

Н. В. Єрмілова, С. Г. Кислиця, Р. В. Захарченко

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ КОНТАКТНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ РУДНИХ ШАХТ

Анотація. У статті розглядаються підходи до створення систем керування електроприводами тягового транспорту рудних шахт. Проведений аналіз роботи в різних режимах та порівняння характеристик чотирьох найбільш популярних типів електроприводів, що застосовуються у тягових електромеханічних системах, виявлені їх переваги та недоліки. Для підвищення ефективності тягових установок в якості приводних двигунів запропоновано використовувати синхронні двигуни з постійними магнітами, що нівелюють недоліки двигунів постійного та змінного струму, які здебільшого використовуються в електроприводах цих електровозів. З метою вдосконалення методів та схем автоматичного керування тяговими приводами розроблені математичні моделі динаміки руху тягової установки з синхронними двигунами з постійними магнітами (СДПМ), на базі яких створені комп'ютерні імітаційні моделі систем автоматичного керування (САК) для різних варіантів конструктивного виконання електродвигунів. За допомогою цих моделей проведений аналіз режимів роботи запропонованих САК тягових установок з СДПМ як без пускових обмоток, так і з ними. Порівнювалася робота САК для моделі тягової установки з лінійними регуляторами струму та швидкості, а також для моделі САК з оптимальними релейними сигналами керування, заснованими на використанні властивостей функцій перемикачів оптимальних керуючих діянь. Аналіз ефекту від застосування запропонованих оптимальних релейних сигналів керування тяговою установкою показав, що при застосуванні САК з оптимальними релейними регуляторами тривалість перехідного процесу у випадку двигунів без пускових обмоток виявилась на 14% меншою в порівнянні з САК із лінійними регуляторами, а у випадку двигунів із пусковими обмотками - на 13.5% меншою, що доводить перевагу використання систем керування з оптимальними релейними регуляторами. Крім того виявлено, що такі системи автоматичного керування електроприводами тягових установок володіють астатизмом відносно моменту навантаження.

Ключові слова: система керування, електровози, синхронні двигуни, комп'ютерна модель.

Вступ

Постановка проблеми. В наш час одним з пріоритетних завдань промисловості України є підвищення її енергоефективності. Однією з найбільш енергоємних являється рудовидобувна галузь. До 30% загальних витрат в технологічному процесі видобування руди припадає на транспортування сировини. Контактні або контактні - акумуляторні електровози є основним тяговим транспортом на рудних шахтах. Модернізація шахтних транспортних ліній дозволяє говорити про актуальність і затребуваність цього напрямку [1]. Вона проходить у ключі покращення показників продуктивності шляхом зміни конструкції вагонеток, впровадженням сучасних видів контактних-акумуляторних електровозів, монорейкових транспортних систем. Все це обумовлює пошук шляхів для підвищення економічності роботи тягових установок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Удосконалення систем автоматичного керування (САК) є одним зі шляхів покращення енергетичних показників контактних електровозів. Застосування досконаліших САК, спрямованих на покращення динамічних характеристик електроприводу, призводить до зниження рівня споживання електричної енергії. Цього можна досягнути шляхом зниження величини максимальних струмів в статорних обмотках двигунів за рахунок скорочення тривалості перехідних процесів та іншими відомими методами. Питання автоматизації роботи різноманітних електроприво-

дів змінного струму, у тому числі й електроприводів на основі синхронних двигунів з постійними магнітами (СДПМ), розглядалися в роботах В.М. Дембіцького, І.В. Савеленка, С.М. Пересади, А.С. Поздеева, К.А. Пупкова, О.Н. Синчука, Ю.Г. Осадчука, О.О.Удовенка та ін. [1-8].

В роботах цих авторів розглядається створення систем керування електроприводами на базі СДПМ малої, середньої та великої потужності. Також відомим є підхід до створення систем керування тяговими електроприводами, що заснований на ідеях Л.С. Понтрягіна, які покладені в основу сучасної теорії оптимального керування.

З аналізу робіт випливає, що питання вибору та удосконалення систем автоматичного керування тягових установок електровозів з метою підвищення їх енергетичної ефективності ще недостатньо вивчене і є досить актуальним.

Мета роботи – порівняння ефективності систем автоматичного керування електроприводів тягових установок шахтних електровозів з різними типами регуляторів для найбільш поширених варіантів конструктивного виконання СДПМ.

