

МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

УДК 656.225

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2026-2-72.35>

Маловічко Н. В., аспірантка кафедри автоматики та телекомунікацій
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0004-4093-9212

Маловічко В. В., кандидат технічних наук, доцент,
декан факультету комп'ютерних технологій і систем
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0008-2704-5555

СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ П'ЯТИЗНАЧНОГО ВИХІДНОГО СТАНЦІЙНОГО СВІТЛОФОРА У ВИГЛЯДІ ДИСКРЕТНОГО АВТОМАТУ

Робота спрямована на підвищення функціональної надійності експлуатації систем станційної електричної централізації на мікропроцесорній елементній базі шляхом перевірки правильності функціонування систем під час їх запуску з використанням імітаційних моделей напільних пристроїв. Було проаналізовано різні типи математичних моделей. З'ясовано, що для поставленої задачі найбільш ефективним є використання моделей у вигляді скінченних дискретних автоматів, так як в такій моделі за допомогою вибору вхідних та вихідних параметрів легко реалізувати зв'язок об'єкта з мікропроцесорною частиною системи. Запропоновано використовувати дискретний автомат Мура з двома вихідними станами (відкритий та закритий сигнал) та п'ятьма внутрішніми станами (сигналізація світлофора).

Створено дискретний автомат, визначені вхідні, вихідні та внутрішні його стани, побудовані таблиці переходів та виходів, наведені секвенційні рівняння роботи автомату та виконана їх мінімізація аналітичним методом. Сформовано стани елементів пам'яті на базі трьох RS тригерів виконана мінімізація їх кодування з використанням карт Карно. Побудована структурна схема створеного автомату та виконана перевірка роботи моделі з використанням обчислювальної техніки.

Уперше розроблено математичну модель п'ятизначного станційного світлофора з двома жовтими вогнями та маневровим показанням у вигляді скінченного дискретного автомата, що дозволяє її використовувати для імітації роботи даного об'єкта в різних режимах.

Використання запропонованої моделі дозволяє проводити перевірку правильності роботи системи виробником на стадії проектування, де запропонована модель може виконуватись без фізичної реалізації у вигляді програмної емуляції та перевіряти відповідність функціонування нормативній документації на стадії запуску системи на залізничній станції де буде використовуватись фізична схема імітації роботи світлофора на логічних елементах та тригерах.

Ключові слова: електрична централізація, світлофор, сигнальні показання, математична модель дискретний автомат.

Malovichko N. V., Malovichko V. V. Creation of a mathematical model of a five-indication station exit signal in the form of a finite-state automaton

The work is aimed at improving the operational functional reliability of microprocessor-based station interlocking systems by verifying the correctness of system operation during commissioning using simulation models of trackside equipment. Methodology: Various types of mathematical models were analyzed. It was determined that, for the given task, the most effective approach is the use of models based on finite discrete automata, since such a model allows the interaction between the controlled object and the microprocessor-based part of the system to be easily implemented through the selection of input and output parameters. It is proposed to use a Moore finite-state automaton with two output states (signal cleared and signal at stop) and five internal states (signal indication of the railway signal).

A finite-state automaton was developed, and its input, output, and internal states were defined. State transition and output tables were constructed, sequential equations describing the automaton operation were derived, and their minimization was performed using an analytical method. The states of memory elements based on three RS flip-flops were determined, and the minimization of their encoding was carried out using Karnaugh maps. A structural diagram of the developed automaton was created, and the model operation was verified using computer simulation.

For the first time, a mathematical model of a five-indication station signal with double-yellow aspects and a shunting indication has been developed in the form of a finite-state discrete automaton, which enables its use for simulating the operation of this object under various operating modes.



© Н. В. Маловічко, В. В. Маловічко, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

The use of the proposed model makes it possible for the manufacturer to verify the correctness of system operation at the design stage, where the model can be implemented as software emulation without physical realization. It also enables verification of compliance with regulatory documentation during the system commissioning stage at a railway station, where a physical circuit simulating the operation of the signal using logic elements and flip-flops is employed.

Key words: *electrical centralization, railway signal, signal indication, mathematical model, finite-state automaton.*

Постановка проблеми. Ефективність функціонування залізничного транспорту напряму залежить від можливості систем автоматики виконувати покладені на них функції без відмов та помилок. Станційні системи автоматики є одними з найбільш складних по конструкції і ліквідація відмови в даних системах потребує багато часу що викликає доволі значні затримки в русі поїздів.

