

14. **Labbe R.** Kalman and Bayesian Filters in Python [Electronic resource]. – 2018. – Access mode: <https://archive.org/details/KalmanAndBayesianFiltersInPython/mode/2up>
15. **Nguyen V., Claussen T.** Reducing computational complexity of gating procedures using sorting algorithms / V. Nguyen, T. Claussen // Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion, 9-12 July 2013, Istanbul, Turkey. – IEEE Publisher, 2013. – P. 1707–1713.

The editorial board received a manuscript on 13.05.2020

УДК 62-836:629

М. В. ХВОРОСТ, д-р техн. наук, проф., Р. В. ВОРОНОВ, асистент  
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

## СПОСТЕРІГАЧ СТАНУ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ДВОМА АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ, ЩО ЖИВЛЯТЬСЯ ВІД ОДНОГО ІНВЕРТОРА

**Мета роботи.** Виконати аналіз тягової електромеханічної системи, у якій живлення декількох асинхронних двигунів здійснюється від одного інвертора, при оцінці змінних стану кожного двигуна за допомогою адаптивного спостерігача.

**Методи дослідження.** Аналіз рівнянь стану асинхронного двигуна здійснювався з використанням математичних методів диференційного числення, аналіз процесів у тяговій електромеханічній системі здійснювався шляхом математичного моделювання, робота напівпровідникового перетворювача (інвертора) моделювалася з використанням методу перемикаючих функцій.

**Наукова новизна.** У роботі запропоновано структуру та порядок розрахунку коефіцієнтів адаптивного спостерігача стану асинхронного двигуна у складі електромеханічної системи з живленням декількох двигунів від одного інвертора.

**Практична значимість** полягає у розробці практичних рішень, які можуть стати основою синтезу алгоритмів керування тяговими електромеханічними системами, у яких здійснюється керування декількома двигунами змінного струму від одного інвертора. Така ситуація є типовою для залізничного транспорту, а тому використання розроблених підходів може слугувати для подальшого покращення показників енергоефективності та точності керуванні.

**Результати.** У роботі розглянуто рівняння стану асинхронного двигуна та на їх основі розроблено адаптивний спостерігач стану та запропоновано підхід до розрахунку коефіцієнтів спостерігача задля забезпечення його стійкості. Оскільки важливою умовою функціонування системи векторного керування є коректна орієнтація системи координат, що обертається, то у випадку живлення декількох двигунів від одного інвертора орієнтація даної системи координат повинна здійснюватися за усередненим потокозчепленням ротора двигунів. Представлено аналітичні залежності, що описують зміну усереднених величин при наявності відхилень у параметрах двигунів, що відповідає реальним умовам функціонування. Розглянуто метод розрахунку сигналів завдання контурів керування струму з урахуванням наявності відхилень у параметрах двигунів, що дозволяє підвищити точність керування та інші показники якості. Розроблену систему досліджено шляхом математичного моделювання, результати якого свідчать про те, що використання адаптивного спостерігача стану дозволяє забезпечити функціонування багатодвигунної системи без використання датчиків магнітного потоку та кутової швидкості.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, інвертор, векторне керування, потокозчеплення ротора, кутова швидкість, спостерігач стану

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-31-36

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** За останні десятиліття завдяки бурхливому розвитку мікропроцесорної техніки та силової електроніки було розроблено чимало систем регульованого електроприводу змінного струму. Проте, у більшості таких систем виробники не передбачають можливість здійснення керування декількома двигунами від одного інвертора, обмежуючи можливість функціонування такої системи лише у режимі скалярного керування, що суттєво знижує показники якості керування та енергоефективність. В даний час до найбільш популярних випадків, де здійснюється живлення декількох двигунів змінного струму від одного інвертора відносяться тягові електромеханічні системи залізничного транспорту та електроприводи рольгангів у металургійному виробництві. Проте, наявність ефективних підходів до побудови систем керування такими багатодвигунними системами дозволило б розширити сферу їх застосування, оскільки зменшення кількості інверторів, що використовуються, дозволило б досягти меншої вартості та зменшення габаритних розмірів.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Дослідження тягових електромеханічних систем змінного струму [1-5] є актуальною задачею, оскільки відбувається поступове витіснення двигунів пос-