Основна частина

При інтенсивному впровадженні електромеханічних тягових систем виникає задача необхідності відпрацювання чітких критеріїв вибору електричних двигунів [2]. Аналіз роботи в різних режимах та порівняння характеристик чотирьох найбільш популярних типів електроприводів, що застосовуються у

тягових електромеханічних системах та гібридних транспортних засобах, виявив наступні їх переваги та недоліки:

– асинхронний двигун має достатньо великий ККД (близько 96%) на високій кутовій швидкості, проте одночасно він характеризується найширшим діапазоном низької ефективності на малій кутовій швидкості через втрати в міді;

– вентильний реактивний двигун має зосереджені обмотки з низьким опором, але, як правило, йому необхідно більш високе значення струму для створення аналогічного за величиною моменту;

– двигун постійного струму послідовного збудження, який дуже часто застосовується в електроприводах тягового транспорту, має м'яку механічну характеристику, що ускладнює завдання підтримки стабільності швидкості електровоза в статичних режимах роботи;

– синхронний двигун з постійними магнітами має ККД вищий за 97%. Він має зосереджену обмотку з низьким опором, проте вимагає більшої кількості матеріалу постійних магнітів для задоволення вимог відносно моменту. Синхронний двигун з 12 пазами та 8 полюсами має трохи вищий ККД при низькій кутовій швидкості, але на швидкості, вищій за 5000 об/хв., ця перевага втрачається, оскільки вихрові струми багатократно зростають (до 50 разів);

– асинхронний двигун та вентильний реактивний двигун мають нижчу щільність потужності, тобто 55 кВт/52 кг (для асинхронного) та 55 кВт/45 кг (для вентильного) у порівнянні з показниками 55 кВт/32 кг – для синхронного двигуна з постійними магнітами. На показники вібрації та шуму значно впливає геометрія статора, комбінація його пазів та полюсів, а також спосіб керування. Причому вібрація виявляється тим нижчою, чим більшим є час дискретності вхідних впливів, за однієї й тієї ж топології вентильний реактивний двигун має набагато сильнішу вібрацію, ніж синхронний двигун з постійними магнітами, що працює в режимі переривчастого струму.

Враховуючі вищеописане, для підвищення ефективності тягових установок пропонується використовувати синхронні двигуни з постійними магнітами, що нівелюють недоліки двигунів постійного та інших типів змінного струму, які здебільшого використовуються в приводах електровозів.

Синхронні двигуни з постійними магнітами (іноді їх називають магнітоелектричними машинами) не мають обмоток збудження на роторі. Обертання здійснюється за рахунок взаємодії магнітних полів обмоток статора та постійних магнітів, розміщених на роторі електричної машини. Такі машини поєднують простоту конструкції двигунів змінного струму та можливість керування ДПС. Вони характеризуються високим ККД в широкому діапазоні частот обертання ротора, у тому числі, і на нижніх швидкостях; простотою конструкції та відсутністю втрат на збудження; невисокою інерцією при доволі значному моменті; відносно невеликими розмірами (наприклад, асинхронна машина аналогіч-

ної потужності та класу енергоефективності в 2 рази більша за синхронний двигун); незмінним моментом на валу незалежно від швидкості обертання ротора.

СДПМ знайшли широке розповсюдження в обладнанні з високими вимогами до стабільності частоти обертання. До недоліків синхронних машин належать необхідність застосування додаткового обладнання для пуску та входу в синхронний режим, можливість розмагнічування ротора при високих температурах, а також необхідність встановлення датчиків зворотного зв'язку. Поява частотних перетворювачів та сучасних матеріалів для магнітів дозволяє вирішувати ці проблеми.

Конструктивно СДПМ відрізняється встановленням магнітів на роторі: вони можуть розміщуватися як на поверхні (SPMSM), так і всередині (IPMSM) вузла, що обертається. Ротори із вбудованими магнітами застосовуються в двигунах, що працюють при значному навантаженні на валу та високих швидкостях, але вартість таких роторів суттєво вища. Також випускаються СДПМ як без пускових обмоток, так і з ними.

Для покращення енергетичних характеристик тягових установок на основі синхронних двигунів з постійними магнітами необхідно провести вдосконалення методів та схем автоматичного керування цими приводами. Були розроблені математичні моделі динаміки руху тягової установки з СДПМ для найбільш поширених варіантів конструктивного виконання, які дозволили синтезувати сигнали оптимального керування тяговою установкою, що можуть в подальшому бути використані при побудові схем САК рухом тягових установок [9]. На базі математичних моделей тягових установок на основі СДПМ створені комп'ютерні імітаційні моделі САК, за допомогою яких можна проводити аналіз режимів роботи запропонованих САК тягових установок з СДПМ як без пускових обмоток, так і з ними [10].

