

Список літератури

1. S. E. Collier, «Ten steps to a smarter grid,» in Rural Electric Power Conference. IEEE, pp. B2–B2–7, April 2009.
2. X. Wei, Z. Yu-Hui, and Z. Jie-lin, «Energy-efficient distribution in smart grid,» in International Conference on Sustainable Power Generation and Supply 2009, pp. 1–6, March 2009.
3. R. E. Brown, «Impact of smart grid on distribution system design,» in Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, IEEE, pp. 1–4, July 2008.
4. H. Farhangi, «The path of the smart grid,» Power and Energy Magazine, IEEE, vol. 8, pp. 18–28, January-February 2010.
5. Соколова Н. П. Моделювання та програмне забезпечення прогнозування споживання електричної енергії об'єктами аеропорту / Н. П. Соколова // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 2/8 (68), С. 8–2.
6. Омеляненко В. І. Автоматизована система прогнозування споживання електроенергії на залізницях / В. І. Омеляненко, Г. В. Омеляненко, Ю. П. Чудний // Міжнародний науково-технічний журнал «Світлотехніка та Електроенергетика». – 2009. – № 2. – С. 9–13.
7. Павлюк О. Інтегрована автоматизована система для прогнозування споживання електричної енергії у Львівській області / О. Павлюк. – Національний університет «Львівська політехніка», 2015.
8. Лещинський О. Л. Модель прогнозування обсягу споживання електричної енергії світлосигнального обладнання аеропорту / О. Л. Лещинський, В. С. Коновалюк, Н. П. Соколова // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 2/1(16). – С. 27–31.
9. Бурій С. В. Оцінка методів прогнозування електроспоживання підприємств на прикладі вугільної шахти / С. В. Бурій, В. В. Халімов // Наукові праці ВНТУ. – 2014. – No 2.
10. More B. R. Electric load forecasting in smart grid environment and classification of methods, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 7, July-2014, pp. 49–51.
11. Chemetova S., Santos P., Ventim-Neves M. (2016) Load Forecasting in Electrical Distribution Grid of Medium Voltage. In: Camarinha-Matos L. M., Falcão A. J., Vafaei N., Najdi S. (eds) Technological Innovation for Cyber-Physical Systems. DoCEIS 2016. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 470. Springer, Cham.
12. A. K. Singh, I. Ibraheem, S. Khatoun, M. Muazzam, D. K. Chaturvedi, «Load forecasting techniques and methodologies: A review», Power Control and Embedded Systems (ICPCES) 2012 2nd International Conference on, pp. 1–10, 2012.
13. R.-H. Liang and C.-C. Cheng, «Combined regression-fuzzy approach for shortterm load forecasting,» IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 147, pp. 261–266, July 2000.
14. G.-C. Liao, «An evolutionary fuzzy neural network approach for short-term electric power load forecasting,» in Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 2006.
15. A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic, and D. Morton, «Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid,» in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 1627–1632, July 2008.

Рукопис подано до редакції 10.04.2019

УДК 622.625.28

Д.О. КАЛЬМУС, ст. викладач, Криворізький національний університет

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ДВИГУНОМ ШАХТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ З РЕЛЕЙНИМ РЕГУЛЯТОРОМ СТРУМУ

Мета. Метою даної роботи є вдосконалення електричного приводу шахтного електровозу за рахунок застосування цифрової системи керування тяговим електричним двигуном з релейним регулятором струму, та знаходження за квадратичними критеріями оптимального за відхиленням керування, яке б забезпечувало максимальну швидкість при роботі шахтного електровозу в пунктах завантаження.

Методи дослідження. При проведенні розглянутого в статті дослідження було використано методи безпосереднього спостереження та вивчення режимів роботи та графіків навантаження електроприводів, загальна теорія навантажень електроприймачів із змінним графіком навантаження, а також методи синтезу оптимальних систем із застосуванням функції Белмана – Ляпунова.

Наукова новизна. Розв'язання даної задачі складає актуальність роботи. Її метою є узагальнення відомих методів розрахунків імпульсних електромеханічних систем і формулювання на цій основі уніфікованого методу з розробкою цифрової системи керування, яка б забезпечила ефективне функціонування електричного приводу шахтного електровозу при роботі в пунктах завантаження.

