

6. Shevchenko V.V. Prediction of the operational status of turbogenerators / V.V. Shevchenko // Electric (Moscow, Russia). – 2015. – № 1. – P.p. 3-7. (Rus.)
7. Electromechanical equivalents for use in power system stability studies / J.M. Undrill, J.A. Casazza, E.M. Gulachenski, L.K. Kirchmayer // IEEE Trans, on PAS. – 1971. – Vol. 90. – № 5. – P.p. 2060-2071.
8. Kuzmin V.V. Optimizing the weight and size parameters of the inactive parts of turbogenerators / V.V. Kuzmin, V.V. Shevchenko, A.N. Minko. – Kharkov : Monograph SPDFL A.V. Chaltsey, 2012. – 246 p. (Rus.)
9. Shumilov Y.A. The results of experimental studies of vibration turbogenerator TBB-1000-2U3 unit № 3 SU NPP / Y.A. Shumilov, B.M. Demidyuk, A.V. Shtogrin // Electronics and electrical engineering. – Kharkov : NTU «KPI». – 2008. – № 5. – P.p. 32-36. (Rus.)
10. Sih G.C. The Role of Fracture Mechanics in Design Technology / G.C. Sih // Journal of engineering for industry. – November, 1976. – V. 98. – Series B. – № 4. – P. 113-120.
11. Shevchenko V.V. Structurally-logic scheme for decrease weight and size parameters of turbogenerators / V.V. Shevchenko, A.M. Maslennikov // Reporter of the Priazovskyi state technical university : Collection of scientific works / SHEE «PSTU». – Mariupol, 2015. – Issue 30. – Vol. 2. – P.p. 137-144. (Rus.)

Рецензент: С.Ф. Артюх
д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

Статья поступила 05.05.2016

УДК 629.423.14

© Слободенюк Ю.О.¹, Бялобржеський О.В.²

ВПЛИВ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ГАЛЬМУВАННЯ ТЯГОВОЇ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ В СИСТЕМІ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ НА НАПРУГУ В ЛАНЦІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

На підставі аналізу гальмівних тягових характеристик електровоза з асинхронними машинами були виділені основні режими гальмування і їх умови і особливості. Виходячи з умов роботи електровоза в гальмівному режимі (рекуперації), а саме те, що характеристики визначаються законами регулювання частоти і напруги на обмотках статора, запропоновано введення додаткового контуру в систему векторного керування з формуванням реактивної складової струму для регулювання потужності гальмування. Запропоновані доповнення до системи управління рекуперацією також може використовуватися як засіб для компенсації нештатних ситуацій пов'язаних зі зниженням напруги живлення.

Ключові слова: система тягового електропостачання, рекуперація, асинхронна машина, векторна система керування.

Слободенюк Ю.А., Бялобржеський А.В. Влияние процесса регулирования мощности торможения тяговой асинхронной машины в системе векторного управления на напряжение в звене постоянного тока. На основании анализа тормозных тяговых характеристик электровоза с асинхронными машинами были выделены основные режимы торможения и их условия и особенности. Исходя из условий работы электровоза в тормозном режиме (рекуперации), а именно то, что характеристики определяются законами регулирования частоты и напряжения на

¹ аспірант, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, jul.alexandrovna@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, seetal@kdu.edu.ua

обмотках статора, пропонується введення додаткового контура в систему векторного управління з формуванням реактивної складової току для регулювання потужності торможень. Пропозиційні доповнення до системи управління рекуперацією також можуть використовуватися як засіб для компенсації нештатних ситуацій, пов'язаних з зниженням напруги живлення.

Ключові слова: система тягового електроживлення, рекуперація, асинхронна машина, векторна система управління.

