

- інвертором і напівпровідниковим вмикачем гальмових резисторів / Чернышев А. О., заявл. №12.03.2007 ; опубл. 10.08.2007, Бюл. № 12, 2007 р.
4. Декларацийний патент на корисну модель № 67170, Україна, Н02М7/00. Спосіб формування трапецеїдальної широтно-імпульсної модуляції напруги інвертора / Д. А. Шокар'єв, Є. І. Скапа / Патентовласник Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського ; заявл. 26.04.2011 ; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 3, 2012 р.

Shokarov Dmytro, Assos. Prof., PhD tech. sci.

Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyyi National University, Kremenchuk, Ukraine

On the question of research of characteristics of the output voltage waveforms structure of a voltage inverter-induction motor

The analysis of the work leads to the conclusion that the formation of variants trapezoidal output voltage signal quality better by reducing the number of switching points during synchronous switching power transistors in all phases of the inverter.

Increase the frequency of the carrier signal does not lead to the exclusion of a number of harmonic components of the output voltage, and to their movement toward higher frequencies. Therefore, an important moment in the formation of a variety of pulse width modulation switching frequency inverter power switches.

pulse width modulation, asynchronous motor, the inverter voltage nonsinusoidality

Одержано 25.11.15

УДК 621.316.1

І.В. Савеленко, викл.

Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна,

E-mail: ivan.savelenko@gmail.com

Математичне моделювання перехідних процесів в тяговій установці з синхронним двигуном на постійних магнітах за наявності пускових обмоток

На основі розгляду рівнянь Парка-Горева та застосуванням спостерігача Люенбергера для системи автоматичного керування тяговою установкою, розраховано координати синхронного двигуна з постійними магнітами в перехідних процесах. Доведено переваги використання СДПМ з пусковими обмотками в порівнянні з СДПМ без них.

синхронний двигун на постійних магнітах, спостерігач зниженого порядку, пускові обмотки, перехідний режим

І.В. Савеленко, препод.

Кировоградский национальный технический университет, г.Кировоград, Украина

Математическое моделирование переходных процессов в тяговой установке с синхронным двигателем на постоянных магнитах при наличии пусковых обмоток

На основе рассмотрения уравнений Парка-Горева и применения наблюдателя Люенбергера для системы автоматического управления тяговой установкой, рассчитаны координаты синхронного двигателя с постоянными магнитами в переходных процессах. Доказано преимущества использования СДПМ с пусковыми обмотками при сравнении с СДПМ без них.

синхронный двигатель на постоянных магнитах, наблюдатель пониженного порядка, пусковые обмотки, переходный режим

© І.В. Савеленко, 2016

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку гірничо-металургійного комплексу України спостерігається тенденція до збільшення об'ємів видобутку руди. Основним видом транспорту на рудних шахтах є контактні або контактено-акумуляторні електровози. В технологічному процесі видобутку сировини на транспортування припадає до 30 % від загальних витрат. Це обумовлює пошук шляхів підвищення енергетичних показників тягових установок.

Найпоширенішим типом двигунів, що використовується в тягових установках нашої країни, є двигуни постійного струму [1]. Проте, в якості приводів тягових установок все більшого поширення набувають синхронні двигуни на постійних магнітах (СДПМ), що обумовлене їх більш високими енергетичними характеристиками в порівнянні з двигунами постійного струму. Використання тягових електроприводів змінного струму стримувалось такими їх недоліками, як необхідність використання в якості джерела живлення частотного перетворювача напруги, відносно велика вартість та складність систем автоматичного керування (САК) [2]. Для покращення динамічних характеристик електроприводів тягових установок зі значним навантаженням, що характеризуються великою інерційністю та важкими умовами пуску-гальмування доцільно використовувати СДПМ з пусковими обмотками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [3] розроблено математична модель електроприводу з СДПМ в основу якої покладено математичний апарат на основі рівнянь Парка-Горева та теорію оптимального керування [2]. В роботі [4] проведено синтез систем автоматичного керування тягової установки з СДПМ без пускових обмоток та отримані закони оптимального регулювання для релейних регуляторів струмів та швидкості обертання. Необхідно зазначити, що промисловістю випускаються СДПМ з пусковими обмотками та без них. Тому розробка САК тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками є актуальною.