тійного струму, а існуючі варіанти систем векторного керування, що виготовляються серійно, не передбачають можливість живлення декількох двигунів від одного інвертора. У [6] розглянуто показники якості керування дводвигунної системи, що живиться від одного інвертора, та виконано порівняння систем ведучий – ведений та систем з усередненням змінних стану двигунів з використанням методу малих сигналів. З цією метою було отримано передаточну функцію, яка зв'яже малий вихідний сигнал моменту з малим сигналом завдання та досліджено її реакцію на ступінчастий вхідний сигнал. Проте, отримані рішення є актуальними лише для випадку двох двигунів, функціонування систем з більшою кількістю двигунів не розглядалося. У [7, 8] досліджуються аналогічні варіанти систем, але з використанням синхронних двигунів з постійними магнітами у якості тягових, в тому числі на прикладі електромобіля Chevrolet Volt. Проте, внутрішні процеси та зовнішні характеристики таких двигунів суттєво відрізняються від асинхронних через те, що у них відсутнє ковзання, що означає ідентичність швидкостей обертання поля машини та її ротора. Тому в даному випадку немає підстав стверджувати, що розроблені рішення можуть застосовуватися для асинхронних двигунів без відповідної корекції системи керування.

**Постановка задачі.** Виконати аналіз тягової електромеханічної системи, у якій живлення декількох асинхронних двигунів здійснюється від одного інвертора, при оцінці змінних стану кожного двигуна за допомогою адаптивного спостерігача. Розробити підхід до розрахунку сигналів керування струмовими контурами системи векторного керування багатодвигунної системи. Виконати дослідження розробленої системи шляхом математичного моделювання.

**Викладення матеріалу та результати.** Асинхронний двигун у нерухомій відносно статора системі координат може бути описаний наступними рівняннями

$$\begin{aligned} \frac{di_{s\alpha}}{dt} &= \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)R_r}{L_r} \right) i_{s\alpha} + \frac{L_m L_r R_r}{\sigma L_s L_r^2} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha}; \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} &= \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)R_r}{L_r} \right) i_{s\beta} - \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m L_r R_r}{\sigma L_s L_r^2} \psi_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\beta} + \omega_r \psi_{r\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta}; \\ T_e &= \frac{L_m p}{L_r} (i_{s\alpha} \psi_{r\beta} - i_{s\beta} \psi_{r\alpha}); \\ \sigma &= 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \end{aligned}$$

де  $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  – проекції вектору струму статора на осі нерухомої відносно статора системи відліку  $\alpha\beta$ ;  $R_s, R_r$  – активні опори обмоток статора і ротора асинхронного двигуна;  $L_s, L_r$  – власна індуктивність обмоток статора і ротора;  $L_m$  – взаємна індуктивність обмоток статора і ротора;  $\sigma$  – коефіцієнт розсіяння двигуна;  $\omega_r$  – електрична частота обертання валу двигуна;  $p$  – кількість пар полюсів;  $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$  – проекції вектору напруги статора на осі нерухомої відносно статора системи відліку  $\alpha\beta$ ;  $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$  – проекції вектору потокозчеплення ротора на осі нерухомої відносно статора системи відліку  $\alpha\beta$ .

Використання системи векторного керування двигунами змінного струму вимагає наявності інформації щодо величини та положення вектору потокозчеплення ротора. Це можна забезпечити за допомогою вимірювання величини магнітного потоку або шляхом її непрямой оцінки. Конструкції тягових асинхронних двигунів, як правило, не передбачають можливість встановлення всередину датчиків магнітного потоку, тому більш доцільним рішенням є використання математичних підходів до ідентифікації змінних стану електромеханічної системи. Адаптивний спостерігач потокозчеплення ротора асинхронного двигуна може бути описаний наступними рівняннями

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{i}_{s\alpha}}{dt} &= \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)R_r}{L_r} \right) \hat{i}_{s\alpha} + \frac{L_m L_r R_r}{\sigma L_s L_r^2} \hat{\psi}_{r\alpha} + \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \hat{\psi}_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\alpha} + k_1 (i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}) - \\ &- k_2 (\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{i}_{s\beta}}{dt} &= \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{(1-\sigma)R_r}{L_r} \right) \hat{i}_{s\beta} - \frac{L_m \hat{\omega}_r}{\sigma L_s L_r} \hat{\psi}_{r\alpha} + \frac{L_m L_r R_r}{\sigma L_s L_r^2} \hat{\psi}_{r\beta} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{s\beta} + k_2 (\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}) + \\ &+ k_1 (\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}); \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\alpha}}{dt} &= \frac{R_r L_m}{L_r} \hat{i}_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \hat{\psi}_{r\alpha} - \hat{\omega}_r \hat{\psi}_{r\beta} + k_3 (\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}) - k_4 (\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}); \\ \frac{d\hat{\psi}_{r\beta}}{dt} &= \frac{R_r L_m}{L_r} \hat{i}_{s\beta} + \hat{\omega}_r \hat{\psi}_{r\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \hat{\psi}_{r\beta} + k_4 (\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}) + k_3 (\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}), \end{aligned}$$

