

УДК 005.591.6:[621.3.08:625.1]

В. В. МАЛОВІЧКО^{1*}, Н. В. МАЛОВІЧКО^{2*}, Р. В. РИБАЛКА^{3*}

^{1*} Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта v.v.malovichko@ust.edu.ua, ORCID 0009-0008-2704-5555

^{2*} Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта n.v.malovichko@ust.edu.ua, ORCID 0009-0004-4093-9212

^{3*} Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, м. Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта r.v.rybalka@ust.edu.ua, ORCID 0000-0001-7444-0517

ВИКОРИСТАННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ НА КОЛІЙНИХ РЕЛЕ СТАНЦІЙНИХ РЕЙКОВИХ КІЛ

Мета. Метою роботи є розроблення структури автоматичного вимірювального комплексу, який дозволяє реалізувати підхід до вимірювання напруги на обмотках колійних реле рейкових кіл на посту електричної централізації без зменшення її параметрів надійності та безвідмовності, з можливістю своєчасного виявлення відхилень напруги від нормативних значень. **Методика.** Використано методи аналізу та синтезу для: дослідження принципів вимірювання напруги на обмотках колійних реле рейкових кіл на станціях, актуальних конструкцій роботів і їх застосування на залізничному транспорті; обґрунтування конфігурації та параметрів роботизованої системи для автоматичного вимірювання напруги на обмотках колійних реле. **Результати.** Проаналізовано поточну процедуру вимірювання напруги на колійних реле та існуючі підходи до її автоматизації. Виявлено певні недоліки вказаного вимірювання, які пов'язані з його тривалістю та можливістю виникнення небезпечної відмови. Для вимірювання напруги на колійних реле розроблено структуру автоматичного вимірювального комплексу на основі роботизованої системи з трьома ступенями свободи, робочою областю в прямокутних координатах, керуванням платою Arduino UNO, можливістю передавання результатів вимірювання на автоматизоване робоче місце електромеханіка для зберігання і подальшої обробки. Запропоновано спосіб прогнозування поступових відмов під час наближення напруги на обмотці реле до границь визначених нормалей та алгоритм дій у разі виявлення таких відхилень. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано підхід до вимірювання напруги на колійних реле залізничної станції, який дозволяє виконувати автоматичні вимірювання з надійною гальванічною розв'язкою вимірювального кола та інших ліній живлення приймачів рейкових кіл без участі обслуговуючого персоналу. **Практична значимість.** Впровадження розробленого комплексу дозволить виконувати автоматичне, безпечне та оперативне вимірювання напруги на обмотках колійних реле рейкових кіл на посту електричної централізації з можливістю своєчасного виявлення відхилень напруги від нормативних значень і прогнозування поступових відмов станційних рейкових кіл. В свою чергу, це дозволить вивільнити час обслуговуючого персоналу для виконання інших робіт.

Ключові слова: роботизована система, вимірювання напруги, колійні реле, технічне обслуговування, Arduino UNO.

Вступ

Витрати часу персоналу, що обслуговує систему електричної централізації (ЕЦ), може бути зменшено шляхом автоматизації його певних дій. Серед дій, що виконуються за безпосередньої участі обслуговуючого персоналу – періодичне вимірювання напруги на колійних реле рейкових кіл (РК) [2]. Аналіз розробок автоматичних систем вимірювання напруги на колійних реле РК [3] дозволив виявити їх спільну структуру, що передбачає використання мультиплексора, оцифровування сигналу та завантаження результатів до певного сховища, наприклад, персонального комп'ютера. На жаль, у подібних вимірювальних системах паралельне

підключення виводів з обмоток колійних реле до входу мультиплексора створює передумову для виникнення короткого замикання між лініями живлення різних колійних реле. Це може призвести до виникнення небезпечної відмови – помилкової вільності ділянки колії за її фактичної зайнятості. Тому системи автоматичного вимірювання подібного типу не набули широкого застосування.

Вказаний недолік обґрунтовує актуальність розробки автоматичної системи вимірювання напруги на колійних реле РК, яка дозволить усунути передумови виникнення вказаної небезпечної відмови, шляхом забезпечення гальванічної розв'язки між лініями живлення різних колійних реле.