Мета роботи. Розроблення математичної моделі синхронного двигуна з постійними магнітами за наявності пускових обмоток для розрахунку керуючих впливів в регуляторах САК тягової установки.

Постановка задачі. На основі застосування рівнянь Парка-Горева та спостерігача Люенбергера для САК тягової установки, визначити вплив струмів в пускових обмотках СДПМ у перехідних режимах.

Виклад основного матеріалу. Математична модель електроприводу з СДПМ без пускових обмоток, що побудована на основі рівнянь Парка-Горева розглянута в [3]. Врахування процесів, що протікають у пускових обмотках СДПМ призводить до ускладнення його математичної моделі. Тоді система рівнянь [3] набуває вигляду:

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

де u_d, u_q – складові напруги обмоток статора по осям d, q, B ;

i_d, i_q – складові струму обмоток статора по осям d, q, A ;

$p = d/dt$ – оператор диференціювання;

ω_R – швидкість обертання ротору, рад/сек;

r_s – опір фази статора, Ом;

x_d, x_q – складові індуктивні опори обмоток статора по осям $d, q, \text{Ом}$;

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

J – момент інерції рухомих частин, кг·м²;

M_3 – зовнішній момент на валу СДПМ;

x_D, x_Q – складові струму еквівалентної пускової обмотки по осям d, q , А;

x_{dD}, x_{qQ} – приведені опори до статорної обмотки еквівалентних пускових обмоток по осям d, q .

Виділивши з першого і третього та п'ятого рівнянь системи (1) складові, що характеризують перехресні зв'язки та зовнішні збурення та перейшовши до рівнянь у відхиленнях отримуємо систему рівнянь збуреного руху.

Позначимо складові, що характеризують перехресні зв'язки та зовнішні збурення через f_1, f_3 та f_5 :

$$\begin{cases} f_1 = -\omega_R x_q i_q - \omega_R x_{qQ} i_Q = -\omega_R (x_q i_q + x_{qQ} i_Q); \\ f_3 = \omega_R (x_d i_d + x_{dD} i_D); \\ f_5 = i_q (x_d i_d + x_{dD} i_D) - i_d (x_q i_q + x_{qQ} i_Q) - M_3. \end{cases} \quad (2)$$

Тоді, із урахуванням (2) система (1) набуде вигляду:

$$\begin{cases} u_d = i_d r_s + x_d p i_d + x_{dD} p i_D + f_1; \\ 0 = i_D r_D + x_D p i_D + x_{dD} p i_d; \\ u_q = i_q r_s + x_q p i_q + x_{qQ} p i_Q + \omega_R x_{dM} I_{M0} + f_3; \\ 0 = i_Q r_Q + x_Q p i_Q + x_{qQ} p i_q; \\ J p \omega_R = i_q x_{dM} I_{M0} + f_5. \end{cases} \quad (3)$$

Позначимо траєкторію заданого руху індексом «*» та введемо позначення параметрів не збуреного руху як $u_d^*, u_q^*, i_d^*, i_D^*, i_q^*, i_Q^*, \omega_R^*$. Враховуючі дані позначення введемо нові змінні: $\eta_1 = I_d = i_d - i_d^*$; $\eta_2 = I_D = i_D - i_D^*$; $\eta_3 = I_q = i_q - i_q^*$; $\eta_4 = I_Q = i_Q - i_Q^*$; $\eta_5 = \Omega_R = \omega_R - \omega_R^*$.

Звідки система диференціальних рівнянь руху СДПМ з пусковими обмотками прийме вигляд:

$$\begin{cases} U_1 = \eta_1 (r_s + p x_d) + \eta_2 p x_{dD}; \\ 0 = \eta_1 p x_{dD} + \eta_2 (r_D + p x_D); \\ U_3 = \eta_3 (r_s + p x_q) + \eta_4 p x_{qQ} + \eta_5 x_{dM} I_{M0}; \\ 0 = \eta_3 p x_{qQ} + \eta_4 (r_Q + p x_Q); \\ 0 = \eta_3 x_{dM} I_{M0} - \eta_5 p J. \end{cases} \quad (4)$$

