая линия–Телеком, 2003. – 368 с.
14. *Амелина М.А.* Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версия 9, 10 / *М.А. Амелина, С.А. Амелин.* – Смоленск : Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2013. – 618 с.
15. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях : Практикум на Electronics Workbench / Под ред. *Д.И. Панфилова.* – М. : Электроника, 1999. – 304 с.

КОРНИЙЧУК Анатолій Іванович – кандидат технічних наук, доцент Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- автоматизація технологічних процесів.

ШАВУРСЬКИЙ Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- автоматизація технологічних процесів;
- методи вимірювання механічних величин.

ВОРОНОВА Тетяна Станіславівна – асистент кафедри комп'ютеризованих систем управління та автоматики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи алгоритмічної обробки інформації в технічних системах.

Стаття надійшла до редакції 27.11.2015