Постановка завдання дослідження

Завданням дослідження цієї роботи є розробка структури роботизованої системи (РС) з використанням плати Arduino, що дозволить вимірювати напругу на обмотках колійних реле РК на посту ЕЦ із забезпеченням гальванічної розв'язки між лініями живлення різних колійних реле.

Мета дослідження

Метою дослідження є розробка структури автоматичного вимірювального комплексу (АВК), який дозволяє реалізувати підхід до вимірювання напруги на обмотках колійних реле РК на посту ЕЦ без зменшення параметрів надійності та безвідмовності роботи системи ЕЦ, з можливістю своєчасного виявлення відхилень напруги від нормативних значень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відповідно до Інструкції з обслуговування пристроїв сигналізації централізації та блокування [2], вимірювання напруги на колійних реле РК виконується електромеханіком один раз на чотири тижні із занесенням результатів вимірювання до журналу ШУ64. Під час виконання даного типу робіт електромеханік перевіряє напругу на кожному відгалуженні РК, яке обладнане колійним реле, порівнює результати з нормами РК і робить відповідні записи в журналі стосовно збігу рівня напруги з дозволеними нормами. Для зручності виконання даних вимірів, на постах ЕЦ розміщені вимірювальні панелі, на які виведено гнізда для вимірювання напруги з кожного реле станції (рис.).

У разі виявлення заниженої чи завищеної напруги на колійному реле, електромеханік повинен виконати регулювання РК і привести рівень напруги у відповідність до вимог нормалі. Як правило, регулювання рівня напруги необхідно виконувати не часто. Тому під час вимірювання напруги на колійних реле РК, основний час витрачається саме на вимірювання напруги та порівняння отриманих результатів із допустимими значеннями. Роботи такого типу вимагають великих витрат часу, оскільки на великій станції необхідно виконати декілька десятків вимірів, і відповідну кількість порівнянь результатів вимірювання з нормами. Також слід враховувати, що в більшості випадків електромеханік не зможе виконати виміри на всіх реле за один раз, оскільки частина РК станції будуть зайняті

рухомим складом або використовуватимуться в маршрутах і обслуговуючому персоналу доведеться чекати, поки РК будуть звільнені, щоб виконати вимірювання. За умов інтенсивної поїзної роботи, цей процес може затягуватись на години, а на великих станціях, де вантажні поїзди можуть стояти на коліях – на декілька днів. Вказані виміри доводиться виконувати поза графіком роботи, при звільненні даних колій. В зв'язку з цим виникає необхідність розробки АВК, який дозволить виконати виміри напруги без участі людини.



Рис. 1. Статив ЕЦ з панеллю для вимірювання напруги

Аналіз розробок автоматичних систем вимірювання напруги на колійних реле [3] дозволив виявити їх типову структуру: виводи з обмоток колійних реле на вимірювальній панелі паралельно підключено до входу мультиплексора, значення напруги виміряно за допомогою аналого-цифрового перетворювача, а результати записано до пам'яті комп'ютера. Головним недоліком таких систем вимірювання є те, що при підключенні до мультиплексора виникає імовірність короткого замикання між лініями живлення різних колійних реле. Це може призвести до небезпечної відмови, коли під час зайнятості однієї з ділянок станції, реле, що її контролює, може отримати живлення від сусідньої лінії і тим самим стати під струм. Небезпечна відмова полягає у відображенні на пульті чергового по станції помилкової вільності ділянки при її фактичній зайнятості. Відповідно до вимог безпеки руху поїздів це є недопустимими і тому системи автоматичного вимірювання даного типу широкого розповсюдження не набули. Вказані

недоліки обґрунтовують актуальність створення автоматичної системи, яка буде виконувати підключення до кожного реле індивідуально за умов забезпечення гальванічної розв'язки, що дозволить уникнути умов, які можуть призвести до розглянутої вище небезпечної відмови. Звичайно залишається імовірність закорочування двох провідників, які фізично підключаються до обмотки реле під час вимірювання напруги, але в цьому малоімовірному випадку відбудеться шунтування обмотки реле і РК буде помилково зайнятим. Така відмова є захисною і на безпеку руху негативного впливу не має. Враховуючи наведене, в даній роботі запропоновано використати РС.

