

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЛОБАТЮК ЮРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 629.423

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ГАЛЬМІВНОЇ  
СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Вінниця - 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: академік НАПН України,  
доктор технічних наук, професор  
**Мокін Борис Іванович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри відновлювальної енергетики та  
транспортних електричних систем і комплексів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Сінчук Олег Миколайович**,  
Криворізький національний університет,  
завідувач кафедри систем електроспоживання та  
енергетичного менеджменту.

кандидат технічних наук, доцент  
**Карплюк Леонід Федорович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
доцент кафедри електропривода та автоматизації  
промислових установок.

Захист відбудеться «16» жовтня 2015 р. о 10:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210, ГНК.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий «15» вересня 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В. В. Кулик

## ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОБОТИ

**Актуальність теми.** Надійне функціонування пристроїв та функціональних агрегатів відноситься до розряду особливо гострих питань на будь-якому виді транспорту. На залізничному транспорті це питання є важливим, оскільки кількість можливих небезпечних ситуацій суттєво зростає, а масштаб останніх змушує звернути на це особливу увагу.

Надійність електротехнічних комплексів електрорухомого складу залізниці є актуальною, беручи до уваги чисельність небезпечних ситуацій на залізничних коліях України. Зокрема, стан такого важливого функціонального блоку електротехнічного комплексу електропотяга, яким є гальмівне та зв'язане з ним електричне обладнання, суттєво впливає на безпеку руху та технічні показники залізничного транспорту. При недостатній ефективності гальм у поїзді створюється загроза виникнення небезпечних ситуацій на залізничних шляхах.

Діагностування основних функціональних агрегатів електротехнічного комплексу електропотяга в режимі нормальної експлуатації скорочує час на пошук несправностей та зменшує матеріальні витрати на ремонт, що сприяє зросту надійності функціонування як електротехнічного комплексу електровоза, так і поїзда в цілому, а тому тема дисертаційної роботи, присвяченої розробці методів та пристроїв для діагностування гальмівної системи електропотяга як однієї із найважливіших підсистем його електротехнічного комплексу є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основний зміст роботи складають результати досліджень, які проводились протягом 2011-2014 років, відповідно до наукового напрямку кафедри «Відновлювальна енергетика та транспортні електричні системи і комплекси».

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення надійності функціонування такого важливого функціонального блоку електротехнічного комплексу електропотяга, яким є гальмівна система, за рахунок створення математичних моделей та пристроїв для діагностування її механічної і пневматичної підсистем та електричної підсистеми у вигляді системи підтримки прийняття рішень по виявленню несправностей на маршруті.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

- здійснити аналіз наукових робіт, присвячених діагностуванню основних функціональних підсистем гальмівної системи електропотяга, та дослідити особливості використання існуючих методів та пристроїв діагностування гальмівної системи електровоза та системи оцінки несправностей електричної підсистеми;
- розробити математичну модель та удосконалити систему підтримки прийняття рішень по виявленню несправностей електричної підсистеми електропотяга машиністом електровоза;

- розробити математичну модель, метод діагностики на її основі та пристрій для діагностування механічної підсистеми гальмівної системи електропотяга;
- розробити математичну модель, метод діагностики на її основі та пристрій для діагностування пневматичної підсистеми гальмівної системи електропотяга;
- розробити імітаційну модель для перевірки синтезованих математичних моделей на адекватність та для оцінки ефективності розроблених пристроїв діагностування.

*Об'єктом дослідження* є процеси діагностування основних функціональних агрегатів електротехнічного комплексу електропотяга.

*Предмет дослідження* – методи, математичні моделі та пристрої для діагностування гальмівної системи електропотяга, як однієї із найбільш важливих функціональних підсистем його електротехнічного комплексу.

**Методи дослідження.** Під час досліджень функціонального блоку електротехнічного комплексу електропотяга, яким є механічна підсистема його гальмівної системи використовувалися методи теоретичної механіки та математичного аналізу. При дослідженні роботи іншого функціонального блоку електротехнічного комплексу електропотяга, яким є пневматична підсистема його гальмівної системи, використовувалися методи аеродинаміки та теорії диференціальних рівнянь в частинних похідних. Для синтезу та дослідження математичних моделей діагностування застосовувались методи ідентифікації динамічних систем та імітаційного моделювання. Для реалізації структур розроблених пристроїв діагностування застосовувалася теорія мікропроцесорів. Використано методи кінцевих автоматів та секвенціального аналізу з метою синтезу системи підтримки прийняття рішень машиністом на маршруті з виявлення несправностей електричної підсистеми електротехнічного комплексу електропотяга, пов'язаної функціонально з гальмівною системою.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше запропоновано новий метод діагностування рівня зносу гальмівних колодок гальмівної системи у складі електротехнічного комплексу електропотяга, який дозволяє вимірювати рівень зносу кожної гальмівної колодки в процесі її нормальної експлуатації за допомогою доступних для вимірювання опосередкованих параметрів, що, на відміну від існуючих методів, не вимагає внесення змін в технологію виробництва гальмівних колодок.

2. Запропоновано математичну модель для діагностування пневматичної магістралі гальмівної системи електропотяга, для ідентифікації якої достатньо знати лише значення основних параметрів режиму роботи електротехнічного комплексу, винесених на панель керування електровозом в кабіні машиніста, та вперше розроблено метод діагностики та пристрій, реалізований на його базі, що дозволяє машиністу визначати місце пошкодження пневматичної магістралі під час руху електропотяга, не покидаючи своєї кабіни.

3. Вперше синтезовано секвенціальну модель функціонування електричної підсистеми гальмівної системи електропотяга, за допомогою якої

удосконалено систему підтримки прийняття рішень щодо виявлення машиністом електровоза несправностей гальмівної системи електропотяга під час його руху.

4. Отримав подальший розвиток метод імітаційного моделювання, з використанням якого запропоновані процедури перевірки синтезованих математичних моделей на адекватність та оцінювання розроблених діагностичних пристроїв на ефективність.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

Розроблено структурні схеми пристроїв для діагностування в режимі нормальної експлуатації таких важливих функціональних блоків електротехнічного комплексу електропотяга, якими є механічна і пневматична підсистеми гальмівної системи електропотяга та функціонально зв'язана з ними електрична підсистема, на основі яких легко реалізується комплексний мікропроцесорний пристрій, що встановлюється на панелі управління у кабіні машиніста поїзда з електричною локомотивною тягою і дозволяє машиністу оперативно реагувати на виникнення несправностей у гальмівній системі електропотяга.

Результати, отримані в дисертаційній роботі, впроваджено на відокремленому підрозділі «Локомотивне депо Жмеринка» державного територіально-галузевого об'єднання «Південно-західна залізниця» (акт підтвердження намірів впровадження від 24. 04. 2015 р.); на відокремленому підрозділі «Вагонне депо Жмеринка» державного територіально-галузевого об'єднання «Південно-західна залізниця» (акт підтвердження намірів впровадження від 20. 04. 2015 р.) та в навчальний процес Вінницького національного технічного університету (акт підтвердження впровадження від 25. 04. 2015).

