

УДК 519.2

Л.П. ГАЛАЙКО

**АНАЛИЗ РЕЖИМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ РУДНИЧНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА**

Наведено аналіз перехідних процесів від режиму двигуна до режиму рекуперативного гальмування вентильно-індукторного двигуна рудничного електровоза потужністю 27 кВт та частотою обертів 1146 хвил<sup>1</sup> при постійній частоті обертів за допомогою розробленої моделі двигуна для перехідних режимів у програмі Simulink. Постійність частоти обертів забезпечено за допомогою фазового регулювання. Закони зміни кутів включення та відключення визначено за допомогою механічних характеристик для режиму постійної потужності, розрахованих на моделі двигуна для сталених режимів. Результати аналізу можна використати для розробки програми для мікропроцесора контролера.

**Ключові слова:** модель, програма Simulink, механічні характеристики, фазове регулювання, рекуперативне гальмування, режим постійної потужності.

Проведен анализ переходных процессов от режима двигателя к режиму рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза мощностью 27 кВт и частотой вращения 1146 мин<sup>-1</sup> при постоянной частоте вращения с помощью разработанной модели двигателя для переходных режимов в программе Simulink. Постоянство частоты вращения обеспечивалось с помощью фазового регулирования. Законы изменения углов включения и отключения определялись с помощью механических характеристик в режиме постоянства мощности, рассчитанных на модели двигателя для установившихся режимов. Результаты анализа могут быть использованы при разработке программы для микропроцессора контроллера.

**Ключевые слова:** модель, программа Simulink, механические характеристики, фазовое регулирование, рекуперативное торможение, режим постоянства мощности.

Modeling transients from the motor to recuperative braking operation by Simulink of the Matlab software package is got up for the switched reluctance motor. The developed imitating models and computing dates are resulted for motor of 27 kW and 1146 rpm, mine electric locomotive projected for a drive on the base of engine of direct-current. Aim of work : to work out the laws of change parameters for providing of constancy of speed in the mode of the braking and in transition from the mode of engine in the mode of the braking. As managing parameters the corners of including and disconnecting are chosen. Continuous change of corners on a certain law are chosen assume a SRM without the sensor of position of rotor. For the task of managing parameters used the mechanical descriptions got by means of simulation model for the set modes of a mode of a constant of a power. Further perfection of adjusting laws is required for reduction of error in the receipt of set. Result of analysis may be used for development of the high-quality program for the microprocessor of controller.

**Keywords:** switched reluctance motor, mode of constancy of speed, mechanical descriptions, simulation model, managing parameters, transients, recuperative braking operation.

**Введение.** Одним из наиболее проблемных режимов вентильно-индукторного двигателя (ВИД) рудничного электровоза является режим рекуперативного торможения. Режим торможения (ВИД) рассмотрен в работе [1] для весьма специфического применения двигателя для привода аппарата искусственной вентиляции легких, режим торможения для этого применения существенно отличается от режима рекуперативного торможения на транспорте. В работе [2] рассмотрен режим рекуперативного торможения ВИД для рудничного электровоза. Указан способ перехода в этот режим путем изменения углов включения и отключения  $\theta_{on}$ ,  $\theta_{off}$  (углов между полюсами статора и ротора, при которых подается питание на катушки полюсов статора и отключается питание соответственно путем включения и отключения транзисторов). Кроме того, приведена формула для определения угла  $\theta_{on}$  для режима рекуперативного торможения через угол  $\theta_{on}$  для режима двигателя (очевидно для получения одинакового момента по величине при одной и той же скорости, это в статье не указано). Приведено сравнение экспериментальной и расчетной формы тока в режиме рекуперативного торможения с хорошим совпадением. Существенным недостатком этой работы является отсутствие анализа переходных процессов из одного режима в другой, так как именно анализ этих процессов необходим для создания программы для микропроцессора контроллера.