Практична значимість. Отримані результати можна використовувати як розрахунково-аналітичний апарат на етапі ескізного проектування тягового електропривода при складанні методики розрахунку та розробки схемних рішень системи керування електромеханічними тяговими комплексами, а також для модернізації існуючого парку шахтного електровозного транспорту.

Результати. Вдосконалення теорії комплексного розрахунку систем з імпульсними перетворювачами та врахуванням процесів в системах регулювання й керування, а також специфіки експлуатації дозволить виконувати комплексне проектування систем імпульсного регулювання за критерієм досягнення найкращих показників роботи

електровозів, тобто мінімальний шлях гальмування – максимальна зчіпна вага, для заданої технічної швидкості. Застосування цифрових систем керування значно полегшує розрахунки зовнішніх і регулювальних характеристик електропривода, а отже, чергове завдання полягає в тому, щоб розробити методику розрахунку систем з імпульсними перетворювачами, враховуючи при цьому процеси в системах регулювання й керування, а також обмеження при роботі електрорухомого складу, наприклад по відхиленню, кількості пусків та часу завантаження.

Ключові слова: шахтний електровоз, електричний двигун, релейний регулятор, математична модель.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-88-92

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Шахтний електровозний транспорт завдяки його мобільності та низькому рівню енергетичних витрат набув широкого розповсюдження на гірничо-видобувних підприємствах України та світу в цілому. Через особливості експлуатації, що обумовлені геологічними умовами, виникає необхідність уніфікації основних вузлів приводу електровозу. До таких вузлів можна віднести, як тягові електричні двигуни (ТЕД), так і пристрої керування ними. Ефективні системи керування шахтними електровозами передбачають встановлення сучасного обладнання, але брак вільного міста для його розміщення, накладає жорсткі обмеження щодо його розмірів та ваги. Розвиток перетворювальної техніки, в плані створення нових елементів та способів керування ними, висуває нові цілі подальшого вдосконалення шахтного електровозного транспорту. Впровадження сучасних систем дозволяє зменшити кількість датчиків та каналів зв'язку, а також досягти повної уніфікації. Отже, актуальним виглядає питання пошуку законів та розрахунку параметрів системи керування електричним приводом електровозів, які мають забезпечити його ефективну роботу.

Аналіз досліджень і публікацій. Як показали результати досліджень, ефективність електровозного відкочування нерозривно пов'язана з удосконалюванням системи керування шахтних електровозів, оскільки в ряді випадків маса поїзда визначається умовами його роботи, виходячи з максимально припустимої швидкості руху й точності позиціонування. Досягнення необхідної безпеки руху повинно забезпечуватися високою ефективністю та точністю при роботі шахтного електровозу в пунктах завантаження [1-5].

Основні тенденції щодо реалізації вимог ефективності електроприводів, виглядають особливо актуальними для їхніх тягових варіантів у різних видах електрифікованого транспорту [9-11]. В свою чергу найбільший ефект спостерігається при впровадженні сучасних технологій на базі цифрових систем керування [11-13].

Постановка завдання. Дослідження та вдосконалення електричного приводу шахтного електровозу за рахунок застосування в ньому цифрової системи керування ТЕД. Для чого пропонується розробити систему керування ТЕД з релейним регулятором струму, та за квадратичними критеріями знайти оптимальне за відхиленням керування, що забезпечує максимальну швидкодію.

Викладення матеріалу і результати. Для шахтних електровозів характерною ознакою є циклічна робота, обумовлена періодичністю процесу відкочування руди. В таких умовах найбільш характерними показниками для дослідження режиму роботи ТЕД є навантажувальні діаграми, отримані за час рейсу. На рис. 1 показана діаграма струмового навантаження ТЕД типу ДТН-45 шахтного електровозу К-14 при постановці вагонеток типу ВГ-9 в пункт завантаження, в умовах горизонту 980 м., ш. «Родина», Криворізький залізорудний комбінат. Так при постановці вагонетки у пункт завантаження машиніст електровозу здійснив чотирнадцять пусків ТЕД, при цьому зафіксовано, що максимальне значення струму складає 320 А, що є більшим його номінального значення 204 А. Слід також зазначити, що при цьому допускається робота ТЕД з навантаженням, що перевищує його номінальне значення, тривалістю до 10 секунд. Тобто, у процесі завантаження вагонетки, для здійснення точного її позиціонування, машиністу доводиться робити зайву кількість пусків, що викликає струмові навантаження, а отже, й тягові зусилля що перевищують припустимі величини. Тобто, робота приводу електровозу в процесі завантаження відбувається в несприятливих умовах, а різко змінний характер струмового навантаження тягового двигуна визначається застосуванням недосконалої системи керування та суб'єктивізмом машиніста при виборі моментів перемикання режимів роботи, що особливо позначається при роботі в місцях завантаження й розвантаження гірської породи.