В роботі [3] проведено синтез системи автоматичного керування електроприводом з СДПМ та отримані закони оптимального регулювання для релейних регуляторів струмів та швидкості обертання. Із системи (4) синтез функції переключення дозволяє отримати закони оптимального керування для регуляторів струму i_d, i_q, i_D, i_Q , та швидкості ω_R :

$$u_{i_d} = u_{ym} \operatorname{sign}(i_d^* - i_d) = -0,5 \operatorname{sign}(i_d); \quad (5)$$

$$u_{i_q} = u_{yom} \operatorname{sign}(i_q^* - i_q) = 0,5 \operatorname{sign}(i_q^* - i_q). \quad (6)$$

$$u_{i_D} = u_{yidm} \operatorname{sign}(i_D^* - i_D) = -220 \operatorname{sign}(i_D). \quad (7)$$

$$u_{i_Q} = u_{yidm} \operatorname{sign}(i_Q^* - i_Q) = 220 \operatorname{sign}(i_Q^* - i_Q). \quad (8)$$

$$u_{\omega} = u_{ym} \operatorname{sign}\left(\omega_R^* - \omega - p \frac{x_Q x_q - x_{qQ}^2}{r_s r_Q} \omega\right) = 15 \operatorname{sign}(\omega_R^* - \omega + 1,03 p \omega). \quad (9)$$

Усі змінні в законах керування (5, 6, 9) піддаються безпосередньому вимірюванню, тому їх структурна реалізація не викликає принципових труднощів.

Змінні i_D та i_Q , які входять до складу законів керування (7) та (8) відповідно не можуть бути вимірні безпосередньо через значну технічну складність встановлення датчиків струму на пускових обмотках СДПМ. Тому, для їх оцінки доцільно скористатись спостерігачами стану зниженого порядку (спостерігач Люенбергера) [5].

В результаті проведеного синтезу спостерігачів Люенбергера для змінних стану i_D та i_Q отримані рівняння спостерігача Люенбергера для оцінки змінних стану η_2 та η_4 системи рівнянь (4).

Рівнянню (10) відповідає структурна схема, зображена на рис. 1.

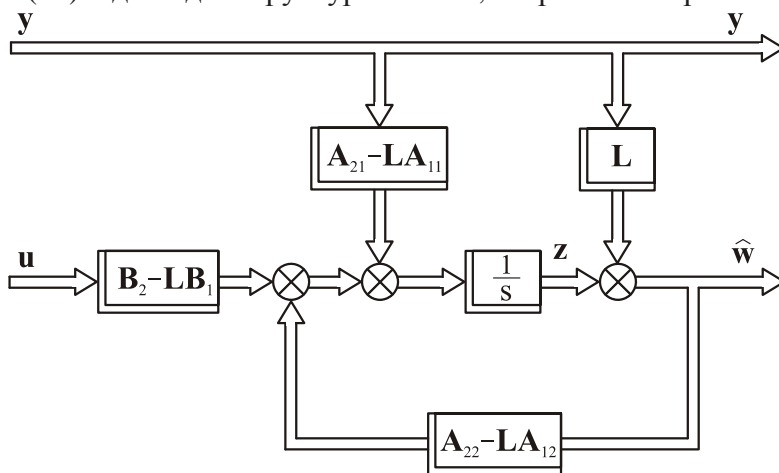


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема спостерігача Люенбергера

В результаті виконаного синтезу спостерігачів Люенбергера для змінних стану i_D та i_Q отримані рівняння спостерігача Люенбергера для оцінки змінних стану η_2 та η_4 системи рівнянь (4). В результаті проведеного аналізу системи (4) встановлено, дана система задовольняє критерію спостережності. Таким чином, узагальнене рівняння спостерігача Люенбергера має наступний вигляд [5]:

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{12})\mathbf{z}(t) + (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{12})\mathbf{L}\mathbf{y}(t) + (\mathbf{A}_{21} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{11})\mathbf{y}(t) + (\mathbf{B}_2 - \mathbf{L}\mathbf{B}_1)\mathbf{u}(t), \quad (10)$$

Структурна реалізація математичної моделі тягової установки з СДПМ за наявності пускових обмоток, зображена на рис. 2.