Певні задачі, що пов'язані з інфраструктурою залізничного транспорту, може бути вирішено шляхом застосування існуючих розробок роботизованих систем. Вказані системи, серед іншого, інспектують інфраструктурні об'єкти залізничного транспорту [1], [11] (наприклад, виявляють дефекти у рейковій колії, стрілочних переводах, елементах рухомого складу), виконують очисні роботи [8] (наприклад, прибирають підлогу в рухомому складі, видаляють фарбу та іржу на сталевих мостах, сміття з рейкової колії) тощо. В [1] запропоновано концепт мобільної платформи-робота для вимірювання певних параметрів електромагнітних процесів у РК. Проте це рішення видається занадто складним та ресурсомістким, якщо застосовувати його для вимірювання напруги на колійних реле. Особливо, за умови приведення цієї задачі до виду «взяти та помістити» («pick-and-place»).

Задачі виду «взяти та помістити» може бути вирішено різними категоріями роботів (маніпуляторів). З-поміж таких категорій, визначених у [7], на це щонайменше здатні прямокутні (декартові – Cartesian), паралельні (наприклад, дельта-роботи), SCARA маніпулятори та маніпулятори типу «рука» (articulated) [9]. Ці категорії розрізняються багатьма параметрами, зокрема: складністю траєкторії руху та її програмуванням, енергоефективністю, швидкістю та прискоренням під час руху. Тому для вирішення задачі, поставленої у даній роботі, необхідно обрати певну категорію маніпулятора.

Як правило, апаратна оптимізація системи спричиняє певні ризики. Модернізація існуючих промислових роботів може бути вкрай проблематичною, зокрема, через внесення змін до фізичної структури системи, що не були передбачені її розробниками. Враховуючи додану складність, ефективність такої модернізації потребує

обґрунтування.

Основний матеріал дослідження

Конфігурація та параметри роботизованої системи. Аналітичний огляд літератури, який виконано у цій роботі, дозволив обґрунтувати вибір конфігурації та певних параметрів РС і платформи для реалізації вимірювання напруги на колійних реле.

Аналіз типових дій працівника під час вимірювання рівня напруги на колійних реле через спеціально призначені гнізда вимірювальної панелі (рис.) дозволив класифікувати цю задачу як «взяти та помістити» в прямокутній системі координат.

Для ефективного вирішення вказаної задачі призначено прямокутних роботів, особливо, якщо вимагаються переважно лінійні рухи. Динамічна модель таких лінійних роботів є більш простою порівняно з маніпулятором типу «рука» і паралельними маніпуляторами та спрощується до множини лінійних диференціальних рівнянь другого порядку. Кінематична схема прямокутних роботів складається виключно з трьох взаємоперпендикулярних призматичних (ковзних) з'єднань [9], тому в ній частково або повністю відсутні ефекти, викликані обертанням елементів маніпулятора. Це дозволяє значно спростити їх програмування і, як правило, досягти більшої енергоефективності. SCARA та дельта-роботи володіють високою швидкістю [9]. Проте, складність їх програмування та енергоефективність у порівнянні з прямокутними роботами може бути вирішальним фактором на користь останніх в задачах виду «взяти та помістити».

Порівняно з гідравлічними та пневматичними актуаторами, електричні актуатори роботів набувають все більшої популярності. Електричні системи з лінійними актуаторами мають певні переваги над гідравлічними та пневматичними [12]: найбільша точність [10], плавність ходу та найнижче споживання потужності (з використанням сервоприводу), найменші габарити. Переміщення в електричній системі є більш плавними, оскільки актуатор виконує обертання з постійним крутним моментом. На відміну від електричних систем, в гідравлічних та пневматичних системах існують явища, які заважають плавному переміщенню, що спричинені коливанням тиску в системі. В електричних системах актуатори виконують перетворення електричної енергії безпосередньо на механічний рух. Ці та інші переваги електричних систем зумовили їх поширення серед промислових

роботів [9].