Більшість систем станційної централізації в Україні побудовані на застарілій релейній елементній базі і потребують заміни на сучасні, мікропроцесорні системи централізації [3], які дозволять зменшити затримки поїздів та підвищити рівень безпеки залізничних перевезень що відповідає транспортній стратегії України [11]. Мікропроцесорні системи мають ряд переваг, такі як додатковий контроль стану пристроїв, архівування подій та відмов, контроль дій обслуговуючого персоналу і т.д. [1]. В той же час у систем даного типу також є слабка ланка, яка обумовлена в складній процедурі відновлення працездатності системи при виникненні відмов в програмному забезпеченні. При створенні системи під конкретну станцію, до моменту підключення напільних пристроїв практично не можливо перевірити всі залежності та роботу системи при відмовах окремих елементів з урахуванням всіх можливих варіантів поїзної роботи в цей момент часу. Якщо ж виконувати таку перевірку після підключення до системи стрілок сигналів та рейкових кіл, то така перевірка значно збільшить час на запуск системи в експлуатацію. В більшості систем централізації релейного типу такі перевірки не виконуються зовсім [4]. В деяких системах, зокрема в системі МПЦ-У таку перевірку проводять за допомогою спеціальних технічних засобів які імітують роботу напільних пристроїв але в якості стрілок сигналів та рейкових кіл використовують датчики що імітують лише включений або виключений стан об'єкта [10]. Така перевірка не дає в повному обсязі розуміння роботи системи при різних станах напільних об'єктів і може призвести до того що помилка в програмному забезпеченні сформованої системи не буде виявлена. Для більш глибокого аналізу при запуску станції необхідно використовувати моделі напільних пристроїв які імітують роботу об'єкта в усіх можливих режимах що значно зменшить ймовірність того, що програмна помилка не буде виявлена під час такої перевірки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В літературі математичні моделі польових пристроїв за звичай наводять в вигляді диференційних рівнянь, або в операторній формі для зручності моделювання за допомогою обчислювальної техніки. Для аналізу роботи окремого елемента це доцільно і достатньо для вирішення питань його роботи в різних режимах. Але при побудові систем діагностування та при комплексній перевірці роботи систем МПЦ під час запуску та налаштування, доцільно використовувати імітаційні моделі роботи напільних пристроїв для реалізації усіх можливих алгоритмів функціонування систем з урахуванням відмов та не типових режимів роботи. В такому випадку напільні об'єкти розглядаються як окремі складові загальної системи і для комплексного аналізу краще використовувати саме моделі у вигляді дискретних автоматів. Математичні моделі стрілки [8], рейкового кола [7] та трьохзначного [6] і чотирьохзначного [5] світлофорів розроблені авторами в вигляді скінченних дискретних автоматів. Для повноти охоплення імітаційними моделями всіх напільних пристроїв, в даній роботі розроблена математична модель п'ятизначного вихідного світлофора, які використовуються на більшості великих залізничних станцій.

Мета статті – Основною метою даної роботи є підвищення функціональної надійності експлуатації систем станційної електричної централізації на мікропроцесорній елементній базі шляхом перевірки правильності функціонування систем під час їх запуску з використанням імітаційних моделей напільних пристроїв.

Виклад основного матеріалу. Математичні моделі напільних пристроїв створюють в різному вигляді як у вигляді класичних диференційних рівнянь та і в вигляді імітаційних моделей в різних програмних пакетах. Для поставленої задачі найбільш ефективним є використання моделей у вигляді скінченних дискретних автоматів [9] так як в такій моделі за допомогою вибору вхідних та вихідних параметрів легко реалізувати зв'язок об'єкта з мікропроцесорною частиною системи. В даній роботі авторами розробляється математична модель станційного світлофора з п'ятьма сигнальними показаннями, тобто враховується і можлива маневрова робота від даного сигналу, а також реалізація маршрутів відправлення по відхиленню [2]. В якості моделі використовується дискретний автомат Мура з двома вихідними станами (відкритий та закритий сигнал) та п'ятьма внутрішніми станами (сигналізація світлофора). Для реалізації обрана саме модель Мура тому що вихідний стан визначається тільки за рахунок внутрішніх станів автомата і на пряму не залежить від сигналу на вході моделі.

