

УДК 656.25

В. В. МАЛОВІЧКО – к.т.н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, malovichko_vv@mail.ru

Н. В. МАЛОВІЧКО – асистент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, natali_mv@mail.ru

ПРЕДСТАВЛЕННЯ РОБОТИ ВИХІДНОГО СВІТЛОФОРА СТАНЦІЇ У ВИГЛЯДІ ДИСКРЕТНОГО АВТОМАТА

Вступ

На залізничному транспорті України все більшого розвитку набувають мікропроцесорні системи керування рухом поїздів на станціях. Релейні системи електричної централізації (ЕЦ) вже в більшості вичерпали свій ресурс функціонування та є технічно застарілими. В проектуванні нових станцій та при капітальних ремонтах існуючих, релейні системи ЕЦ замінюються новими мікропроцесорними системами. При використанні будь якої нової системи, на етапі проектування та впровадження необхідно перевірити можливість роботи системи в заданих за технічною документацією режимах, можливість відновлення системи при різних типах відмов, взаємодію вузлів системи між собою та правильність функціонування програмного забезпечення. Для вирішення подібних задач, серед іншого, використовується математичне моделювання систем, що проектуються, з використанням комп'ютерної техніки. Але такі моделі не дозволяють в повній мірі дослідити роботу кожного вузла системи, тому що математична модель в цьому випадку буде надто складною. Тому з метою дослідження роботи окремих пристроїв автоматики (вихідних світлофорів, рейкових кіл, стрілочних переводів, і т.д.), які є частинами системи електричної централізації стрілок та сигналів на станції, доцільно створювати окремі математичні моделі, які дозволять імітувати роботу пристроїв в різних режимах та їх взаємодію з системою в цілому. В зв'язку з цим, робота по створенню мате-

матичної моделі роботи станційного вхідного світлофора є актуальною.

В даній роботі виконується опис роботи об'єктів залізничної автоматики за допомогою абстрактних та структурних скінчених автоматів, так як це дозволяє досить просто реалізувати залежності між сигналами на вході, сигналами на виході та внутрішніми станами пристроїв.

Метою роботи є створення математичної моделі роботи вихідного станційного світлофора, ввімкненого в систему ЕЦ, як скінченного дискретного автомату.

Створення математичної моделі вихідного світлофора

Впровадження систем мікропроцесорної централізації (МПЦ) на залізницях сприяє підвищенню якості роботи залізничного транспорту та надійності роботи систем залізничної автоматики. Але в той же час використання систем комп'ютерного типу викликає необхідність застосовувати нові заходи для підвищення надійності роботи систем та потребує використання нових шляхів підвищення безпеки їх функціонування [1]. Одною з проблем які виникають при використанні мікропроцесорних ЕЦ є необхідність перевірки роботи системи в граничних режимах роботи та при виході з ладу напільних пристроїв ЕЦ. Таким чином необхідно перевіряти реакцію системи на відмови, які досить часто виникають на залізничному транспорті, при чому необхідно виконувати таку перевірку до початку експлуатації системи [2]. Наприклад, в системі МПЦ-У, яка зараз впрова-

джується на залізничних станціях, таку перевірку виконують за допомогою технічних засобів комплексної перевірки функціонування які імітують роботу напільних пристроїв безпосередньо перед запуском системи [3], а в системі МПЦ-С за допомогою засобів відтворення роботи пристроїв нижнього рівня у складі випробувального стенду на етапі створення системи. Але в обох випадках робота колійних пристроїв імітується або простою комутацією необхідних електричних кіл, або підключенням одиночних реальних об'єктів. При цьому питання створення математичних моделей окремих напільних об'єктів не розглядається, а тільки виконується імітація їх роботи, що значно звужує можливості перевірки працездатності систем МПЦ. Тому розробка математичних моделей станційних напільних пристроїв є важливою та актуальною задачею.

Основними напільними пристроями, для яких необхідно створити математичні моделі їх функціонування є стрілочні переводи, рейкові кола та станційні світлофори, так як від правильної роботи даних пристроїв в основному залежить безпека всієї системи ЕЦ.

Для стрілки електричної централізації створювалась значна кількість різних математичних моделей. Була розроблена модель роботи стрілочного двигуна в просторі станів [4, 5], виконана модель роботи стрілочного електроприводу в системі MATLAB+Simulink, а також моделі стрілочного перевodu з застосуванням нейромережних технологій [6, 7]. Але всі ці моделі відображають процеси, які відбуваються в середині самого об'єкту, але не моделюють роботу стрілочного перевodu як елементу системи ЕЦ. У випадку перевірки функціонування мікропроцесорної системи ЕЦ необхідно математично описати роботу стрілочного перевodu саме як одного із елементів більш складної системи.

