

В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук., проф., НТУ "ХПІ",
М. В. МЕЗЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

КОМП'ЮТЕРНІ КОМПОНЕНТИ ДЛЯ РІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РУХОМИМ СКЛАДОМ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ

Вирішення завдань оптимального управління тяговим рухомих складом, як правило, виконується у припущеннях, що зовнішнє середовище щодо відношення до рухомого складу залишається незмінним та не впливає або слабо впливає на закони управління. Однак реальний рух рухомих складів по залізниці може вносити суттєві зміни в заздалегідь розроблені закони управління та графіки руху. Це пов'язано з тим, що по залізниці рухається множина рухомих складів, графіки руху яких можуть порушуватися, що може призвести до порушення оптимальних графіків руху цілого ряду рухомих складів. У зв'язку з цим у статті розглядаються підходи до управління складом із змінами, що склалися у зовнішньому середовищі. Такі підходи вимагають ідентифікації зовнішнього середовища в процесі руху конкретного складу та корекції законів управління при зміні параметрів зовнішнього середовища. У цьому випадку відбувається перехід до проактивного управління. Іл.: 1. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: комп'ютерні компоненти; оптимальне управління; тяговий рухомий склад; зміна станів зовнішнього середовища; проактивне управління.

Постановка проблеми і аналіз літератури. Тяговий рухомий склад із асинхронним приводом відноситься до складних об'єктів (СО). На його створення навіть при відомих європейських та американських зразках Україні знадобилося близько 20 років [1]. Однак далеко не всі проблеми цього рухомого складу вирішені.

Проблемам оптимізації процесів перевезення вантажів і пасажирів по залізниці традиційно приділяється досить багато уваги [2]. Однак питання оптимізації розглядаються у більшості випадків практично незалежно від можливості суттєвих змін у зовнішньому середовищі, які можуть зводити до мінімуму результати застосування оптимальних законів управління із-за низького рівня інформатизації перевізного процесу на залізничних дорогах України. В даний час на території країн СНД актуальні розробки та повсюдне впровадження інтелектуальних транспортних засобів (ІТЗ). Теорія ІТЗ у більшості розроблена в кінці минулого сторіччя. При цьому вирізняють п'ять видів інтелектуальних систем [2]:

- ІС (інтелектуальна інформаційна система);
- ЕС (експертна система);
- РІС (розрахунково-логічна система);

– ГІС и РІС (гібридна і рефлекторна інформаційні системи).

Ці системи застосовуються при вирішенні різних завдань управління промисловим виробництвом. Однак використовувати досвід застосування цих систем для створення інтелектуальних систем управління перевізним процесом (ІСУПП) на залізничному транспорті важко через особливості функціонування залізниць:

– в процесі перевезення вантажів і пасажирів беруть участь різні динамічні об'єкти, що вимагають безперервного контролю і управління. При цьому системи збору інформації розосереджені, тому необхідна передача великих обсягів інформації про перевізні процеси. З одного боку, це вимагає технічних засобів і технологій більш придатних, ніж на найбільших стаціонарних підприємствах. З іншого боку, це часто породжує затримки інформації для прийняття правильних оперативних рішень, що, в першу чергу, призводить до необхідності приймати рішення в умовах невизначеності. Це знижує і безпеку перевізного процесу та збільшує ризики появи нештатних ситуацій.

– оскільки комп'ютерна техніка та її програмне забезпечення стрімко розвивається, то на залізничному транспорті використовуються безліч різних інформаційних моделей. Ці моделі інтегровані між собою і їх не можна розділити на окремі моделі, кожен з яких можна модифікувати незалежно від інших. Через це періодично такі системи вимагають комплексної переробки, а отже і періодичного вкладання в їх розвиток значних коштів.

В сучасних умовах проблеми оптимального управління тяговим рухомим складом на залізницях України вимагають переходу до нової проактивної технології управління [3 – 8], яка вже отримала широку реалізацію в атомній енергетиці, військових областях, в авіаційній галузі і інш. При цьому проактивне управління складними об'єктами і системами докорінно відрізняється від більшості існуючих реактивних систем управління, що реагують на відхилення від нормального функціонування об'єкта управління і запобігають розвитку негативних і аварійних ситуацій. Реактивне управління забезпечує стає функціонування динамічних об'єктів в реальному часі і управління системами із зворотними зв'язками, в тому числі з урахуванням випадкових збурень зовнішнього середовища. Подальше ускладнення керованих об'єктів і їх взаємодії із зовнішнім середовищем вимагає врахування динаміки не тільки об'єктів управління, а й зовнішнього середовища, що неможливо без її моніторингу. В даний час виділяють два можливих підходи до створення систем моніторингу: підхід, заснований на реалізації систем, виходи яких асоціюються з виходами об'єкта управління, а другий підхід – асоціація з індикаторами, які

відображають результати. При цьому зацікавлені не тільки в конкретних результатах в якийсь момент часу, але і які наслідки цих результатів матимуть в майбутньому і як ефективно розвиватиметься в майбутньому ця система. Це дозволяє оцінювати успішність проекту в майбутньому щодо очікуваних результатів, які грають роль зворотного зв'язку. Залежно від об'єкта та цілей моніторингу можуть ефективно використовуватися обидва підходи. При проактивному управлінні в результаті моніторингу та прогнозування можливостей системи управління СО запобігається розвиток небажаних процесів і позаштатних ситуацій в СО. Це істотно підвищує якість управління СО та запобігає виникненню різних нештатних ситуацій, аварій та катастроф, великих матеріальних втрат і загибелі людей. Однак в більшості випадків моніторинг і прогнозування стану СО вимагає створення дорогих автоматизованих систем, тому в основному управління СО здійснюється вручну, ґрунтуючись як на математичному моделюванні в прискореному часі, так і на евристичних правилах, які не допускають небажані процеси в СО і системах управління.

