

В. І. Носков, М. В. Мезенцев, С. Ю. Гавриленко, Г. В. Гейко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА СТАНУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Анотація. Мета статті. При розробці систем тягового електропривода вітчизняного дизель-поїзда ДЕЛ-02 з тяговими асинхронними двигунами ставиться завдання забезпечення ефективного контролю та діагностики стану дизель-поїзда і його елементів у процесі експлуатації з використанням сучасних інформаційних технологій. Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити такі питання: визначення основних вузлів і параметрів, які підлягають контролю та діагностиці; побудова структурної схеми системи контролю та діагностики; розробка методів контролю та діагностики стану дизель-поїзда та його елементів. **Результати.** Для підвищення ефективності експлуатації дизель-поїздів ДЕЛ-02 вітчизняного виробництва розроблена система контролю та діагностики стану тягового електропривода з використанням сучасних засобів виміру основних параметрів і подальшою обробкою отриманої інформації бортовою мікропроцесорною системою керування. Запропоновані та обґрунтовані рішення щодо побудови системи, яка забезпечує контроль необхідної кількості технічних і економічних показників тягового електропривода без введення в схему системи керування додаткових елементів. Контроль і діагностика показників стану тягового електропривода виконана за допомогою нейронної мережі.

Ключові слова: тяговий електропривід, система контролю та діагностики, мікропроцесорна система керування, нейронна мережа.

Вступ

Підвищення ефективності перевезень залізничним транспортом вимагає впровадження сучасних тягових електроприводів та систем керування, які виконані на основі засобів мікропроцесорної техніки, мікроконтролерів і мікроЕОМ. Однак, якість і надійність роботи локомотива будуть недостатніми, якщо в структурі системи керування (СК) не передбачено контроль і діагностику стану тягового електропривода (ТЕП) і його елементів.

Система контролю та діагностики (СКД) повинна бути невід'ємною частиною СК і, по можливості, повинна використовувати наявні в схемі устаткування (датчики, регулятори та ін.) з мінімальною кількістю додаткових технічних засобів. СКД повинна здійснювати постійний автоматичний контроль роботи ТЕП і його СК, видавати необхідну оперативну інформацію машиністові та надавати допомогу фахівцям депо в обслуговуванні устаткування.

Аналіз літератури. Контроль і діагностика стану рухомого складу є актуальною проблемою, про що свідчать публікації по даному питанню. Як видно з літературних джерел, СКД можна підрозділити на:

1) бортові – входять до складу систем керування ТЕП, забезпечують постійний контроль технічного стану його устаткування та видають машиністові необхідну інформацію на екран. СКД реєструє та зберігає контрольовані параметри для їх обробки в депо [1-3]. У ряді випадків ця інформація дистанційно передається на станції (у депо);

2) стаціонарні – визначають технічний стан локомотива та його елементів (систем) в умовах депо як за результатами, отриманими у поїздах, так і за результатами стендових випробувань;

3) автоматизовані з дистанційним контролем окремих вузлів локомотива при його русі по перегону. Ці СКД розташовуються, як правило, у районі стрілочних переводів, а контролю піддаються елементи ходової частини локомотива: букси, колісні пари та ін. [4-6].

СКД у загальному випадку здійснює: безперервний контроль забезпечення СК необхідних тягових і гальмових характеристик; безперервний контроль і діагностику стану системи та її елементів; попередження про виникнення граничних і неприпустимих режимів роботи устаткування; надання інформаційної допомоги машиністові по якості роботи ТЕП; реєстрацію та зберігання інформації про контрольовані параметри в процесі експлуатації, яка використовується службою ремонту та обслуговування в депо. У ряді випадків, при необхідності, ця інформація передається різними способами зв'язку на станцію.

У цій статті розглядаються питання створення бортової СКД. Сучасні локомотиви оснащуються бортовими мікропроцесорними системами (МПС) керування ТЕП і допоміжним устаткуванням. Крім того, вони мають датчики параметрів основних вузлів і агрегатів, використання інформації з яких відкриває можливість реалізації в структурі СКД додаткового функціонала, пов'язаного з питаннями контролю та діагностики стану локомотива.