Виконаємо кодування вхідних, вихідних та внутрішніх станів моделі.

x_1 – натиснута кнопка вихідного світлофора для початку маршруту;

\bar{x}_1 – кнопка вихідного світлофора для початку маршруту не натискалась;

x_2 – перша ділянка віддалення вільна, реле ЛС під струмом, наступний світлофор відкритий;

\bar{x}_2 – перша ділянка віддалення зайнята, реле ЛС вимкнене, наступний світлофор закритий;

- x_3 – готується маршрут для руху з відхиленням по стрілочному переводу;
- \bar{x}_3 – не готується маршрут для руху з відхиленням по стрілочному переводу;
- x_4 – готується маршрут для виконання маневрової роботи з перевіркою відсутності поїзного маршруту;
- \bar{x}_4 – не готується маневровий маршрут для виконання маневрової роботи в межах станції;
- x_5 – поїзд виїхав на маршрут;
- y – світлофор відкритий;
- \bar{y} – світлофор закритий;
- s_0 – червоний вогонь;
- s_1 – жовтий вогонь;
- s_2 – зелений вогонь;
- s_3 – місячно-білий вогонь;
- s_4 – два жовтих вогні;
- s_5 – два жовтих вогні з верхнім мигаючим.

На основі вхідних параметрів, внутрішніх характеристик та вихідних показників функціонування сформовано граф роботи п'ятизначного вихідного світлофора (рис. 1).

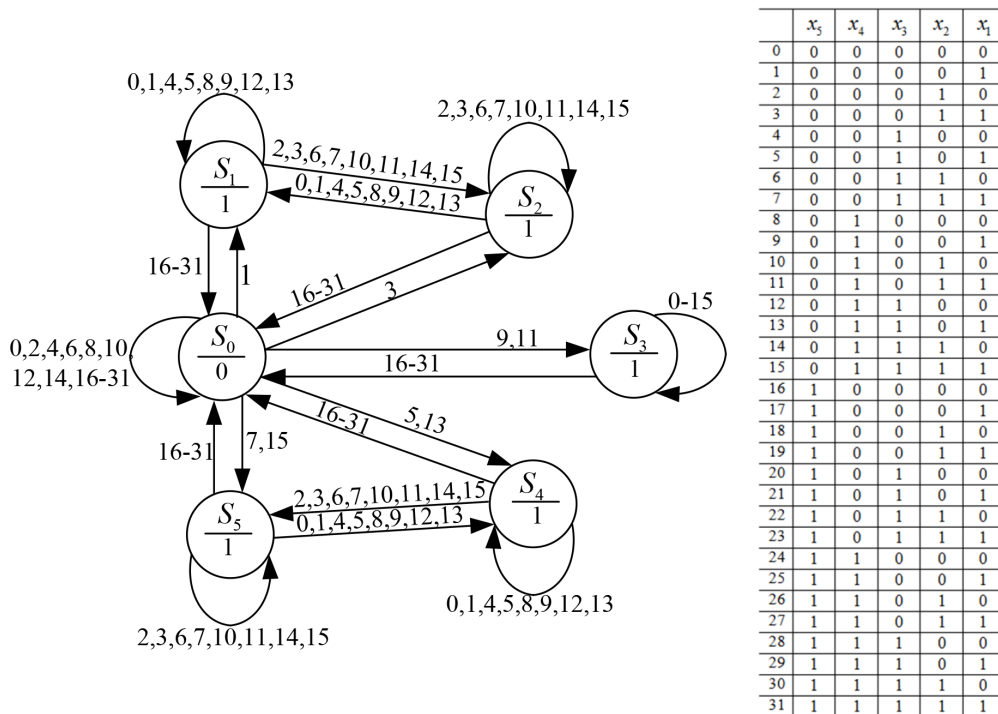


Рис. 1. Граф роботи п'ятизначного вихідного світлофора

Виходячи зі сформованої діаграми, яка характеризує роботу п'ятизначного вихідного світлофора, укладаються таблиці функцій переходів станів дискретного автомата та відповідних функцій виходів (табл. 1, 2).