Сформульовано і загальні принципи реалізації концепції проактивного моніторингу та управління СО [3]:

– принцип необхідного різноманіття, який передбачає полімодельний опис СО за рахунок класифікації та впорядкування моделей і встановлення між ними зв'язків;

– багатокритеріальність рішень, отримання неостаточних рішень;

– декомпозиції і агрегування СО;

– самоорганізації математичних моделей.

Математичні моделі рухомого складу. В даний час при дослідженнях асинхронного приводу і визначення оптимальних законів управління застосовуються різні математичні моделі, які описують рух потягів з тяговим асинхронним приводом [1]. Зручною моделлю для дослідження процесів руху дизель-поїзда з тяговим асинхронним приводом є модель, що описується наступною системою рівнянь:

$$\frac{dx_1}{dt} = a_{17}x_7; \quad (1)$$

$$\frac{dx_2^n}{dt} = a_{212}^n x_{12}^n - a_{222}^n x_2^n + a_{24}^n x_4^n + a_{265}^n x_6^n x_5^n; \quad (2)$$

$$\frac{dx_3^n}{dt} = a_{313}^n x_{13}^n - a_{333}^n x_3^n + a_{35}^n x_5^n - a_{364}^n x_6^n x_4^n; \quad (3)$$

$$\frac{dx_4^n}{dt} = a_{42}^n x_2^n - a_{44}^n x_4^n - p x_6^n x_5^n; \quad (4)$$

$$\frac{dx_5^n}{dt} = a_{52}^n x_2^n - a_{55}^n x_5^n + p x_6^n x_4^n; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dx_6^n}{dt} = & a_{60}(a_{61}^n(x_4^n x_3^n - x_5^n x_2^n) - b_0^n - b_1^n x_6^n - b_3^n (x_6^n)^2 - i(x_1) - \\ & - \omega_r(x_1) + \eta_8^n(t)); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{dx_7}{dt} = a_{70} \left(\sum_{y=1}^2 a_{71}^y (x_4^y x_3^y - x_5^y x_2^y) - x_{10} - F_{c1} \right); \quad (7)$$

$$\frac{dx_8}{dt} = a_{80}(x_{10} - x_{11} - F_{c2}); \quad (8)$$

$$\frac{dx_9}{dt} = a_{90}(a_{91}^3(x_4^3 x_3^3 - x_5^3 x_2^3) + x_{11} - F_{c3}); \quad (9)$$

$$\frac{dx_{10}}{dt} = a_{10}(x_7 - x_8); \quad (10)$$

$$\frac{dx_{11}}{dt} = a_{11}(x_8 - x_9), \quad (11)$$

де x_1 – шлях, який проходить дизель-поїзд, t – час; a_{17} , $a_{212}^n = a_{313}^n = 1/\sigma^n L_s^n$, $a_{22}^n = a_{33}^n = R_s^n / \sigma^n L_s^n + R_r^n (L_m^n)^2 / (\sigma^n L_s^n (L_r^n)^2)$, $a_{24}^n = a_{35}^n = L_m^n / (\sigma^n L_s^n L_r^n T_r^n)$, $a_{265}^n = a_{364}^n = p L_m^n / (\sigma^n L_s^n L_r^n)$, $a_{42}^n = a_{52}^n = L_m^n / T_r^n$, $a_{44}^n = a_{55}^n = 1/T_r^n$, $a_{60} = p/J^n$, $a_{61}^n = \frac{3}{2} p \frac{k_r^n i_p}{\sigma^n L_s^n R^n}$,

$a_{70} = a_{90} = 1/m_M$, $a_{80} = 1/m_{II}$, $a_{10} = C_{12}$, $a_{10} = C_{23}$ ($n = \overline{1,3}$) – постійні коефіцієнти, які враховують параметри двигунів обмоторених вагонів; $\sigma^n = 1 - (L_m^n)^2 / (L_s^n L_r^n)$ – коефіцієнт розсіювання, R_s^n , R_r^n – активні опори статора и ротора; L_s^n , L_r^n , L_m^n – індуктивності відповідно статора, ротора та взаємна; $T_r = L_r / R_r$ – постійна часу ротора; n – кількість двигунів в моделі; $x_2^n = i_{s\alpha}^n$, $x_3^n = i_{s\beta}^n$, $x_{12}^n = U_{s\alpha}^n$, $x_{13}^n = U_{s\beta}^n$ ($n = \overline{1,3}$) – проекції на вісі α і β струмів і напруг статорів двигунів, відповідно двох реальних двигунів першого обмотореного вагону і одного еквівалентного двигуна другого обмотореного вагону; $x_6^n = \omega^n$ ($n = \overline{1,3}$) – кутові швидкості

