

УДК 621.316.7

П.Г. ПЛІШКОВ, І.О. ПЕРЕВЕРЗЄВ, К.Г. ПЕТРОВА, І.В. САВЕЛЕНКО**СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ ТЯГОВОЇ УСТАНОВКИ З СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ**

Запропоновано підхід до автоматичного керування швидкістю руху тягової установки з синхронними двигунами на постійних магнітах, що містять що мають пускові обмотки, який базується на використанні спостерігачів зниженого порядку. Розроблено структурну схему системи автоматичного керування швидкістю тягової установки та її комп'ютерну імітаційну модель. Результати проведених досліджень ефекту від застосування розробленої системи автоматичного керування показали, що застосування цієї системи дозволяє досягти зменшення пульсацій струму в обмотках статора, втрат електричної енергії та зниження рівня пульсацій моменту на валу синхронними двигунами на постійних магнітах.

Ключові слова: система автоматичного керування, спостерігач Люенбергера, синхронні двигуни з постійними магнітами.

Предлагается подход к автоматическому управлению скоростью движения тяговой установки с синхронными двигателями на постоянных магнитах, в устройство которых входят пусковые обмотки, основанный на использовании наблюдателей пониженного порядка. Разработана структурная схема системы автоматического управления скоростью тяговой установки и ее компьютерная имитационная модель. Результаты проведенных исследований эффекта от применения разработанной системы автоматического управления показали, что применение этой системы позволяет достичь уменьшения пульсаций тока в обмотках статора, потерь электрической энергии и снижения уровня пульсаций момента на валу синхронного двигателя на постоянных магнитах.

Ключевые слова: система автоматического управления, наблюдатель Люенбергера, синхронные двигатели с постоянными магнитами.

An approach is proposed to automatic control of the speed of traction unit with synchronous motors on permanent magnets containing starter windings, which is based on the use of reduced-order observers. An equation of Luenberger's observer for estimating currents in starter windings of an engine are developed. The structural scheme of the automatic control system of the traction unit speed and its computer simulation model is developed. The study of the effect from application of the developed automatic control system have shown that the use of this system allows to achieve a reduction of iq current pulses, electric power losses and a decrease in the pulsations of the moment on a shaft of synchronous motors of the with permanent magnets.

Keywords: automatic control system, Luenberger's observer, synchronous motors on permanent magnets.

Вступ. Підвищення енергоефективності роботи електрообладнання є одним з пріоритетних завдань промисловості України. Як відомо, рудовидобувна галузь є однією з найбільш енергоємних в порівнянні з іншими галузями. Так в технологічному процесі видобування сировини на її транспортування припадає до 30 % загальних витрат, Одним із шляхів скорочення цих витрат є застосування в тягових установках руднотермічних шахт більш сучасних електроприводів під час руху. В електроприводах тягових установок все більшого поширення набувають синхронні двигуни на постійних магнітах (СДПМ), що обумовлено їх більш високими енергетичними характеристиками в порівнянні з двигунами постійного струму. За конструктивним виконанням СДПМ випускаються у варіантах з пусковими та без пускових обмоток. Зважаючи на це, системи автоматичного керування (САК) тяговими установками з СДПМ обов'язково повинні враховувати ці їх особливості. Проте існуючі САК швидкістю руху тягових установок на основі СДПМ застосовують ті ж самі лінійні регулятори, що і для установок з двигунами постійного струму. Розробка систем автоматичного керування для СДПМ дозволить забезпечити широкі діапазони регулювання швидкості обертання, покращити їх енергетичних, статичні і динамічні показники.

Тому задача удосконалення САК швидкістю руху тягових установок з СДПМ з метою підвищення їх енергоефективності є актуальною.

Аналіз публікацій. В роботі [1] для керування швидкістю руху електроприводів з СДПМ пропонується застосовувати такі ж лінійні САК, як і для приводів постійного струму. Проте, як зазначалося вище,

такий підхід до побудови САК не враховує ряд конструктивних особливостей електроприводів з СДПМ, що знижує ефективність їх роботи.