Найкраще для вирішення цієї задачі можна використати модель стрілочного пе-

реводу у вигляді дискретного автомату моделі Мура [8], так як в ній за допомогою вибору вхідних та вихідних величин легко реалізувати зв'язок стрілки з системою ЕЦ.

В даній роботі наведено розробку моделі вихідного світлофору, при цьому модель виконана у вигляді скінченного дискретного автомату з таких самих міркувань, як і для моделі стрілочного перевodu. На вихідному світлофорі в залежності від типу станції, типу системи інтервального регулювання на перегоні та колійного розвитку може бути різна кількість сигнальних показань. В приведеній моделі використовуємо найбільш розповсюджений вихідний світлофор для поїзних маршрутів з трьома вогнями – жовтий, зелений та червоний. У більшості випадків в конструкції вихідного світлофору в наявності також є ще лампа білого вогню, але це сигнальне показання використовується для маневрових пересувань і в поїзних маршрутах не використовується (крім ділянок де автоматична локомотивна сигналізація використовується як самостійний засіб сигналізації та при відгалуженнях без колійного блокування) [9].

В зв'язку з цим в розробленій математичній моделі білий вогонь не реалізується.

Для вихідного світлофора, що має ув'язку з тризначним автоблокуванням на перегоні, за допомогою двопозиційного сигнального реле С трьох сигнальних показань не досягти, тому необхідна комутація забезпечується контактами двох реле: С та ЛС (лінійно-сигнального реле, яке контролює вільність двох ділянок віддалення від станції) [10]. При завданні маршруту відправлення, якщо попереду вільні дві або більше ділянок перегону, одночасно з сигнальним реле світлофора збуджується реле ЛС, внаслідок чого розмикається коло лампи червоного вогню і замикається коло лампи зеленого вогню.

Якщо при завданні маршруту відправлення, попереду вільна тільки одна блок-ділянка, то реле ЛС не збуджується і струм

в цьому випадку пройде через лампу жовтого вогню.

Для розробки дискретного автомату виконаємо кодування внутрішніх станів, вхідних та вихідних сигналів (табл. 1). Необхідно мати на увазі, що кодування вхідних і вихідних сигналів може істотно впливати на складність комбінаційної частини схеми

так само, як і кодування станів автомата [11].

На етапі побудови направленного графа (рис. 1), використовуємо представлення автомата моделлю Мура, оскільки вихідний сигнал повністю визначається внутрішнім станом автомата і не залежить від комбінації сигналів на вході [12].

Таблиця 1

Вхідні сигнали	
x_1 – натиснута кнопка відкриття світлофору; $\overline{x_1}$ – кнопка відкриття світлофору не натиснута; x_2 – друга ділянка віддалення вільна, реле ЛС під струмом; $\overline{x_2}$ – друга ділянка віддалення зайнята, реле ЛС без струму; x_3 – поїзд почав рух по маршруту; $\overline{x_3}$ – поїзд не вступав на маршрут;	При завданні маршруту черговий по станції натискає кнопку керування світлофором. Після перевірки виконання умов безпеки спрацьовує сигнальне реле С, світлофор перемикається на дозволяюче сигнальне показання. Коли ЛС знеструмлене реле С комутує електричне коло лампи жовтого вогню, а коли ЛС під струмом – електричне коло лампи зеленого вогню. При завданні поїзного маршруту, світлофор закривається при вступі поїзду на першу секцію.
Вихідні сигнали	
y – світлофор відкритий; $\overline{y}$ – світлофор закритий;	На світлофорі дозволяюче показання (зелений або жовтий вогонь). На світлофор закритий (червоний вогонь).
Внутрішні стани	
S_0 – на світлофорі червоний вогонь; S_1 – на світлофорі жовтий вогонь; S_2 – на світлофорі зелений вогонь.	