де  $\hat{i}_{s\alpha}$ ,  $\hat{i}_{s\beta}$  – оцінка проекцій вектору струму статора на осі нерухомої відносно статора системи відліку  $\alpha\beta$  адаптивним спостерігачем стану;  $\hat{\psi}_{r\alpha}$ ,  $\hat{\psi}_{r\beta}$  – оцінка проекцій вектору потокозчеплення ротора на осі нерухомої відносно статора системи відліку  $\alpha\beta$  адаптивним спостерігачем стану;  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  – коефіцієнти адаптивного спостерігача стану асинхронного двигуна.

Вибір значень коефіцієнтів адаптивного спостерігача стану асинхронного двигуна здійснюється, виходячи з необхідності забезпечення стійкого функціонування спостерігача. Тому доцільно розрахувати дані коефіцієнти таким чином, щоб полюси спостерігача були пропорційними до полюсів асинхронного двигуна. В цьому випадку значення коефіцієнтів слід знаходити наступним чином

$$\begin{aligned} k_1 &= (k-1) \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{\sigma R_r}{L_r} \right); \\ k_2 &= (k-1) \hat{\omega}_r; \\ k_3 &= -(k^2-1) \left( \frac{R_s L_r - \sigma^2 R_r L_s}{L_m} + \frac{L_m R_r}{L_r} \right) + (k-1) \frac{\sigma L_s L_r}{L_m} \left( \frac{R_s}{\sigma L_s} - \frac{(\sigma+1)R_r}{L_r} \right); \\ k_4 &= (k-1) \frac{\sigma L_s L_r}{L_m} \hat{\omega}_r. \end{aligned}$$

Використання даного спостерігача стану дозволяє виконувати непряме оцінювання не лише величин проекцій вектору потокозчеплення ротора у нерухомій відносно статора системі відліку  $\alpha\beta$ , а й величини кутової швидкості, що дозволяє спростити структуру системи за рахунок усунення механічного датчика з валу двигуна.

У такому випадку оцінювати величину кутової швидкості можна з використанням наступного виразу

$$\hat{\omega}_r = K_n \left( \psi_{r\beta} (\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}) - \hat{\psi}_{r\alpha} (\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}) \right) + K_i \int \left( \psi_{r\beta} (\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}) - \hat{\psi}_{r\alpha} (\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}) \right) dt,$$

де  $K_n$  та  $K_i$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної частин адаптивного алгоритму.

Розглянемо випадок з живленням трьох асинхронних двигунів від одного інвертора та запишемо складові векторів струму через відповідні середні значення  $i_{s\alpha\text{сеп}}$ ,  $i_{s\beta\text{сеп}}$ , а також відповідні відхилення складових струму між собою  $\Delta i_{s12\alpha}$ ,  $\Delta i_{s12\beta}$ ,  $\Delta i_{s23\alpha}$ ,  $\Delta i_{s23\beta}$ ,  $\Delta i_{s13\alpha}$  та  $\Delta i_{s13\beta}$ :

$$\begin{aligned} i_{s\alpha\text{сеп}} &= \frac{i_{s\alpha1} + i_{s\alpha2} + i_{s\alpha3}}{3}; \\ i_{s\beta\text{сеп}} &= \frac{i_{s\beta1} + i_{s\beta2} + i_{s\beta3}}{3}; \\ \Delta i_{s12\alpha} &= \frac{1}{2} (i_{s\alpha1} - i_{s\alpha2}); & \Delta i_{s12\beta} &= \frac{1}{2} (i_{s\beta1} - i_{s\beta2}); \\ \Delta i_{s23\alpha} &= \frac{1}{2} (i_{s\alpha2} - i_{s\alpha3}); & \Delta i_{s23\beta} &= \frac{1}{2} (i_{s\beta2} - i_{s\beta3}); \\ \Delta i_{s13\alpha} &= \frac{1}{2} (i_{s\alpha1} - i_{s\alpha3}); & \Delta i_{s13\beta} &= \frac{1}{2} (i_{s\beta1} - i_{s\beta3}). \end{aligned}$$