В роботах [2, 3] запропоновано оптимальну релейну систему автоматичного керування швидкістю руху тягових установок з СДПМ. Так, в роботах [4, 5] проведено синтез законів оптимального релейного керування швидкістю руху тягових установок на основі СДПМ з пусковими обмотками, на базі яких розроблено структурну схему САК. В таких САК для визначення змінних стану, що не піддаються безпосередньому вимірюванню (струми в пускових обмотках) пропонується застосовувати спостерігачі. Проте, в даній роботі не обґрунтовано тип спостерігача, та не проведено розрахунок його параметрів.

Мета роботи. Метою даної роботи є дослідження роботи САК швидкістю руху тягових установок на основі СДПМ, до складу якої входять спостерігачі змінних стану, які не піддаються безпосередньому вимірюванню (струми в пускових обмотках СДПМ).

Викладення основного матеріалу досліджень. Як зазначалося в роботах [2,3], для синтезу САК швидкістю руху тягових установок з СДПМ необхідно розробити математичну модель об'єкту керування. Математична модель СДПМ при загальноприйнятих допущеннях може бути представлена в рухомій системі координат, пов'язаній з ротором СДПМ (d-q координати) у наступному виді:

$$\begin{cases} u_d = i_d r_s + x_d p i_d + x_{dD} p i_D - \\ - \omega_R x_q i_q - \omega_R x_{qQ} i_Q; \\ 0 = i_D r_D + x_D p i_D + x_{dD} p i_d; \\ u_q = i_q r_s + x_q p i_q + x_{qQ} p i_Q + \\ + \omega_R x_d i_d + \omega_R x_{dD} i_D + \omega_R x_{dM} I_{M0}; \\ 0 = i_Q r_Q + x_Q p i_Q + x_{qQ} p i_q; \\ J p \omega_R = i_q (x_d i_d + x_{dD} i_D + x_{dM} I_{M0}) - \\ - i_d (x_q i_q + x_{qQ} i_Q) - M_3, \end{cases} \quad (1)$$

де u_d, u_q – проекції напруги в обмотках статора на вісі d–q, в.о.;

i_d, i_q – складові струму в обмотці статора по осям d–q, в.о.;

r_s – активний опір статорної обмотки СДПМ, в.о.;

x_d, x_q – складові індуктивного опору статорної обмотки СДПМ по осям d–q, в.о.;

$p = d/dt$ – оператор диференціювання;

x_{dD}, x_{qD} – складові індуктивного взаємного опору приведенного до статорної обмотки СДПМ по осям d–q, в.о.;

x_D, x_Q – складові індуктивного опору приведеного до статорної обмотки СДПМ по осям d–q, в.о.;

x_{dM} – індуктивний опір еквівалентної обмотки збудження, в.о.;

i_D, i_Q – складові струму еквівалентної пускової обмотки по осям d–q, в.о.;

ω_R – кутова (електрична) швидкість статора, рад⁻¹;

r_D, r_Q – складові активного опору еквівалентної пускової обмотки СДПМ по осям d–q, в.о.;

I_{M0} – струм еквівалентної обмотки збудження, А;

J – момент інерції руючих частин, в.о.;

M_3 – момент зовнішніх сил, в.о.

В роботах [4,5] проведено синтез САК швидкості руху тягової установки з СДПМ. Сигнали оптимального регулювання релейних регуляторів струмів та швидкості обертання наведені нижче.

$$u_{id} = u_{ym} \text{sign}(i_d) \quad (2)$$

$$u_{iD} = u_{yidm} \text{sign}(i_D) \quad (3)$$

$$u_{iQ} = u_{yidm} \text{sign}(i_Q^* - i_Q) \quad (4)$$

$$u_{iq} = u_{yom} \text{sign}(i_q^* - i_q) \quad (5)$$

$$u_\omega = u_{ym} \text{sign} \left(\omega_R^* - \omega - p \frac{x_Q x_q - x_{qQ}^2}{r_s r_Q} \omega \right) \quad (6)$$

де i_d^* – поздовжня складова струму статора СДПМ;

i_D^* – поздовжня складова струму в пусковій обмотці СДПМ;

i_q^* – поперечна складова струму статора СДПМ;

i_Q^* – поздовжня складова струму в пусковій обмотці СДПМ;

ω_R^* – кутова швидкість статора при відсутності збурень, рад⁻¹.