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві автору належать: у [1] – запропонована структурна схема та розроблено алгоритм функціонування пристрою, який реалізує розроблену модель; у [2] – синтезовано структуру системи автоматичного контролю технічного стану силових електричних кіл тягового електровоза; у [3] – здійснено синтез математичної моделі для діагностування пневматичної магістралі гальмівної системи електропоїзда; у [4] – розроблено деталізовану математичну модель, придатну для визначення місця пошкодження цієї магістралі, та її структурну схему, придатну для розробки імітаційної моделі; у [9] – розробка принципу роботи та впровадження мікропроцесора; у [10] – розробка принципу роботи та впровадження мікропроцесора; у [5] – побудована математична модель для діагностики рівня зносу гальмівних колодок; у [6] – проаналізовано принцип роботи гальмівної системи та визначені умови і запропоновано рішення, що дозволить системі контролю коректно працювати; у [7] – у структурній схемі передбачено зручний для машиніста механізм виведення інформації про вірогідну несправність та спосіб її усунення.

**Апробація результатів дисертації.** Результати та основні наукові положення дисертаційної роботи пройшли апробацію на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, 2011 – 2015 рр.; I та II міжнародних науково-технічних конференціях «Оптимальне керування електроустановками», м. Вінниця, 2011, 2013 рр.; міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми та перспективи розвитку технічних засобів транспорту та систем автоматизації», м. Харків, 2014 р.

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані у 10 наукових працях, з них 3 статті у наукових фахових виданнях, які входять до переліку ВАК України та міжнародної науково-метричної бази РИНЦ, 1 стаття у виданні США, що входить до переліку Index Copernicus та ін., 2 патенти на корисні моделі та 4 тези доповідей.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (122 найменування), додатків. Основний зміст викладений на 135 сторінках друкованого тексту, містить 56 рисунків, 6 таблиць. Загальний обсяг роботи 155 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність досліджень, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Вказано мету та практичне значення одержаних результатів, а також описано їх апробацію, публікації та впровадження.

**У першому розділі** подано короткий аналіз електровоза як електричного транспортного засобу для локомотивної тяги. Окреслено коло питань, пов'язаних з несправностями електровоза та рухомого складу, що виникають під час руху на маршруті. Основну увагу, здійснивши аналіз аварійних ситуацій на залізниці, вирішено надати гальмівній системі потяга з електричною локомотивною тягою. Розглянуто будову та роботу гальмівної системи електровоза, до комплексу якої входять електрична, механічна та пневматична підсистеми.

Представлено аналіз робіт, присвячених методам та засобам діагностування гальмівної системи електропотяга: розробці пристроїв для діагностики гальмівних колодок електровоза та вагонів; розробці пристроїв для знаходження місця пошкодження пневматичної магістралі потяга; контролю стану електричної підсистеми гальмівної системи потяга.

На підставі проведеного аналізу сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи.

**У другому розділі** розробляється система підтримки прийняття рішень машиністом електровоза по виявленню несправностей електричної підсистеми гальмівної системи під час руху на маршруті.

Під час експлуатації тягового електровоза ВЛ80Р можуть виникати аварійні ситуації, що призводять до відключення певних електричних комутуючих та захисних кіл.

Основними причинами, що викликають ненормальну роботу електровоза, являються: порушення електричного кола внаслідок обриву проводів чи поломки шин, несправності в схемі випрямно-інверторного перетворювача і блока керування випрямно-інверторним перетворювачем; відсутність контакту на блокувальних чи силових контактах; коротке замикання внаслідок заземлення кіл, пробоя ізоляції проводу, електродвигуна чи апарата; нечітка робота апаратів через понижений тиск в пневматичному колі керування і т.і.

Стан обладнання контролюється сигнальними лампами, встановленими на панелі пульта машиніста і лампами, встановленими на панелі над пультом машиніста. В інструкції для машиніста розміщені можливі характерні несправності при роботі електровоза та способи їх усунення. Оскільки різним комбінаціям індикації одних і тих же ламп відповідають різні вірогідні причини несправності та способи їх усунення, то це відносно ускладнює роботу машиніста та збільшує час на прийняття певного рішення.

Для синтезу структури САК використано математичний апарат секвенцій.

Маючи структурну схему пристрою контролю, який реалізує секвенціальна модель САК, синтезувано функціональну схему САК.

Розроблену функціональну схему мікропроцесорної САК представлено на рис.1.

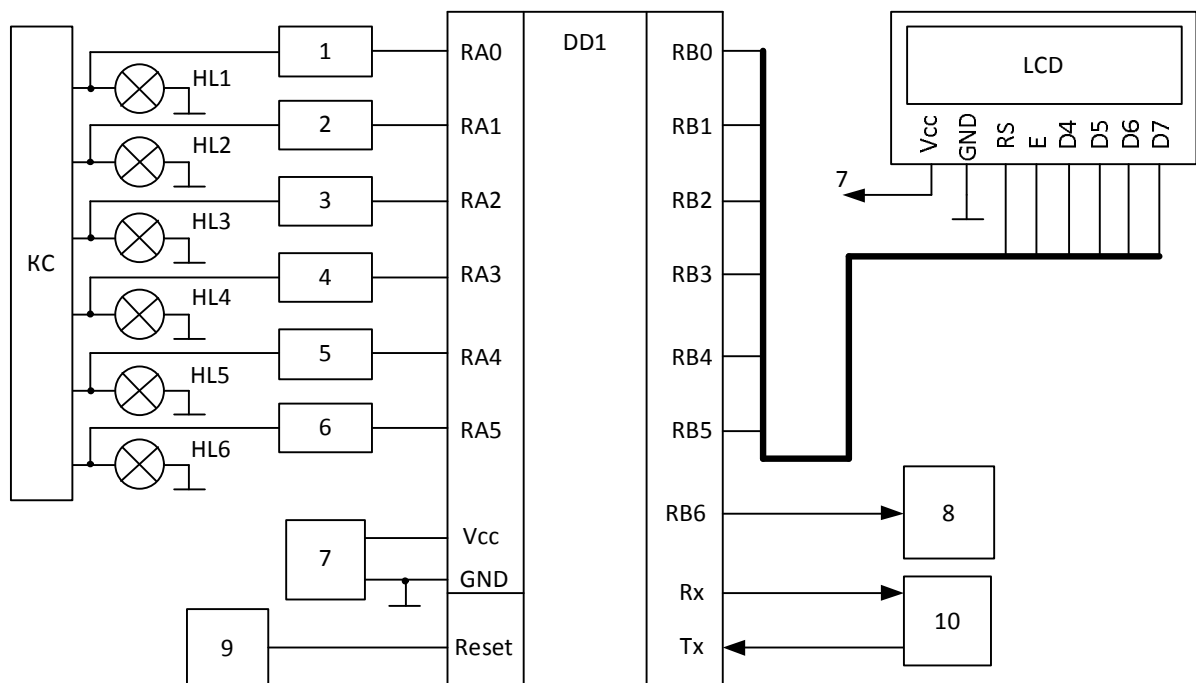


Рисунок 1 – Функціональна схема мікропроцесорної САК

КС – кола сигналізації електровоза, HL1-HL6 – сигнальні індикаторні лампи (HL1 – тяговий двигун, HL2 – головний вимикач, HL3 – режим

рекуператції, HL4 – випрямно-інверторний перетворювач ВИП61, HL5 – випрямно-інверторний перетворювач ВИП62, HL6 – реле заземлення), 1-6 – перетворювачі рівня вхідного сигналу, DD1 – мікроконтролер PIC18F2320, 7 – джерело живлення, 8 – пристрій звукового сигналу, 9 – кнопка перезапуску системи, 10 – ПК, LCD – рідкокристалічний дисплей.