обертання роторів двигунів, відповідно двох реальних двигунів першого обмотового вагону і одного еквівалентного двигуна другого обмотового вагону; p – число пар полюсів статора у кожному двигуні; J^n ($n=\overline{1,3}$) – момент інерції двигуна і механізму, що зведений до валу, відповідно двох реальних двигунів першого обмотового вагону і одного еквівалентного двигуна другого обмотового вагону; i_p – передавальне число редуктора; R^n ($n=\overline{1,3}$) – радіуси, відповідно, двох колісних пар першого вагону і однієї еквівалентної колісної пари третього вагону; b_0^n, b_1^n, b_2^n – постійні коефіцієнти, які характеризують момент навантаження; $i(x_1)$ – функція опору від уклонів профілю шляху; $\omega_r(x_1)$ – функція опору від кривих профілю шляху; $\eta_{\delta}^n(t)$ ($n=\overline{1,3}$) – випадкові функції для імітації можливості виникнення боксування, $\eta_{\delta}^3(t) = 0$; $x_4^n = \Psi_{r\alpha}^n, x_5^n = \Psi_{r\beta}^n$ ($n=\overline{1,3}$) – проекції на вісі α і β потокозчеплень роторів двигунів, відповідно двох реальних двигунів першого обмотового вагону і одного еквівалентного двигуна другого обмотового вагону; $x_7 = V_1, x_8 = V_2, x_9 = V_3$ – швидкості руху першого, другого і третього вагонів дизель-поїзда; m_M, m_{II} – маса обмотового і пасажирського вагонів; $x_{10} = F_{12}, x_{11} = F_{23}$ – сили, що діють між першим та другим, та другим та третім вагонами; F_c^n ($n=\overline{1,3}$) – сили опору руху першого, другого и третього вагонів; C_{12}, C_{23} – коефіцієнти пружності зв'язків між першим і другим, і другим і третім вагонами; $x_i(t_0), (i=\overline{1,11})$ – початкові значення змінних в момент часу t_0 ; t_0 – початок інтервалу руху складу.

Ціль статті – показати перевагу проактивного управління при змінній обстановці у зовнішньому середовищі, коли на якійсь ділянці залізниці рухомі состави впливають на оптимальне управління інших составів.

Математична модель (1) – (11) може використовуватися як для отримання більш точних моделей руху складу, коли, наприклад, необхідно досліджувати електромагнітні процеси в асинхронному приводі, так і для отримання одномасової моделі складу з одним еквівалентним двигуном. Така модель істотно прискорить моделювання, коли на деякій ділянці залізничної колії рухаються кілька составів.

В даний час управління дизель-поїздом з асинхронним приводом здійснюється машиністом в реактивному режимі, коли машиніст за даними комп'ютера системи управління, приладів і розкладом руху, визначає позицію контролера машиніста, а отже і необхідну швидкість руху складу самостійно або за розрахунками бортової обчислювальної системи.

Сучасне тотальне вторгнення комп'ютерів і комп'ютерних технологій в усі сфери людського життя створило ілюзію, що комп'ютери і їх технології можуть вирішувати будь-які проблеми. Однак як невирішені завдання в різних сферах людського життя, так і величезна кількість аварій і катастроф в різних областях застосування комп'ютерів, причинами яких було недосконалість комп'ютерних технологій, дали привід появи твердження про "комп'ютерному руйнуванні західної цивілізації" і про побудову суспільства ризику, а не "інформаційного суспільства" [9, 10]. Однак перспективи створення інтелектуальних систем на основі проактивного управління показують, що у комп'ютерних технологій є ще майбутнє.

Приклад 1. Нехай приміський склад рухається від станції A до станції B з зупинками на проміжній станції Q_r і зупиночних пунктах $Q_1, Q_2, \dots, Q_{r-1}, Q_{r+1}, Q_q$ (рис. 1).

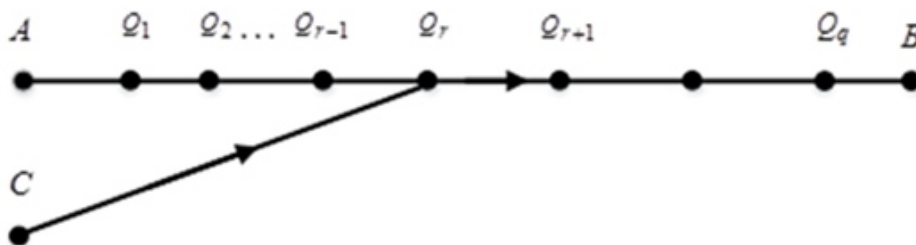


Рис. 1. Схема руху залізничних составів

Якщо по ділянці шляху AB рухається тільки один склад, то розклад руху складу може бути розрахований заздалегідь, коригування цього руху може бути пов'язане тільки з погодними умовами, ремонтними роботами або якимись непередбаченими обставинами. Якщо серед проміжних пунктів зупинки є хоча б одна станція Q_r , на якій перетинаються (або об'єднуються) хоча б два маршрути L_1 і L_2 , за якими можуть рухатися як швидкі, так і приміські поїзди, то можуть виникати ситуації, які необхідно враховувати при розрахунку руху між пунктами зупинок. Наприклад, приміський поїзд рухається зі станції A до станції B (маршрут