Сигнали оптимального керування (2) і (5) реалізуються з допомогою жорстких зворотних зв'язків в функції основних змінних, а сигнал (6) – в функції

основної змінної та її першої похідної. Усі змінні сигнали керування (2), (5) та (6) піддаються безпосередньому вимірюванню, тому структурна реалізація цих сигналів не викликає принципових труднощів.

Змінні i_D та i_Q , які входять до складу сигналів керування (3) та (4) відповідно не можуть бути виміряні безпосередньо через значну технічну складність встановлення датчиків струму на пускових обмотках СДПМ. Тому, для їх оцінки доцільно скористатись спостерігачами стану.

Як відомо з теорії автоматичного керування, застосування того чи іншого типу спостерігачів обумовлене характером зміни у часі змінної стану, наявністю випадкових збурень, що істотно впливають на значення змінної стану тощо.

Для визначення значень змінних стану, що не піддаються безпосередньому вимірюванню найбільшого поширення набули спостерігачі повного порядку, спостерігачі зниженого порядку (спостерігач Люенбергера) та спостерігачі засновані на алгоритмі оптимальної фільтрації Калмана.

Проведені дослідження показали, що співвідношення сигнал/шум для змінних стану i_D та i_Q є порівняно великим, тому нехтування випадковими збуреннями (завадами) не призводить до значного зниження точності роботи САК.

Зважаючи на те, що частина змінних стану математичної моделі СДПМ піддається безпосередньому вимірюванню, для оцінки значень i_D та i_Q найдоцільніше використати спостерігач Люенбергера.

Для синтезу спостерігачів Люенбергера змінних стану i_D та i_Q було розроблено математичну модель СДПМ з пусковими обмотками у вигляді системи різницевих диференційних рівнянь незбуреного руху приведених до форми Коші:

$$\begin{cases} (r_s + p x_d) \eta_1 + p x_{dD} \eta_2 = U_1; \\ p x_{dD} \eta_1 + (r_D + p x_D) \eta_2 = 0; \\ (r_s + p x_q) \eta_3 + p x_{qQ} \eta_4 + x_{dM} I_{M0} \eta_5 = U_3; \\ p x_{qQ} \eta_3 + (r_Q + p x_Q) \eta_4 = 0; \\ x_{dM} I_{M0} \eta_3 - p J \eta_5 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

де $\eta_1 = I_d = i_d - i_d^*$; $\eta_2 = I_D = i_D - i_D^*$; $\eta_3 = I_q = i_q - i_q^*$; $\eta_4 = I_Q = i_Q - i_Q^*$; $\eta_5 = \Omega_R = \omega_R - \omega_R^*$ – змінні стану СДПМ.

На рис. 1 зображена узагальнена структурна схема спостерігача Люенбергера.

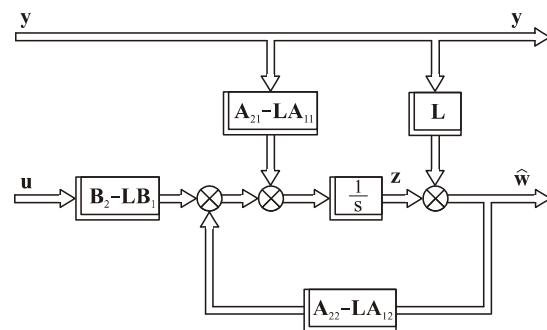


Рис. 1 – Узагальнена структурна схема спостерігача Люенбергера

Узагальнене рівняння спостерігача Люенбергера, що відповідає структурній схемі на рис. 1, має наступний вигляд:

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{12})\mathbf{z}(t) + (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{12})\mathbf{L}\mathbf{y}(t) + (\mathbf{A}_{21} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{11})\mathbf{y}(t) + (\mathbf{B}_2 - \mathbf{L}\mathbf{B}_1)\mathbf{u}(t) \quad (8)$$

Математична модель динаміки руху тягової установки для контуру d має наступний вигляд:

$$\begin{cases} (r_s + px_d)\eta_1 + px_{dD}\eta_2 = U_1; \\ px_{dD}\eta_1 + (r_D + px_D)\eta_2 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В системі рівнянь (9) змінна стану $\eta_1 = i_d - i_d^*$ є вимірюваною, а значення змінної стану $\eta_2 = i_D - i_D^*$ оцінюється з допомогою спостерігача.