В момент виникнення аварійної ситуації у електричному обладнанні електровоза на сигнальні лампи подається відповідний сигнал з електричних кіл сигналізації електровоза КС. Цей сигнал також подається на відповідний перетворювач рівня вхідного сигналу (1-6) мікропроцесорної системи, що приводить сигнали до рівня напруги, яка необхідна для нормальної роботи мікроконтролера. З перетворювачів рівня сигнали надходять на відповідні аналогові входи (RA0-RA5) мікроконтролера. Для обміну даними між мікроконтролером DD1 та користувачем та керування роботою пристрою служить клавіатура 10 та рідкокристалічний дисплей LCD. Система оцінює сигнали на входах, формуючи певний стан (S1-S6), якому відповідає відповідне вихідне текстове повідомлення на LCD і звукове повідомлення на пристрій виводу звукового сигналу 8.

Запропонований пристрій можна автономно встановлювати у кабіні машиніста електровоза.

**У третьому розділі** розробляється математична модель та пристрій для діагностування рівня зносу гальмівних колодок вагонів у складі електропотяга.

В експлуатації чавунні гальмівні колодки локомотивів і вагонів достатньо швидко зношуються до критичної товщини, що приводить до необхідності їх заміни. Однак, в сучасних умовах експлуатації гальмівних колодок локомотивів і вагонів, неможливо забезпечити візуальний контроль їхнього зносу, а, відповідно, і їх своєчасну заміну.

Сьогодні товщину гальмівної колодки контролює помічник машиніста лінійкою або штангенциркулем на стоянці локомотива, що викликає великі затрати часу і складає велику трудомісткість.

Величина виходу штоку гальмівного циліндра пропорційна зменшенню товщини гальмівної колодки. Очевидно, що при зношенні гальмівних колодок рівень виходу штока збільшується.

Виконавши математичні перетворення отримаємо вираз функції величини виходу штока гальмівного циліндра від часу:

$$x(t) = \frac{\pi R_n^2 P_y}{m} \int_0^{t_k} \left( t - \tau \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right) dt = \frac{\pi R_n^2 P_y}{m} \left( \frac{t^2}{2} - \tau \left( t + \tau \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right) \Bigg|_0^{t_k} =$$

$$= \frac{\pi R_n^2 P_y}{m} \left( \frac{t_k^2}{2} - \tau \left( t_k + \tau \cdot e^{-\frac{t_k}{\tau}} \right) + \tau^2 \right) \quad (1)$$

де  $P_y$  – усталене значення тиску у гальмівному циліндрі;

$\tau$  – стала часу;

$R_n$  – радіус поршня циліндра;



$m$  – приведенне значення маси гальмівної важільної передачі;  
 $t_k$  – час інтегрування.

Вимірюючи час спрацювання гальмівної важільної передачі, можна судити про величину виходу штока гальмівного циліндра, і, як наслідок, можна судити про ступінь зношення гальмівної колодки. Для цього необхідно мати інформацію про час спрацювання гальмівної важільної передачі (власне, час доторкання колодки до бандажа колеса електровоза).

Значення часу спрацювання ГВП отримаємо, отримавши сигнал від тензометричних сенсорів. Задля цієї мети пропонується використати тензометричні сенсори (сенсори зусилля), які будуть спрацьовувати при відповідному зусиллі гальмівної важільної передачі, яке буде прикладатись колодкою до бандажу колеса, і, відповідно, до башмака колодки, де і пропонується розмістити сенсори.

При функціонуванні гальмівної важільної передачі існує можливість нерівномірного натиску гальмівних колодок в парі між собою і, відповідно, нерівномірного натиску пар гальмівних колодок між собою. Для діагностування цієї несправності пропонується скористатись вектором стану зусиль, прикладених до гальмівних колодок.

Рівняння визначення вектора стану представлено нижче:

$$S = \begin{cases} |F_{11} - F_{12}| \geq \Delta F_k \Rightarrow s_1 = 1 \\ |F_{21} - F_{22}| \geq \Delta F_k \Rightarrow s_2 = 1 \\ \left| \frac{F_{11} + F_{12}}{2} - \frac{F_{21} + F_{22}}{2} \right| \geq F_{kp} \Rightarrow s_3 = 1 \end{cases}, \quad (2)$$

де  $F_{ij}$  – зусилля спрацювання, прикладене до  $i$ -ї гальмівної колодки  $j$ -ого гальмівного механізму;

$\Delta F_k$  – допустиме відхилення в зусиллі спрацювання гальмівних колодок, прикладене до  $i$  гальмівної колодки 1-ого гальмівного механізму;

$\Delta F_{kp}$  – допустиме відхилення в зусиллі спрацювання гальмівних колодкових механізмів.

Позитивне значення вектора стану буде свідчити про нерівномірність спрацювання гальмівної важільної передачі.

На основі розробленої математичної моделі запропоновано наступну структурну схему пристрою (рис. 2).

На структурній схемі пристрою позначено наступні елементи: 1, 2, 3, 4 – тензометричні сенсори зусилля; 5, 6, 7, 8 – таймери; 9, 10, 11 – компаратори, 12 – блок підрахунку максимального значення часу спрацювання; 13 – блок обчислення рівня зносу гальмівних колодок; 14 – блок знаходження вектора стану зусиль натиску на гальмівну колодку; 15 – блок подачі сигналу про запуск системи гальмування; ПВІ – пристрій виведення інформації.

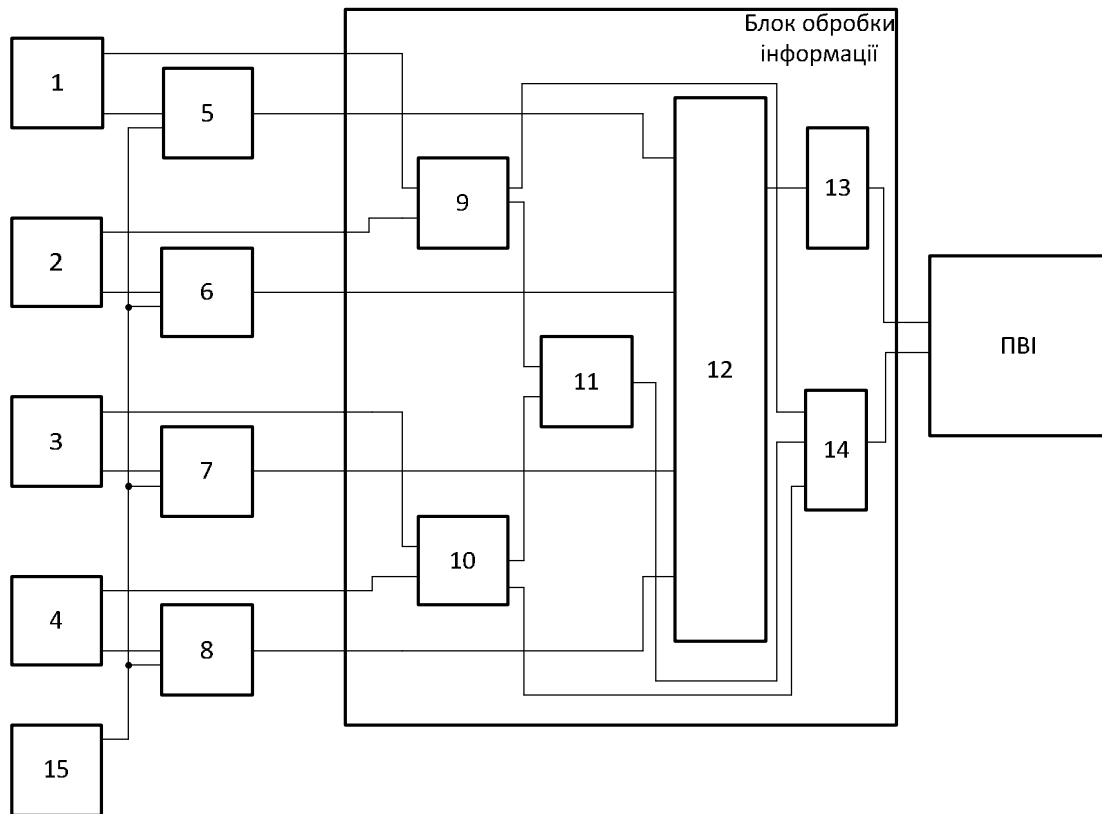


Рисунок 2 – Структурна схема пристрою діагностування

Запропоновано алгоритм роботи, функціональну схему мікропроцесорної САК. Запропонований пристрій призначений для діагностування рівня зносу гальмівних колодок та врахування вектора рівня натиску гальмівних колодок на бандаж колеса електровоза, що несе інформацію про рівномірність або нерівномірність спрацювання гальмівної важільної передачі.