Yu.O. Slobodenyuk, O.V. Byalobrzhesky. Influence of the braking power control of the traction asynchronous machine in the voltage vector control system under DC. At braking the traction motors are transferred to generator mode and produce electrical energy which passes to the contact mains or storage device in the DC mains for further use. Such braking is called regenerative. The resulting electrical energy can be spent by trains in traction mode. Regenerative braking reduces the consumption of electric power for traction. In electric railways of our country more than 3% of the consumed electrical energy is given back to contact mains annually. As this takes place there arises the task to control the braking of the traction motors with minimal impact on electric power quality and maintaining proper braking performance. Based on the analysis of the characteristics of the brake traction of an electric locomotive with asynchronous electric machines the main braking modes have been chosen: at a constant sliding speed and the stator constant voltage; at constant braking power and the stator constant voltage; at a power value more than the nominal braking power; at a constant load torque; at a constant frequency of the stator. The vector control system with the formation of the reactive component of the stator current and the EMF regulator was chosen, basing on the working conditions characteristics in the electric braking mode (recuperation); namely, that the characteristics are defined by the laws regulating the frequency and voltage across the stator windings. This control system can fully reproduce any predetermined trajectory of traction and braking performance and adjust braking power. The offered system with recuperation can be used as a means of compensation in emergency situations with a power failure.

Keywords: system of traction power supply, recuperation, asynchronous machine, vector control system.

Постановка проблеми. На даний час режим рекуперації в порівнянні з іншими видами гальмування широко використовують в системах тягового електроприводу з асинхронними машинами. Він дозволяє значно знизити пікові навантаження і споживання електроенергії. Але даний режим гальмування має ряд недоліків [1]:

- значні втрати потужності у контактній мережі та негативний вплив на якість електричної енергії;
- для контактної мережі змінного струму необхідна синхронізація за частотою та амплітудою;
- технічна неможливість тягової підстанції прийняти електроенергію одночасно від декількох електровозів, зокрема для системи постійного струму;
- низька якість електричної енергії рекуперації.

Зазначені недоліки усувають, оснастивши тягові підстанції ємнісними накопичувачами енергії, які акумулюють надлишкову енергію з подальшим поверненням її в контактну мережу при пуску і розгоні електровозів [2]. Однак накопичувати енергію можна безпосередньо на електровозі без генерації її в контактну мережу. При цьому енергію, що виділяється при гальмуванні, накопичують на ємнісному накопичувачі, замість того, щоб розсіювати її у вигляді тепла на гальмівних резисторах або повертатись у контактну мережу. Застосування ємнісних накопичувачів енергії на електровозах дозволяє вирішити наступні питання:

- можливість транспортного засобу використовувати власну енергію гальмування для розгону в режимі тяги або на власні потреби;
- не чинити негативний вплив на якість напруги контактної мережі генерованими гармонійними складовими;

– заощадити до 25% електроенергії;
– підвищити коефіцієнт корисної дії в порівнянні з застосуванням ємнісних накопичувачів на тяговій підстанції за рахунок передачі енергії на менш тривалу відстань (зменшення втрат на нагрівання провідників).

При цьому окрім задач регулювання режиму тягового двигуна виникають додаткові задачі управління накопичувачем із забезпеченням мінімального впливу останнього на режим руху [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Рекуперацію іноді використовують, як засіб компенсації нештатних ситуацій або режим «саможивлення» [3]. Даний режим забезпечує працездатність тягового комплексу при короткочасних провалах або зникненні напруги живлення. Реалізація режиму заснована на використанні кінетичної енергії, накопиченої механічними рухомими масами навантаження, і повернення її в інвертор при частотному гальмуванні. Одним із способів реалізації даного режиму є перехід асинхронної машини до структури керування з зовнішнім контуром регулювання вхідної напруги інвертора і внутрішнім контуром регулювання активної складової струму. Найбільш органічно ця концепція вписується у системи векторного керування асинхронною машиною, в яких контури регулювання активної та реактивної складових струму входять в базову структуру регулювання швидкості. При переході в режим «саможивлення» регулятор вхідної напруги інвертора включають замість регулятора швидкості. При відновленні живлення здійснюється зворотний перехід до регулювання швидкості. На рис. 1 приведені часові діаграми швидкості (ω_r), електромагнітного моменту (M), вхідної напруги інвертора (u_d) асинхронної машини виконання 2 при короткочасному зникненні напруги живлення і активної опції «саможивлення». Експеримент проводився при наступних умовах: перетворювач частоти ЕПШ-ТТПТ-10-380-2АП; асинхронна машина 4А112МА6У3; момент навантаження $M_c = 0,5 \cdot M_{ном} = 15 \text{ Н}\cdot\text{м}$; момент інерції $J = 0,17 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; поріг активізації режиму «саможивлення» $u_{d0} = 460 \text{ В}$; заданий рівень стабілізації вхідної напруги інвертора $u_{dz} = 450 \text{ В}$ [3].