Структурна схема роботизованої системи.

На рис. приведено структурну схему пропонованої РС для прикладу вимірювальної панелі,

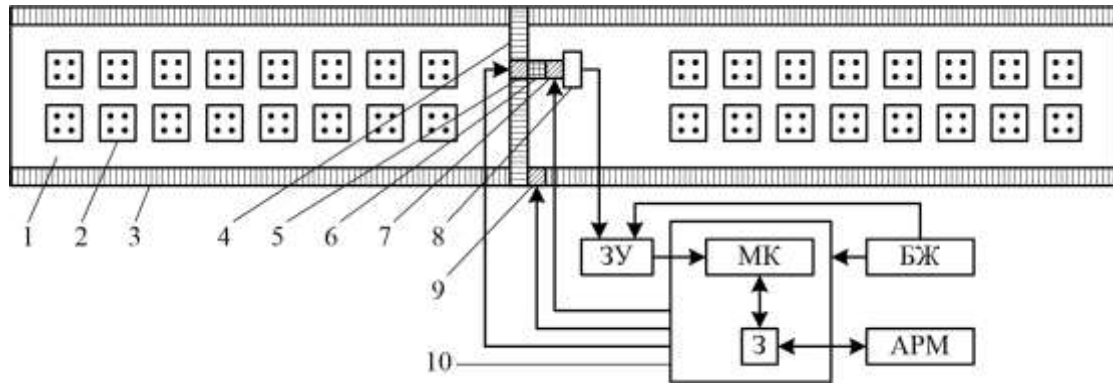


Рис. 2. Структурна схема роботизованої системи вимірювання напруги на колійних реле:

1 – вимірювальна панель; 2 – гніздо з виводами для вимірювання; 3, 4, 6 – направляючі для переміщення вздовж осей X, Y та Z, відповідно; 5, 7, 9 – актуатори для переміщення вздовж осей X, Y та Z, відповідно; 8 – пара вимірювальних щупів; 10 – контролер робота

На вимірювальній панелі рис. (1) розміщено два масиви гнізд з виводами для вимірювання (2) напруги на колійних реле у двох рядках по вісім у кожному масиві. Кожне гніздо містить по дві пари виводів. Переміщення маніпулятора вздовж осей X, Y та Z забезпечують відповідні направляючі (3, 4, 6) та актуатори (5, 7, 9) – електричні приводи. Ними керує контролер робота (10). Робочим органом є пара вимірювальних щупів (8).

Контролер роботизованої системи. В якості контролера пропонованої РС запропоновано використати плату Arduino [4]. Наприклад, Arduino UNO застосовано як контролер маніпулятора типу «рука» з 6 ступенями свободи [5], а в [6] – для дельта-робота. Серед переваг Arduino – низька вартість, широка номенклатура сумісних сенсорів і простота програмування. Для вирішення задачі в даній роботі потрібно керувати трьома актуаторами, тому можливостей Arduino UNO достатньо.

Процес вимірювання напруги роботизованою системою. Контролер (рис. – 10) керує переміщенням маніпулятора так, щоб пара вимірювальних щупів (8) по чергово розміщувалась у кожній з пар виводів гнізд на вимірювальній панелі (1). Під час знаходження пари щупів у виводах гнізда (2) виконується вимірювання напруги на відповідному колійному реле.

Аналогова напруга $u(t)$ з пари вимірювальних щупів (8) через пристрій захисту та узгодження (ЗУ) надходить на вхід мікроконтролера (МК, в обраному Arduino UNO – ATmega328P), призначеного для виконання аналого-цифрового перетворення (АЦП). Результат вимірювання

поданої на рис. . При цьому, маніпулятор знаходиться в проміжному положенні під час руху до наступної позиції для вимірювання.

(ефективне значення напруги $U_{\text{еф.}}$) та ідентифікатор відповідної пари виводів гнізда (2) передається через модуль зв'язку (3) на відповідне автоматизоване робоче місце (АРМ). Одна сесія вимірювання передбачає вимірювання $U_{\text{еф.}}$ на кожній з пар виводів усіх гнізд (2) на вимірювальній панелі (1) та передавання результатів на АРМ.