З метою переходу від графічного подання до аналітичних виразів математичної моделі, на основі відповідних таблиць побудовано секвенційні рівняння. Сформовано елементарні секвенційні вирази, орієнтовані на одну й ту саму змінну, які подано із використанням операції логічної диз'юнкції. Застосовуючи аналітичні методи мінімізації логічних функцій, отримано скорочені рівняння, що мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 \bar{x}_1 S_0 \vee x_5 &\rightarrow S_0; \\
 \bar{x}_5 \bar{x}_2 (\bar{x}_4 \bar{x}_3 S_0 \vee S_1 \vee S_2) &\rightarrow S_1; \\
 \bar{x}_5 x_2 (\bar{x}_4 \bar{x}_3 S_0 \vee S_1 \vee S_2) &\rightarrow S_2; \\
 \bar{x}_3 x_4 \bar{x}_3 S_0 \vee \bar{x}_5 S_3 &\rightarrow S_3; \\
 \bar{x}_5 \bar{x}_2 (x_3 x_1 S_0 \vee S_4) &\rightarrow S_4; \\
 \bar{x}_5 x_2 (x_3 x_1 S_0 \vee S_4) &\rightarrow S_5; \\
 S_0 &\rightarrow \bar{y}; \quad S_1 \vee S_2 \vee S_3 \vee S_4 \vee S_5 \rightarrow y.
 \end{aligned}$$

Таблиця 1

Функції переходів

		Стани					
		S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Вхідні сигнали	00000	S_0	S_1	S_1	S_3	S_4	S_4
	00001	S_1	S_1	S_1	S_3	S_4	S_4
	00010	S_0	S_2	S_2	S_3	S_5	S_5
	00011	S_2	S_2	S_2	S_3	S_5	S_5
	00100	S_0	S_1	S_1	S_3	S_4	S_4
	00101	S_4	S_1	S_1	S_3	S_4	S_4
	00110	S_0	S_2	S_2	S_3	S_5	S_5
	00111	S_5	S_2	S_2	S_3	S_5	S_5
	01000	S_0	S_1	S_1	S_3	S_4	S_4
	01001	S_3	S_1	S_1	S_3	S_4	S_4
	01010	S_0	S_2	S_2	S_3	S_5	S_5
	01011	S_3	S_2	S_2	S_3	S_5	S_5
	01100	S_0	S_1	S_1	S_3	S_4	S_4
	01101	S_4	S_1	S_1	S_3	S_4	S_4
	01110	S_0	S_2	S_2	S_3	S_5	S_5
	01111	S_5	S_2	S_2	S_3	S_5	S_5
	10000	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
	10001	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
	10010	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
	10011	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
	10100	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
	10101	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
10110	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	
10111	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	
11000	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	
11001	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	
11010	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	
11011	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	
11100	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	
11101	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	
11110	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	
11111	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	

Таблиця 2

Функції виходів

Стани	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
Вихідні сигнали	\bar{y}	y	y	y	y	y

Отримані мінімізовані секвенційні рівняння репрезентують абстрактну модель дискретного автомата типу Мура, що моделює функціонування вихідного світлофора з п'ятьма сигнальними показаннями. Для побудови структурної схеми автомата на основі зазначених рівнянь необхідно реалізувати також блок елементів пам'яті, аби забезпечити врахування попереднього стану у процесі функціонування пристрою. Враховуючи наявність шести внутрішніх станів у даного автомата, для формування блоку пам'яті використано три RS-тригери. Реалізація цього блоку можлива з використанням тригерів будь-якого типу, при цьому складність структурної схеми істотно не змінюється. З метою оптимізації обсягу пам'яті кожному стану автомата призначено відповідну комбінацію станів тригерної схеми (табл. 3).

Стани чарунок пам'яті

Стан автомату	Стан тригерних схем		
	Q_1	Q_2	Q_3
S_0	0	0	0
S_1	0	0	1
S_2	0	1	0
S_3	0	1	1
S_4	1	0	0
S_5	1	0	1

Для здійснення реалізації відповідності між комбінаціями станів тригерної схеми та внутрішніми станами автомату укладається таблиця функцій збудження для кожного окремого тригера (табл. 4).