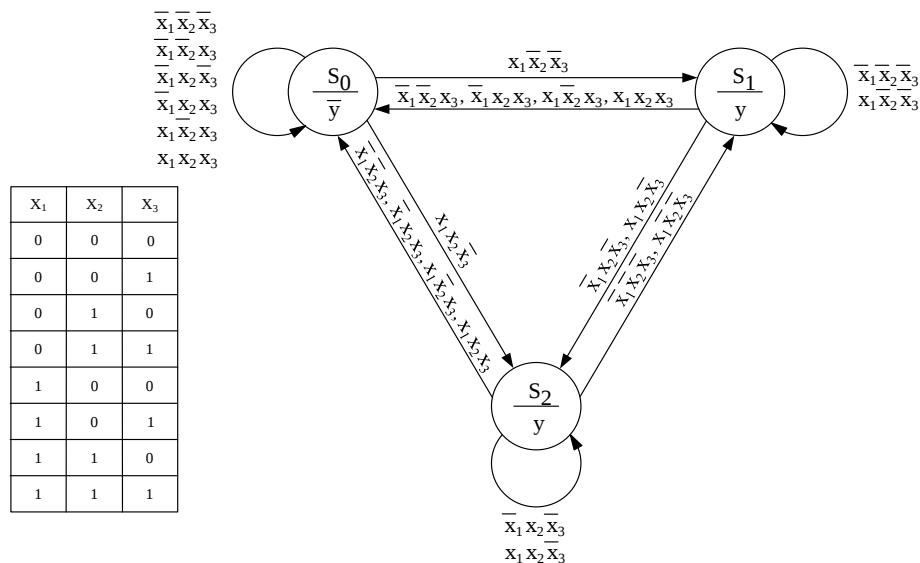


Рис. 1. Направлений граф дискретного автомата, що описує роботу вихідного світлофору з трьома сигнальними вогнями

При графічному представленні, автомат що описує роботу світлофора, має вершини (S_0, S_1, S_2), які є станами автомата, і ребра – комбінації вхідних сигналів ($x_1, x_2, x_3, \overline{x_1}, \overline{x_2}, \overline{x_3}$). Кожному стану автомата відповідає вихідний сигнал ($y, \overline{y}$). Певні комбінації вхідних сигналів викликають перехід автомата з одного стану в інший, що відповідно веде до зміни вихідного сигналу.

На основі наведеного графу, побудовані таблиці функцій переходів (табл. 2) і функцій виходів (табл. 3). На перетині рядків і стовпців автоматних таблиць вказуються внутрішні стани, в які переходить автомат під дією вхідних сигналів і вихідні сигнали, які він при цьому генерує.

Аналітичний опис автомату виконується за допомогою системи секвенціальних рівнянь, які можуть бути отримані на підставі графа або автоматних таблиць. Кожна з секвенцій описує лише один перехід або одну функцію таблиці виходів.

$$\begin{aligned} \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} S_0 &\rightarrow S_0; \overline{x_1} \overline{x_2} x_3 S_0 \rightarrow S_0; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_0 &\rightarrow S_0; \overline{x_1} x_2 x_3 S_0 \rightarrow S_0; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_0 &\rightarrow S_0; \overline{x_1} x_2 x_3 S_0 \rightarrow S_0; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_0 &\rightarrow S_1; \overline{x_1} x_2 x_3 S_0 \rightarrow S_2; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_1 &\rightarrow S_0; \overline{x_1} x_2 x_3 S_1 \rightarrow S_0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_1 &\rightarrow S_0; x_1 \overline{x_2} \overline{x_3} S_1 \rightarrow S_0; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_1 &\rightarrow S_1; x_1 \overline{x_2} x_3 S_1 \rightarrow S_1; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_1 &\rightarrow S_2; x_1 \overline{x_2} x_3 S_1 \rightarrow S_2; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_2 &\rightarrow S_0; \overline{x_1} x_2 x_3 S_2 \rightarrow S_0; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_2 &\rightarrow S_0; x_1 \overline{x_2} \overline{x_3} S_2 \rightarrow S_0; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_2 &\rightarrow S_1; x_1 \overline{x_2} x_3 S_2 \rightarrow S_1; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_2 &\rightarrow S_2; x_1 \overline{x_2} x_3 S_2 \rightarrow S_2; \\ S_0 &\rightarrow \overline{y}; S_1 \rightarrow y; S_2 \rightarrow y. \end{aligned}$$