L_1) за розкладом і прибуває на станцію, де йому затримують відправлення, оскільки за маршрутом CQ_rB рухається швидкий поїзд, який спізнюється. Оскільки між станціями Q_r і Q_q немає можливості пропустити швидкий поїзд перед приміським, то необхідно це здійснити на станції Q_r , затримавши на необхідний час приміський поїзд. Якщо інформація про вимушений простій на станції Q_r приміського поїзда надійшла заздалегідь до його відправлення з зупинкового пункту Q_{r-1} , то можливо скорегувати закон руху між зупинним пунктом Q_{r-1} і станцією Q_r з метою мінімізації витрат енергоресурсів. Таким чином, з цього прикладу видно, що закони управління приміським складом між зупинковими пунктом Q_{r-1} і станцією Q_r залежать не тільки від характеристик рухомого приміського складу, але і від руху інших потягів на цій ділянці шляху. У зв'язку з цим для визначення оптимальних законів керування в подібних випадках необхідно володіти інформацією про рух інших складів. Відзначимо також, що все-таки стабільно високий рівень виконання розкладів пасажирських і приміських поїздів характерний не тільки для України, але і інших країн [16]. Для Великобританії, Франції, Німеччини рівень виконання розкладів в літній період приблизно дорівнює 90%. Найбільш високий рівень виконання розкладів в Японії, де середнє запізнення не перевищує 30 с. Однак на таких лініях щодоби виділяється до 6 годин на ремонт і утримання інфраструктури.

Таким чином, для реалізації концепції проактивного управління необхідно мати уявлення не тільки про поточний стан СО, але і прогнозувати поведінку як його, так і зовнішнього середовища на деякий час вперед. Даний підхід можна здійснити за рахунок реалізації в системі управління моделі об'єкта, на якій виконувати розрахунки з використанням певних законів управління. При цьому постійно здійснювати ідентифікацію параметрів даної моделі, поточного стану СО і зовнішнього середовища. Якщо розглядати математичну модель (1) – (11) в якості моделі для реалізації концепції проактивного управління, то слід зазначити, що в процесі руху дизель-поїзда є чинники, які неможливо врахувати заздалегідь: поява составів, що рухаються поза розкладом, метеорологічні умови, реальний опір руху дизель-поїзда, включення або виключення додаткового обладнання (пристроїв освітлення, опалення та ін.). Все це може призводити до неточного розрахунку керуючих впливів. Крім того, застосування тягових асинхронних двигунів (ТАД) вимагає створення досить складних систем управління і їх складових [10]. При експлуатації дизель-поїзда

змінюються характеристики ТАД, а через допустимі відхилення при виробництві та ремонті двигунів виникають деякі невизначеності тягових характеристик, які також потрібно враховувати і коригувати. Крім того, за допомогою процесу ідентифікації можна проводити діагностику і прогнозування з метою виявлення на ранніх етапах можливі майбутні несправності обладнання, а також для побудови більш ефективних законів управління.

Якщо розглядати модель об'єкта, яка описана співвідношеннями (1) – (11), то виникає необхідність в проведенні ідентифікації як електричних параметрів ТАД в процесі руху дизель-поїзда, так і параметрів, пов'язаних з рухом поїзда (момент опору руху, амплітуди коливань вагонів, зміна параметрів руху складів). Тобто можна сказати, що має місце дворівнева ідентифікація: на першому (нижньому) рівні необхідно виконувати оцінку параметрів, пов'язаних з ТАД, а на другому (верхньому) рівні – параметрів, пов'язаних з рухом поїзда і змін у зовнішньому середовищі.

При роботі ТАД відбувається нагрів активних опорів статора і ротора, що погіршує точність регулювання швидкості і потокозчеплення, а також може призвести до втрати стійкості всієї системи [12]. Особливо помітний вплив зміни цих опорів на роботу двигуна в області малих швидкостей руху. Внаслідок того, що досить складно безпосередньо виміряти параметри опорів ротора і статора, то застосовують непряме визначення їх значень. На сьогоднішній момент запропоновано декілька методів ідентифікації параметрів ТАД [12, 13]. Однак слід зазначити, що одним із загальних недоліків цих методів є те, що при зростанні ступеня несинусоїдальності форми статорних струмів, в значній мірі знижується точність ідентифікації.

Для ідентифікації параметрів пропонується на основі математичної моделі (1) – (11) робити уточнення параметрів двигуна в N заданих моментах часу. Необхідними даними для розрахунків є виміряні значення струму і напруги статора, а також їх похідні першого і другого порядків.