На рис. 1 приведена комп'ютерна модель САК рухом тягової установки з СДПМ без пускових обмоток, яка складається з таких основних блоків:

- «SDPM» – модель СДПМ без пускових обмоток;
- «Reg id» – модель регулятора струму в координатах i_d ;
- «Reg iq» – модель регулятора струму в координатах i_q ;
- «Reg w» – модель регулятора швидкості обертання ротора СДПМ;
- «w_zad» – блок завдання швидкості обертання ротора СДПМ;
- «Mech» – модель динаміки руху електровоза;
- «M_zad» – блок завдання механічного моменту навантаження.

Також була розроблена комп'ютерна модель САК рухом тягової установки на базі СДПМ із пусковими обмотками (рис. 2).

Дана модель складається з наступних блоків:

- «SDPM» – модель СДПМ з пусковими обмотками;
- «Reg id» – модель регулятора струму в координатах i_d ;

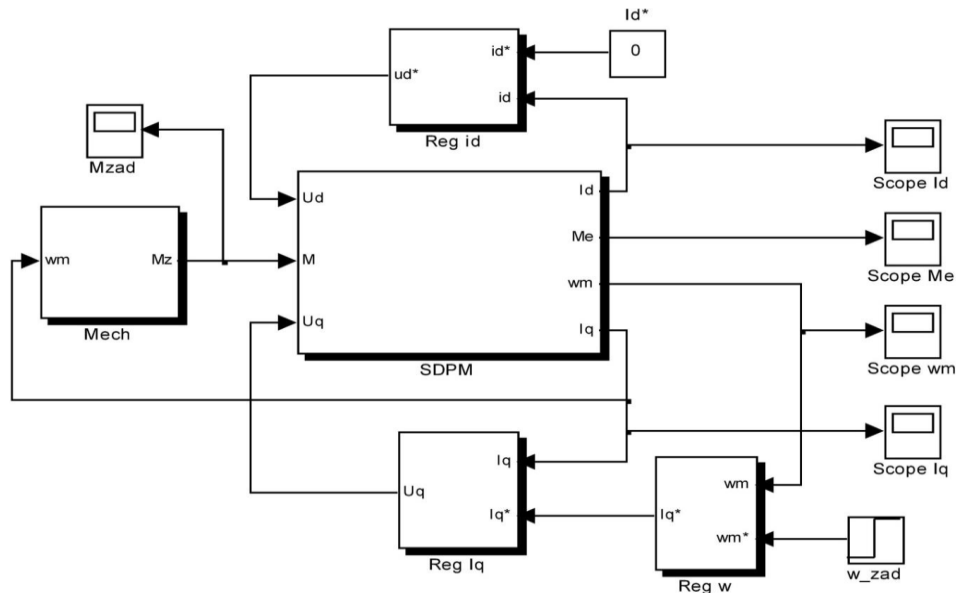


Рис. 1. Комп'ютерна модель САК рухом тягової установки з СДПМ без пускових обмоток