Тоді складові струмів двигунів можна записати так

$$\begin{aligned} i_{s\alpha1} &= i_{s\alpha\text{сеп}} + \frac{2}{3} (\Delta i_{s12\alpha} - \Delta i_{s13\alpha}); & i_{s\beta1} &= i_{s\beta\text{сеп}} + \frac{2}{3} (\Delta i_{s12\beta} - \Delta i_{s13\beta}); \\ i_{s\alpha2} &= i_{s\alpha\text{сеп}} + \frac{2}{3} (\Delta i_{s23\alpha} - \Delta i_{s12\alpha}); & i_{s\beta2} &= i_{s\beta\text{сеп}} + \frac{2}{3} (\Delta i_{s23\beta} - \Delta i_{s12\beta}); \\ i_{s\alpha3} &= i_{s\alpha\text{сеп}} + \frac{2}{3} (\Delta i_{s13\alpha} - \Delta i_{s23\alpha}); & i_{s\beta3} &= i_{s\beta\text{сеп}} + \frac{2}{3} (\Delta i_{s13\beta} - \Delta i_{s23\beta}). \end{aligned}$$

У випадку живлення трьох двигунів від одного інвертора найважливішим питанням, що стосується здійснення керування є вплив орієнтації системи координат, що обертається синхронно, за усередненим полем машини на показники якості керування. Розглянемо рівняння динаміки зміни складових потокозчеплень двигуна у системі координат  $dq$ , що обертається

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{rd}}{dt} &= \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sd} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq}; \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} &= \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sq} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{rq},\end{aligned}$$

де  $\omega_s$  – частота обертання поля машини.

Як правило, параметри двигунів, що живляться від одного інвертора, можуть мати певні відхилення між собою. В такому випадку середні значення параметрів обмоток двигунів та відхилення між ними розраховуються аналогічним чином до складових векторів струму статора. Тоді з використанням усереднених значень рівняння складових векторів потокозчеплення двигунів будуть мати наступний вигляд

$$\begin{aligned}& \frac{d\psi_{rdcep}}{dt} + \frac{R_{rcep}}{L_{rcep}} \psi_{rdcep} - (\omega_s - \omega_{rcep}) \psi_{rqcep} + \\ & + \frac{1}{3} \left( \Delta\psi_{rd1} \frac{\Delta R_{r1}}{\Delta L_{r1}} - \Delta\psi_{rq1} \Delta\omega_{r1} + \Delta\psi_{rd2} \frac{\Delta R_{r2}}{\Delta L_{r2}} - \Delta\psi_{rq2} \Delta\omega_{r2} + \Delta\psi_{rd3} \frac{\Delta R_{r3}}{\Delta L_{r3}} - \Delta\psi_{rq3} \Delta\omega_{r3} \right) = \\ & = \frac{L_{mcep} R_{rcep}}{L_{rcep}} i_{sdcep} + \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta L_{m1} \Delta R_{r1}}{\Delta L_{r1}} \Delta i_{sd1} + \frac{\Delta L_{m2} \Delta R_{r2}}{\Delta L_{r2}} \Delta i_{sd2} + \frac{\Delta L_{m3} \Delta R_{r3}}{\Delta L_{r3}} \Delta i_{sd3} \right); \\ & \frac{d\psi_{rqcep}}{dt} + (\omega_s - \omega_{rcep}) \psi_{rdcep} + \frac{R_{rcep}}{L_{rcep}} \psi_{rqcep} + \\ & + \frac{1}{3} \left( \Delta\psi_{rd1} \Delta\omega_1 + \Delta\psi_{rq1} \frac{\Delta R_{r1}}{\Delta L_{r1}} + \Delta\psi_{rd2} \Delta\omega_2 + \Delta\psi_{rq2} \frac{\Delta R_{r2}}{\Delta L_{r2}} + \Delta\psi_{rd3} \Delta\omega_3 + \Delta\psi_{rq3} \frac{\Delta R_{r3}}{\Delta L_{r3}} \right) = \\ & = \frac{L_{mcep} R_{rcep}}{L_{rcep}} i_{sqcep} + \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta L_{m1} \Delta R_{r1}}{\Delta L_{r1}} \Delta i_{sq1} + \frac{\Delta L_{m2} \Delta R_{r2}}{\Delta L_{r2}} \Delta i_{sq2} + \frac{\Delta L_{m3} \Delta R_{r3}}{\Delta L_{r3}} \Delta i_{sq3} \right),\end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned}\omega_{rcep} &= \frac{\omega_{r1} + \omega_{r2} + \omega_{r3}}{3}; \quad \psi_{rdcep} = \frac{\psi_{rd1} + \psi_{rd2} + \psi_{rd3}}{3}; \quad \psi_{rqcep} = \frac{\psi_{rq1} + \psi_{rq2} + \psi_{rq3}}{3}; \\ \Delta\omega_{r1} &= \omega_{r1} - \omega_{rcep}; \quad \Delta\psi_{rdcep} = \psi_{rd1} - \psi_{rdcep}; \quad \Delta\psi_{rqcep} = \psi_{rq1} - \psi_{rqcep}.\end{aligned}$$