Мета статті. При розробці систем ТЕП вітчизняного дизель-поїзда ДЕЛ-02 з тяговими асинхронними двигунами (ТАД) ставилося завдання забезпечення ефективного контролю та діагностики стану дизель-поїзда і його елементів у процесі експлуатації з використанням сучасних інформаційних технологій. Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити такі питання:

- визначення основних вузлів і параметрів, які підлягають контролю та діагностиці;
- побудова структурної схеми СКД;
- розробка методів контролю та діагностики стану дизель-поїзда та його елементів.

Результати досліджень

Рішення поставлених завдань, у першу чергу, пов'язане із застосуванням конкретного ТЕП і його СК. Структурна схема СК моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02 наведена на рис. 1.

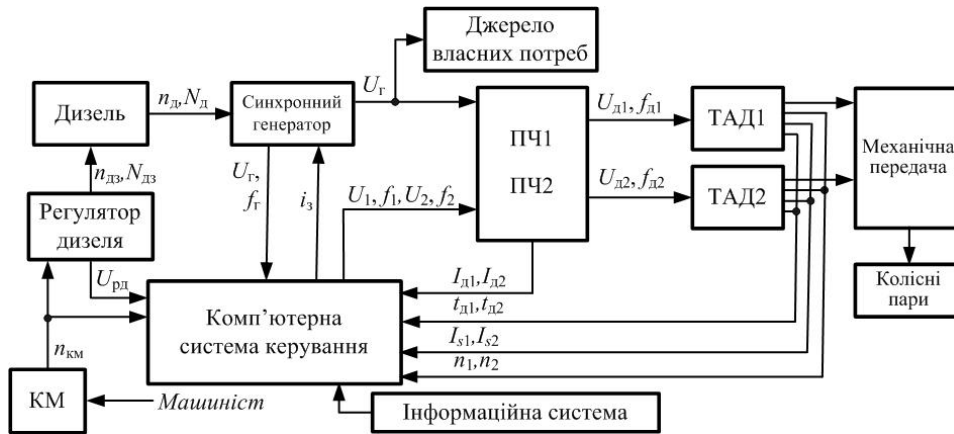


Рис. 1. Структурна схема СК моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02

На рис. 1 використані такі позначення: КМ – контролер машиніста; $n_{км}$ – номер позиції контролера машиніста; $n_{дз}, N_{дз}$ – сигнали завдання частоти обертання та потужності дизеля; $n_{д}, N_{д}$ – вихідні частота обертання та потужність дизеля; $U_{рл}$ – коригуючий сигнал потужності дизеля; $U_{г}, f_{г}$ – напруга і частота генератора; $i_{з}$ – струм збудження генератора; U_1, U_2, f_1, f_2 – завдання параметрів перетворювачів частоти; $f_{д1}, f_{д2}, U_{д1}, U_{д2}$ – частоти та напруги живлення ТАД1 і ТАД2; $I_{д1}, I_{д2}$ – значення активного струму ТАД1 і ТАД2; $t_{д1}, t_{д2}$ – температура ТАД1 і ТАД2; n_1, n_2 – частоти обертання роторів ТАД1 і ТАД2; I_{s1}, I_{s2} – значення повного струму ТАД1 і ТАД2.

Силова частина схеми включає дизель, що приводить в обертання тяговий синхронний генератор, який через перетворювачі частоти (ПЧ1, ПЧ2) живить ТАД1 і ТАД2.

Як видно з рис. 1, система містить значне число регульованих та контрольованих параметрів, які характеризують роботу складових ТЕП (дизель-генератора), перетворювачів частоти, тягових асинхронних двигунів, допоміжних навантажень, механічної частини приводу та безпосередньо СК. З огляду на обсяг контрольованих параметрів та їх різний фізичний зміст і форму сигналів, СК виконана децентралізованою. Зовнішній вигляд МПС показано на рис. 2.