Об'єктом керування в системі автоматичного управління електровозом є ТЕД та перетворювач електричної енергії, які представляють собою силову частину електричного приводу.

Структура неперервної частини об'єкта керування з врахуванням дискретності керуючого впливу може бути записана [6]

$$W_{\omega(p)} = \frac{1 - e^{-pT}}{p} \cdot \frac{K_n}{T_e p + 1}, \quad (1)$$

де K_n та T_e - відповідно коефіцієнт підсилення та електромагнітна стала часу кола «перетворювач - двигун»; T - період дискретизації.

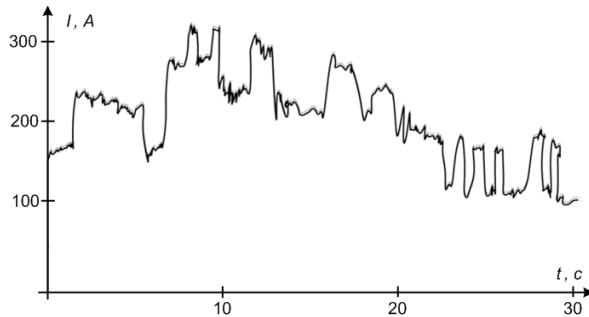


Рис. 1. Діаграма струмового навантаження тягового електричного двигуна типу ДТН-45

Передатна функція ланки у формі Z – перетворень матиме вигляд

$$W_{\omega(z)} = \frac{1 - e^{-\alpha T}}{z - e^{-\alpha T}}, \quad (2)$$

де $\alpha = 1/T_e$.

Запишемо цифрове рівняння швидкості у вигляді

$$\omega_{k+1} - \omega_k e^{-\alpha T} = K_n U_k (1 - e^{-\alpha T}) = \omega_k e^{-\alpha T} + U_k (1 - e^{-\alpha T}), \quad (3)$$

де U_k - напруга перетворювача.

Виходячи з досвіду експлуатації та проведених досліджень [7, 8, 11], для зменшення кількості пусків ТЕД при роботі у пунктах завантаження пропонується стабілізувати швидкість електровозу, при цьому струм ТЕД необхідно обмежити на рівні номінального значення. Отже, для досягнення поставленої задачі, необхідно знайти таке керування, що переводить систему в координати із заданим значенням швидкості за мінімальний час з мінімальним відхиленням. Для пошуку оптимального керування застосуємо квадратичний критерій мінімуму інтегральної похибки, який в дискретній формі має вигляд

$$W = \sum_0^m C_{11} \omega_k^2, \quad (4)$$

де C_{11} - ваговий коефіцієнт.

Теорему Ляпунова в дискретній формі запишемо у вигляді [6]

$$V_{k+1} = \sum \frac{\partial V_{k+1}}{\partial x_k} x_{k+1} = -W_k, \quad (5)$$

де V_k - дискретна функція Ляпунова, W_k - функція що мінімізується.

Рівняння Белмана для оптимального керування будуть мати вигляд [5]

$$\frac{\partial \Phi_k}{\partial \omega_k} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_k}{\partial U_k} = 0; \quad \min \Phi_k = \min \left\{ \omega_k + \frac{\partial V}{\partial \omega_k} \omega_{k+1} + \frac{\partial V}{\partial U_k} U_{k+1} \right\} = 0. \quad (6)$$

Функцію Белмана – Ляпунова будемо шукати у вигляді

$$V = \zeta_{11} \omega_k^2. \quad (7)$$

Для визначення коефіцієнту ζ_{11} похідні $\frac{\partial V}{\partial \omega_k}$ та $\frac{\partial V}{\partial U_k}$ помножимо на праві частини системи рівнянь об'єкта, й дорівняємо отриманий вираз функція що мінімізується

$$2\zeta_{11} \omega_k (-\omega_k e^{-\alpha T} + K_n U_k (1 - e^{-\alpha T})) = -C_{11} \omega_k^2, \quad (8)$$