Якщо параметри двигунів є ідентичними, то вищенаведені рівняння значно спрощуються, що дозволяє здійснювати керування лише за середніми змінними.

Для здійснення керування такою системою необхідно розробити підхід до розрахунку сигналів завдання струмових контурів, а зовнішні контури потокозчеплення ротора і кутової швидкості будувати за аналогією з традиційними системами. Проведений аналіз рівнянь стану багатодвигунної електромеханічної системи дозволив отримати наступні залежності для розрахунку сигналів завдання проєкцій струму статора на осі системи  $dq$ , що обертається синхронно

$$\begin{aligned}i_{sd}^* &= \frac{1}{L_{mcep}} \psi_{rdcep} + \\ & + \frac{L_{rcep}}{3R_{rcep}L_{mcep}} \left( \left( \left( \frac{\Delta R_{r1}}{\Delta L_{r1}} + \Delta\omega_{r1} \right) \Delta\psi_{rd1} + \left( \frac{\Delta R_{r2}}{\Delta L_{r2}} + \Delta\omega_{r1} \right) \Delta\psi_{rd2} + \left( \frac{\Delta R_{r3}}{\Delta L_{r3}} + \Delta\omega_{r1} \right) \Delta\psi_{rd3} \right) \right. \\ & \left. - \left( \frac{\Delta R_{r1} \Delta L_{m1}}{\Delta L_{r1}} \Delta i_{sd1} + \frac{\Delta R_{r2} \Delta L_{m2}}{\Delta L_{r2}} \Delta i_{sd2} + \frac{\Delta R_{r3} \Delta L_{m3}}{\Delta L_{r3}} \Delta i_{sd3} \right) \right); \\ i_{sq}^* &= \frac{1}{\psi_{rdcep}} \left( \frac{T^*}{pL_{mcep}} - \right. \\ & \left. - \frac{1}{3} (\Delta\psi_{rd1} \Delta i_{sq1} + \Delta\psi_{rd2} \Delta i_{sq2} + \Delta\psi_{rd3} \Delta i_{sq3} - \Delta\psi_{rq1} \Delta i_{sd1} - \Delta\psi_{rq2} \Delta i_{sd2} - \Delta\psi_{rq3} \Delta i_{sd3}) \right).\end{aligned}$$

Для дослідження запропонованої системи була розроблена математична модель у середовищі Matlab/Simulink. Умови моделювання формувалися таким чином, що три асинхронні двигуни з відхиленнями у параметрах схеми заміщення  $\pm 20\%$ , отримують живлення від одного

інвертора. Працюючи в усталеному режимі, відбувалась зміна моментів навантаження окремих двигунів. Отримані результати продемонстрували, що запропонована система знаходить нову робочу точку без втрати швидкодії у порівнянні з традиційною системою векторного керування при індивідуальному живленні двигуна від інвертора.

**Висновки.** У роботі розглянуто рівняння стану асинхронного двигуна та на їх основі розроблено адаптивний спостерігач стану та запропоновано підхід до розрахунку коефіцієнтів спостерігача задля забезпечення його стійкості. Оскільки важливою умовою функціонування системи векторного керування є коректна орієнтація системи координат, що обертається, то у випадку живлення декількох двигунів від одного інвертора орієнтація даної системи координат повинна здійснюватися за усередненим потокозчепленням ротора двигунів. Представлено аналітичні залежності, що описують зміну усереднених величин при наявності відхилень у параметрах двигунів, що відповідає реальним умовам функціонування. Розглянуто метод розрахунку сигналів завдання контурів керування струму з урахуванням наявності відхилень у параметрах двигунів, що дозволяє підвищити точність керування та інші показники якості. Розроблену систему досліджено шляхом математичного моделювання, результати якого свідчать про те, що використання адаптивного спостерігача стану дозволяє забезпечити функціонування багатодвигунної системи без використання датчиків магнітного потоку та кутової швидкості.