**У четвертому розділі** представлено синтез системи діагностування пневматичної підсистеми гальмівної системи електропотяга.

Під час руху електропотяга у цих проміжних з'єднаннях під впливом вібрацій, додаткових прогинів на закругленнях та завихрень повітряних мас, насичених твердими частками, підхопленими завихреними повітряними масами з міжколійної поверхні, можуть виникати обриви, через які відбувається витік із пневматичної магістралі стисненого повітря і падіння тиску в ній. Внаслідок цього спрацьовує аварійно гальмівна система, електропоїзд зупиняється і поїзна бригада починає візуально шукати місце обриву.

Процес зміни тиску у пневмопроводі з відкритим кінцем за умови відсутності проміжних витоків повітря через його стінки описується рівнянням в частинних похідних, що має вигляд:

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{1}{v_*^2} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} - \frac{8\pi\mu_d}{Spv_*^2} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (3)$$

де  $p(x,t)$  – тиск у пневмопроводі, що вимірюється у  $\text{Н/м}^2$  і під час перехідного процесу, обумовленого обривом, є функцією як осьової координати  $x$  пневмопроводу, що вимірюється у м, так і часу  $t$ , що

вимірюється у сек;  $v_*$  – швидкість звуку у стисненому повітрі пневмопроводу, що вимірюється у м/сек;  $S$  – площа поперечного перерізу пневмопроводу, що вимірюється у  $\text{м}^2$ ;  $\rho$  – густина стисненого повітря, що вимірюється у  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\mu_d$  – динамічний коефіцієнт в'язкості стисненого повітря, що вимірюється у  $\frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}$ .

Вираз для визначення координати точки обриву пневмопроводу  $x_o$  має наступний вигляд:

$$x_o = - \frac{v_*}{k_t(0) \sqrt{1 - \frac{8\pi\mu_d}{S\rho k_t(0)}}} \ln \frac{p_*(x_o, t_*)}{p_*(0, t_*)}. \quad (4)$$

Цей вираз (4) і буде першою складовою математичної моделі для діагностування пневматичної магістралі гальмівної системи електропоїзда, оскільки він дозволяє визначити координату  $x_o$  точки обриву цієї магістралі.

Отримані в результаті математичних перетворень наступні вирази слугують вихідними передумовами для розв'язання задачі створення структури пристрою для діагностування пневматичної магістралі гальмівної системи залізничного потяга, за допомогою якої потім легко автоматизується пошук місця пошкодження цієї магістралі.

$$k_t(0) = \frac{1}{t_* - t} \ln \frac{p_{**}(0, t)}{p_{**}(0, t_*)}, \quad (5)$$

$$k_t^* = \frac{1}{t_* - t_1} \ln \frac{p_{**}(0, t_1)}{p_{**}(0, t_*)}, \quad (6)$$

$$\frac{1}{t_* - t_1} \ln \frac{p_{**}(0, t_1)}{p_{**}(0, t_*)} = \frac{1}{t_* - t_2} \ln \frac{p_{**}(0, t_2)}{p_{**}(0, t_*)}. \quad (7)$$

Для побудови структури пристрою на базі математичної моделі спочатку виразимо значення фіксованого моменту часу  $t_*$  у явному вигляді. Для цього скористаємось виразом (7), із якого слідує, що

$$t_* = \frac{t_1 - \frac{\ln(p_{**}(0, t_1)/p_{**}(0, t_*))}{\ln(p_{**}(0, t_2)/p_{**}(0, t_*))} t_2}{1 - \frac{\ln(p_{**}(0, t_1)/p_{**}(0, t_*))}{\ln(p_{**}(0, t_2)/p_{**}(0, t_*))}}. \quad (8)$$

Виходячи з виразів (4), (5), (6), (8) і зроблених вище зауважень стосовно тиску на початку гальмівної магістралі до її пошкодження і в точці пошкодження цієї магістралі побудована структурна схема математичної моделі для визначення місця пошкодження пневматичної магістралі гальмівної системи залізничного потяга.

Пристрій для діагностування пневматичної магістралі гальмівної системи поїзда пояснюється кресленням, на якому зображена його структурна схема (рис.3), де: 1 – блок задавання значення атмосферного тиску, 2 – блок задавання значення тиску у пневматичній магістралі поїзда, 3 – блок задавання значення динамічного коефіцієнта в'язкості стисненого повітря, 4 – блок задавання значення швидкості звуку у стисненому повітрі, 5 – блок задавання значення першого моменту часу, 6 – блок задавання значення другого моменту часу, 7 – датчик тиску, 8 – цифровий таймер, 9 – перший блок підсилення сигналу, 10 – другий блок підсилення сигналу, 11 – перший компаратор, 12 – другий компаратор, 13 – блок диференціювання, 14 – блок визначення знаку сигналу, 15 – мікропроцесор, 16 – елемент І, 17 – кнопка ініціалізації системи, 18 – блок обрахунку коефіцієнту зміни тиску за часом, 19 – блок підсилення сигналу, що містить значення густини стисненого повітря, 20 – блок підсилення сигналу, що містить значення площі поперечного перерізу пневмопроводу, 21 – блок обрахунку координати точки обриву пневмопроводу, 22 – блок виведення інформації.