Для модуля 3 обрано Wi-Fi модуль (ESP8266). АРМ – персональний комп'ютер з Wi-Fi. Блок живлення (БЖ) забезпечує живлення контролера (10) та елементи ЗУ. Пристрій ЗУ забезпечує: гальванічну розв'язку (трансформатор); перетворення вхідної напруги на ту, що задовольняє вимогам АЦП – від 0 В до +5 В (дільник напруги, неінвертуючий операційний підсилювач); фільтрацію сигналу відповідно до вимог теореми Котельникова.

Обмеження параметрів роботизованої системи. Для оцінки того, чи забезпечить пропонована РС вирішення поставленої задачі, в роботі виконано оцінку граничних значень таких її параметрів: загальна тривалість вимірювання $T_{\text{вим.заг.}}$ значення $U_{\text{еф.}}$ в одній сесії вимірювання; частота дискретизації та похибка квантування АЦП.

Загальна тривалість однієї сесії вимірювання дорівнює

$$T_{\text{вим.заг.}} = T_{\text{п.заг.}} + NT'_{\text{вим.}} + T_{\text{ін.}} \quad (1)$$

де $T_{\text{п.заг.}}$ – загальна тривалість переміщення робочого органу в одній сесії вимірювання; $T'_{\text{вим.}}$ – тривалість вимірювання $U_{\text{еф.}}$ на одній з N пар виводів; N – кількість пар виводів гнізд для вимірювання (рис. – 2); $T_{\text{ін.}}$ – витрати часу на інші

операції (ініціювання МК, передавання результатів на АРМ тощо).

Номинальна частота неперервного сигналу напруги $u(t)$ на парі виводів гнізд для вимірювання (рис. – 2) не перевищує $f_n=50$ Гц. За теоремою Котельникова, мінімально необхідна частота дискретизації – $f_{д.мін}=2 \cdot f_n=100$ відлік/с. Враховуючи неідеальність умов вимірювання як запас по частоті дискретизації, прийнятним є $f_{д.п}=7 \cdot f_{д.мін}=700$ відлік/с.

Тривалість

$$T'_{вим.} = T_{АЦП} + T_{эф.}, \quad (2)$$

де $T_{АЦП}=1/f_{д.п} \approx 1,43$ мс – тривалість виконання АЦП; $T_{эф.}$ – тривалість обчислення $U_{эф.}$.

Значення $U_{эф.}$ для неперервного $u(t)$ обчислюється за виразом

$$U_{эф.} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}. \quad (3)$$

З виходу АЦП надходить послідовність $\{u_k\}$ відліків неперервного $u(t)$, де $k=0,1 \dots m-1$, а m – кількість відліків. За умови обчислення наближеного значення інтегралу за допомогою методу середніх прямокутників, вираз (3) перетворюється на такий

$$U_{эф.} = \sqrt{\frac{1}{mT_{АЦП}} \sum_{k=0}^{m-1} u_k^2}. \quad (4)$$

Для зменшення витрат пам'яті МК з $O(n)$ (збереження послідовності $\{u_k\}$ довжиною m відліків) до $O(1)$, в алгоритмі обчислення виразу (4) реалізовано накопичення суми значень u_k^2 після кожного взяття відліку АЦП.

Кількість тактів МК ATmega328P, потрібних для виконання АЦП, не перевищує 25 [4], а для множення або ділення – близько 2. Тому $T_{эф.} \ll T_{АЦП}$ і в (2) $T_{вим.} \approx T_{АЦП} \approx 1,43$ мс.

Отже розрахункова прийнятна частота дискретизації складає $f_{д.п}'=1/T_{вим.} \approx 700$ відлік/с. Оскільки максимальна частота дискретизації АЦП МК ATmega328P дорівнює $f_{д.макс}=15 \cdot 10^3$ відлік/с [4], то $f_{д.п}' \ll f_{д.макс}$. Отже продуктивності МК ATmega328P достатньо для вимірювання $U_{эф.}$. Обчислена $f_{д.п}'$ може бути прийнятою за граничну частоту під час розрахунку фільтру проти накладання спектрів.