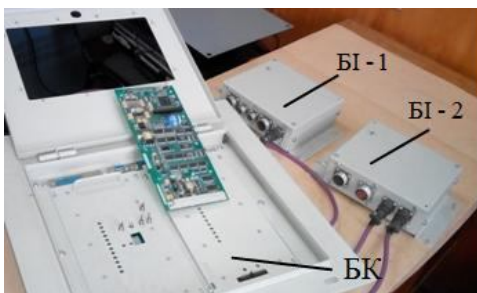


Рис. 2. Зовнішній вигляд МПС

Прийом сигналів зворотного зв'язку від датчиків, їх обробка й нормалізація виконуються інфор-

маційними блоками БІ-1 та БІ-2. Оброблені сигнали зворотного зв'язку надходять у блок керування БК по цифровому каналу зв'язку CAN2. Вибір протоколу CAN2 обґрунтований його високою перешкодозахисністю, досить простою реалізацією та високою надійністю роботи в умовах бортових транспортних мереж СКД [7].

При обробці сигналів зворотного зв'язку використано метод розкладання в ряд Фур'є при визначенні першої гармонійної струму фази ТАД, метод «ковзного вікна» при обчисленні частоти обертання ротора ТАД та ін. [8, 9]. Мікропроцесорна СК дизель-поїзда передає оперативну інформацію про роботу ТЕ і його елементів на екран машиніста та забезпечує підключення переносного бортового процесорного модуля (інформаційна система), що реєструє та відображає поточні значення основних змінних ЕП у всіх режимах функціонування дизель-поїзду і прогнозує його стан з раннього виявлення відхилень динамічних характеристик (розладнань та інцидентів) окремих агрегатів, вузлів та СК ТЕ. Проблема раннього виявлення зміни динамічних характеристик складових СК дизель-поїзда та тісно пов'язана з нею проблема їх діагностики була вирішена на основі нейронних мереж, що прогнозують динаміку об'єктів [10]. В розглянутому випадку контрольований об'єкт описується як лінійний стохастичний об'єкт рівнянням виду:

$$q(t_k) = b_1 q(t_{k-1}) + b_2 q(t_{k-2}) + \dots + b_n q(t_{k-n}) + b_{n+1} u(t_{k-1}) + b_{n+2} u(t_{k-2}) + \dots + b_{n+q} u(t_{k-q}) + \delta(t_k) = B^T r(t_k) + \delta(t_k), \quad (1)$$

де $q(t_k)$ і $u(t_k)$ – відповідно вихідна змінна та керування об'єктом в момент часу $t = t_k$; $B^T = (b_1, \dots, b_n, \dots, b_{n+q})^T$ – вектор у загальному випадку невідомих параметрів; $\delta(t_k)$ – збурювання типу білий шум; $r(t_k) = (q(t_{k-1}), q(t_{k-2}), \dots, u(t_{k-q}))$ – вектор узагальнених входів в момент часу t_k .

Було розглянуто один з можливих підходів до виявлення зміни динамічних характеристик об'єкта (1) за інформацією, яка міститься в послідовності значень його вихідного сигналу

$$q(t_1), q(t_2), \dots, q(t_k), \dots \quad (2)$$

Нехай послідовність (2) подається на вхід нейронної мережі, яка зображена на рис. 3 та має три шари нейронів з лінійними функціями активації:

$$A_1^1, A_2^1, \dots, A_d^1, A_1^2, A_2^2, \dots, A_d^2, A_1^3, A_2^3, \dots, A_d^3.$$