Привівши систему рівнянь (9) до стандартного вигляду рівнянь змінних стану у матричному вигляді та провівши відповідні алгебраїчні перетворення було отримано рівняння спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану η_2 .

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = -\frac{r_D x_d + lr_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{z}(t) - \frac{r_D x_d + lr_D x_{dD}}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{ly}(t) + \frac{r_s x_{dD} + lr_s x_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{y}(t) - \frac{x_{dD} + lx_D}{x_D x_d - x_{dD}^2} \mathbf{u}(t) \quad (10)$$

Структурна схема спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану η_2 , що відповідає рівнянню (10) зображена на рис. 2.

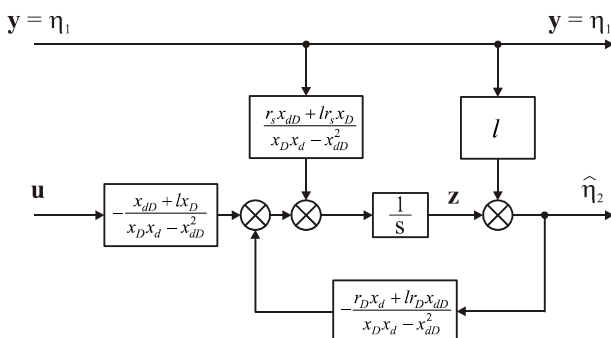


Рис. 2 – Структурна схема спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану η_2

Математична модель динаміки руху тягової установки для контуру q має наступний вигляд:

$$\begin{cases} (r_s + px_q)\eta_3 + px_{qQ}\eta_4 + x_{dM}I_{M0}\eta_5 = U_3; \\ px_{qQ}\eta_3 + (r_Q + px_Q)\eta_4 = 0; \\ x_{dM}I_{M0}\eta_3 - pJ\eta_5 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

В системі рівнянь (11) змінні стану $\eta_3 = i_q - i_q^*$ і $\eta_5 = \omega_R - \omega_R^*$ є вимірюваними, а значення змінної стану $\eta_4 = i_Q - i_Q^*$ оцінюється з допомогою спостерігача.

Привівши систему рівнянь (11) до стандартного вигляду рівнянь змінних стану у матричному вигляді та провівши відповідні алгебраїчні перетворення було отримано рівняння спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану η_4 :

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = -\frac{r_Q x_Q + l_1 r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \mathbf{z}(t) - \frac{r_Q x_Q + l_1 r_Q x_{qQ}}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \times [l_1 \quad l_2] \mathbf{y}(t) + \left[\frac{r_s x_{qQ} + l_1 r_s x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} - \frac{l_2 x_{dM} I_{M0}}{J} \right. \\ \left. \times \frac{x_{dM} I_{M0} (x_{qQ} + l_1 x_Q)}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \right] \mathbf{y}(t) - \frac{x_{qQ} + l_1 x_Q}{x_Q x_q - x_{qQ}^2} \mathbf{u}(t) \quad (12)$$

Структурна схема спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану η_4 , що відповідає рівнянню (12) зображена на рис. 3.