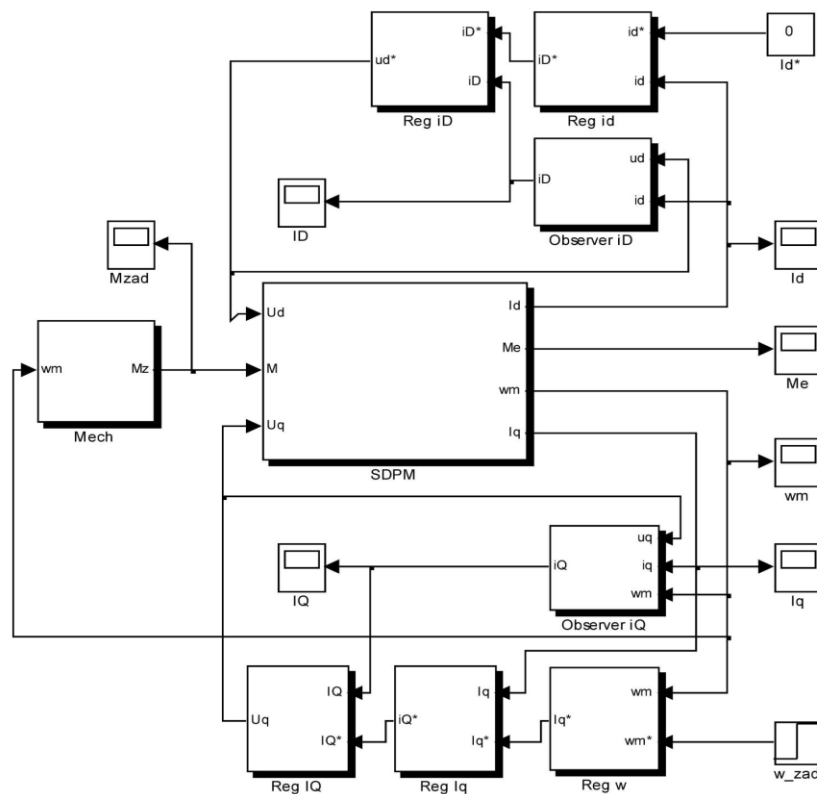


Рис. 2. Комп'ютерна модель САК рухом тягової установки з СДПМ із пусковими обмотками

- «Reg iq» – модель регулятора струму в координатах i_q ;
- «Reg w» - модель регулятора швидкості обертання ротора СДПМ;
- «w_zad» – блок завдання швидкості обертання ротора СДПМ;
- «Mech» – модель динаміки руху електровоза;
- «M_zad» – блок завдання механічного моменту навантаження;
- «Reg IQ» – комп'ютерна модель спостерігача Люенбергера для змінної стану i_Q ;

- «Red ID» – комп'ютерна модель спостерігача Люенбергера для змінної стану i_D .

На базі комп'ютерних моделей проведено порівняння характеристик САК швидкістю руху тягових установок для двох випадків: для моделі САК тягової установки з лінійними регуляторами струму та швидкості; для моделі САК тягової установки з оптимальними релейними сигналами керування, заснованими на використанні властивостей функцій перемикання оптимальних керуючих діянь [4].

Ці комп'ютерні моделі дозволяють розраховувати та запам'ятовувати значення параметрів тягової

установки, що дало можливість провести їх подальшу обробку та представити результати у вигляді графіків.

Результати комп'ютерного моделювання роботи САК тягової установки з СДПМ без пускових обмоток наведені на рис. 3 – 5.

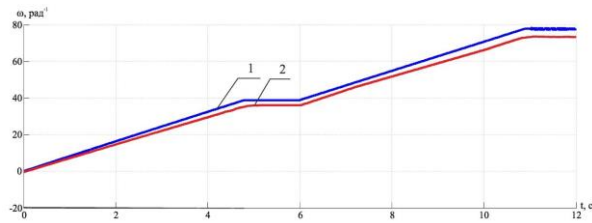


Рис. 3. Порівняльна характеристика зміни швидкості обертання ротора СДПМ у часі: 1 – модель САК з оптимальними релейними регуляторами; 2 – модель САК з лінійними регуляторами

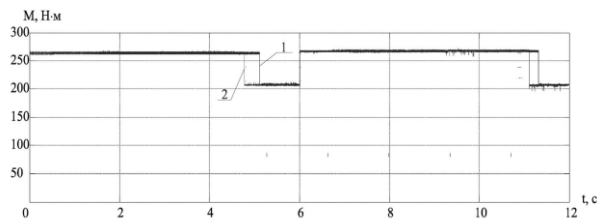


Рис. 4. Порівняльна характеристика зміни моменту у часі: 1 – модель САК з лінійними регуляторами; 2 – модель САК з оптимальними релейними регуляторами

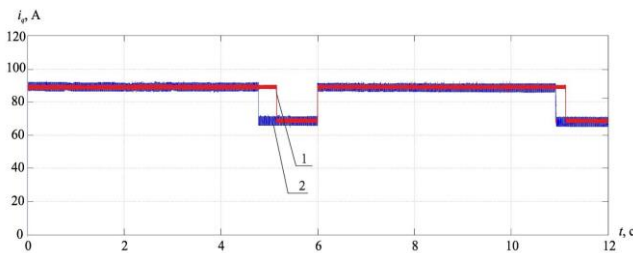


Рис. 5. Порівняльна характеристика зміни струму i_q : 1 – модель САК з лінійними регуляторами; 2 – модель САК з оптимальними релейними регуляторами