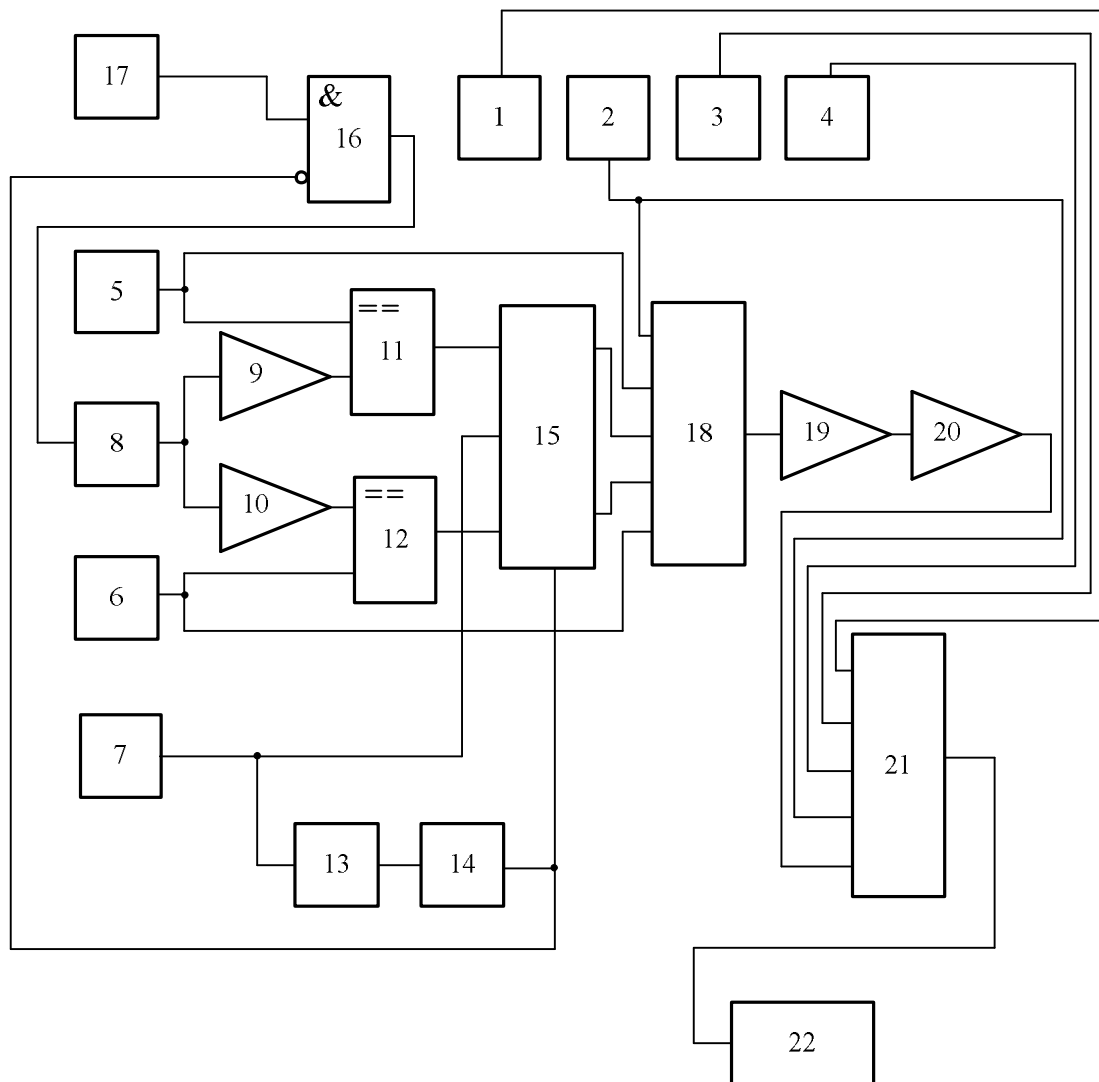


Рисунок 3 – Структурна схема пристрою діагностування пневматичної магістралі

Структурна схема мікропроцесорного пристрою для діагностування пневматичної підсистеми гальмівної системи електропотяга приведена на рис. 4.

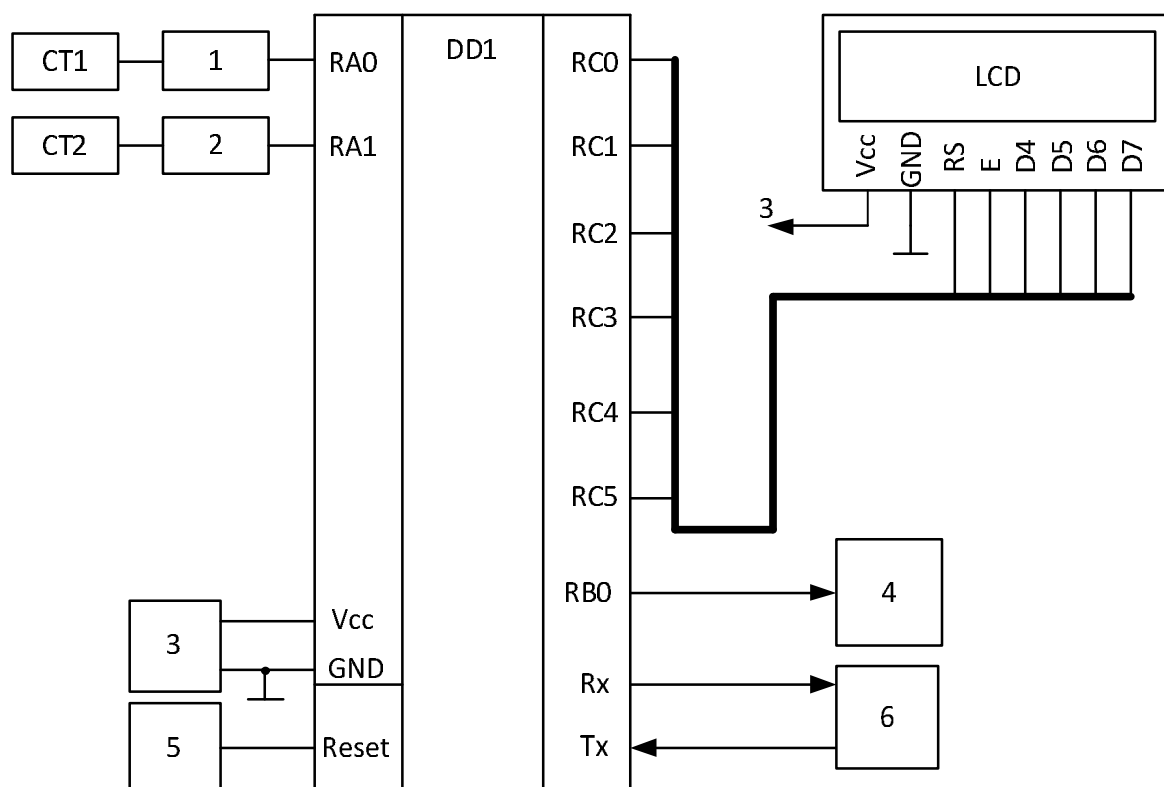


Рисунок 4 – Функціональна схема мікропроцесорної реалізації пристрою

На схемі: DD1 – мікроконтролер; CT1-CT2 – сенсори тиску; 1-2 – перетворювачі рівня вхідного сигналу, 3 – блок живлення, 4 – пристрій виводу звукового сигналу; 5 – кнопка перезапуску системи; 6 – клавіатура; LCD – рідкокристалічний дисплей.

Використовуючи сучасний підхід до теоретичного дослідження здійснено імітаційне моделювання системи діагностики, що побудована на базі розробленої структурної схеми синтезованої математичної моделі для діагностування пневматичної магістралі гальмівної системи електропотяга.

На рис.5 представлено схему імітаційної моделі у вікні ПППІ MATLAB, що побудована на основі структурної схеми математичної моделі.

Під час дослідження системи діагностики пневматичної підсистеми гальмівної системи електропотяга на імітаційній моделі у якості вхідних даних було використано наближені значення з функції тиску від часу під час спаду тиску. Для отримання реальних даних було проведено експеримент, отримані в ході якого дані використано для моделювання роботи системи діагностики та для перевірки адекватності роботи математичної моделі і побудованого на її основі пристрою.