В работе [3] автора этой статьи приведены результаты моделирования переходных процессов в режиме рекуперативного торможения и при переходе из режима двигателя в режим рекуперативного торможения для ВИД мощностью 27 кВт и частотой

вращения 1146 мин<sup>-1</sup>. Для проведения моделирования были разработаны модели двигателя для программы Simulink пакета программ Matlab для установившихся и переходных режимов. [4, 5]. Результаты моделирования показали, что являются возможными переход из режима двигателя в режим рекуперативного торможения и устойчивая работа машины в режиме рекуперативного торможения при использовании фазового регулирования. Приближенные значения углов включения и отключения определялись с помощью механических характеристик, полученных с помощью модели для установившихся режимов. В модели для переходных процессов задавались уточненные значения углов по одному из законов: при наличии датчика положения ротора задавались конечные приращения углов в определенные моменты времени, при отсутствии датчика положения ротора задавалось непрерывное изменение углов по определенному закону. Недостатком работы является проведение расчетного эксперимента только для одного значения скорости (номинальной скорости 120 рад/с), а также использование для определения значения углов статических механических характеристик при постоянных значениях углов включения и отключения, приведенных в работе [6]. Однако, при увеличении скорости выше номинальной двигателя, предназначенные для привода транспортных средств, переходят в режим постоянства мощности. Для обеспечения этого режима углы включения и отключения существенно изменяются при изменении скорости.

**Цель работы.** Разработать законы изменения управляющих параметров для обеспечения постоянства скорости в режиме рекуперативного торможения

и при переходе из режима двигателя в режим рекуперативного торможения для вентильно-индукторного двигателя, работающего в режиме постоянства мощности, с помощью имитационной модели в программе Simulink пакета программ Matlab.

**Описание эксперимента.** Для двигателя мощностью 27 кВт, частотой вращения  $1146 \text{ мин}^{-1}$ , спроектированного для привода рудничного электровоза на базе двигателя постоянного тока, были рассчитаны статические механические характеристики в режиме двигателя и в режиме рекуперативного торможения при постоянстве мощности. С помощью этих характеристик определены углы включения и отключения

для моделирования переходных процессов и проведено моделирование. Значения средних значений моментов и углов включения и отключения занесено в таблицу, а результаты моделирования представлены на рис. 1–4. При моделировании задавалось непрерывное изменение углов по определенному закону, которое предполагает управление при отсутствии датчика положения ротора. Наличие датчика положения ротора является одним из недостатков вентильно-индукторных двигателей. В настоящее время опубликовано значительное число работ по бездатчиковому управлению.

Таблица 1 – Значения средних моментов и углов включения и отключения для режима двигателя и режима рекуперативного торможения

$\Omega$ , рад/с	Режим двигателя			Режим рекуперативного торможения		
	$P=14400 \text{ Вт}$	$P=20000 \text{ Вт}$	$P=28800 \text{ Вт}$	$P=-14400 \text{ Вт}$	$P=-20000 \text{ Вт}$	$P=-28800 \text{ Вт}$
120	120 27,9/11,6	167 28,9/11,6	240 30,2/11,6	-120 4,7/-11,6	-167 5,7/-11,6	-240 7,2/-11,4
240	60 31,1/11	83,3 33,1/11	120 35,8/11	-60 9,1/-11	-83,3 11,1/-11	-120 13,8/-11
360	40 33/11	55,5 36,1/11	80 40,1/19,4	-40 11/-11	-55,5 14,1/-11	-80 19/-10,6