З рис. 3 можна побачити, що тривалість перехідного процесу зміни швидкості у випадку моделі САК з оптимальними релейними регуляторами виявилася на 14% меншою, ніж для моделі з лінійними регуляторами. До того ж ця система, на відміну від базової, володіє астатизмом відносно моменту навантаження. Це підтверджують і характеристики на рис. 4, 5. Також були проведені аналогічні дослідження роботи САК електроприводом на основі СДПМ з пусковими обмотками. Порівняльні характеристики наведені на рисунках 6 – 8. З рис. 6 можна побачити, що тривалість перехідного процесу зміни швидкості у випадку моделі САК з оптимальними релейними регуляторами виявилася на 13,5% меншою, ніж для моделі з лінійними регуляторами. Як і у першому випадку (СДПМ без пускових обмоток) ця система, на відміну від базової, володіє астатизмом відносно моменту навантаження. Аналогічні висновки можна зробити по рис. 7, 8.

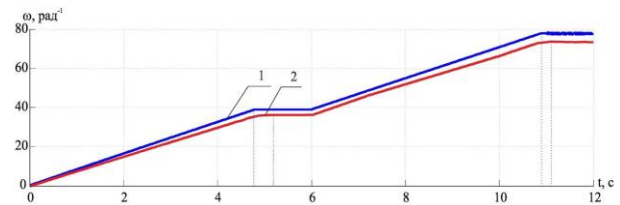


Рис. 6. Порівняльна характеристика зміни швидкості обертання ротора тягової установки: 1 – модель САК з оптимальними релейними регуляторами; 2 – модель САК з лінійними регуляторами

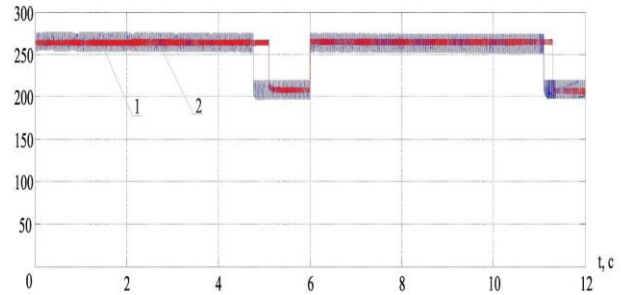


Рис. 7. Порівняльна характеристика зміни моменту для моделі САК: 1 – модель САК з лінійними регуляторами; 2 – модель САК з оптимальними релейними регуляторами.

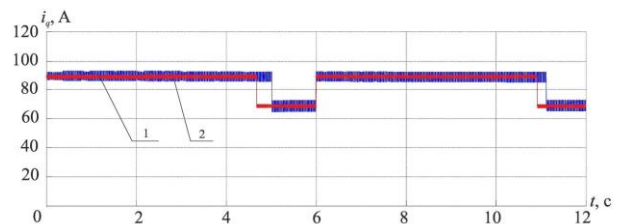


Рис. 8. Порівняльна характеристика зміни струму i_q : 1 – модель САК з оптимальними релейними регуляторами; 2 – модель САК з лінійними регуляторами.

Для двох досліджуваних випадків проведено статистичну обробку результатів моделювання, яка показала, що статична похибка швидкості обертання ротору (ω) відносно заданого сигналу 39 rad^{-1} , в моделі САК з лінійними регуляторами складає 3.6%, а САК з оптимальними релейними регуляторами – 0.6%.

Крім того, пульсації струмів i_q та моменту M в при використанні базової моделі САК більше ніж в САК тягової установки САК з оптимальними релейними регуляторами на 49.9%, та 12.92%, відповідно.

Це свідчить про перевагу запропонованої САК з оптимальними релейними регуляторами швидкістю руху тягової установки.

Висновки

1. Проведений аналіз джерел показує, що питання удосконалення систем автоматичного керування тягових установок електровозів з метою підвищення їх енергетичної ефективності ще недостатньо вивчене і є досить актуальним.

2. Проаналізовано роботу в різних режимах та порівняння характеристик найбільш популярних типів електроприводів для застосування у тягових електромеханічних системах та гібридних транспортних засобах. В результаті зроблено висновок, що для підвищення ефективності тягових установок найбільш доцільно використовувати синхронні дви-

гуни з постійними магнітами, що нівелюють недоліки двигунів постійного та змінного струму, які здебільшого використовуються в цих електроприводах.

3. Розроблені комп'ютерні імітаційні моделі дали можливість проаналізувати відмінності у режимах роботи запропонованих САК тягових установок з СДПМ як без пускових обмоток, так і з пусковими обмотками.