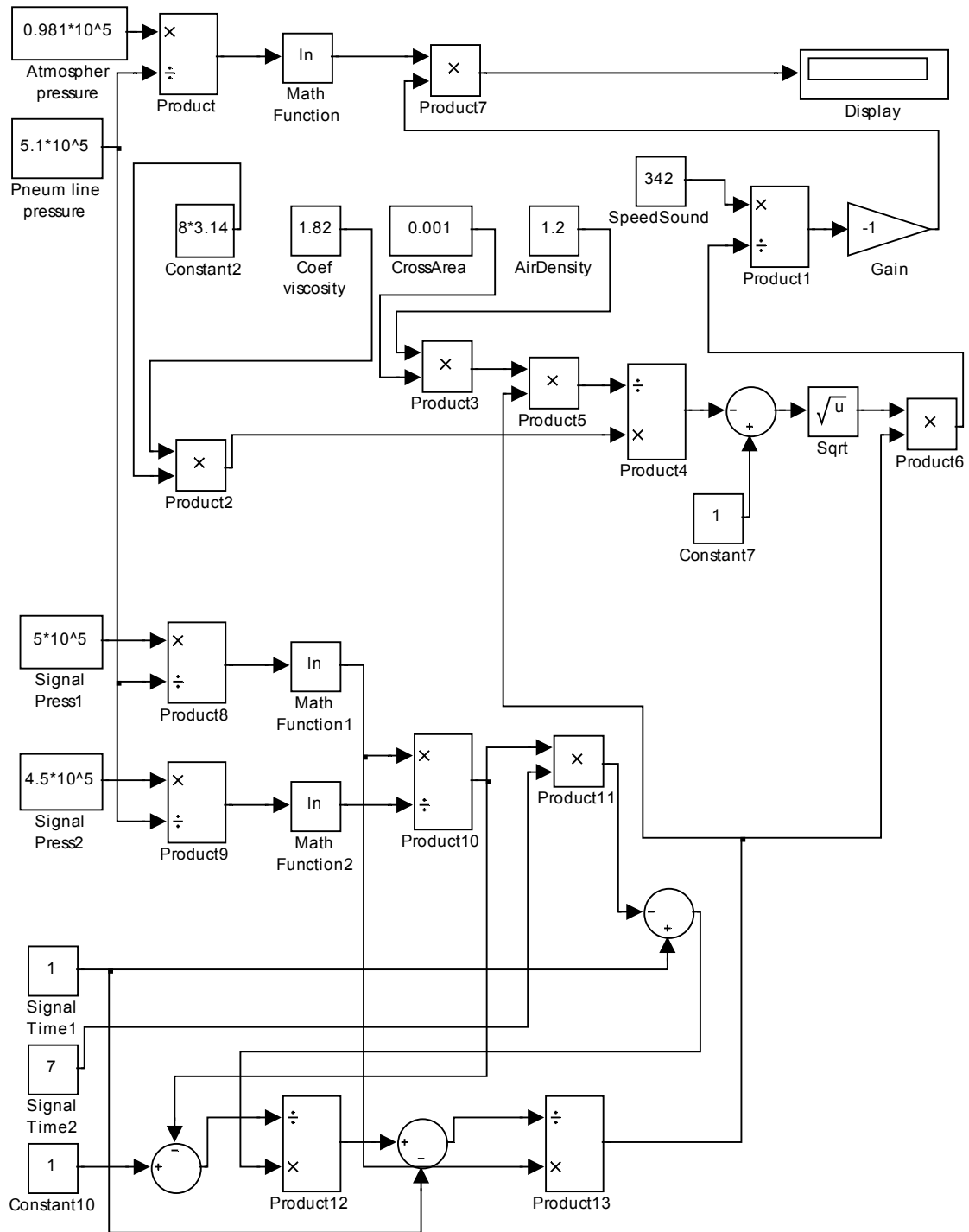


Рисунок 5 – Структурна схема імітаційної моделі для діагностики стану пневматичної магістралі гальмівної системи електропотяга у TOOLBOX Simulink ППП MATLAB

Задачею експерименту було дослідним шляхом у польових умовах визначити характеристики зміни тиску від часу у пневматичній магістралі гальмівної системи потяга під час штучного обриву пневмопроводу магістралі поїзда з електровозною локомотивною тягою.

Під час експерименту проводились вимірювання із штучним обривом пневматичної магістралі у двох місцях поїзда: між 11 і 12 та між 20 і 21

вагонами по три вимірювання у кожному місці (див. рис. 6). Було знято залежність спаду тиску до  $2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ , що дало в повній мірі проаналізувати аварійну ситуацію обриву пневмопроводу. На рисунку позначено наступне: 1 – місце приєднання цифрового сенсора тиску та ноутбука; 2 – перше місце штучного обриву пневматичної магістралі, 3 – друге місце штучного обриву пневматичної магістралі; 4 – місце приєднання компресорної установки; 5 – пневматична магістраль вантажного поїзда.

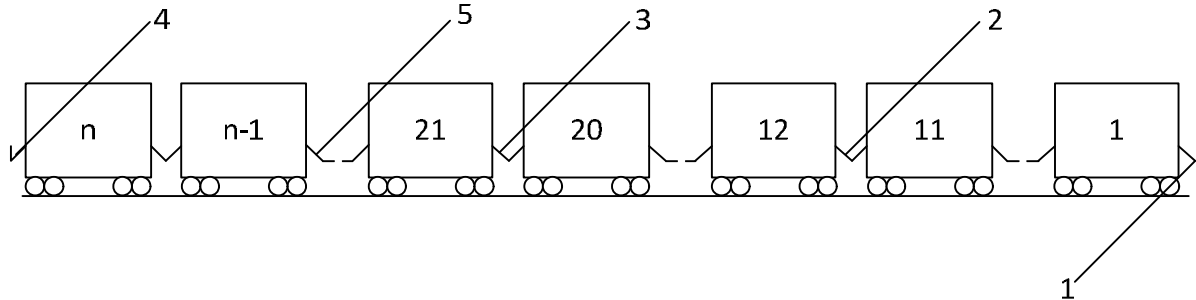


Рисунок 6 – Схема розміщення приладів для вимірювання та контрольних точок при проведенні експерименту

Отримані у результаті обробки даних значення були використані для побудови характеристик спаду тиску під час обриву пневмопроводу та для перевірки синтезованої математичних моделі на адекватність роботи.

На рис.7 представлено одну із знятих характеристик зміни тиску у пневматичній магістралі вантажного поїзда під час обриву між 11 та 12 вагонами.

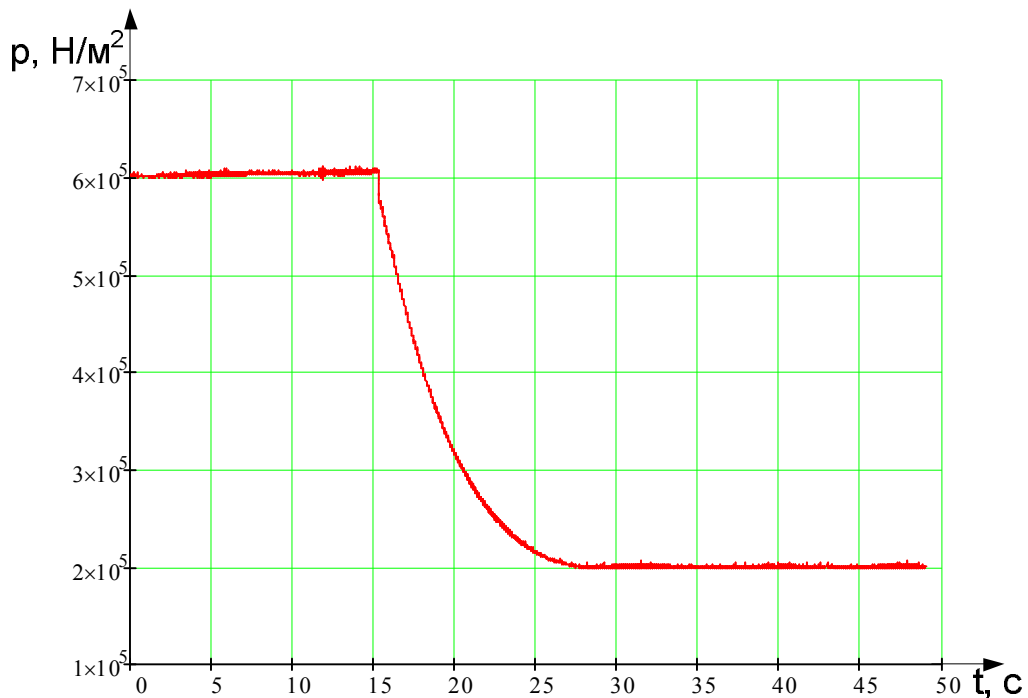


Рисунок 7 – Графік спаду тиску під час обриву між 11 і 12 вагоном

На рис. 8 представлено імітаційне моделювання роботи діагностичного пристрою з використанням отриманих у результаті обробки даних необхідних значень параметрів.