Розглянемо ідентифікацію основних параметрів для ТАД на основі математичної моделі (1) – (11) (співвідношення (2) – (5)). У наведеній моделі невідомими для кожного двигуна є п'ять параметрів:

$R_s^n, R_r^n, L_m^n, L_s^n, L_r^n$, які змінюються в процесі роботи двигуна. Вектор стану системи доступний для вимірювання частково, а саме: вимірюються проекції струму статора $i_{sa}^n, i_{s\beta}^n$ і частота обертання ротора двигуна ω ; вектор потокозчеплення ротора для вимірювання недоступний; керуючими сигналами є компоненти двовимірного вектора

напруги статора $U_{s\alpha}^n$, $U_{s\beta}^n$. Для виконання ідентифікації необхідно виконати перетворення математичної моделі до виду, в якому виключені величини потокозчеплення ротора, які неможливо виміряти. Для цього слід виконати такі перетворення:

$$\frac{dx_2^n}{dt} = a_{212}^n \left(\frac{dx_{14}^n}{dt} - K_r^n \frac{dx_4^n}{dt} \right); \quad (12)$$

$$\frac{dx_4^n}{dt} = \frac{1}{K_r^n} \left(\frac{dx_{14}^n}{dt} - \frac{1}{a_{212}^n} \frac{dx_2^n}{dt} \right) = \frac{1}{K_r^n} \left(x_{12}^n - R_s^n x_2^n - \frac{1}{a_{212}^n} \frac{dx_2^n}{dt} \right); \quad (13)$$

$$\frac{dx_2^n}{dt} = a_{212}^n \left(\frac{dx_{15}^n}{dt} - K_r^n \frac{dx_5^n}{dt} \right); \quad (14)$$

$$\frac{dx_5^n}{dt} = \frac{1}{K_r^n} \left(\frac{dx_{15}^n}{dt} - \frac{1}{a_{212}^n} \frac{dx_2^n}{dt} \right) = \frac{1}{K_r^n} \left(U_{12}^n - R_s^n x_2^n - \frac{1}{a_{212}^n} \frac{dx_2^n}{dt} \right), \quad (15)$$

де $x_{14}^n = \Psi_{r\alpha}^n$, $x_{15}^n = \Psi_{r\beta}^n$ ($n = \overline{1, 3}$) – проекції на осі α і β потокозчеплень статорів двигунів, відповідно, двох реальних двигунів першого обмотеного вагона і одного еквівалентного двигуна другого обмотеного вагона.

Виконавши диференціювання обох частин виразів (2) – (3), отримаємо такі вирази:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_2^n}{dt^2} &= a_{212}^n \frac{dx_{12}^n}{dt} - a_{22}^n \frac{dx_2^n}{dt} + a_{24}^n \frac{dx_4^n}{dt} + \\ &+ p\beta^n x_6^n \frac{dx_5^n}{dt} + p\beta^n \frac{dx_6^n}{dt} x_5^n; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_3^n}{dt^2} &= a_{313}^n \frac{dx_{13}^n}{dt} - a_{33}^n \frac{dx_2^n}{dt} + a_{35}^n \frac{dx_5^n}{dt} + \\ &+ p\beta^n x_6^n \frac{dx_4^n}{dt} + p\beta^n \frac{dx_6^n}{dt} x_4^n. \end{aligned} \quad (17)$$

Тепер підставимо вираз (2) в (16), а вираз (3) в (17), і виконавши алгебраїчні перетворення, отримаємо наступні залежності:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_2^n}{dt^2} + px_6^n \frac{dx_3^n}{dt} &= K_1^n x_2^n + K_2^n x_{12}^n + \\ &+ K_3^n px_6^n x_2^n + K_4^n \left(\frac{d_{12}^n}{dt} + px_6^n x_{13}^n \right) + K_5^n \frac{dx_2^n}{dt}; \\ \frac{d^2 x_3^n}{dt^2} - px_6^n \frac{dx_2^n}{dt} &= K_1^n x_3^n + K_2^n x_{13}^n + \\ &+ K_3^n px_6^n x_2^n + K_4^n \left(\frac{dx_{13}^n}{dt} - px_6^n x_{12}^n \right) + K_5^n \frac{dx_3^n}{dt}, \end{aligned}$$

де $K_1^n = -\frac{R_s^n}{\sigma^n L_s^n T_r^n}$; $K_2^n = \frac{1}{\sigma^n L_s^n T_r^n}$; $K_3^n = -\frac{R_s^n}{\sigma^n L_s^n}$; $K_4^n = \frac{1}{\sigma^n L_s^n}$;

$$K_5^n = -\frac{(L_r^n R_s^n + L_s^n R_r^n)}{\sigma^n L_s^n L_r^n}.$$

У наведених рівняннях невідомими є коефіцієнти $K_1^n - K_5^n$. Провівши вимірювання напруги, струму статора і частоти обертання ротора двигуна в п'яти моментах часу, отримуємо матрицю вигляду $Y^n = K^n X^n$, де

$$Y^n = \begin{vmatrix} \left(\frac{d^2 x_2^n}{dt^2} \right)_k + px_6^n \left(\frac{dx_3^n}{dt} \right)_k \\ \left(\frac{d^2 x_2^n}{dt^2} \right)_{2k} + p\omega^n \left(\frac{dx_3^n}{dt} \right)_{2k} \\ \dots \\ \left(\frac{d^2 x_2^n}{dt^2} \right)_{5k} + p\omega^n \left(\frac{dx_3^n}{dt} \right)_{5k} \end{vmatrix},$$

$$X^n = \begin{vmatrix} (X_1^n)_k & (X_2^n)_k & (X_3^n)_k & (X_4^n)_k & (X_5^n)_k \\ (X_1^n)_{2k} & (X_2^n)_{2k} & (X_3^n)_{2k} & (X_4^n)_{2k} & (X_5^n)_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (X_1^n)_{5k} & (X_2^n)_{5k} & (X_3^n)_{5k} & (X_4^n)_{5k} & (X_5^n)_{5k} \end{vmatrix},$$