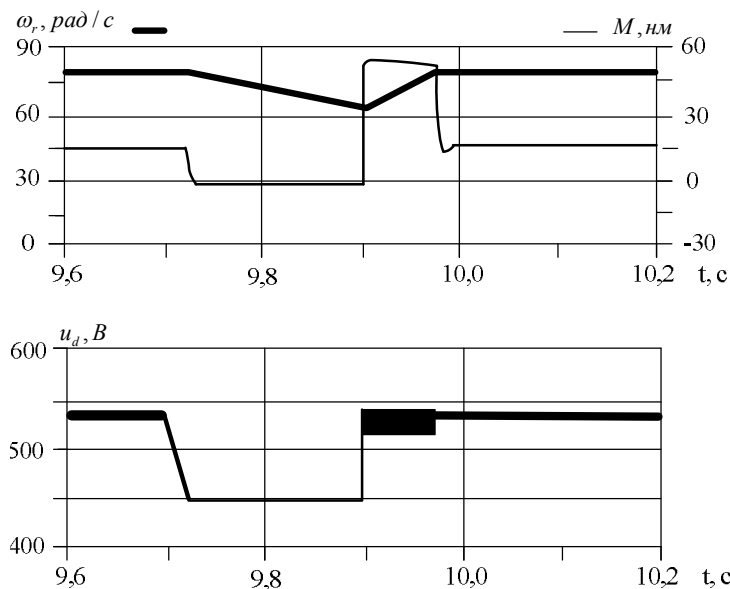


Рис. 1 – Тимчасові діаграми роботи асинхронної машини при векторному керуванні при короткочасному зникненні напруги живлення

З діаграм видно, що при зникненні напруги живильної мережі в момент часу $t = 9,7 \text{ с}$ деякий час асинхронна машина продовжує працювати з електромагнітним моментом, рівним навантаженню, споживаючи потужність ланки постійного струму, поки напруга u_d не знизиться до порога активізації режиму «саможивлення». Далі швидко знижується до нуля (машина переводиться в режим неробочого ходу), а напруга u_d стабілізується на заданому рівні (450 В). Швидкість асинхронної машини починає плавно знижуватися під дією моменту навантаження. При відновленні напруги живильної мережі в момент часу $t = 9,9 \text{ с}$ конденсатор ланки постій-

ного струму швидко заряджається, а швидкість асинхронної машини виходить на заданий рівень. Основними перевагами розглянутого способу реалізації режиму «саможивлення» є висока динамічна і статична точність регулювання напруги, відсутність низькочастотних коливань в напругах і струмах, режим роботи асинхронної машини, близький до неробочого ходу, і незначні втрати енергії.

Метою даної роботи є визначення режимів гальмування тягової асинхронної машини у складі системи частотного керування та впливу на напругу у колі постійного струму.

Виклад основного матеріалу. Гальмівні характеристики асинхронної машини в генераторному режимі, як і тягові характеристики в руховому режимі [1, 4], визначаються законами регулювання частоти і напруги на обмотках статора. В координатах швидкості електровоза v (або частоти статора) і гальмівної сили B (або моменту M) гальмівні характеристики розташовуються в області, обмеженою максимальною швидкістю v_{max} і граничною кривою гальмівної сили за умовами зчеплення коліс з рейками $B_{зч}$ (рис. 2).