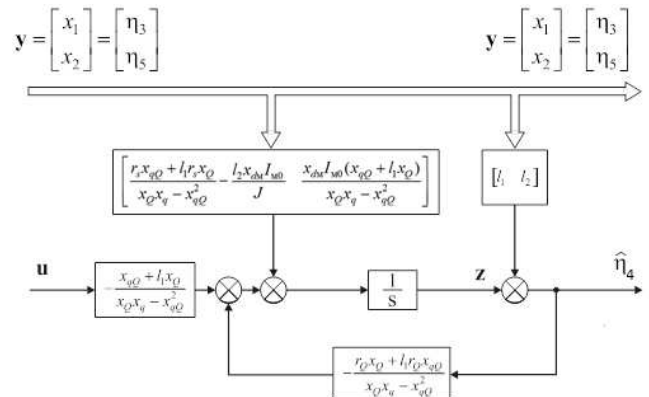


Рис. 3 – Структурна схема спостерігача Люенбергера для оцінки змінної стану η_4

Дослідження роботи розробленої САК швидкістю руху тягової установки з СДПМ найдоцільніше проводити шляхом комп'ютерного моделювання. З цією метою було розроблено комп'ютерну імітаційну модель САК в основу якої покладено отримані закони оптимального керування та отримані рівняння спостерігачів стану.

Схема узагальної комп'ютерної моделі САК тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками зображена на рис. 4.

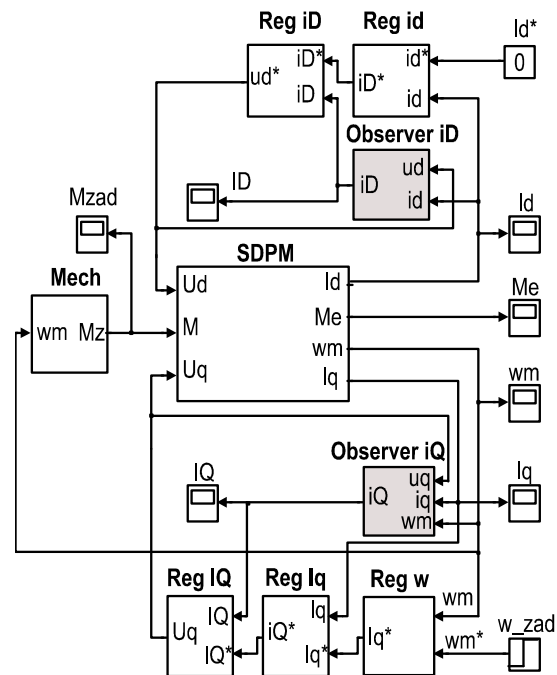


Рис. 4 – Схема узагальної комп'ютерної моделі САК тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками

На рис. 4.

- «SDPM» – модель СДПМ з пусковими обмотками;
- «Red id» – модель регулятора струму i_d , що відповідає сигналу керування (2);
- «Red iq» – модель регулятора струму i_q , що відповідає сигналу керування (5);
- «Red iD» – модель регулятора струму i_D , що відповідає сигналу керування (3);
- «Red iQ» – модель регулятора струму i_Q , що відповідає сигналу керування (4);
- «Red w» – модель регулятора швидкості обертання ротора СДПМ, що відповідає сигналу керування (6);
- «w_zad» – блок задання швидкості обертання ротора СДПМ;
- «M_zad» – блок задання механічного моменту навантаження.
- «Mech» – модель динаміки руху електровоза.
- «Observer iQ» – блок спостерігача струму i_Q
- «Observer iD» – блок спостерігача струму i_D

Для оцінки ефективності використання розробленої САК швидкістю руху тягової установки на основі СДПМ з пусковими обмотками було проведено її комп'ютерне моделювання. В якості базової моделі для порівняння була обрана САК швидкістю руху тягової установки з лінійними регуляторами струму та швидкості.

Результати комп'ютерного моделювання роботи САК наведені у вигляді графіків на рис. 5, 6.