У подальшій роботі, для зменшення громіздкості опису автомату секвенціальні рівняння скорочують. Для цього кожному секвенцію, яка прямує до однієї і тієї ж змінної, записуємо через знак диз'юнкції і спрямовуємо до даної змінної. В результаті такого запису рівняння будуть мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} S_0 \vee \overline{x_1} \overline{x_2} x_3 S_0 \vee \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_0 \vee \overline{x_1} x_2 x_3 S_0 \vee \\ \vee \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_0 \vee \overline{x_1} x_2 x_3 S_0 \vee \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_1 \vee \overline{x_1} x_2 x_3 S_1 \vee \\ \vee \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_1 \vee \overline{x_1} x_2 x_3 S_1 \vee \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_2 \vee \overline{x_1} x_2 x_3 S_2 \vee \\ \vee \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_2 \vee \overline{x_1} x_2 x_3 S_2 \rightarrow S_0; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_0 \vee \overline{x_1} x_2 x_3 S_1 \vee \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_1 \vee \overline{x_1} x_2 x_3 S_2 \vee \\ \vee \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_2 \rightarrow S_1; \\ \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_0 \vee \overline{x_1} x_2 x_3 S_1 \vee \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_1 \vee \overline{x_1} x_2 x_3 S_2 \vee \\ \vee \overline{x_1} x_2 \overline{x_3} S_2 \rightarrow S_2; \\ (S_1 \vee S_2) \mapsto y; S_0 \mapsto \overline{y}. \end{aligned}$$

Таблиця 2

Стани	Вхідні сигнали							
	000	001	010	011	100	101	110	111
S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_1	S_0	S_2	S_0
S_1	S_1	S_0	S_2	S_0	S_1	S_0	S_2	S_0
S_2	S_1	S_0	S_2	S_0	S_1	S_0	S_2	S_0

Таблиця 3

Стани	S_0	S_1	S_2
Вихідні сигнали	$\overline{y}$	y	y

Для отримання найбільш простих виразів, використовуючи закони та тотожності алгебри логіки, мінімізуємо скорочені секвенції. Після мінімізації аналітичним методом скорочені секвенції мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}\overline{x_1}S_0 \vee x_3(S_0 \vee S_1 \vee S_2) &\mapsto S_0; \\ \overline{x_1x_2x_3}S_0 \vee \overline{x_2x_3}(S_1 \vee S_2) &\mapsto S_1; \\ x_1x_2\overline{x_3}S_0 \vee x_2\overline{x_3}(S_1 \vee S_2) &\mapsto S_2. \\ (S_1 \vee S_2) &\mapsto y; S_0 \mapsto \overline{y}.\end{aligned}$$

Дані мінімізовані секвенціальні рівняння представляють собою абстрактний дискретний автомат моделі Мура, що описує роботу вихідного світлофора, ввімкненого в ЕЦ. Щоб побудувати, на базі секвенціального опису, структуру автомату, необхідна наявність двох блоків: блока реалізації переходів, який описує стан автомату і блока реалізації функцій виходу.

Для побудови блока реалізації переходів, функції S_0 , S_1 , S_2 необхідно використовувати в якості перемикаючих сигналів тригерних схем, які виконують роль елементів пам'яті. Зважаючи на те, що у даного автомата три внутрішні стани, для побудови елементів пам'яті використаємо два тригери RS типу. Під дією вхідних сигналів тригер може перемикатися з одного стійкого стану в інший. Для тригера з прямими входами: $Q=1$ при $S=1$ і $R=0$; $Q=0$ при $S=0$ і $R=1$; $Q=0$ при $S=0$ і $R=0$. При $R=S=1$ стан тригера буде невизначеним.

Для зменшення необхідного об'єму пам'яті, станам автомату ставимо в відповідність одну з можливих комбінацій станів тригерних схем (табл. 4).

Для реалізації відповідності між станом автомату і тригерними схемами складаємо таблицю функцій збудження для кожного тригера (табл. 5).

Порожні клітинки в таблиці – це ті набори аргументів S_0 , S_1 , S_2 при яких функція збудження не може прийняти ні нульового ні одиничного значення, тобто функція алгебри логіки має на даному наборі аргументів невизначений стан. Для мінімізації функцій збудження кожного тригера використовуємо метод карт Карно (рис. 2).

За результатами мінімізації функцій збудження тригерів та секвенціальних рівнянь, будуємо дискретний автомат моделі Мура у вигляді структурної схеми в заданому елементному базисі (рис. 3).