### Список літератури

1. **Козакевич І.А.** Энергоэффективные режимы гальмування тягових асинхронних електроприводів / **І.А. Козакевич, Ю.Г. Осадчук, А.Л. Аміров** // Вісник Криворізького національного університету. – 2017. – Вип. 45. – С. 122-127.
2. **Козакевич І.А.** Дослідження роботи синхронного двигуна з постійними магнітами в гібридних тягових електроприводах / **І.А. Козакевич, І.В. Касаткіна, Л.В. Срьоменко** // Гірничий випуск. – 2018. – Вип. 104. – С. 106-110.
3. **Козакевич І.А.** Система керування вентилями реактивними двигунами / **І.А. Козакевич, І.І. Шевченко** // Гірничий вісник. – 2017. – Вип. 102. – С. 135-138.
4. **Козакевич І.А.** Керування потоками потужності гібридних транспортних засобів / **І.А. Козакевич, Ю.Г. Осадчук, Р.А. Ільченко** // Гірничий випуск. – 2017. – Вип. 102. – С. 124-129.
5. **Sinchuk O.** Research of regenerative braking of traction permanent magnet synchronous motors / **O. Sinchuk, I. Kozakevich** // Modern Electrical and Energy Systems: proceedings of the International Conference MEES. – 2017. – P. 92-95.
6. **Joshi B.M.** Two-motor single inverter field-oriented induction machine drive dynamic performance / **B.M. Joshi, M.C. Chandorkar** // Sadhana. – Indian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 39, iss. 2. – P. 391-407.
7. **Nagano T.** Design of multi-parallel drive technique for system with numbers of Permanent Magnet Synchronous Motors / **T. Nagano, J. Itoh** // IEEE 2013: proceedings of 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). – 2013.
8. **Henry J.** Modeling and simulation of the 2016 Chevy Volt in dual PMSM EV mode / **J. Henry, A. Abdelrahman, M. Youssef** // IEEE 2017: proceedings of International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE). – 2017. DOI:10.1109/sege.2017.8052776.
9. **Заполовский Н.И.** Моделирование тягового электропривода дизель поезда с учетом сцепления колесных пар с рельсами / **Н.И. Заполовский, С.И. Червонный, Р.М. Грыб** // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – № 23. – С. 61-66.
10. **Nicolae P.M.** Direct flux vector control for dual-three phase induction motor drives / **P.M. Nicolae, M. C. Nitu, D. Constantin** // 4th International Youth Conference on Energy. – 2013. – P. 1-5.
11. **Somasekhar V. T.** Effect of zero-vector placement in dual-inverter fed open-end winding induction-motor drive with a decoupled space-vector PWM strategy / **V. T. Somasekhar, S. Srinivas, K. K. Kumar** // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55, iss. 6. – P. 2497-2505.
12. **Janous S.** Predictive control of parallel induction motors fed by single inverter with common current sensors / **S. Janous, J. Talla, Z. Peroutka, V. Smidl** // 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2018. – P. 5843-5848.
13. **Chinmaya K.A.** Analysis of space vector PWM techniques for dual three-phase induction machine / **K.A. Chinmaya, G.K. Singh** // Innovations in Power and Advanced Computing Technologies. – 2017. – Pp. 1-5.
14. **Ghani P.** Analysis of electromechanical model of traction system with single inverter dual induction motor / **P. Ghani, M. Arasteh, H.R. Tayebi** // 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference. – 2016. – Pp. 99-104.
15. **Логинава Е.Ю.** Исследование динамических процессов в электроприводе локомотива с использованием Simulink/MATLAB / **Е.Ю. Логинава, Бурэн-Ингэл Гантумур** // Электронный журнал Cloud of Science. – 2015. – Том 2. №1. – С. 89-99.
16. **Космодамианский А.С.** Прямое управление моментом асинхронных двигателей при их питании от одного преобразователя частоты / **А.С. Космодамианский, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев** // Электротехника. – 2015. – №9. – С. 29-35.