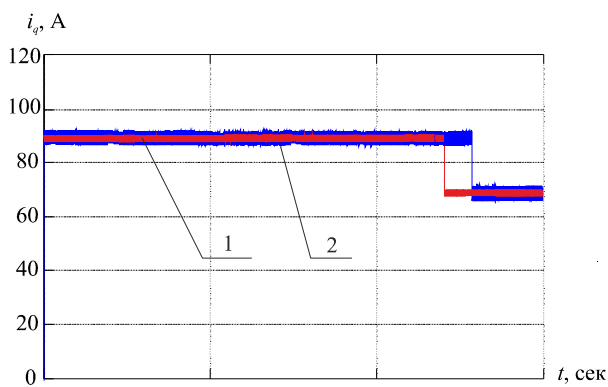


Рис. 5 – Графік зміни струму в проекції на вісь q; 1 – розроблена модель САК з релейними регуляторами, 2 – базова модель САК (з лінійними регуляторами)

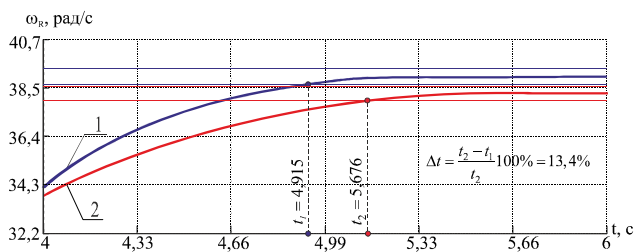


Рис. 6 – Графік швидкості обертання ротора; 1 – розроблена модель САК з релейними регуляторами, 2 – базова модель САК (з лінійними регуляторами)

Як видно з рис. 5, 6, тривалість перехідного процесу зміни струму і швидкості у випадку розробленої моделі виявилась меншою на 13,4 %, ніж для випадку моделі базової САК.

До того ж у випадку розробленої САК спостері-

гається зменшення пульсацій струму i_q , що призводить до зменшення втрат електричної енергії та зниження рівня пульсацій моменту на валу СДПМ.

Висновки. В результаті проведених досліджень можливо зробити наступні висновки:

1. Для оцінки змінних стану та що не піддаються безпосередньому вимірюванню найдоцільніше скористатися спостерігачем Люенбергера, що обумовлене відносною простотою його технічної реалізації.

2. Аналіз роботи розробленої САК швидкістю руху тягової установки з СДПМ показав, що при її використанні спостерігається зменшення часу перехідного процесу, втрат електричної енергії та пульсацій моменту на валу СДПМ, що свідчить про більш високу ефективність в порівнянні з існуючими.

Список літератури

1. Садовой А.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А.В. Садовой, Б.В. Сухи-нин, Ю.В. Сохина // Под редакцией Садовой А. В. – К: Исимо, 1996. – С. 298.
2. Савеленко І.В. Розробка та дослідження роботи системи автоматичного керування тяговим електроприводом / І.В. Савеленко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 42 (1151). – С. 76 – 79.
3. Плишков П.Г. Математичні моделі синхронних двигунів на постійних магнітах для синтезу систем автоматичного керування високоефективними електроприводами / П. Г. Плишков, І. В. Савеленко, А. В. Некрасов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3/2015 (92) – С. 26–34.
4. Савеленко І.В. Синтез системи автоматичного керування електроприводом на базі синхронного двигуна з постійними магнітами / І.В. Савеленко // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ. – Кіровоград: КНТУ, 2015. – Вип. 28. – С. 309 – 317.
5. І.В. Савеленко Математичне моделювання перехідних процесів в тяговій установці з синхронним двигуном на постійних магнітах за наявності пускових обмоток / І.В. Савеленко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – вип. 29. – Кіровоград: КНТУ, 2016. – С. 304 – 309.

References (transliterated)