Оскільки керування U_k входить у систему з лінійним множником, то воно буде визначатися виразом

$$U(\omega_k, k) = -\text{sign} K_n \left(\frac{\partial V_k}{\partial \omega_k} \right). \quad (9)$$

Дорівнюючи коефіцієнти при однакових ступенях ω_k знайдемо

$$\zeta_{11} = \frac{C_{11}}{2e^{-\alpha T}}. \quad (10)$$

Отже, знаходимо керування у вигляді

$$U = -\text{sign}K_n \left(\frac{\partial V_k}{\partial \omega_k} \right) = -\text{sign}K_n [2\zeta_{11}\omega_k] = -\text{sign}K_n \left[\omega_k \left(\frac{C_{11}}{e^{-\alpha T}} \right) \right] = -\text{sign}K_n [\gamma_1 \omega_k], \quad (11)$$

де

$$\gamma_1 = \frac{C_{11}}{e^{-\alpha T}}. \quad (12)$$

Таким чином замкнена система регулювання буде мати вигляд (рис. 2).

За наведеними виразами, для електричного приводу шахтного електровозу К-14 з ТЕД типу ДТН-45, у програмному середовищі MatLab було проведено моделювання та отримано графік струму в контурі ТЕД при імітації роботи в пункті завантаження (рис. 3).

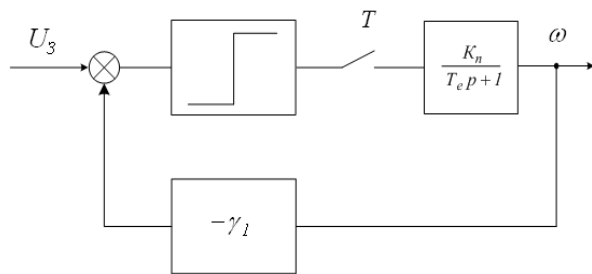


Рис. 2. Замкнена система регулювання

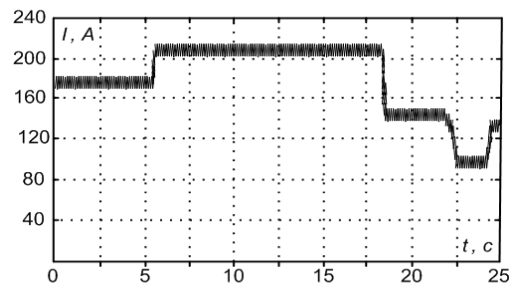


Рис. 3. Графік струму в контурі ТЕД типу ДТН-45

Наведені результати математичного моделювання показують, що за графіком (рис. 3), що відображає операцію завантаження вагонетки, можна відзначити, що у порівнянні з діаграмою (рис. 1), кількість пусків ТЕД при постановці вагонетки у пункт завантаження зменшується до п'яти. Також, треба зазначити, що час постановки вагонетки під завантаження скорочується з тридцяти двох до двадцяти п'яти секунд, а струм тягового двигуна, в процесі операції завантаження, не перевищує його номінальне значення.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Запропоновано алгоритм роботи шахтного електровозного транспорту в пунктах завантаження вагонеток. Згідно з цим алгоритмом розроблено систему керування ТЕД шахтного електровозу з релейним регулятором струму та отримано вирази для розрахунку її параметрів. Дослідження, за допомогою імітаційного моделювання, роботи системи керування електричним приводом шахтного електровозу К-14 з ТЕД типу ДТН-45, показує, що розроблена система з релейним регулятором струму, за таким показником як час перехідного процесу, не поступається системам підлеглого регулювання, та може бути реалізована програмно, у вигляді закону керування, що не потребує додаткового встановлення обладнання. Час завантаження вагонеток та кількість пусків для їх постановки зменшуються. Отже, розроблена система керування ТЕД з релейним регулятором струму може бути використана для вдосконалення електричного приводу шахтного електровозного транспорту.