4. Аналіз ефекту від застосування запропонованих оптимальних релейних сигналів керування

тяговою установкою показав, що при застосуванні САК з оптимальними релейними регуляторами тривалість перехідного процесу у випадку двигунів без пускових обмоток виявилась на 14% меншою в порівнянні з САК із лінійними регуляторами, а у випадку двигунів із пусковими обмотками - на 13.5% меншою. Крім того виявлено, що САК з оптимальними релейними регуляторами тягових установок володіють астатизмом відносно моменту навантаження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Синчук О.Н. Шахтний електровозний транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование: учебник / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелий, Л.Л. Дебелий; под ред. доктора технических наук, профессора О.Н. Синчука. – Кривой Рог - Донецк: ЧП Щербатых А.В., 2015. – 428 с.
2. Осадчук Ю.Г. Порівняльний аналіз асинхронних, синхронних машин з постійними магнітами та вентильних реактивних двигунів для гібридних транспортних засобів / Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич, Р.А. Ільченко // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий ріг: Криворізький національний університет, 2016. – Вип. 42. – С. 94-99.
3. Поздеев А.С. Современные типы синхронных двигателей с постоянными магнитами на роторе и способы управления ими / А.С. Поздеев, В.М. Казакбаев, В.А. Прахт, В.А. Дмитриевский // Энергосбережение и повышение энергетической эффективности. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2015. – С. 188-192.
4. Савеленко І.В. Автоматизація процесу керування тяговими установками з синхронними двигунами на постійних магнітах: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.07 «Автоматизація процесів керування»/ І.В. Савеленко. – Кіровоград, 2016. – 22 с.
5. Тімков О.М. Поява гібридних силових установок на транспортних засобах / О.М. Тімков, О.В. Григорашенко // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – 2014. – № 1. – С. 42-47.
6. Дембіцький В.М. Дослідження приводу гальмівної системи транспортного засобу з гібридною силовою установкою та рекуперацією енергії / В.М. Дембіцький // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – 2013. – № 29. – С. 28-33.
7. Krøvel Ø. Design of Large Permanent Magnetized Synchronous Electric Machines/ Øystein Krøvel //Ph.D thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, P. 6-10, 14-15. Feb 2011.
8. Lutsenko, I. Optimal control of systems engineering. Development of a general structure of the technological conversion subsystem (part 2) / I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 1, Issue 2 (73). – P. 43–50.
9. Байков, А.И. Математическое моделирование электропривода на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами / А.И. Байков, М.В. Андрюхин, И.В. Бобылев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". – Нижний Новгород: ФНПЦ "ННИИРТ", 2014. – Вып. 4. – С. 33-49.
10. Мичурин, Р.А. Моделирование работы синхронного двигателя с постоянными магнитами в среде Simulink / Р.А. Мичурин // Электронные информационные системы. – М.: АО "НТЦ ЭЛИНС", 2017. – Вып. 3. – С. 23-32.

Received (Надійшла) 01.10.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.11.2021

**Research of automatic control systems
for electric drive of contact electric locomotive of ore mines**

N. Yermilova, S. Kyslytsia, R. Zakharchenko

Abstract. The article considers approaches to the creation of control systems for electric drives of traction transport of ore mines. The analysis of work in different modes and comparison of characteristics for most popular types of electric drives applied in traction electromechanical systems is carried out, their advantages and lacks are revealed. To increase the efficiency of traction units as drive motors, it is proposed to use synchronous motors with permanent magnets, which eliminate the shortcomings of DC and AC motors, which are mostly used in these electric locomotives. In order to improve the methods and schemes of automatic control of traction drives, mathematical models of dynamics of traction unit with synchronous motors with permanent magnets (SMPM) were developed, on the basis of which computer simulation models of automatic control systems (ACS). Using these models, the analysis of the modes of operation of the proposed ACS traction units with SMPM both without starting windings and with them. The operation of ACS for the traction unit model with linear current and speed regulators was compared, as well as for the ACS model with optimal relay control signals based on the use of the properties of switching functions of optimal control actions. Analysis of the effect of the proposed optimal relay control signals of the traction unit showed that when using ACS with optimal relay regulators, the duration of the transient process in the case of motors without starting windings was 14% shorter compared to ACS with linear regulators, and in the case of motors with starting motors. - by 13.5% less, which proves the advantage of using control systems with optimal relay regulators. In addition, it was found that such systems of automatic control of electric drives of traction units have astatism in relation to the moment of loading.

Keywords: control system, electric locomotives, synchronous motor, computer model.