де k – величина інтервалу дискретизації; $X_1^n = x_2^n$; $X_2^n = x_{12}^n$;

$$X_3^n = px_6^n x_3^n; \quad X_4^n = \frac{dx_{12}^n}{dt} + px_6^n x_{13}^n; \quad X_5^n = \frac{dx_2^n}{dt}.$$

Вектор невідомих параметрів

$$K^n = \left[K_{1k}^n; K_{2k}^n; K_{3k}^n; K_{4k}^n; K_{5k}^n \right]^T.$$

Із системи рівнянь ($K^n = Y^n (X^n)^{-1}$), отримаємо оцінки параметрів цієї системи $K_1^n - K_5^n$, за допомогою яких можуть бути отримані наступні параметри двигунів:

$$R_s^n = -\frac{K_3^n}{K_4^n}, \quad T_r^n = \frac{K_4^n}{K_2^n}, \quad \sigma^n = \frac{K_2^n}{K_4^n (K_3^n - K_5^n)}, \quad L_s^n = \frac{(K_3^n - K_5^n)}{K_2^n}.$$

Слід зазначити, що визначити такі параметри, як R_r^n , L_r^n, L_m^n , через коефіцієнти $K_1^n - K_5^n$ неможна. Визначення даних параметрів з урахуванням того, що діапазон їх можливої зміни щодо паспортного значення відомий, запропоновано виконати за допомогою генетичного алгоритму. Внаслідок того, що ці параметри можуть змінюватися в невеликих межах відносно їх паспортних значень, використання генетичного алгоритму дає прийнятне рішення за досить короткий час.

У рівняння руху математичної моделі (1) – (11) входить момент опору руху, який апроксимується поліномом другого ступеня з постійними коефіцієнтами (b_0, b_1, b). Ці коефіцієнти розраховуються заздалегідь за методом тягових розрахунків і залишаються постійними при русі дизель-поїзда для конкретного перегону. Але в процесі руху дизель-поїзда, при зміні дорожньої обстановки (погодні умови, зміни розкладу і т.п.) момент опору руху може змінюватися, що призводить до відхилень у визначенні керуючих впливів при виконанні управління з моделлю. Необхідно відзначити, що крім невизначеності дорожньої обстановки на точність прогнозування руху дизель-поїзда впливає також відхилення його фактичної ваги від розрахункового значення. Значення моменту опору руху (за різними оцінками) може відрізнятись від розрахункових значень не більше ніж на 20%. В результаті при використанні розробленого методу похибка прогнозування швидкості руху дизель-поїзда, з урахуванням оцінки моменту опору в процесі моделювання при різних варіантах завантаження дизель-поїзда склало не більше 2%.

Проактивне управління передбачає також використання моніторингу стану СО. Система управління тяговим електроприводом дизель-поїзда характеризуються значним числом технічних і економічних показників, що змінюються в часі. Оперативна оцінка всіх цих показників людиною практично неможлива навіть при візуальному відображенні інформації, для аналізу якої потрібно не тільки висока кваліфікація фахівця, а й трудомістка обробка даних з використанням обчислювальної техніки. У зв'язку з цим для моніторингу стану тягових електроприводів пропонується використовувати підхід, заснований на аналізі таксономічного показника [1, 15]. Для визначення таксономічного показника використовується рекурентна нейронна мережа, яка розраховує його значення в певні моменти часу. Якщо одержувані значення приблизно однакові і близькі до одиниці, то це свідчить про нормальне функціонування об'єкта управління. Зменшення значень таксономічного показника є сигналом про відхилення функціонування об'єкта від оптимального.

Висновки. В роботі розглянуто застосування концепції проактивного управління для рухомого складу з тяговим асинхронним електроприводом. В системі управління дизель-поїздом запропоновано використовувати реалізацію математичної моделі руху складу, з метою коригування законів управління при можливій зміні параметрів моделі. Ідентифікація параметрів здійснюється на двох рівнях: на першому (нижньому) рівні визначаються параметри, пов'язані з тяговими асинхронними електродвигунами, а на другому (верхньому) – параметри, що пов'язані з рухом поїзда. Моніторинг стану дизель-поїзда здійснюється за допомогою розрахунку таксономічного показника, на підставі значення якого визначаються відхилення у функціонуванні об'єкта від норми. Для розрахунку таксономічного показника застосовується рекурентна нейронна мережа, що має додаткові виходи, на яких формуються сигнали відхилення кожного з контрольованих параметрів від оптимального значення. Це дозволяє швидко ліквідувати виникаючі відхилення від оптимальних режимів при функціонуванні СО.