Будь-який сигнал $q(t_k)$, $k \in \mathbb{N}$, вхідної послідовності (2) надходить на ланцюжок послідовно з'єднаних елементів одиничних затримок, на виході яких формується набір затриманих за часом сигналів:

$$q(t_{k-1}), q(t_{k-2}), \dots, q(t_{k-d}).$$

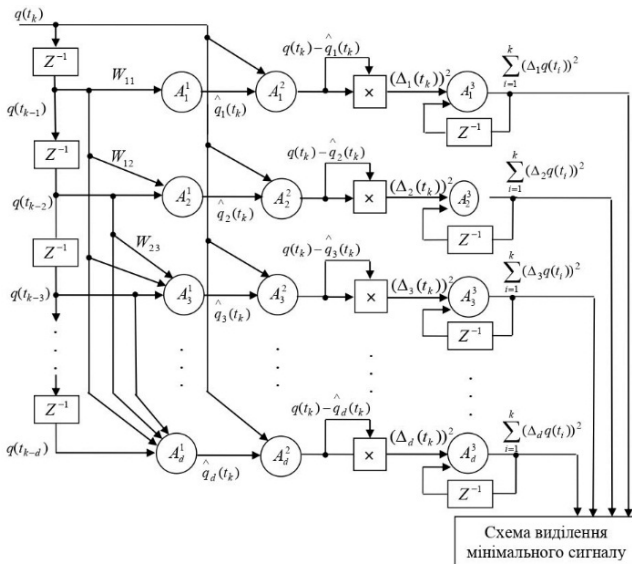


Рис. 3. Контролююча нейронна мережа із прямою передачею сигналів для лінійних стохастичних об'єктів

За допомогою нейронів $A_1^1, A_2^1, \dots, A_d^1$ першого шару мережі шляхом зваженого підсумовування сигналів $q(t_{k-1}), q(t_{k-2}), \dots, q(t_{k-d})$ здійснюється лінійна апроксимація вимірюваної послідовності, і отримуються оцінки ряду (2) за допомогою співвідношень виду:

$$\begin{aligned} U_{вих A_1^1} &= \hat{q}_1(t_k) = W_{11}(t_k) q(t_{k-1}), \\ U_{вих A_2^1} &= \hat{q}_2(t_k) = W_{12}(t_k) q(t_{k-1}) + W_{22}(t_k) q(t_{k-2}), \\ &\dots \end{aligned} \quad (3)$$

$$U_{вих A_d^1} = \hat{q}_d(t_k) = \sum_{i=1}^d W_{id} q(t_{k-i}),$$

де W_{ip} ($i = \overline{1, p}$, $p = \overline{1, d}$) – вага зв'язку між i -м елементом одиничної затримки та нейроном A_p^1 .

Адаптація ваг зв'язків нейронів була виконана градієнтними алгоритмами за допомогою різновиду алгоритму Уїдрову-Хофа [11]:

$$W_{ip}(t_{k+1}) = W_{ip}(t_k) + \alpha \eta_p(t_k) (q(t_k) - \hat{q}_p(t_k)) q(t_{k-i}),$$

$$\eta_p(t_k) = \left(\sum_{i=1}^p q^2(t_{k-i}) \right)^{-1} = (\eta_{p-1}^{-1}(t_k) - q^2(t_{k-p}))^{-1},$$

$$\eta_0^{-1} = 0; \quad 0 < \alpha < 2; \quad i = \overline{1, p}, \quad p = \overline{1, d}.$$

Співвідношення (3) є d -різницевиими моделями для прогнозування значень ряду (2). Для кожної моделі (3) при кожному значенні дискретного часу t за допомогою нейронів $A_1^2, A_2^2, \dots, A_d^2$ з лінійними функціями активації обчислюється різниця між дійсним значенням $q(t_k)$ вихідного вимірюваного сигналу та прогнозованим $\hat{q}_i(t_k)$:

$$\Delta_i(t_k) = q(t_k) - \hat{q}_i(t_k), \quad i = \overline{1, d}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Різниці (4) за допомогою нейронів третього шару $A_1^3, A_2^3, \dots, A_d^3$, кожний з яких має на одному із входів блок множення, а в ланцюзі зворотного зв'язку блок з одиничною затримкою сигналу, використовуються для підрахунку суми квадратів евклідових відстаней між вхідними сигналами й прогнозованими:

$$\Sigma_i(t_k) = \sum_{j=1}^k (q(t_j) - \hat{q}_i(t_j))^2 = \sum_{j=1}^k (\Delta_i q(t_j))^2, \quad i = \overline{1, d}. \quad (5)$$

Краща з моделей (3) має мінімальну суму (5) і може бути використана для опису вимірюваної вихідної послідовності (2), що дає змогу виявляти розладнання в роботі об'єкта, а також виконувати діагностику динамічних параметрів.