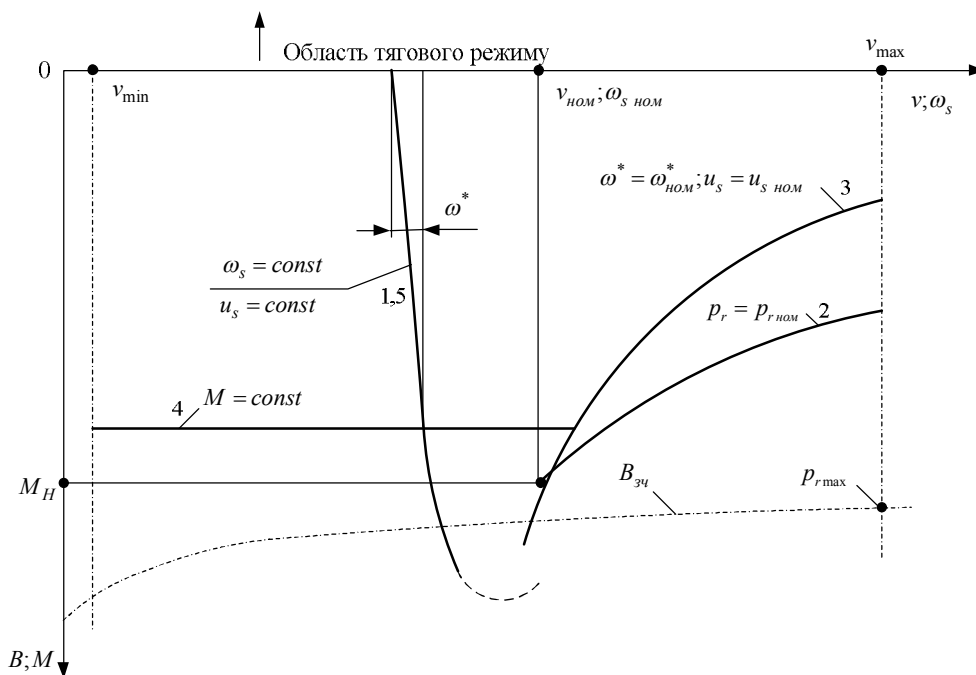


Рис. 2 – Гальмівні характеристики асинхронної машини

В номінальному режимі (при швидкості $v_{ном}$, частоті $\omega_{s\ ном}$ і моменті $M_{ном}$) потужність гальмування дорівнює номінальній $p_{r\ ном}$. Оскільки асинхронна машина на відміну від колекторної не має обмежень по комутації, то потужність гальмування а в зоні швидкостей вище номінальної лімітують, головним чином, допустимим тепловим режимом. Тому в зоні швидкостей від $v_{ном}$ до v_{max} гальмівні характеристики в тривалому (часовому) режимі обмежені гіперболою, яку визначають рівнянням $M_v = p_{r\ ном} = const$. У короткочасних режимах допустиме перевищення значення $p_{r\ ном}$.

У генераторному режимі асинхронної машини частота обертання ротора ω_r більше частоти статора ω_s на значення абсолютного ковзання ω^* , тобто $\omega_r = \omega_s + \omega^*$. Оскільки частота статора в межі рівна нулю, то мінімальне значення частоти обертання в генераторному режимі не може бути менше абсолютного ковзання, тому $\omega_{r\ min} \geq \omega^*$.

Отже, гальмування в зоні низьких швидкостей обмежене деякою швидкістю v_{min} , яка, як правило, не перевищує 1-2 км/год, і практично її можна не враховувати при розгляді області гальмівних характеристик асинхронної машини.

Існують декілька законів регулювання частоти і напруги при гальмуванні [4]. Розрізняють гальмівні характеристики асинхронної машини в генераторному режимі при різних законах регулювання частоти і напруги [4].

1) Режим гальмування при $\omega^* = const$, $u_s = const$. Гальмівна характеристику асинхронної машини в генераторному режимі при заданому абсолютному ковзанні ($\omega^* = const$) і незмінній ЕРС ($e = const$) в функції частоти статора ω_s . В режимі $u_s = const$, $\omega^* = const$ гальмівний момент обернено пропорційний частоті статора ω_s в квадраті (або швидкості електровоза v в квадраті).

2) Режим гальмування при $p_r = const$, $u_s = const$. Гальмівна характеристика при незмінній напрузі u_s , потужність p_r буде залишатися постійною, якщо абсолютне ковзання ω^* змінюють пропорційно частоті ω_s . На практиці режим роботи асинхронної машини в генераторному режимі при постійній потужності використовують в зоні швидкостей вище номінальної $u_{s\text{ ном}}$, тобто в діапазоні частот $\omega_s > \omega_{s\text{ ном}}$.

3) Режим гальмування при $p_r > p_{r\text{ ном}}$. Як вже зазначалося, при швидкостях вище $v_{\text{ном}}$ в нетривалих режимах гальмування припустимо перевищувати номінальне значення потужності $p_{r\text{ ном}}$. Цього досягають шляхом форсованого підвищення ω^* до критичного абсолютного ковзання $\omega_{кр}^*$ при швидкостях, близьких до номінальної $v_{\text{ном}}$.