Список літератури:

1. Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, С.Ю. Леонов // Научное издание – Х.: ХФИ "Транспорт Украины". – 2003. – 248 с.
2. Ерофеев А.А. Предпосылки создания системы интеллектуального управления перевозочным процессом // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. 2017. – №1 (34). – С. 42 – 45.
3. Вонт Р. Адаптивные и проактивные компьютерные системы / Р. Вонт, Т. Перинг, Д. Тенненхау // Открытые системы. – 2003. – № 7. – С. 4 – 9.

4. *Охтилев М.Ю.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов / *М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов.* – М.: Наука, 2006. – 410 с.
5. *Васильев С.Н.* От классических задач регулирования к интеллектуальному управлению // Теория и системы управления. – 2001. – № 1. – С. 5 – 22.
6. *Тиханычев О.В.* Об использовании принципа проактивного управления в системах поддержки принятия решений // Прикладная информатика. – 2018. – Т. 13. – № 2 (74).
7. *Li Yongkui* Proactive behavior-based system for controlling safety risks in urban highway construction megaprojects / *Yongkui Li, Yi Hu, Xia Bo, M. Skitmore* // Automation in Construction. – Vol. 95. – 2018. – P. 118 – 128.
8. *Want R.* Comparing autonomic and proactive computing / *R. Want, T. Pering, D. Tennenhouse* // IBM Systems Journal. – 2003. – Vol. 42. – Is. 1. – P. 129 – 135.
9. *Герасименко В.А.* Информатика и интеграция в технике, науке, познании // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 5. – С. 22 – 42.
10. *Верзилин Д.Н.* Неокибернетика: состояние исследований и перспективы развития / *Д.Н. Верзилин, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов* // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXIII Международ. науч.-практич. конф. Ч.1.-СПб.: Изд-во Политех-Пресс. – 2019. – С. 81-98.
11. *Осипов С. И.* Основы тяги поездов. Учебник для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / *С.И. Осипов, С.С. Осипов.* – М.:УМК МПС России. – 2000. – 592 с.
12. *Kenne G.* An online simplified rotor resistance estimator for induction motors / *G. Kenne, R.S. Simo, F. Lamnabhi-Lagarrigue, A. Arzande, J.C. Vannier* // IEEE Transactions on control systems technology, 2010. – Vol. 18. – № 5. – P. 1188 – 1194.
13. *Duran M.J.* Induction-motor sensorless vector control with online parameter estimation and overcurrent protection / *M.J. Duran, J.L. Duran, F. Perez, J. Fernandez* // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – Vol. 53. – № 1. – P. 154 – 161.
14. *Castaldi P.* Parameter estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring / *P. Castaldi, A. Tilli* // IEEE Transactions on control systems technology. – 2005. – Vol. 13. – № 3. – P. 386 – 400.
15. *Дмитриенко В.Д.* Анализ интегральных показателей для контроля тягового подвижного состава / *В.Д. Дмитриенко, Г.В. Гейко, Н.В. Мезенцев, С. Ю. Леонов* // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – 2015. – № 12 (137). – С. 20 – 22.
16. *Махедов М.И.* Развитие системы нормирования и учета показателей выполнения расписаний движения пассажирских и пригородных поездов для железных дорог и сети в целом / *М.И. Махедов, Е.А. Сотников, Е.А. Махедова* // Вестник ВНИИЖТ. – 2020, Т. 79. – № 4. – С. 183 – 190.

References:

1. Noskov, V.I., Dmitrienko, Zapolovsky, N.I., Leonov, S.Yu. (2003), *Modeling and optimization of control and monitoring systems for locomotives*, Kharkiv, HFI "Transport of Ukraine", 248 p.
2. Erofeev, A.A. (2017), "Prerequisites for the creation of an intelligent control system of the transportation process", *Bulletin of the Belarusian State Universistema of Transport*, No. 1 (34), pp. 42 – 45.
3. Vont, R., Pering, T., Tennenhow, D. (2003), "Adaptive and proactive computer systems", *Open systems*, No. 7, pp. 4 – 9.