При $N=64$ (рис.) в (1) $NT_{вим.} \approx 91,5$ мс.

Загальна тривалість переміщення робочого органу в одній сесії вимірювання дорівнює

$$T_{п.заг.} = T_{заг.ХУ} + T_{заг.З}$$

де $T_{заг.ХУ}$ – загальна тривалість переміщення

робочого органу за шляхом в площині ХУ; $T_{заг.З}$ – тривалість переміщення робочого органу в обох напрямках за віссю Z.

Для РС пропонується «С»-подібний шлях маніпулятора в площині ХУ (рис. – направляючі 3 та 4) за годинниковою стрілкою між гніздами з виводами: початок – у правому нижньому, переміщення ліворуч до лівого нижнього, підйом до верхнього лівого, переміщення до правого верхнього. Розрахунок $T_{п.заг.}$ залежить від розмірів конкретної вимірювальної панелі, які можуть суттєво відрізнитись залежно від структури конкретної станції. Тому в даній роботі розрахунок $T_{п.заг.}$ не приведено. Значення доданку $T_{ін.}$ вважається незначним.

Похибка квантування в АЦП МК ATmega328P [4] не перевищує 0,5 від найменшого значимого біта, тобто для аналогового сигналу в межах (0, +5) В приблизно дорівнює 2,4 мВ. В зв'язку з тим, що під час вимірювання значення напруги порівнюється з нормаліями з точністю до десятих вольт, то розрахована похибка квантування АЦП не впливає на результати.

Використання Arduino для керування роботизованою системою

В контролерах РС, подібних до Arduino UNO, необхідно враховувати обмежений обсяг вбудованої пам'яті. Обрану плату Arduino UNO побудовано на базі мікроконтролера ATmega328P, що має три основні типи пам'яті [4]: Flash, SRAM та EEPROM. Кожен із них виконує окрему функцію і вимагає оптимального використання для забезпечення стабільної та надійної роботи пристрою.

Flash-пам'ять («програмна пам'ять») обсягом 32 кБ призначена для зберігання основного коду програми. Після компіляції та завантаження коду, ця пам'ять слугує постійним сховищем команд, які виконуються при кожному перезапуску плати. В пропонованій РС зберігання координат для переміщення маніпуляторів реалізовано у Flash-пам'яті з використанням директиви PROGMEM, що дозволило зменшити навантаження на оперативну пам'ять (SRAM) і суттєво розширити кількість допустимих точок вимірювання у межах апаратних обмежень плати. За приблизними оцінками, з огляду на розмір залишкової Flash-пам'яті та використання компактного формату даних, Arduino UNO може вмішувати до 3400 координат точок вимірювання, не перевищуючи допустимого обсягу пам'яті, тобто забезпечити вимірювання напруги на реле станцій будь-якого розміру.

SRAM (оперативна пам'ять) обсягом 2 кБ використовується для зберігання змінних під час виконання програми. Через її малий обсяг особливо важливо уникати тривалого зберігання великих масивів. В запропонованій РС це досягнуто шляхом динамічного завантаження даних координат із Flash-пам'яті до оперативної пам'яті лише на момент використання. У такий спосіб загальне споживання SRAM не перевищує 10 % від доступного обсягу, що забезпечує надійне функціонування під час роботи актуаторів і в процесі обміну даними з АРМ.

EEPROM – енергонезалежна пам'ять обсягом 1 кБ. У межах базової реалізації EEPROM не використовується, проте може бути залучена для збереження параметрів калібрування, конфігурацій користувача або останньої координати, на якій завершено цикл вимірювання. Використання EEPROM слід здійснювати з урахуванням обмеженої кількості циклів перезапису, що становить приблизно 100 тисяч для кожної комірки. Також в дану пам'ять можна занести величину напруги 1 В, що використовується для визначення вільності РК.