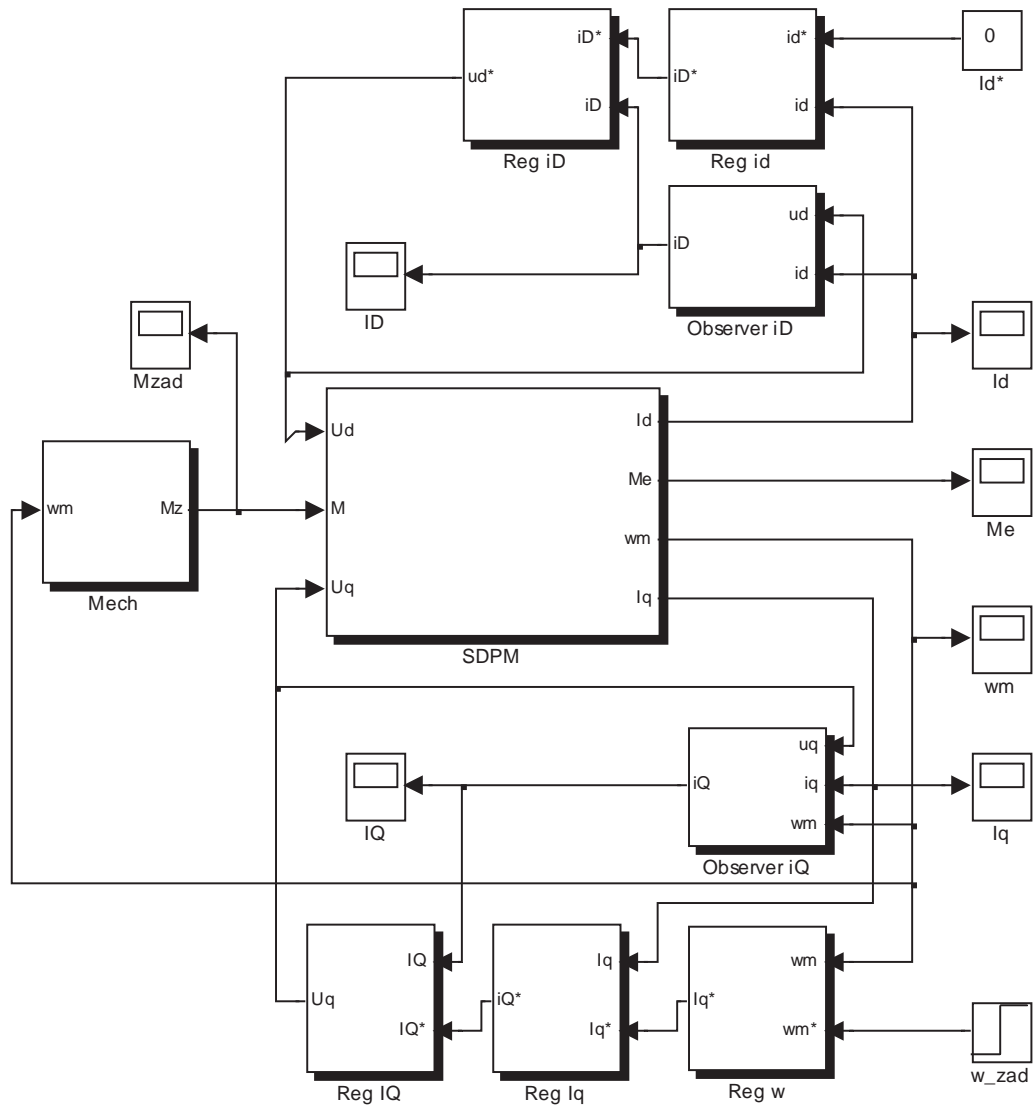
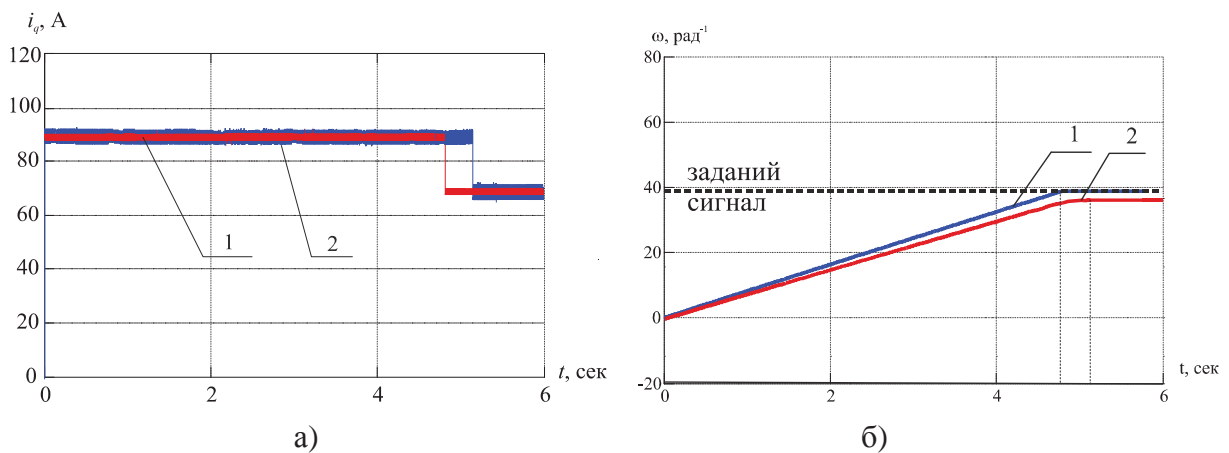