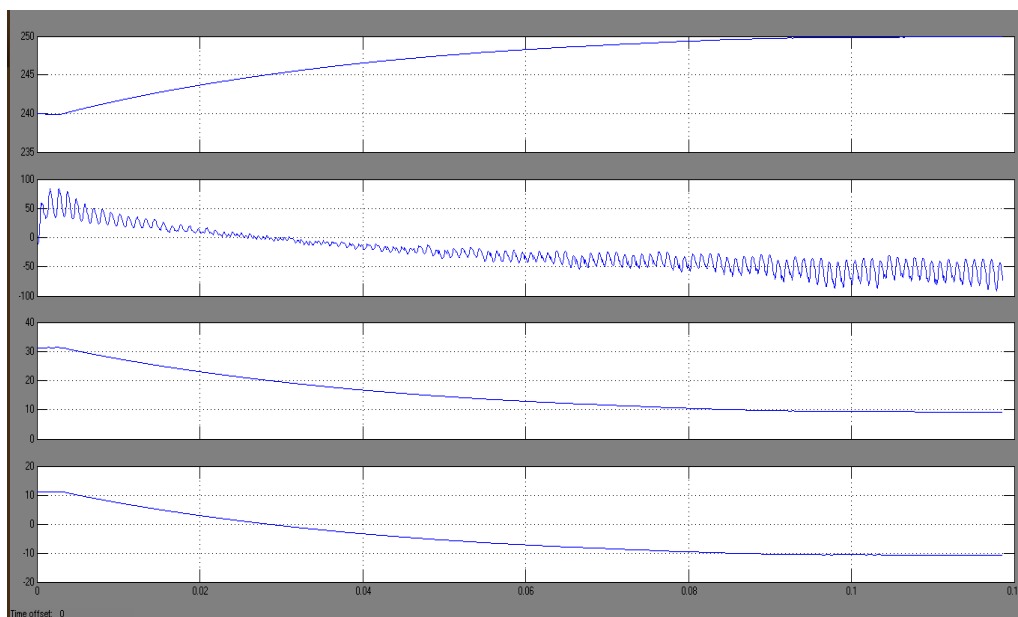


Рис. 1 – Зависимости угловой скорости, мгновенного значения момента, угла включения и угла отключения от времени при изменении среднего момента нагрузки от значения  $60 \text{ Н} \cdot \text{м}$  до значения  $-60 \text{ Н} \cdot \text{м}$  при значении скорости  $240 + \Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega$  – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке  $\Delta\Omega < 10$ )

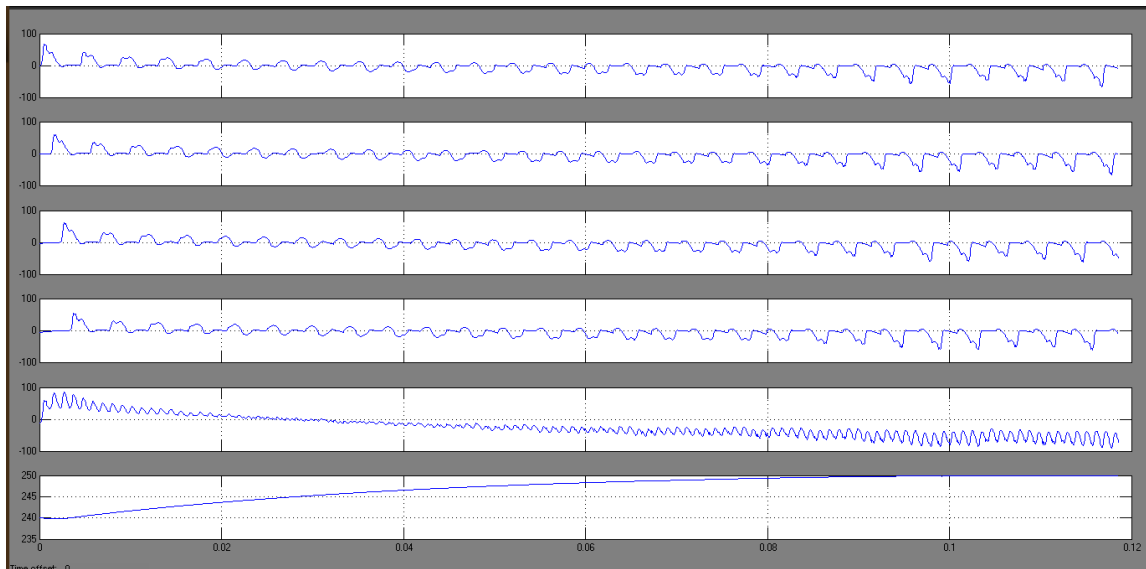


Рис. 2 – Зависимости мгновенных значений моментов четырех фаз, результирующего момента и угловой скорости при изменении среднего момента нагрузки от значения 60 Н·м до значения -60 Н·м при значении скорости  $240 + \Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega$  – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке  $\Delta\Omega < 10$ )