Таблиця 4

Стан автомату	Стан тригерних схем	
	Q_1	Q_2
S_0	0	0
S_1	0	1
S_2	1	0

Таблиця 5

Стани автомату			Функції збудження тригерів			
S_2	S_1	S_0	S_1	R_1	S_2	R_2
0	0	0	–	–	–	–
0	0	1	0	1	0	1
0	1	0	0	1	1	0
0	1	1	–	–	–	–
1	0	0	1	0	0	1
1	0	1	–	–	–	–
1	1	0	–	–	–	–
1	1	1	–	–	–	–

$S_2 \backslash S_1 S_0$	00	01	11	10
0	X	0	X	0
1	1	X	X	X

$S_1 = S_2$

$S_2 \backslash S_1 S_0$	00	01	11	10
0	X	1	X	1
1	0	X	X	X

$R_1 = \overline{S_2}$

$S_2 \backslash S_1 S_0$	00	01	11	10
0	X	0	X	1
1	0	X	X	X

$S_2 = S_1$

$S_2 \backslash S_1 S_0$	00	01	11	10
0	X	1	X	0
1	1	X	X	X

$R_2 = \overline{S_1}$

Рис. 2. Мінімізація функцій збудження тригерів за допомогою карт Карно

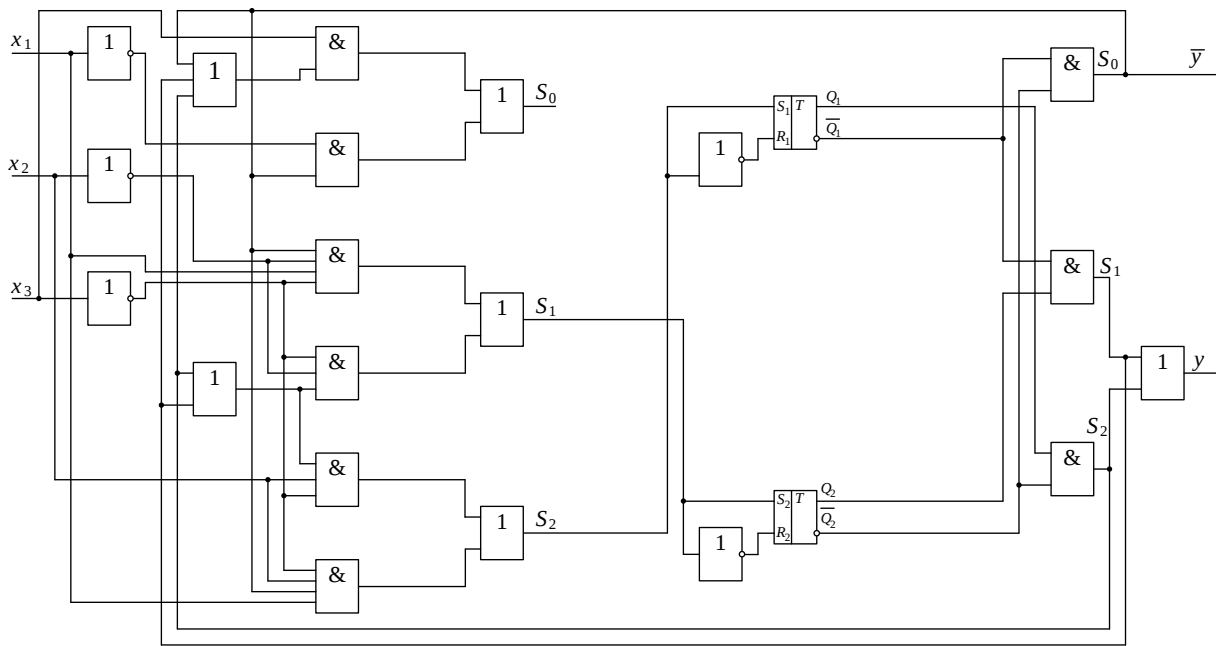


Рис.3. Структурна схема дискретного автомату вихідного світлофору з трьома вогнями

Наведена на рис. 3. принципова схема, яка реалізує математичну модель функціонування вихідного світлофору може бути використана як елемент перевірки системи МПЦ на адекватність функціонування в основних режимах роботи при завданні поїзних маршрутів. При використанні абстрактного дискретного автомату з'являється можливість виконати моделювання роботи світлофору за допомогою обчислювальної техніки, без фізичної реалізації структурної схеми [13]. Також необхідно враховувати що при використанні розробленої схеми моделювання роботи вихідного світлофору необхідно передбачити використання схеми узгодження рівнів вхідних і вихідних сигналів схеми та сигналів на входах та виходах модулів МПЦ.