Рисунок 2 – Структурна реалізація математичної моделі тягової установки з СДПМ при наявності пускових обмоток

Результати комп'ютерного моделювання роботи САК тягової установки на основі СДПМ з пусковими обмотками наведені у вигляді графіків на рис. 3.



1 – розроблена модель САК, 2 – базова модель САК
Рисунок 3 – Графіки зміни струму (а) швидкості обертання ротора (б)

Як видно з рис. 3, тривалість перехідного процесу зміни струму і швидкості у випадку розробленої моделі виявилась меншою на 7,63 %, ніж для моделі САК з СДПМ без пускових обмоток.

Крім того СДПМ з пусковими обмотками, в порівнянні з СДПМ без них, забезпечують більш м'який пуск та зменшення пульсацій пускового моменту.

Висновки:

1. Застосування спостерігача Люенбергера дозволило провести оцінку значень пускових струмів i_D, i_Q для моделі САК тягової установки на базі СДПМ з пусковими обмотками, що не піддаються безпосередньому вимірюванню.

2. Аналіз ефекту від застосування запропонованих САК показав, що тривалість перехідного процесу у випадку СДПМ із пусковими обмотками виявилась на 7,63 % меншою в порівнянні з моделлю САК з СДПМ без пускових обмоток[3].

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. Терехов В. М. Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова.– М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 301 с.
3. Плешков П. Г. Математичні моделі синхронних двигунів на постійних магнітах для синтезу систем автоматичного керування високоефективними електроприводами / П. Г. Плешков, І. В. Савеленко, А. В. Некрасов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 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. – 2015. – №28. – С. 309–316.
5. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовков. – М. Машиностроение, 1976. – 184 с.

Ivan Savelenko, Lecturer

Kirovograd National Technical University, Kirovohrad, Ukraine

Mathematical modeling of transients in traction drive with synchronous motor on the permanent magnets with of starting winding

The development of a mathematical model of synchronous motor with permanent magnets in the presence of starting windings to calculate of controlling influences in the regulators ACS of traction drive.

Based on consideration of equations Park-Gorev and use of observer Luenberger for automatic control system traction drive, calculated coordinates of the synchronous motor with permanent magnets in the transition process. Proven advantages of SDPM with windings of starts compared to SDPM without them.

The use of observer Luenberger allowed to assess the value of starting current model ACS traction system based on SDPM of starting windings that can not be directly measured. Analysis of the effect from the application of the proposed ACS showed that the length of the transition process in the case of SDPM with launchers windings appeared at 7.63% compared with the model of ACS SDPM without launchers windings.

automatic control systems, electric drive, synchronous permanent magnet motor

Одержано 22.03.16