Розглянута нейронна мережа була використана також для контролю потужності дизель-генератора, яка віддається на тягу.

На рис. 4 наведені залежності потужності генератора від оборотів дизеля.

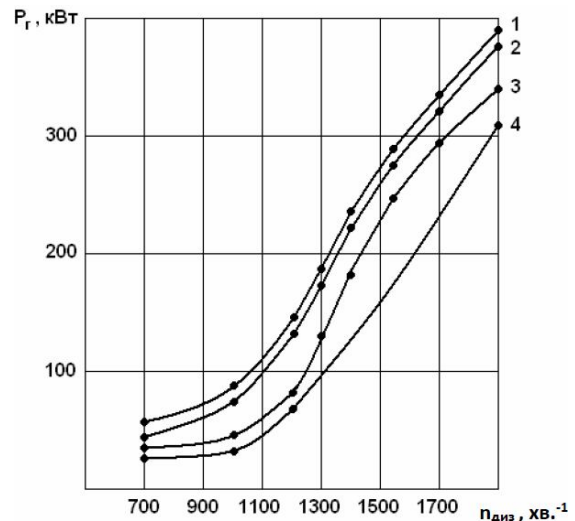


Рис. 4. Залежності потужності генератора від оборотів дизеля (1 – потужність генератора при виключених допоміжних навантаженнях; 2 – тягова потужність генератора при включених допоміжних навантаженнях; 3 – тягова потужність генератора при включених допоміжних навантаженнях і опаленні; 4 – селективна характеристика)

Потужність, що віддається дизель-генератором на тягу, визначається потужністю, яку розвиває дизель на конкретній позиції контролера машиніста (на конкретних оборотах дизеля), селективною характеристикою й потужністю включених допоміж-

них навантажень і опалення. Селективна характеристика показує ту мінімальну потужність, яка відповідає конкретним оборотам дизеля (або позиції контролера машиніста). Чим менше відстань між зовнішньою та селективною характеристикою, тим більше підстав для припущень про несправності або неоптимальну роботу дизеля, оскільки він не розвиває потрібної потужності.

Коли зовнішня характеристика дизель-генератора буде дорівнювати селективній характеристиці, дизель-поїзд знімається з експлуатації. Такі випадки були зафіксовані на дизель-поїзді ДЕЛ-02 на Одеській залізниці, коли були забруднені паливні фільтри «тонкого» та «грубого» очищення. За допомогою контролюючої системи, розробленої на основі розглянутої нейронної мережі, недолік потужності дизеля був вчасно виявлений і усунутий з мінімальними часовими втратами для експлуатації дизель-поїзда.