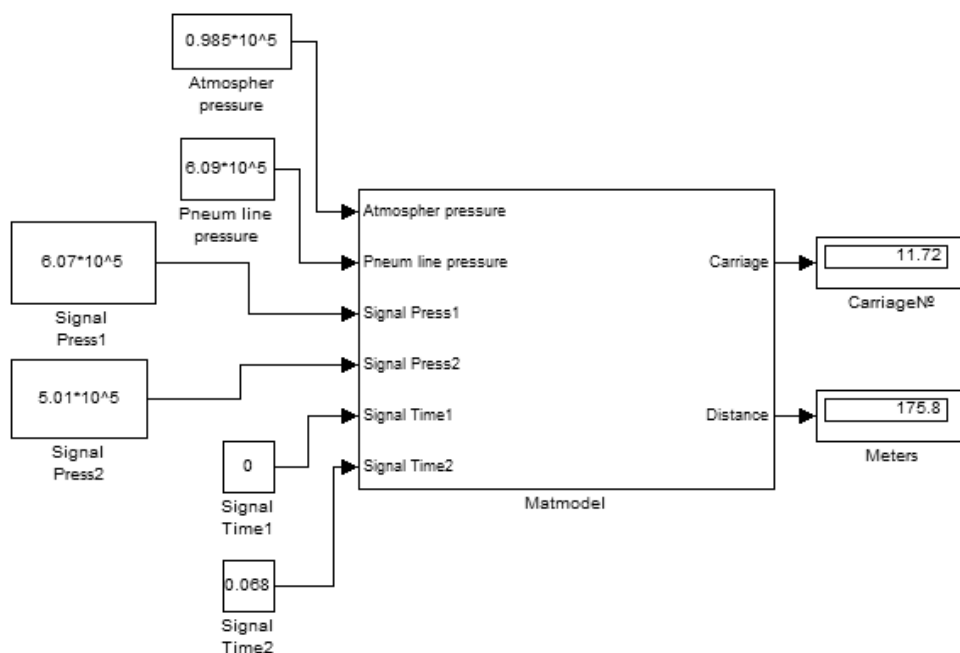


Рисунок 8 – Імітаційне моделювання роботи діагностичного пристрою

Для наочності у таблиці 1 приведені обраховані за допомогою математичної моделі значення, що характеризують місця обривів.

Таблиця 1 – Результати обчислень моделювання обривів

Номер обриву	Обчислена відстань		Точка фактичного обриву
	метр	вагон	
1	190,1	12,68	Між 11 і 12 вагоном
2	190,8	12,72	
3	175,8	11,72	
1	337,6	22,5	Між 20 і 21 вагоном
2	307,6	20,5	
3	311,8	20,79	

Отримані результати підтверджують адекватність синтезованих математичних моделей.

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи.



## ВИСНОВКИ

На основі проведення даного дисертаційного дослідження, присвяченого розробці методів, математичних моделей та пристроїв для діагностування такого важливого функціонального блоку електротехнічного комплексу електропотяга, яким є його гальмівна система з її електричною, механічною та пневматичною підсистемами, що містить в собі нові наукові результати, які в сукупності розв'язують важливу науково-прикладну задачу, можна зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу наукових робіт, присвячених синтезу методів, математичних моделей і пристроїв для діагностування такого важливого функціонального блоку електротехнічного комплексу електропотяга, яким є його гальмівна система з її електричною, механічною та пневматичною підсистемами, показано, що існуючі методи, моделі та пристрої не дозволяють розв'язувати поставлену задачу в умовах нормального функціонування електротехнічних комплексів електропотягів, що рухаються;

2. Завдяки синтезованій в дисертаційній роботі секвенціальній математичній моделі процесу функціонування електричної підсистеми гальмівної системи електропотяга удосконалено систему підтримки прийняття рішення машиністом електропотяга по виявленню несправностей гальмівної системи до її вступу в режим нормального функціонування;

3. Вперше розроблено математичну модель, яка зв'язує усі параметри, що характеризують процес вимірювання рівня зносу гальмівних колодок, та на її основі розроблено метод діагностики; синтезовано структуру пристрою, за допомогою якого можна вимірювати рівень зносу гальмівних колодок в процесі їх нормальної експлуатації і без втручання в технологію їх виготовлення;

4. Запропоновано математичну модель, яка зв'язує параметри пневматичної підсистеми гальмівної системи з параметрами режиму електротехнічного комплексу електропотяга, та на її основі вперше розроблено метод визначення місця обриву пневмопроводу гальмівної системи електропотяга та синтезовано структуру пристрою для визначення координати місця обриву пневмопроводу без зупинки електропотяга;

5. Розроблено мікропроцесорні варіанти реалізації пристроїв для діагностування рівня зносу гальмівних колодок та визначення місць обриву пневмопроводу, а також алгоритмічний варіант мікропроцесорної реалізації системи підтримки прийняття рішень машиністом електровоза по виявленню несправностей гальмівної системи електропотяга;

6. Синтезована імітаційна модель функціонування гальмівної системи електропотяга і з її допомогою доведена ефективність розроблених діагностичних пристроїв;

7. На діючому електропотязі здійснена експериментальна перевірка синтезованих математичних моделей на адекватність.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мокін Б. І. Математична модель і структура пристрою діагностики гальмівної системи електровоза [Текст] / Б. І. Мокін, Ю. А. Лобатюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – №6. – С. 130 – 133. – ISSN 1997-9266.
2. Мокін Б.І. Синтез структури системи автоматичного контролю технічного стану силових електричних кіл тягового електровоза [Текст] / Б. І. Мокін, Ю. А. Лобатюк, С. О. Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2014. – №5. – С. 96-102. – ISSN 1997-9266.
3. Мокін О.Б. Синтез математичної моделі для діагностування пневматичної магістралі гальмівної системи електропоїзда [Електронний ресурс] / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін, Ю. А. Лобатюк, В. А. Лобатюк // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2013. – №1. – Режим доступу до журналу : <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/2669/2903>. – ISSN 2307-5376.
4. Oleksandr Mokin Simulation Model for the Monitoring System of Air Brake of the Train and Determining the Place of Breakage [Текст] / Oleksandr Mokin, Borys Mokin, Yuriy Lobatiuk // International Journal of Traffic and Transportation Engineering. – 2014. – Volume 3. – №4. – pp. 184-188. – ISSN: 2325-0062.
5. Мокін Б. І. Математична модель і структура пристрою діагностики гальмівної системи електровоза [Текст] / Б. І. Мокін, Ю. А. Лобатюк // Оптимальне керування електроустановками: I міжнародна науково-технічна конференція: матеріали конференції. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – С. 96.
6. Мокін Б. І. Математична модель для визначення місця обриву пневматичної магістралі гальмівної системи електропоїзда [Текст] / Б. І. Мокін, Ю. А. Лобатюк // Оптимальне керування електроустановками: II міжнародна науково-технічна конференція: матеріали конференції. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – С. 69.
7. Мокін О.Б. Мікропроцесорна система автоматичного контролю технічного стану силових електричних кіл тягового електровоза [Текст] / Мокін О. Б., Лобатюк Ю. А., Жуков С. О. // Проблеми та перспективи розвитку технічних засобів транспорту та систем автоматизації: міжнародна науково-технічна конференція: матеріали конференції. – Харків: ХНУМГ, 2014. – С. 35-37.
8. Лобатюк Ю.А. Методи діагностування електропривода електровоза [Електронний ресурс] / Мокін Б.І., Лобатюк Ю.А. // XL регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету: матеріали конференції. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – Режим доступу до файлу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2011/ineeem/txt/lobatiuk.pdf>.
9. Пат. 93668 Україна, МПК В60Т 17/18 (2006.01). Пристрій для контролю зношення гальмівних колодок електровоза / Мокін Б. І., Мокін О. Б.,

Лобатюк Ю. А., Лобатюк В. А.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201404980; заяв. 12.05.2014; опубл. 10.10.2014; Бюл. № 19.