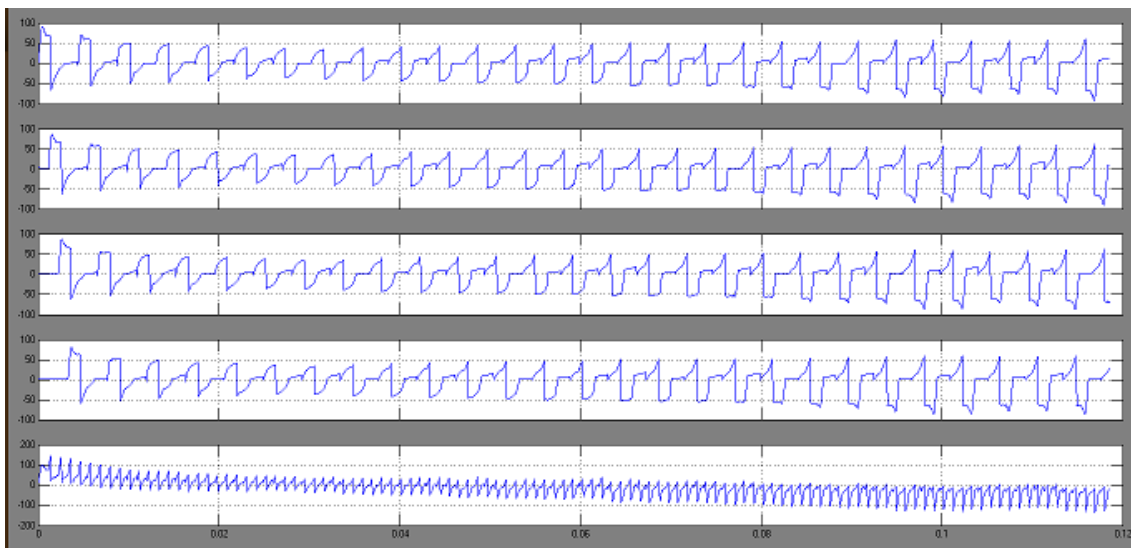


Рис. 3 – Зависимости мгновенных значений токов сети четырех фаз и результирующего тока сети при изменении среднего момента нагрузки от значения 60 Н·м до значения -60 Н·м при значении скорости  $240 + \Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega$  – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке  $\Delta\Omega < 10$ )

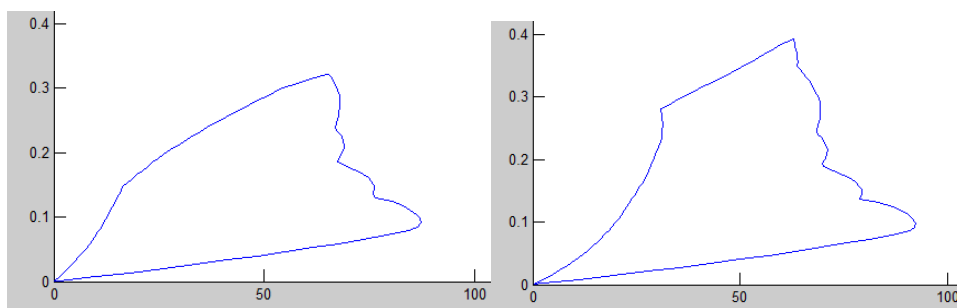


Рис. 4 – Зависимости потокоцепления от тока фазы за один цикл при разных значениях углов включения и отключения в режиме рекуперативного торможения (слева – 9,1/-11, справа – 17,5/-7)

**Анализ результатов эксперимента.** Рис.1 иллюстрирует переход вентильно-индукторного двигателя из режима двигателя при нагрузке 60 Н·м в режим рекуперативного торможения при нагрузке -60

Н·м. Время переходного процесса составило 0,12 с. За время переходного процесса угловая скорость возросла до значения 250 рад/с, погрешность регулирования составила 4 %. Значения начальных и конечных углов

включения и отключения соответствуют приведенным в таблице.

Из рис.2 видно, как изменяется форма кривых моментов отдельных фаз и результирующего момента в переходном процессе. Коэффициент пульсаций результирующего момента (отношение максимального момента к среднему) в конечной точке составил 1,5. Рис.3 иллюстрирует изменение токов сети от отдельных фаз и результирующий.

Рис. 4 показывает необходимость определения оптимальных углов включения и отключения. Основной эксперимент проведен для значений углов 9,1/-11. При этом получен момент -60 Н·м, коэффициент полезного действия составил 0,94. При значениях углов 17,5/-7 получен такой же момент, но коэффициент полезного действия уменьшился до значения 0,923, что можно объяснить ухудшением формы годографа рабочей точки на рис.4.

**Выводы.** Качественная работа вентильно-индукторного двигателя, предназначенного для привода транспортных средств, во всех его режимах, требует непрерывного изменения управляющих параметров. Для разработки законов изменения этих параметров необходимо проведение значительного числа экспериментов на модели с целью получения оптимальных законов управления.