4. Okhtilev, M.Yu., Sokolov, B.V., Yusupov, R.M. (2006), *Intelligent technologies for monitoring and control of the structural dynamics of complex technical objects*, Moscow, Nauka, 410 p.
5. Vasiliev, S.N. (2001), "From classical regulation problems to intelligent control", *Theory and control systems*, No. 1, pp. 5 – 22.
6. Tikhanychev, O.V. (2018), "On the use of the principle of proactive control in decision support systems", *Applied Informatics*, Vol. 13, No. 2 (74).
7. Li, Yongkui., Yi, Hu., Xa, Bo., Skitmore, M. (2018), "Proactive behavior-based system for controlling safety risks in urban highway construction megaprojects", *Automation in Construction*, Vol. 95, pp. 118 – 128.
8. Want, R., Pering, T., Tennenhouse, D. (2003), "Comparing autonomic and proactive computing", *IBM Systems Journal*, Vol. 42, Is. 1, pp. 129 – 135.
9. Gerasimenko, V.A. (1993), "Informatics and integration in technology, science, cognition", *Foreign radio electronics*, No. 5, pp. 22 – 42.
10. Verzhilin, D.N., Sokolov, B.V., Yusupov, R.M. (2019), "Neocybernetics: state of research and development prospects", *System analysis in design and management*, SPb, Polytech-Press Publishing House, pp. 81 – 98.
11. Osipov, S.I., Osipov, S.S. (2000), *Fundamentals of traction trains. Textbook for students of technical schools and colleges of railway transport*, Moscow, UMK Ministry of Railways of Russia, 592 p.
12. Kenne, G., Simo, R.S., Lamnabhi-Lagarrigue, F., Arzande, A., Vannier, J.C. (2010), "An online simplified rotor resistance estimator for induction motors", *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 18, No. 5, pp. 1188 – 1194.
13. Duran, M.J., Duran, J.L., Perez, F., Fernandez, J. (2006), "Induction-motor sensorless vector control with online parameter estimation and overcurrent protection", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 1, pp. 154 – 161.
14. Castaldi, P., Tilli, A. (2005), "Parameter estimation of induction motor at standstill with magnetic flux monitoring", *IEEE Transactions on control systems technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 386 – 400.
15. Dmitrienko, V.D., Heiko, H.V., Mezentsev, M.V., Leonov, S.Yu. (2015), "Analysis of integral indicators for control of traction rolling stock", *Information systems: collection of scientific works*, Kharkiv: Kharkiv University of the Powers of the Power named Ivan Kozhedub, No. 12 (137), pp. 20 – 22.
16. Makhedov, M.I., Sotnikov, E.A., Makhedova, E.A. (2020), "Development of the system of rationing and accounting for the performance of timetables for the movement of passenger and suburban trains for railways and the network as a whole", *Bulletin of VNIIZhT*, Vol. 79, No. 4, pp. 183 – 190.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ" Серков О.А.

Поступила (received) 29.05.2021

Dmitrienko Valerii, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Mezentsev Mykola, Cand. Tech. Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (098) 859-88-98, e-mail: mykola.mezentsev@khpi.edu.ua
ORCID ID: 0000-0001-7834-2797

УДК 861.5.015.2

Комп'ютерні компоненти для вирішення проблем оптимального управління рухомим складом залізниць України / Дмитрієнко В.Д., Мезенцев М.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2021. – № 1 (5). – С. 40 – 55.

Вирішення завдань оптимального управління тяговим рухомим складом, як правило, виконується у припущеннях, що зовнішнє середовище щодо відношення до рухомого складу залишається незмінним та не впливає або слабо впливає на закони управління. Однак реальний рух рухомих складів по залізниці вносить суттєві зміни в заздалегідь розроблені закони управління та графіки руху. У зв'язку з цим у статті розглядаються підходи до управління складом із змінами, що склалися у зовнішньому середовищі. Такі підходи вимагають ідентифікації зовнішнього середовища в процесі руху конкретного складу та корекції законів управління при зміні параметрів зовнішнього середовища. У цьому випадку відбувається перехід до проактивного управління. *Ил.: 1. Библиогр.: 16 назв.*

Ключові слова: комп'ютерні компоненти; оптимальне управління; тяговий рухомий склад; зміна станів зовнішнього середовища; проактивне управління.

УДК 861.5.015.2

Компьютерные компоненты для решения проблем оптимального управления подвижным составом железных дорог Украины / Дмитриенко В.Д., Мезенцев Н.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2021. – № 1 (5). – С. 40 – 55.

Решение задач оптимального управления тяговым подвижным составом, как правило, выполняется в предположении, что внешняя среда по отношению к составу остается неизменной и не влияет или слабо влияет на законы управления. Однако реальное движение составов по железной дороге вносит существенные изменения в заранее рассчитанные законы управления и графики движения. В связи с этим в статье рассмотрены подходы к управлению составом с учетом изменения состояний внешней среды. Такие подходы требуют идентификации внешней среды в процессе движения конкретного состава и коррекции законов управления при изменении параметров внешней среды. В этом случае происходит переход к проактивному управлению. *Ил.: 1. Библиогр.: 16 назв.*

Ключевые слова: компьютерные компоненты; оптимальное управление; тяговый подвижной состав; изменение состояний внешней среды; проактивное управление.

УДК 861.5.015.2

Computer components for solving the problems of optimal control of the rolling stock of the railways of Ukraine / Dmitrienko V.D., Mezentsev M.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2021. – № 1 (5). – P. 40 – 55.

The solution of the problems of optimal control of traction rolling stock, as a rule, is performed under the assumption that the external environment in relation to the composition remains unchanged and does not affect or weakly affects the laws of control. However, the actual movement of trains on the railway makes significant changes to the pre-calculated laws of control and schedules. In this regard, the article considers approaches to the control of the composition taking into account changes in the state of the environment. Such approaches require the identification of the external environment in the process of movement of a particular composition and the correction of control laws when changing the parameters of the external environment. In this case, there is a transition to proactive control. *Figs.: 1. Refs.: 16 titles.*

Keywords: computer components; optimal control; traction rolling stock; change in the state of the environment; proactive control.