Таблиця 4

Кодування станів тригерних схем

Стани автомата						Функції збудження тригерів					
S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_1	R_1	S_2	R_2	S_3	R_3
0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1

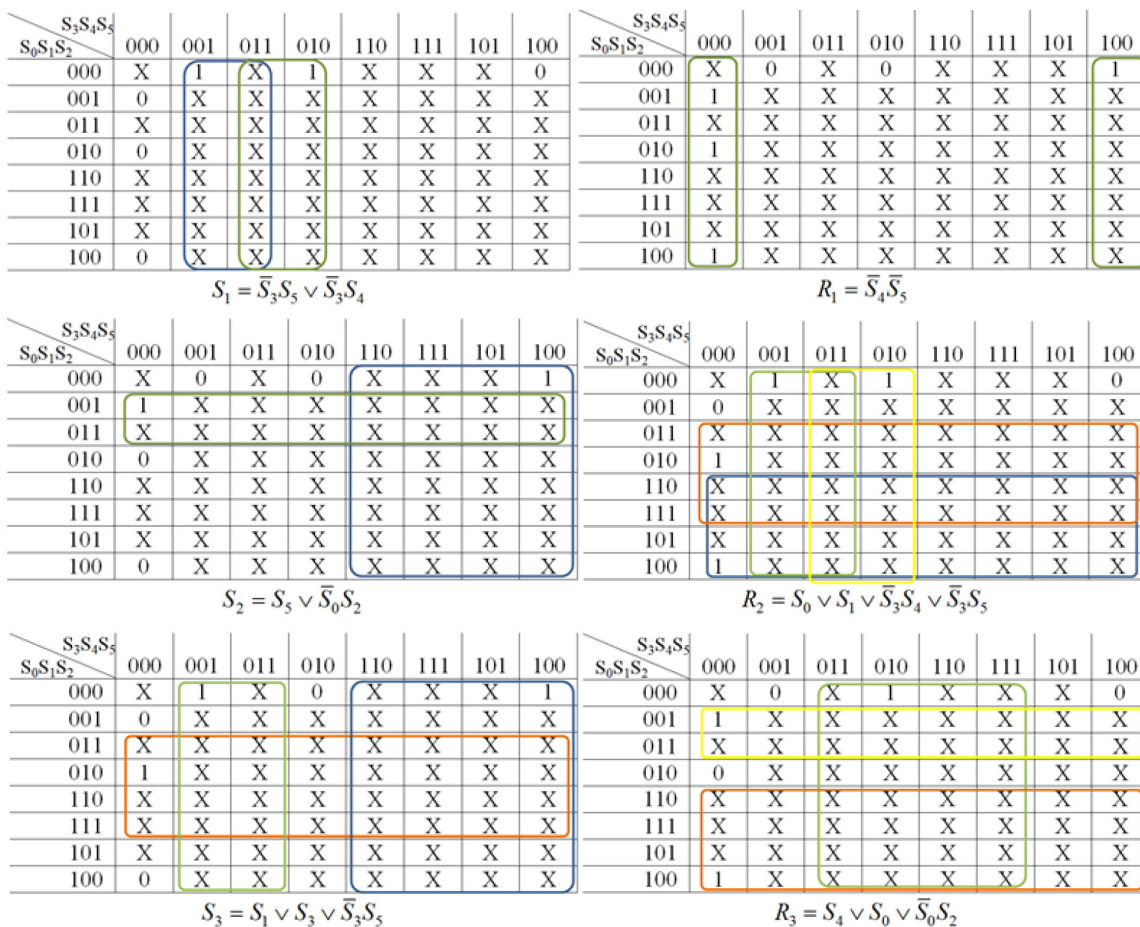


Рис. 2. Мінімізація функцій збудження тригерів із використанням карт Карно

Оскільки дискретний автомат характеризується лише шістьма визначеними станами, відповідні тригерні схеми функціонують однозначно лише для шести комбінацій у таблиці. З метою оптимізації обсягу, усі інші рядки, що не відповідають визначеним станам, не відображаються, а відповідні стани тригерів вважаються невизначеними. Для синтезу схеми з мінімально можливою кількістю логічних елементів застосовується метод мінімізації за допомогою карт Карно (рис. 2).

На основі мінімізованих секвенційних рівнянь та відповідних тригерних схем побудовано структурну схему дискретного автомата п'ятизначного вихідного світлофора. Для верифікації функціонування розробленої математичної моделі здійснено її апаратну реалізацію в програмному середовищі Proteus (рис. 3). З метою підтвердження адекватності роботи моделі, шляхом моделювання схемної реалізації, було перевірено коректність переходів графа з кожного стану у відповідну позицію за умов подання всіх допустимих комбінацій вхідних сигналів. У результаті експериментального дослідження встановлено відповідність функціонування змодельованої схеми табличним даним вхідних та вихідних параметрів (табл. 1, 2).