#### Список литературы

1. Гулий М. В. Тормозной режим вентильно-реактивного двигателя. / И. Н. Радимов, В. В. Рышша, З. П. Процына. – Электротехника и Электромеханика, 2009, №1, с. 59–62..
2. Коломейцев, Л. Ф. Режимы работы тягового электропривода рудничного электровоза с трехфазным реактивным индукторным двигателем/ Л. Ф. Коломейцев, И. А. Прокопец, С. А. Пахомин и др. – Известия вузов. Электромеханика, 2002, №2, с. 18 – 22.
3. Галайко, Л.П. Моделирование режима рекуперативного тормо-

жения в имитационной модели вентильно-индукторно двигателя. / Л.П. Галайко// Электротехнічні і комп'ютерні системи. – 2017. Одеса. №25(101)..

4. Галайко, Л.П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах. / Л. П. Галайко. – Вестник НТУ «ХПИ», 48'2005, Харьков, 2005, с. 24–27.
5. Галайко, Л. П. Имитационное моделирование установившихся режимов работы вентильно-индукторного двигателя. / Л. П. Галайко. – Электротехніка і електромеханіка, 2005, №1, с. 24–26.
6. Галайко, Л. П. Вентильно-индукторный двигатель в тормозных режимах / Л. П. Галайко– Електромашинобудування та електрообладнання, «Техніка», 2004, №62, с. 109 –112.

#### References (transliterated)

1. Guliy, M. V., Radimov, I. N., Rimsha, V. V. ets. – “Brake mode of switched reluctance motor”. [Tormoznoy rezhim ventilno-reaktivnogo dvigatelya], *Electrotehnika i Electromekhanika*, (2009), №1, p. 59–62.
2. Kolomeitsev, L. F., Prokopets, I. A., Pakhomin, S. A. etc. – “Operation modes of a railway drive of a mine electric locomotive with a three-phase reluctance induction motor”, [Rezhimy raboty tyagovogo elektroprivoda rudnichnogo elektrovoza s trekhfaznim reaktivnim induktornim dvigatelem], (2002.), *Izvestiya vuzov. Electromekhanics*, №2., pp. 18–22.
3. Galayko, L.P. Modelirovanie rezhima rekuperativnogo tormzheniya v imitacionnoy modeli ventilno-induktornogo dvigatelya. [Modeling of the recuperative braking working mode in imitating model of the switched reluctance motor]. *Elektrotehnicheskie i komputernye sistemi*. [Elektrik and computer system]. Odesa. 2017. №25 (101).
4. Galayko, L. P. Imitatsionnoye modelirovaniye ventil'no – induktornogo dvigatelya v perekhodnikh rezhimakh. [Simulation of Switched Reluctance motor in transient conditions], *Vestnik NTU "HPI"*, 48'2005, Kharkiv, pp. 24–27.
5. Galayko, L. P. Imitatsionnoye modelirovaniye ustanovivshikhsya rezhimov raboti ventil'no-induktornogo dvigatelya [Simulation modeling of steady state Switched Reluctance motor], “*Elektrotehnika i Elektromekhanika*”, (2005), №1, p.24–26.
6. Galayko, L. P. Ventilno-induktorniy dvigatel v tormoznikh rezhimakh. [Switched reluctance motor in braking mode], *Electromashinobuduvannya ta elektroobladnyannya*, «Technika», (2004), №62, p 109 –112.

Поступила (received) 05.10.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Аналіз режиму рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя рудничного електровоза / Л. П. Галайко // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ «ХПИ», 2017. – № 34 (1256). – С. 38–41. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Аналіз режиму рекуперативного гальмування вентильно-індукторного двигуна копальневого електровоза / Л. П. Галайко // Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків : НТУ «ХПИ», 2017. – № 34 (1256). – С. 38–41. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.**

**Analysis of the recuperative braking working mode in imitating model of the switched reluctance motor / L. P. Galayko // NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 38–41. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-3944.**

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Галайко Лидія Петрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедри, г. Харьков; тел.: (0572) 670428; e-mail: [lidagalayko@gmail.com](mailto:lidagalayko@gmail.com).

**Галайко Лідія Петрівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри, г. Харків; тел.: (0572) 670428; e-mail: [lidagalayko@gmail.com](mailto:lidagalayko@gmail.com).

**Galayko Lidiya Petrivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department; tel.: (0572) 670428; e-mail: [lidagalayko@gmail.com](mailto:lidagalayko@gmail.com).