Для вимірювання $u(t)$ в кожній точці (рис.) використано аналоговий вхід МК. Передачу отриманих даних ($U_{\text{эф}}$ та ідентифікатор відповідної пари виводів гнізда рис. – 2) може бути здійснено у двох варіантах:

- USB-з'єднання;
- Wi-Fi модуль (ESP8266) у режимі TCP-клієнта з відправкою HTTP-запитів на сервер (модуль 3 на рис.).

Перший варіант доцільно використовувати, тільки якщо АРМ, куди буде передаватись інформація, знаходитиметься поряд. Таке розміщення використовується, наприклад, в мобільних модулях сучасних мікропроцесорних систем. Тому для запропонованого підходу вимірювання використано передачу через Wi-Fi модуль.

Обробка даних вимірювання

Контролер РС послідовно перевіряє кожне колійне реле на станції. Якщо РК вільне (напруга більше 1 В), то виконується вимірювання напруги на колійному реле даного РК. Якщо РК зайняте, то контролер перемикається на вимірювання напруги на наступному РК. При цьому в пам'яті фіксується необхідність повторного вимірювання через певний інтервал часу з таким розрахунком, щоб виміри були виконані за 4 тижні, до наступного періоду загальних вимірювань за нормативною документацією.

Результати вимірювання передаються через Wi-Fi на АРМ поста ЕЦ. У випадку, коли напруга на колійному реле перевищує максимальну нормаль, АРМ видає інформацію на пристрій відображення і на друкуючий пристрій, а також по лінійному колу інформація про зафіксовану відмову поступають змінному інженеру дистанції сигналізації і зв'язку. При виникненні такої ситуації, електромеханік повинен виконати регулювання РК. Якщо напруга на колійному реле не перевищує максимальну нормаль, то АРМ перевіряє чи не менше вона мінімальної нормалі. Коли ця умова виконується, АРМ зберігає отримані дані для подальшого аналізу і переходить до вимірювання напруги на наступному колійному реле.

На основі збережених результатів попередніх вимірювань є можливість прогнозувати виникнення відмови. Наприклад, якщо напруга наближається до максимальної (або мінімальної) границі нормалі та перевищує поріг наближення, що задається програмно, на моніторі АРМ відображається попередження про необхідність регулювання напруги на реле, оскільки досить імовірно виникнення відмови через порівняно невеликий проміжок часу. У даній роботі алгоритм прогнозування виникнення відмов не розглянуто.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше запропоновано підхід до вимірювання напруги на колійних реле залізничної станції, який дозволяє виконувати автоматичні вимірювання з надійною гальванічною розв'язкою вимірювального кола та інших ліній живлення приймачів рейкових кіл без участі обслуговуючого персоналу. Впровадження розробленого комплексу дозволить виконувати автоматичне, безпечне та оперативне вимірювання напруги на обмотках колійних реле рейкових кіл на посту електричної централізації з можливістю своєчасного виявлення відхилень напруги від нормативних значень і прогнозування поступових відмов станційних рейкових кіл. В свою чергу, це дозволить вивільнити час обслуговуючого персоналу для виконання інших робіт.

Висновки

Виконаний аналіз існуючих конструкцій роботів дозволив розробити структуру РС з контролером на базі Arduino UNO, що є основою

АВК, який надає можливість вимірювати напругу на обмотках реле рейкових кіл на посту ЕЦ без участі обслуговуючого персоналу із забезпеченням гальванічної розв'язки між лініями живлення різних колійних реле. Останнє дозволяє уникнути передумов небезпечної відмови виду «помилкова вільність ділянки колії».