4) Режим гальмування при постійному моменті $M = const$. Магнітний потік машини

$$\Phi = \frac{e}{C \cdot \omega_s} = \frac{e}{C \cdot \omega_{sz} \cdot \omega_{s\text{ ном}}}, \quad (1)$$

де C – електромагнітна постійна машини.

Нехай при зміні швидкості гальмування v здійснюють автоматичне регулювання напруги на статорі таким чином, що ЕРС e змінюється пропорційно частоті ω_s :

$$e = \omega_{sz} \cdot e_0, \quad (2)$$

де e_0 – фіксоване значення ЕРС, що відповідає номінальній частоті $\omega_{s\text{ ном}}$.

В цьому випадку магнітний потік залишається незмінним і рівним заданому значенню Φ ,

у відповідності з виразом $\Phi = \frac{\omega_{sz} \cdot e_0}{C \cdot \omega_{sz} \cdot \omega_{s\text{ ном}}} = \Phi_0 = const$.

Умову $\Phi = const$ виконують шляхом підтримання незмінного значення струму статора i_s . Згідно зі схемою заміщення струм статора $\bar{i}_s = \bar{i}_r + \bar{i}_\mu$. При незмінному потоці струм намагнічування \bar{i}_μ є незмінним. Крім того, при $\omega^* = const$ струм ротора $i_r = const$. Звідси випливає, що при виконанні умов $\omega^* = const$ і $\Phi = const$ струм статора i_s не залежить від частоти ω_s і є незмінним. Тому регулюють напругу при гальмуванні під контролем регулятора струму статора. При автоматичному підтримання фіксованих значень ω_{yct}^* і $i_{s\text{ yct}}$ будуть однозначно виконуватись умови $\Phi = const$ і $M = const$. Струм i_s однозначно визначає втрати потужності в обмотках статора асинхронної машини, діодах і тиристорах автономного інвертора. Отже, режим мінімального струму i_s практично відповідає умові максимального ККД системи асинхронна машина – автономний інвертор при заданому моменті. Тому реалізація заданого моменту асинхронною машиною при мінімальному струмі i_s є найбільш раціональною умовою як для рухового, так і для генераторного режимів.

5) Режим гальмування при постійній частоті статора $\omega_s = const$. Режим гальмування при постійній частоті статора і незмінній напрузі u_s є найбільш простим за своєю реалізацією. Такий режим використовують для підтримки практично постійної швидкості гальмування під час

руху електровоза на спусках. Для тягової асинхронної машини зазвичай ω^* змінюється в невеликих межах (від 0 до 1-2 Гц), що становить не більше 1-3% номінальної частоти статора $\omega_{s\text{ ном}}$. При збільшенні гальмівного моменту частота обертання $\omega_r = \omega_s + \omega^*$ і швидкість гальмування v_2 зростає незначно. Тому для режиму гальмування при $\omega_s = \text{const}$ припустимо вважати $\omega_r \approx \text{const}$ і $v_2 = \text{const}$.

Якщо перед гальмуванням на спуску швидкість електровоза менше необхідної v_2 , то встановлюють частоту ω_s відповідну швидкості v_2 , а також відрегульовують напругу. По мірі руху по спуску швидкість електровоза буде поступово зростати і при досягненні умови $\omega_r \geq \omega_s$ почнеться режим гальмування з заданою швидкістю v_2 .

Якщо ж початкова швидкість електровоза вище необхідної, то спочатку слід виконати гальмування електровоза (використовуючи розглянуті раніше режими $p_2 = \text{const}$ або $M = \text{const}$) і при досягненні необхідної швидкості v_2 перейти на режим $\omega_s = \text{const}$ і $u_1 = \text{const}$.

Таким чином, формування гальмівної характеристики тягової асинхронної машини є задачею організації керування складовими активного та реактивного струмів статора, забезпечуючи певний рівень збудження машини з урахуванням поточної кутової частоти та відповідний електромагнітний момент [5].

Асинхронна машина при векторному керуванні має характеристики, близькі до характеристик двигуна постійного струму (ДПС), і забезпечують [3]:

- окреме регулювання магнітного потоку і електромагнітного моменту машини;
- в режимі підтримки постійного значення потокозчеплення ротора реалізують гранично допустиму швидкодію при керуванні моментом.