1. Sadovoi A. V. Systemy optimalnoho upravleniya pretsyzyonnimy elektropyvodamy [Systems for optimal control of precision electric drives]. A. V. Sadovoi, B. V. Sukhynyn, Yu. V. Sokhyna. Pod redaktsyei Sadovoho A. V. – K: Ysymo, 1996. 298. Print
2. Savelenko I.V. Rozrobka ta doslidzhennia roboty systemy avtomatychnoho keruvannia tiahovym elektropyvodom. I.V. Savelenko. Visnyk NTU «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – Vol 42 (1151). – p. 76 – 79. Print
3. Plieskov P. H. Matematychni modeli synkronnykh dvyhunyv na postiiynykh mahnitakh dlia syntezu system avtomatychnoho keruvannia vysokoefektyvnymy elektropyvodamy [Development and research of the system of automatic control of traction electric drive] / P. H. Plieskov, I. V. Savelenko, A. V. Nekrasov. Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – Kremenichuk: KrNU, 2015. – Vol. 3/2015 (92) – p. 26–34. Print
4. Savelenko I.V. Syntez systemy avtomatychnoho keruvannia elektropyvodom na bazi synkronnoho dvyhuna z postiiynykh mahnitamy [Mathematical model of synchronous motors based on permanent magnets for the synthesis of automatic control of high-effective electronic]. I.V. Savelenko. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia: zb. nauk. prats KNTU. – Kirovohrad: KNTU, 2015. – Vol. 28. – p. 309 – 317. Print
5. I.V. Savelenko Matematychne modeliuвання perekhidnykh protsesiv v tiahovii ustanovtsi z synkronnym dvyhonom na postiiynykh mahnitakh za naiavnosti puskovykh obmotok [Mathematical modeling of transients in a traction unit with a synchronous motor

on permanent magnets in the presence of starting windings]. I.V. Savelenko. Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu: Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia. – Vol.

29. – Kirovohrad: KNTU, 2016. – p. 304 – 309. Print

Надійшла (received) 05.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Система оптимального керування рухом тягової установки з синхронними двигунами на постійних магнітах / П. Г. Плешков, П. Г. Переверзев, К. Г. Петрова, І. В. Савеленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 71–75. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079–3944.

Системы оптимального управления движением тяговой установки с синхронными двигателями на постоянных магнитах / П. Г. Плешков, П. Г. Переверзев, К. Г. Петрова, И. В. Савеленко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 71–75. Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079–3944.

The system of optimal control of the motion of a traction unit with synchronous motors on permanent magnets / P. H. Plieshkov, I. O. Pereverzev, K.G. Petrova, I. V. Savelenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No 34 (1256). – P. 71–75. Bibliography: 5. – ISSN 2079–3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плешков Петро Григорович – кандидат технічних наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет, завідувач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

Плешков Петр Григорьевич – кандидат технических наук, профессор, Центральноукраинский национальный технический университет, заведующий кафедрой электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

Plieshkov Petro Hryhorovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Full Professor, Central Ukrainian National Technical University, Head of the Department of "Electrical systems and energy management", tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: inbox@ets.kr.ua.

Переверзев Ігор Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: igor_pereverzev@ukr.net.

Переверзев Игорь Алексеевич – кандидат технических наук, Центральноукраинский национальный технический университет, доцент кафедры электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: igor_pereverzev@ukr.net.

Pereverzev Igor Oleksiyevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Central Ukrainian National Technical University, Associate Professor at the Department of "Electrical systems and energy management", Kropyvnytskyi, tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: igor_pereverzev@ukr.net.

Петрова Катерина Григорівна – кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, старший викладач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: kateflash27@gmail.com.

Петрова Катерина Григориевна – кандидат технических наук, Центральноукраинский национальный технический университет, старший преподаватель кафедры электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: kateflash27@gmail.com.

Petrova Kateryna Grygorievna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Central Ukrainian National Technical University, senior lecturer at the Department of "Electrical systems and energy management", Kropyvnytskyi, tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: kateflash27@gmail.com.

Савеленко Іван Володимирович – кандидат технічних наук, Центральноукраїнський національний технічний університет, старший викладач кафедри електротехнічних систем та енергетичного менеджменту, м. Кропивницький, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: ivan.savelenko@gmail.com.

Савеленко Иван Владимирович – кандидат технических наук, Центральноукраинский национальный технический университет, старший преподаватель кафедры электротехнических систем и энергетического менеджмента, г. Кропивницкий, тел.: (0522) 39 04 61; e-mail: ivan.savelenko@gmail.com.

Savelenko Ivan Volodymyrovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Central Ukrainian National Technical University, senior lecturer at the Department of "Electrical systems and energy management", Kropyvnytskyi, tel.: (0522) 39 04 61; e-mail: ivan.savelenko@gmail.com.