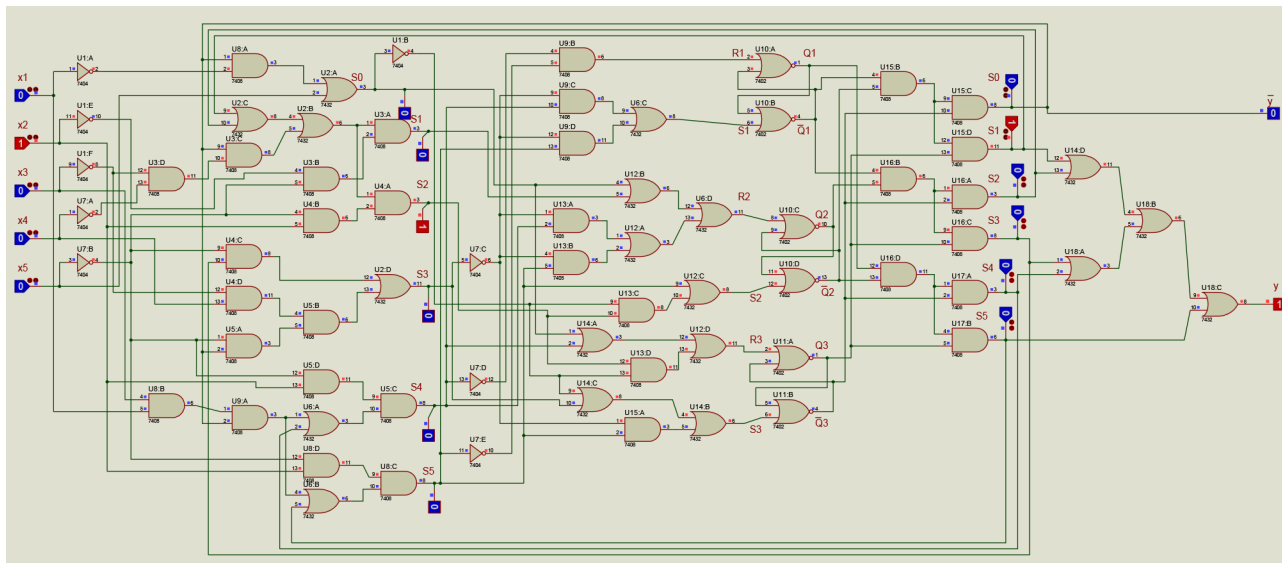


Рис. 3. Схема дискретного автомата п'ятизначного вихідного світлофора

Висновки. Уперше розроблено математичну модель п'ятизначного станційного світлофора з двома жовтими вогнями та маневровим показанням у вигляді скінченного дискретного автомата. Використання такої моделі можливе при вирішенні відразу декількох задач. По перше на стадії перевірки системи виробником при проектуванні, де запропонована модель може виконуватись без фізичної реалізації у вигляді програмної емуляції. По друге на стадії запуску системи на залізничній станції де буде використовуватись фізична схема імітації роботи світлофора на логічних елементах та тригерах. Обидва варіанти дозволять значно підвищити надійність роботи системи, шляхом виявлення всіх недоліків в програмному забезпеченні.

Використання запропонованої моделі п'ятизначного вихідного світлофора дозволить значно зменшити час на введення в експлуатацію систем на залізничних станціях та підвищити надійність їх роботи за рахунок перевірки функціонування системи при всіх можливих станах світлофора з урахуванням ув'язки сигнальних показань з поїзною ситуацією та заданими маршрутами.

Список використаних джерел:

1. Гаєвський В. В. *Удосконалення технічної експлуатації систем мікропроцесорної централізації на основі оперативної ідентифікації та локалізації порушень* : дис.... канд. техн. наук. Харків, 2021. 214 с.
2. *Інструкція з забезпечення безпеки руху поїздів при виконанні робіт з технічного обслуговування та ремонту пристроїв сигналізації, централізації та блокування в АТ «Укрзалізниця»* : затв. рішенням правління АТ «Укрзалізниця» від 10.02.2020, протокол № Ц-45/11 Ком.т. Київ : АТ «Укрзалізниця», 2020. – 124 с.
3. Калюта Ю. В., Ананьєва О. М. Аналітичний огляд систем залізничної автоматики. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2024. № 3. С. 13–24.
4. Каменєв О. Ю., Лапко А. О., Щєблїкіна О. В. Математичні моделі верифікації ергатичних систем засобів залізничної автоматики. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 4. С. 7–14.
5. Маловічко В. В., Маловічко Н. В. Математична модель роботи чотирьохзначного станційного вихідного світлофора у вигляді дискретного автомата моделі Мура. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2018. № 15. С. 70–78.