Складова струму асинхронної машини i_d при векторному керуванні грає ту ж роль, що і струм збудження ДПС, а складова струму i_q – відповідає струму якоря ДПС.

Поліпшення динамічних властивостей приводу з асинхронною машиною при векторному керуванні є результатом того, що в перехідних процесів є можливість підтримувати сталість потокозчеплення ротора на відміну від скалярного регулювання, де потокозчеплення ротора в перехідних процесах змінюється при зміні струмів статора і ротора, що призводить до зниження темпу зміни електромагнітного моменту [3, 6]. В приводі з векторним керуванням, де потокозчеплення ротора можна підтримувати постійним, електромагнітний момент змінюється так швидко, як швидко змінюється складова струму статора i_q .

У найпростішому випадку, коли асинхронна машина працює лише в першій зоні регулювання швидкості ($\omega_r < \omega_{r\text{ ном}}$) при дотриманні закону $\psi_r = \text{const}$, формувач завдання з реактивної складової струму вироджується в задатчик сигналу постійного рівня [2], як правило, відповідного номінальному рівню потокозчеплення ротора:

$$i_{dz} = i_{d\text{ ном}} = \psi_{r\text{ ном}} / L_m. \quad (3)$$

Зміна потокозчеплення в процесі роботи асинхронної машини використовують в наступних випадках [6]:

- при регулюванні швидкості у другій зоні (вгору від номінальної);
- при регулюванні швидкості на рівні, близькому до номінального в умовах перевантаження по моменту і відсутності необхідного запасу по напрузі живлення;
- при оптимізації процесів у асинхронної машини за певними критеріями, зокрема енергетичними.

Формують завдання реактивної складової струму в умовах наявності функції ослаблення поля при роботі у другій зоні регулювання швидкості, може здійснюватися у відповідності з виразом [3]:

$$i_{dz} = \begin{cases} i_{d\text{ ном}}, & \text{якщо } |\omega_\psi| \leq \omega_{\psi\text{ ном}}, \\ i_{d\text{ ном}} \frac{\omega_{\psi\text{ ном}}}{|\omega_\psi|}, & \text{якщо } |\omega_\psi| > \omega_{\psi\text{ ном}}. \end{cases} \quad (4)$$

Вимога до формування бажаних динамічних властивостей асинхронної машини при ро-

боті в умовах ослаблення поля призводить до доцільності формування i_{dz} в замкнутому контурі стабілізації ЕРС (напруги статора) рис. 3.

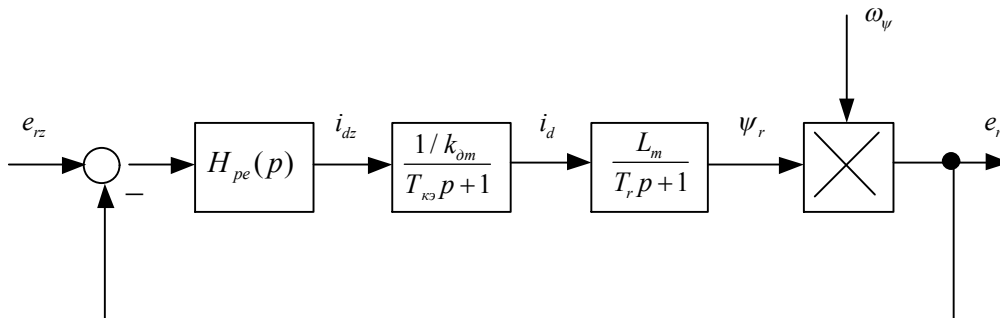


Рис. 3 – Структурна схема контура ЕРС

$$H_{pe}(p) = \frac{T_r p + 1}{(2T_{ke} L_m \omega_{\psi \max} / k_{oc}) p} = k_{ep} + \frac{k_{ei}}{p} = \frac{i_d}{e_{rz}}, \quad (5)$$

де $k_{ep} = \frac{k_{oc} T_r}{2T_{ke} L_m \omega_{\psi \max}}$, $k_{ei} = \frac{k_{oc}}{2T_{ke} L_m \omega_{\psi \max}}$, де T_r – постійна часу кола ротора, с; k_{oc} – кое-

фіцієнт передачі датчика струму; L_m – взаємна індуктивність; $\omega_{\psi \max}$ – частота обертання вектора потокозчеплення; T_{ke} – постійна часу контуру ЕРС.