Список літератури

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. -М.: Недра, 1981. - 389с.
2. Пироженко В.Х. Рудничные электровозы с тиристорным приводом. - К.: Техніка, 1981. - 159 с.
3. Синчук О.Н. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых элект-роприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – Киев: ИЕДНАУ, 2006. – 252с.
4. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н. Подвижный состав электрифицированных железных дорог. - .М.: Транспорт, 1980. - 471 с.
5. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами. М.: Радио и связь, 1982. 392 с.
6. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Электроиздат, 1987. 256 с.
7. Sinchuk O., Kozakevich I., Kalmus D., Siyanko R. Examining energy-efficient recuperative braking modes of traction asynchronous frequency-controlled electric drives. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 1. No 1 (85). Pp. 50-56.
DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91912>.
8. Кальмус Д.О. Дослідження роботи системи гальмування з врахуванням зміни коефіцієнта зчеплення коліс електровозу з рейками. Електроніка та зв'язок. Київ, 2017. Том №22. №3(98). С. 40-45.

9. **Алексеев Н.И.** Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. - 252 с.

10. **Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А.** Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. - М.: Транспорт, 1986. - 229 с.

11. **Синчук О.Н.** Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. докт. техн. наук, проф. О.Н. Синчука. – Кривой Рог - Донецк: ЧП Щербатых А. В., 2015. – 296 с.

12. **Бирзниец Л.В.** Импульсные преобразователи постоянного тока. - М.: Энергия, 1974. - 256 с.

13. **Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В.** Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте. Монография – АДЕФ – Украина, 1998. – 280 с.

Рукопис подано до редакції 03.04.2019

УДК 622.03-047.58:622.22

М. В. ШОЛОХ, канд. техн. наук, доц., М. П. СЕРГЕСЬВА, ст. викладач,
Криворізький національний університет

АНАЛІЗ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИРОДНО-ПРОСТОРОВОГО РОЗМІЩЕННЯ МІНЛИВОСТІ ВМІСТУ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ КОРИСНИХ КОПАЛИН У МАСИВІ І ЗАЛІЗОРУДНІЙ МАСІ ШАХТ І КАР'ЄРІВ

Мета. Метою даної роботи є аналіз методів моделювання відособлених і взаємозалежних динамічних рядів природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин. Побудова моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічних рядів і використання базується на методах аналізу тимчасових рядів вмісту якісних показників корисних копалин.

Методи дослідження. Моделювання взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин пов'язане з узагальненням методу для ізольованих рядів. Розглянуто підходи для моделювання взаємозалежних динамічних рядів природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин. Побудовано адаптивну і дискретну лінійну модель прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічного ряду вмісту якісних показників корисних копалин множинної регресії та алгебраїчного критерію стійкості. Для моделей прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак динамічних рядів вмісту якісних показників використано алгоритм Марквардта, а для нелінійного методу – метод найменших квадратів.

Наукова новизна. Для ілюстрації методики послідовних операцій ідентифікації моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин відособлених рядів вмісту якісних показників залізорудної маси для дільниць рудного тіла і покладів родовищ Кривбасу розглянуто приклади визначення центрованої постійної моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак і розрахунок прогнозних оцінок вмісту якісних показників корисних копалин у масиві і залізорудній масі. Запроектовано рекомендації технології прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин окремих рівнів залізорудної маси з невеликими інтервалами дискретності.

Практична значимість. Рекомендована методика моделювання взаємозалежних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин і побудова моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин динамічних рядів, обмежується двома взаємозалежними динамічними рядами вмісту якісних показників корисних копалин.

Результати. Розглянуті моделі прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак мають високоадаптивні властивості, високу точність прогнозування і можливість моделювання нестационарних динамічних рядів вмісту якісних показників корисних копалин. За рахунок ефективного статистичного аналізу інформації прогнозування характеристик об'ємно-якісних ознак окремих рівнів потоків залізорудної маси, які пов'язанні технологічними процесами досягнуто узагальнення методів прогнозування ізольованих рядів вмісту якісних показників корисних копалин на взаємозалежні.

Ключові слова: моделювання, динамічні ряди, родовище, залізисті кварцити, об'ємно-якісні показники.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-92-99

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Побудова моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показників корисних копалин у масиві балансово-промислових запасів і розпушеної залізорудної масі, динамічних рядів вмісту якісних показників і використання для прогнозування базується на методах аналізу тимчасових рядів вмісту якісних показників корисних копалин [1]. Було встановлено, що найбільш завершений і досконалий – метод Бокса-Дженкінса [2]. Основними перевагами моделей прогнозування природно-просторового розміщення мінливості вмісту якісних показ-