6. Маловічко В. В., Маловічко Н. В. Представлення роботи вихідного світлофора станції у вигляді дискретного автомата. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 12. С. 112–118.

7. Маловічко В. В., Маловічко Н. В., Рибалка Р. В., Створення математичної моделі станційного рейкового кола у вигляді скінченного дискретного автомата. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 2. С. 5–11.

8. Маловічко В. В., Рибалка Р. В., Маловічко Н. В., Тимошенко Л. С. Представлення роботи стрілочного переводу у вигляді дискретного автомату моделі Мура. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2013. № 6. С. 47–51.

9. Матвієнко М. П. Комп'ютерна логіка: навчальний посібник. Київ : Ліра-К, 2012. 288 с.

10. Мікропроцесорна система централізації МПЦ-У : навч. посіб. для студентів вузів залізничного транспорту. / Басов В. І., Єлисеєв В. В., Петренко О. В., та ін. Київ : Макрос, 2014. 430 с.

11. *Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року*. Київ, 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-r#Text>

References:

1. Gaievskiy, V. V. (2021). *Udoskonalennia tekhnichnoi ekspluatatsii system mikroprotsesornoi tseentralizatsii na osnovi operatyvnoi identyfikatsii ta lokalizatsii porushen* (PhD dissertation). Kharkiv. [in Ukrainian].

2. *Instruktsiia z zabezpechennia bezpeky rukhu poizdiv pry vykonanni robot z tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu prystroiv syhnalizatsii, tseentralizatsii ta blokuvannia v AT "Ukrzaliznytsia" : zatv. rishenniam pravlinnia AT "Ukrzaliznytsia" vid 10.02.2020, protokol № Ts-45/11 Kom.t.* (2018). Kyiv.

3. Kaliuta, Yu. V., Ananieva, O. M. (2024). Analichnyi ohliad system zaliznychnoi avtomatyky. *Informatsiino-keruivchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 3, 13–24. [in Ukrainian].

4. Kameniev, O. Yu., Lapko, A. O., Sheblykina, O. V. (2020). Matematychni modeli verifikatsii erhatychnykh system zasobiv zaliznychnoi avtomatyky. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, 4, 7–14. [in Ukrainian].

5. Malovichko, V. V., & Malovichko, N. V. (2018). The mathematical model of operation of the four-unit station exit signal as a Moor discrete automaton. *Electromagnetic Compatibility and Safety on Railway Transport*, 15, 70–78. [in Ukrainian].

6. Malovichko, V. V., & Malovichko, N. V. (2016). Predstavlennia roboty vykhidnoho svitlofora stantsii u vyhliadi dyskretnoho avtomata. *Elektromagnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznychnomu transporti*, 12, 112–118. [in Ukrainian].

7. Malovichko, V. V., Malovichko, N. V., Rybalka, R. V. (2024). Stvorennia matematychnoi modeli stantsiinoho reikovooho kola u vyhliadi skinchennoho dyskretnoho avtomata. *Nauka ta prohres transportu*, 2, 5–11. [in Ukrainian].

8. Malovichko, V. V., Rybalka, R. V., Malovichko, N. V., & Tymoshenko, L. S. (2013). Representation of switch operation as discrete automaton Moore's machine kind. *Electromagnetic Compatibility and Safety on Railway Transport*, 6, 47–51. [in Ukrainian].

9. Matviienko, M. P. (2012). *Kompiuterna lohika: navchalnyi posibnyk*. K. : Lira-K [in Ukrainian].

10. Basov, V. I., Yelysieiev, V. V., Petrenko, O. V., & in. (2014). *Mikroprotsesorna systema tseentralizatsii MPTs-U: navch. posib. dlia studentiv vuziv zaliznychnoho trans-portu*. K. : Makros [in Ukrainian].

11. *Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku*. (2018). Kyiv. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-r#Text> [in Ukrainian].

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026