Очевидно, що процеси в контурі ЕРС при $\omega_{\psi} = \omega_{\psi \max}$ відрізняються від оптимальних (стають монотонними) [3]. Цим ефектом можна знехтувати при невеликому діапазоні регулювання швидкості у другій зоні. Практично повністю цей ефект усувають з допомогою структурної лінеаризації контуру ЕРС за рахунок введення в прямий канал блока ділення на ω_{ψ} . У цьому випадку коефіцієнти регулятора ЕРС, розраховані за (5), слід домножити на $\omega_{\psi \max}$. Обмеження вихідного сигналу регулятора ЕРС здійснюється з умови формування в першій зоні регулювання швидкості номінального значення потокозчеплення ротора, тобто задається на рівні $i_{d \text{ nom}}$.

Крім розглянутих елементів базової структури системи управління асинхронною машиною, в ньому реалізовані функції автоматичної настройки системи управління на параметри машини, адаптації асинхронної машини до змін постійної часу ротора і моменту інерції.

Висновки

Обрана система векторного керування з формуванням завдання реактивної складової струму, яка дозволяє регулювати потужністю гальмування та використовувати рекуперацію, як засіб компенсації нештатних ситуацій. Дана система керування повністю задовольняє потребам електровоза, як об'єкта керування, і в повній мірі може відпрацьовувати тягову характеристику.

Список використаних джерел:

1. Охотников Н.С. Использование накопителей энергии для повышения тяговых свойств электровозов / Н.С. Охотников // Вестник ВНИИЖТ. – 2010. – №5. – С. 33-36.
2. Привалов С.Я. Анализ электрических величин на токоприемнике электровоза в режимах тяги и рекуперации / С.Я. Привалов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск : Новосибирская гос. акад. водного транспорта, 2009. – №1. – С. 308-311.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводом переменного тока / А.Б. Виноградов. – Иваново, 2008. – 298 с.
4. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко; под ред. Н.А. Ротанова. – М. : Транспорт, 1991. – 336 с.

5. Бялобржеський О.В. Структура системи автоматичного керування компенсуючими пристроєм в ланцюзі постійного струму частотно-керованого тягового асинхронного двигуна / О.В. Бялобржеський, Ю.О. Слободенюк // Науково-технічний збірник. Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ, 2015. – Вип. 94. – С. 31-36.
6. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А.Б. Виноградов // Электротехника. – 2005. – №5. – С. 57-62.

Bibliography:

1. Ohotnikov N.S. The use of energy storage devices to improve traction properties of electric / N.S. Ohotnikov // Herald Research Institute of Railway Transport. – 2010. – №5. – P. 33-36. (Rus.)
2. Privalov S.Ya. Analysis of electrical quantities on the susceptor in electric traction and recovery / S.Ya. Privalov // Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East. – Novosibirsk : Novosibirsk State. Acad. Water transport, 2009. – №1. – P. 308-311. (Rus.)
3. Vinogradov A.B. Vector control Power AC / A.B. Vinogradov. – Ivanovo, 2008. – 298 p. (Rus.)
4. Electric train with asynchronous traction motors / N.A. Rotanov, A.S. Kurbasov, Yu.G. Bykov, V.V. Litovchenko; edited by N.A. Rotanova. – M. : Transport, 1991. – 336 p. (Rus.)
5. Byalobrzheskyy O.B. Structure automatic control system compensating devices in the chain of controlled frequency DC traction induction motor / O.B. Byalobrzheskyy, Yu.O. Slobodenyuk // Scientific and technical collection. Mining electrical engineering and automation. – Dnipropetrovsk, 2015. – Issue 94. – P. 31-36. (Ukr.)
6. Vinogradov A.B. Calculating losses in steel, saturation and skin effect in the simulation of dynamic processes in the frequency-controlled asynchronous electric / A.B. Vinogradov // Electronics. – 2005. – №5. – P. 57-62. (Rus.)

Рецензент: О.М. Сінчук

д-р техн. наук, проф., Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського

Стаття надійшла 07.05.2016