Висновки

Приведено аналіз різних СКД, які дозволяють підвищити надійність експлуатації рухомого складу та забезпечити його ефективну роботу. При створенні вітчизняних дизель-поїздів ДЕЛ-02 питання контролю та діагностики вирішувалися з урахуванням безлічі факторів, обумовлених використанням високоєфективного асинхронного ТЕП і мікропроцесорної СК. СКД є складовою частиною мікропроцесорної СК і не вимагає наявності в схемі додаткових пристроїв. Також було визначено перелік контрольованих параметрів, виконано аналіз обсягу цих параметрів і характер їх зміни. Застосовано для контролю нейронну мережу із прямою передачею сигналів. Результати експлуатації дизель-поїздів серії ДЕЛ-02 на Одеській залізниці підтвердили ефективність функціонування розробленої СКД.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Боднар Є. Б. Основні вимоги та принципи створення бортових систем діагностування локомотивів / Є. Б. Боднар. – Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2014. – № 1 (49). – С. 68-74.
2. Мельников В. Диагностирование тепловозов по данным бортовых микропроцессорных систем / В. Мельников // Мир транспорта. – 2014. – № 03. – С. 56-62.
3. Бабков Ю. Многофункциональная микропроцессорная система управления тепловозом / Ю. Бабков и др. – Железнодорожный транспорт. 2004. – СТА, № 3. – С. 46-52.
4. Пляскин А.К. Оперативный мониторинг подвижного состава и объектов инфраструктуры железной дороги / А.К. Пляскин, М.Ю. Кейно // Транспорт российской федерации. – 2011. – № 3 (34). – С. 55-57.
5. Noboru Niura. Overview of the ATACS radio train control system / Noboru Niura // JR EAST Technical Review. – 2013. – No. 25. P. 15-18.
6. Гундаев И. Система управления движением локомотивом с использованием ГЛОНАСС/GPS / И. Гундаев, А. Батраков // Современные технологии автоматизации. – 2012. – № 3. – С. 40-43.
7. Нургулжанова А. Н. Анализ систем диагностики технического состояния локомотивов и вагонов при движении железнодорожных составов / А. Н. Нургулжанова, Э. А. Багыбаева // Мат. XLI межд. НПК КазАТК им. М. Тынышпаева: «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика». – Т. 2. – 2017. – С. 169-171.
8. Носков В. И. Обработка сигналов в бортовой системе управления дизель-поезда ДЭЛ-02 / В. И. Носков, Н. В. Мезенцев, Г. В. Гейко, В. И. Панченко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2018. – Вип. 2 (48). – С. 20-23.
9. Носков В. И. Метод определения гармонического состава фазного тока статора асинхронного двигателя в системах регулируемых приводов / В. И. Носков, Н. В. Мезенцев, Г. В. Гейко, М. В. Липчанский // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Харків: ХУПС імені Івана Кожедуба, 2015. – Вип. 7 (132). – С. 59-61.
10. Дмитриенко В. Д. Адаптивный контроль отклонений в системах управления локомотивов с помощью нейронных сетей / В. Д. Дмитриенко, Н. И. Заполовский, В. И. Носков, М. В. Липчанский, Р. Д. Расрас // Проблеми інформатики і моделювання: друга наук.-техн. конф. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – С. 14.
11. Бодянский С. В. Адаптивное выявление розглядає в об'єктах керування за допомогою штучних нейронних мереж / С. В. Бодянский, О. І. Михальов, І. П. Плісею – Дніпропетровськ: Системні технології, 2000. – 140 с.

Received (Надійшла) 12.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.02.2021

Control and diagnosis of the condition the traction electric drive

Valentin Noskov, Mykola Mezentsev, Svitlana Gavrylenko, Hennadii Heiko

Abstract. The purpose of the article. During the development of traction electric drive systems of domestic diesel train DEL-02 with traction asynchronous motors the task is to ensure effective control and diagnostics of the diesel train and its elements during operation using modern information technologies. To achieve this goal it was necessary to address the following issues: the definition of the main components and parameters that are subject to control and diagnosis; construction of the structural scheme of the control and diagnostic system; development of methods of control and diagnostics of the state of the diesel train and its elements. **Results.** To improve the efficiency of operation of diesel trains DEL-02 of domestic production, the system of control and diagnostics of the state of the traction electric drive using modern means of measuring basic parameters was developed. Further processing of the information received is performed by an onboard microprocessor control system. The solutions for the construction of the system that provides control of the required number of technical and economic indicators of traction electric drive without the introduction of additional elements in the scheme of the control system were proposed and substantiated. Control and diagnosis of indicators of the state of traction electric drive was performed by using a neural network.

Keywords: traction electric drive, control and diagnostic system, microprocessor control system, neural network.