Висновки

Представлення напільних пристроїв у вигляді математичної моделі є пріоритетним для перевірки працездатності та надійності систем МПЦ, завдяки легкості завдання необхідних величин, відносно простим розрахункам, лаконічній і не громіздкій структурі моделі, легкості зміни

структури в залежності від представлених вимог. Також в цьому випадку є можливість моделювання роботи пристрою за допомогою обчислювальної техніки і створення фізичної схеми на базі логічних елементів, яка дозволить імітувати роботу пристрою в різних режимах.

В залежності від поставлених вимог, змінюючи вхідні величини, внутрішні стани та вихідні величини можна суттєво змінювати процеси, що відображаються математичною моделлю роботи вихідного світлофору. Для математичної моделі роботи схеми світлофору, в якості вхідної величини можливо використати контроль перегорання ламп світлофору, як внутрішній стан можна додати згаслий світлофор та додаткові вогні, а вихідною величиною прийняти готовність заданого маршруту. Практична цінність роботи полягає в тому, що змінюючи вхідні та вихідні величини, а також додаючи додаткові внутрішні стани моделі можна реалізувати роботу вихідного світлофору в будь якому режимі з урахуванням більшості можливих відмов.

Бібліографічний список

1. Бойнік, А. Б. Шляхи підвищення безпеки функціонування станційних мікропроцесорних систем залізничної автоматики / А. Б. Бойнік, В. І. Мойсеєнко // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 4. – С. 42–46.
 2. Каменєв, О. Ю. Проблематика підходів до дослідження безпеки використання ергатичних систем керування на залізничному транспорті / О. Ю. Каменєв // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – Вип. 44. – С. 7–16.
 3. Басов, В. І. Мікропроцесорна система централізації МПЦ-У : навчальний посібник для студентів вузів залізничного транспорту. / В. І. Басов, В. В. Єлисеєв, О. В. Петренко, та ін. – К., 2014. – 430 с.
 4. Буряк, С. Ю. Використання простору станів для створення моделі стрілочного двигуна постійного струму / С. Ю. Буряк, В. В. Маловічко, Р. В. Рибалка // Збірник наукових праць. Донецький інститут залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – 2012. – Вип. 29. – С. 19–23.
 5. Буряк, С. Ю. Впровадження системи технічної діагностики стрілочних переводів / С. Ю. Буряк, В. І. Гаврилюк, О. О. Гололобова // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2015. – № 3. – С. 7–26.
 6. Гаврилюк, В. І. Застосування нейромережних технологій для діагностування стрілочних переводів з двигунами постійного струму / В. І. Гаврилюк, В. Ю. Дуб, В. В. Маловічко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2010. – № 31. – С. 209–213.
 7. Dub, V. Development of neural network program for automated testing of railway contact blocks / V. Dub, V. Gavriluk // Archives of Transport System Telematics. – 2009. – Vol. 2. – Iss. 2. – P. 16–18.
 8. Маловічко, В. В. Представлення роботи стрілочного переводу у вигляді дискретного автомату моделі Мура / В. В. Маловічко, Р. В. Рибалка, Н. В. Маловічко, та ін. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – Ном. 6. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2013.
 9. Інструкція з сигналізації на залізницях України. ЦШ-0001 : Затв.: Наказ Мінтрансу та зв'язку України 23.06.08. № 747 / Мін-во трансп. та зв'язку України. – К., 2009. – 82 с.
 10. Сапожников, Вл. В. Станционные системы автоматики и телемеханики : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / Вл. В. Сапожников, Б. Н. Елкин, И. М. Кокурин и др. – М.: Транспорт, 1997. – 432 с.
 11. Матвієнко, М. П. Комп'ютерна логіка : Навчальний посібник. – К.: Видавництво Ліра-К, 2012. – 288 с.
 12. Сапожников, В. В. Теория дискретных устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Сапожников, Ю. А. Кравцов, Вл. В. Сапожников. // Под ред. В. В. Сапожникова, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: УМК МПС России – 2001. – с. 312.
 13. Кирсанов, М. Н. Графы в MAPLE. Задачи, алгоритмы, программы – М.: Издательство ФИЗМАТЛИТ. – 2007. – с. 168.
- Ключові слова:** електрична централізація, математична модель, безпека функціонування, вихідний світлофор.
- Ключевые слова:** электрическая централизация, математическая модель, безопасность функционирования, выходной светофор.
- Keywords:** electric interlocking, mathematical model, operation safety, exit light signal.
- Рецензенти:**
д. т. н., проф. А. Б. Бойнік,
д. ф.-м. н., проф. В. І. Гаврилюк.
- Надійшла до редколегії 13.10.2016.
Прийнята до друку 28.10.2016.