17. Qi L. Study of speed-sensorless weighted vector control of parallel connected induction motors drive / L. Qi, C. Weng, X. You // International Power Electronics and Application Conference and Exposition. – 2014. – P. 553-559.
18. Веселов Г.Е. Синергетическая система управления тяговым электроприводом / Г.Е. Веселов, И.А. Радионов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – №5 (130). – С. 42-47.
19. Nakajima A. Vector control of two induction motor drives fed by matrix converter / A. Nakajima, K. Sakaki, K. Sankashita, H. Kubota // IECON 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – 2014. – P. 4873-4878.
20. Кручек В.А. Коэффициент использования сцепной массы локомотива с групповым тяговым приводом колесных пар / В.А. Кручек, А.В. Грищенко, Т.С. Титова // Известия Петербургского университета путей и сообщения. – 2017. – Том 14, № 2. – С. 267 – 279.

Рукопис подано до редакції 26.02.2020

УДК 669.15-198:538.953

О.С. ВОДЕННИКОВА, канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет  
 О.Б. МАТЯШЕВА, викл., Запорізький металургійний коледж Запорізького національного університету  
 Л.В. ВОДЕННИКОВА, асист., Запорізький державний медичний університет  
 Д.Ю. БОБОШКО, канд. техн. наук, Криворізький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОНЕНТІВ ШИХТИ ДЛЯ ВИПЛАВКИ МАЛОФОСФОРИСТОГО ШЛАКУ

**Мета.** Метою роботи є дослідження теплофізичних властивостей компонентів шихти для виплавки малофосфористого шлаку для пошуку складів шихт з мінімальним теплоспоживанням.

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями:  
 експериментально визначити теплофізичні властивості (тепловміщення, питому теплоємність, коефіцієнт теплопровідності) компонентів шихти для виплавки МФШ;

проаналізувати аналітичні залежності теплофізичних характеристик шихтових матеріалів від температури та визначити оптимальний склад шихти з мінімальним теплоспоживанням.

**Методи досліджень.** При узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з напрямку удосконалення технології виробництва передільного малофосфористого шлаку використовувався комплексний підхід. Дослідження хімічного складу шихти для виплавки МФШ проводили за допомогою хімічного аналізу, а гранулометричний склад шихти визначали за допомогою ситового аналізу. Виконано обробку та аналіз експериментальних даних залежності теплофізичних характеристик компонентів шихти від температури.

**Наукова новизна.** Запропоновано підхід к оптимізації складу компонентів шихти при виплавці МФШ за рахунок вибору шихтових матеріалів, які володіють низькою питомою теплоємністю, що дозволяє удосконалювати технологічний режим виплавки МФШ, знизити витрати електроенергії на 15-20% та знизити собівартість готового продукту.

**Практичне значення.** Використання МФШ, отриманого з застосування низькотеплоємних шихт (з використанням у шихті замість кварциту та частини дефіцитного коксу відходів вуглезбагачення коксохімічного виробництва та відходів виробництва вторинного алюмінію), на стадії виплавки металевого марганцю дасть змогу знизити кратність шлаку, що в свою чергу призводить до підвищення витягу марганцю в шлак на 2%.

**Результати.** Дослідженнями теплофізичних властивостей компонентів шихти для виплавки МФШ встановлено вплив питомої теплоємності шихти на енергозбереження та запропоновано низькотеплоємний склад шихти, використання якого дозволить знизити витрату коксу на відновлення в 1,3-1,9 рази, зекономити до 20% електроенергії та відповідно знизити собівартості МФШ.

**Ключові слова:** малофосфористий шлак, склад шихти, теплофізичні властивості, питома теплоємність, теплопровідність, теплоспоживання.

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-36-41

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Відомо, що трьохстадійна технологія виробництва металевого марганцю заснована на виплавці передільного малофосфористого шлаку (МФШ) селективним відновленням заліза і фосфору з марганцеворудної сировини періодичним процесом; отримання передільного низьковуглецевого висококремністого силікомарганцю безперервним вуглетермічним процесом та саме виробництво металевого марганцю силікотермічним процесом [1].

Виплавка силікомарганцю з зниженим вмістом фосфору потребує значної витрати малофосфористого шлаку, що призводить до підвищення його собівартості не тільки за рахунок використання більш дорогої сировини, але і за рахунок різкого зниження показників виробни-