10. Пат. 93669 Україна, МПК В60Т 17/18 (2006.01). Пристрій для діагностування пневматичної магістралі гальмівної системи електропоїзда / Мокін Б. І., Мокін О. Б., Лобатюк Ю. А., Лобатюк В. А.; заявник і патентовласник Вінницький національний технічний університет. – № u201404981; заяв. 12.05.2014; опубл. 10.10.2014; Бюл. № 19.

## АНОТАЦІЯ

**Лобатюк Ю. А.** Методи і засоби технічної діагностики гальмівної системи електричних транспортних засобів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2015.

Дисертація присвячена розробці методів, математичних моделей та пристроїв для діагностування такого важливого функціонального блоку електротехнічного комплексу електропотяга, яким є його гальмівна система з її електричною, механічною та пневматичною підсистемами.

Розроблено мікропроцесорні варіанти реалізації пристроїв для діагностування рівня зносу гальмівних колодок та визначення місць обриву пневмопровода, а також алгоритмічний варіант мікропроцесорної реалізації системи підтримки прийняття рішень машиністом електровоза по виявленню несправностей гальмівної системи електропотяга.

Здійснено перевірку синтезованих математичних моделей на адекватність та оцінювання розроблених діагностичних пристроїв на ефективність з використанням імітаційного моделювання.

Ключові слова: електропотяг, гальмівна система, діагностика, колодка, пристрій діагностики.

## ABSTRACT

**Lobatiuk Y. A.** Methods and means for technical diagnostics of breaking systems of electric vehicles – Manuscript.

Candidate's thesis on specialty 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems (Technical Sciences). – Vinnytsia National Technical University, Vinnitsia, 2015.

The thesis is devoted to the development of methods, mathematical models, and devices for diagnostics of an important functional unit of the electrotechnical set of the electrical train, that is its braking system with its electrical, mechanical, and pneumatic subsystems.

Developed are microprocessor variants of the implementation of the devices for the diagnostics of the wear degree of the brake shoes and determination of the

places of the pneumatic wire break. Elaborated is algorithmic variant of the microprocessor implementation of the support system of the electric locomotive driver's decisions concerning identification of the malfunctions of an electric train brake system.

A verification the adequacy of synthesized mathematical models and evaluation developed diagnostic devices on the effectiveness of using simulation was done.

Keywords: electric train, braking system, diagnostic, brake shoe, device for diagnostics.

## АННОТАЦИЯ

**Лобатюк Ю. А.** Методы и средства технической диагностики тормозной системы электрических транспортных средств. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2015.

Диссертация посвящена разработке методов, математических моделей и устройств для диагностики такого важного функционального блока электротехнического комплекса электропоезда, каким является его тормозная система с ее электрической, механической и пневматической подсистемами.

Объектом исследования являются процессы диагностирования основных функциональных агрегатов электротехнического комплекса электропоезда.

Предмет исследования - методы, математические модели и устройства для диагностики тормозной системы электропоезда, как одной из наиболее важных функциональных подсистем его электротехнического комплекса.

Для решения поставленных задач использовались следующие методы: во время исследований механической подсистемы его тормозной системы использовались методы теоретической механики и математического анализа. При исследовании работы пневматической подсистемы его тормозной системы, использовались методы аэродинамики и теории дифференциальных уравнений в частных производных. Для синтеза и исследования математических моделей диагностики применялись методы идентификации динамических систем и имитационного моделирования. Для реализации структур разработанных устройств диагностирования применялась теория микропроцессоров. Используются методы конечных автоматов и секвенциального анализа с целью синтеза системы поддержки принятия решений машинистом на маршруте по выявлению неисправностей электрической подсистемы электротехнического комплекса электропоезда, связанной функционально с тормозной системой.

На базе математического аппарата секвенций синтезирована структурная схема системы автоматического контроля силовых электрических цепей тягового электровоза ВЛ80Р. в которой предусмотрен удобный для машиниста механизм вывода информации о вероятной неисправности и способ ее устранения.

Разработана структурная схема и представлены алгоритм работы

устройства для автоматического контроля силовых электрических цепей тягового электровоза, который предлагается реализовать на базе современной микропроцессорной техники.

Разработана математическая модель для диагностирования уровня износа тормозных колодок и нахождения вектора уровня нажима тормозных колодок на бандаж колеса электровоза, который несет информацию о равномерности / неравномерности износа тормозной рычажной передачи.

На основе разработанной математической модели предложено и построено структурную схему и алгоритм работы устройства для диагностики уровня износа тормозных колодок и учета вектора уровня нажима тормозных колодок на бандаж колеса электровоза. Осуществлена микропроцессорная реализация разработанного устройства для диагностирования.

Синтезировано математическую модель для диагностирования пневматического магистрали тормозной системы электропоезда, с помощью которой можно определить пространственную координату места обрыва этой магистрали.

Показано, что для определения пространственной координаты места обрыва пневматического магистрали тормозной системы можно использовать только линии пересечения поверхности, по которой задается решение дифференциального уравнения в частных производных 2-го порядка, с координатными плоскостями «пространственная координата - давление» и «временная координата - давление », что позволяет построить для решения поставленной задачи гораздо более простую математическую модель, не связанную с разложением решения этой дифференциального уравнения в ряд Фурье по пространственной координате, модулированный экспонентами, и поиском необходимого и достаточного количества членов этого ряда для обеспечения заданной точности решения.

На основе общей математической модели, описывающей изменение давления в пневматической магистрали тормозной системы электропоезда, разработано детализированную математическую модель, пригодную для определения места повреждения этой магистрали, и ее структурную схему, пригодную для разработки имитационной модели.

На основе детализированной математической модели с использованием TOOLBOX Simulink ППП MATLAB и разработанной имитационной модели осуществлена оценка эффективности работы устройства для определения места обрыва пневматических проводов тормозной системы железнодорожного состава и проверено эту математическую модель адекватность.

Предложена структурная схема и представлен алгоритм работы микропроцессорного устройства для диагностирования пневматического магистрали тормозной системы электропоезда.

Осуществлена проверка синтезированных математических моделей на адекватность и оценка разработанных диагностических устройств на эффективность с использованием метода имитационного моделирования.

Ключевые слова: электропоезд, тормозная система, диагностика, колодка, устройство диагностики.

Підписано до друку 03.09.2015 р. Формат 29,7×42<sup>1</sup>/<sub>4</sub>.  
Наклад 100 прим. Зам. № 2015-086  
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету.  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе,95. Тел.: 59-87-38