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Гаврилюк В. Перспективи використання роботів для контролю технічного стану рейкових кіл. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2025. № 29. С. 72–77. DOI: 10.15802/tstt2025/325483.
2. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) : ЦШ-0060. Київ, 2009.
3. Тимошенко О. Розробка підсистеми контролю рейкових кіл на станції : дипломна робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра. Дніпро : Український держ. ун-т науки і техн., 2025. 79 с. Також доступний за посиланням: <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/20334>
4. Arduino Documentation. *Arduino Docs*. URL: <https://docs.arduino.cc/> (date of access: 25.02.2025).
5. Azlan N., Sanni M., Shahdad I. Low-cost Pick and Place Anthropomorphic Robotic Arm for the Disabled and Humanoid Applications. *Applied Research and Smart Technology*. 2020. Vol. 1, no 2. P. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.23917/arstech.v1i2.25>.
6. Hoai P., Cong V., Hiep T. Design a low-cost delta robot arm for pick and place applications based on computer vision. *FME Transactions*. 2023. Vol. 51, no. 1. P. 99–108. DOI: 10.5937/fme2301099p.
7. ISO 8373:2021(en), Robotics — Vocabulary. *ISO Online Browsing Platform (OBP)*. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-3:v1:en> (date of access: 21.02.2025).
8. Koul P. A Study of Innovations in Robotic Designs and Technologies for Application in Railway Transportation Systems. *International Journal of Ingenious Research, Invention and Development*. 2024. Vol. 3, no. 5. P. 483–501. DOI: 10.5281/ZENODO.14211829.
9. Muru J., Rassölkin A. A Scoping Review of Energy Consumption in Industrial Robotics. *Machines*. 2025. Vol. 13, no. 7. P. 1–30. DOI: 10.3390/machines13070542.
10. Uyar O. Control of Linear Electric Actuator with Hybrid Fuzzy PID Controller. *Proceedings of The International Conference on Academic Research in Science, Technology and Engineering*. 2022. Vol. 1, no. 1. P. 39–47. DOI: 10.33422/icarste.v1i1.61.
11. Wang Y., Miao B., Zhang Y. et al. Review on Rail Damage Detection Technologies for High-Speed Trains. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 14. P. 1–30. DOI: 10.3390/app15147725.
12. Pustavrh J., Hočevár M., Podržaj P. et al. Comparison of hydraulic, pneumatic and electric linear actuation systems. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. DOI: 10.1038/s41598-023-47602-x.

Надійшла в редколегію 26.03.2025

Прийнята до друку 21.05.2025

V. MALOVICHKO, N. MALOVICHKO, R. RYBALKA

APPLICATION OF A ROBOTIC SYSTEM TO AUTOMATE THE PROCESS OF MEASURING VOLTAGE ACROSS TRACK RELAYS OF RAILWAY STATION TRACK CIRCUITS

Purpose. This study aims to develop the structure of an automatic measuring complex that enables the implementation of the approach to measure voltage across the windings of track circuit relays at the electric interlocking tower, without compromising its dependability and reliability, featuring the capability for timely detection of deviations from standard voltage levels. **Methodology.** Methods of analysis and synthesis were applied to examine the principles of voltage measurement across the windings of track circuit relays at stations, as well as relevant robotic designs and their applications in railway transport; and to justify the configuration and parameters of a robotic system for automatic voltage measurement across track relay windings. **Findings.** The current procedure for measuring voltage across track relays, along with existing approaches to its automation, was analysed. Certain drawbacks of the mentioned measurement process, related to its duration and the risk of hazardous failure, were identified. To enable voltage measurement across track relays, the structure of an automatic measuring complex, based on a robotic system with three degrees of freedom, a working area in rectangular coordinates, controlled by the Arduino UNO board, and the ability to transfer measurement results to an electromechanic's automated workstation for storage and further processing, was developed. A method for predicting gradual failures as the voltage across the relay winding approaches the threshold of specified standards, along with an algorithm for responding to such deviations, was proposed. **Originality.** For the first time, an approach was proposed to measure the voltage across the track relays at a railway station, enabling automatic measurements with reliable galvanic isolation between the measuring circuit and other power supply circuits of the track circuit receivers, without the involvement of maintenance personnel. **Practical value.** The implementation of the developed complex enables automatic, safe and prompt measurement of voltage across the windings of track circuit relays at the electric interlocking tower, featuring an option to timely detect voltage deviations from standard values and predict gradual failures of station track circuits. This, in turn, will allow maintenance personnel to allocate their time to other tasks.

Key words: robotic system, voltage measurement, railway track relays, maintenance, Arduino UNO.