

*Л.П. ГАЛАЙКО*

## **ВЫБОР УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

В статье рассмотрен вопрос о выборе управляющих параметров для регулирования различных режимов работы вентильно-индукторного двигателя. Проведен анализ статей, изданных в течение 2005-2018 годов по вентильно-индукторным двигателям для различных приводов в Украине и за рубежом. Анализ показал, что имеется большое разнообразие в выборе управляющих параметров у разных авторов, а также у большинства авторов отсутствует анализ переходных процессов при использовании выбранных управляющих параметров. Автор статьи в предыдущих работах использовал фазовое регулирование для вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза мощностью 27 кВт и частотой вращения 1146 мин<sup>-1</sup>. С целью выбора оптимальных управляющих параметров в данной работе для указанного двигателя в качестве управляющего параметра выбрано ШИМ напряжения. Рассмотрены переходные процессы при изменении момента нагрузки в режиме двигателя, а также от режима двигателя к режиму рекуперативного торможения при постоянной частоте вращения с помощью разработанной модели двигателя для переходных режимов в программе Simulink. При переходе от режима двигателя к режиму рекуперативного торможения изменялись углы включения и отключения. Скажности импульсов в ШИМ определялись с помощью механических характеристик, 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, управляющие параметры, рекуперативное торможение, ШИМ напряжения.

*Л.П. ГАЛАЙКО*

## **ВИБІР КЕРУЮЧИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГУНА**

У статті розглянуто питання про вибір керуючих параметрів для регулювання різних режимів роботи вентильно-індукторного двигуна. Проведено аналіз статей, виданих протягом 2005-2018 років щодо вентильно-індукторних двигунів для різних застосувань в Україні і за кордоном. З аналізу випливає, що є велика різноманітність у виборі керуючих параметрів у різних авторів, а також у більшості авторів відсутній аналіз перехідних процесів при використанні обраних керуючих параметрів. Автор статті в попередніх роботах використовував фазове регулювання для вентильно-індукторного двигуна рудничного електровоза потужністю 27 кВт і частотою обертання 1146 хв<sup>-1</sup>. З метою вибору оптимальних керуючих параметрів в даній роботі для зазначеного двигуна в якості керуючого параметра вибрано ШІМ напруги. Розглянуто перехідні процеси при зміні моменту навантаження в режимі двигуна, а також від режиму двигуна до режиму рекуперативного гальмування при постійній частоті обертання за допомогою розробленої моделі двигуна для перехідних режимів в програмі Simulink. При переході від режиму двигуна до режиму рекуперативного гальмування змінювалися кути включення і відключення. Шпаруватості імпульсів в ШІМ визначалися за допомогою механічних характеристик, розрахованих на моделі двигуна для сталих режимів. Результати аналізу можуть бути використані при розробці програми для мікропроцесора контролера.

**Ключові слова:** модель, програма Simulink, механічні характеристики, керуючі параметри, рекуперативне гальмування, ШІМ напруги.

*L. P. GALAYKO*

## **THE CHOICE OF CONTROL PARAMETERS FOR REGULATING MODES OF OPERATION OF A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR**

The article discusses the choice of control parameters for regulating various modes of operation of a switched reluctance motor. The analysis of articles published during the 2005-2018 year a switched reluctance motors for various drives in Ukraine and abroad. The analysis showed that there is a great diversity in the choice of control parameters from different authors, and most authors do not have an analysis of transients when using selected control parameters. The author of the article in previous works used phase control for a switched reluctance motor of a mine electric locomotive with a capacity of 27 kW and a rotational speed of 1146 min<sup>-1</sup>. In order to select the optimal control parameters in this work for the specified engine, the PWM voltage was chosen as the control parameter. Transients are considered when changing the load torque in the engine mode, as well as from the engine mode to the recuperative braking mode at a constant rotation speed using the developed engine model for transients in the Simulink program of the Matlab software package. When switching from engine mode to recuperative braking, the on and off angles changed. The pulse duty rates in PWM were determined using mechanical characteristics calculated on the engine models for steady-state conditions. The results of the analysis can be used in the development of a program for the microprocessor controller.

**Keywords:** model, Simulink program, mechanical characteristics, control parameters, recuperative braking, PWM voltage.

**Введение.** Вентильно-индукторные двигатели (ВИД), за рубежом Switched Reluctance Motor находят все более широкое применение в различных областях техники. Главные достоинства двигателя: простота конструкции, низкая стоимость, надежность и возможность формирования средствами управления любой механической характеристики, что позволяет применять их для любых приводов. Однако, качественное функционирование этих приводов невозможно без специального программного продукта, реализуемого в высокопроизводительных контролерах.

При разработке программы один из вопросов, которые необходимо решить, является выбор управляющих параметров для разных режимов работы.

В работе [1] для ВИД стиральной машины мощностью 90 Вт проведено сравнение трех способов управления для поддержания постоянства скорости: 1) изменением углов включения и отключения  $\Theta_{on}$ ,  $\Theta_{of}$  (углов между полюсами статора и ротора, при которых происходит включение и отключение транзисторов, подающих питание на катушки фаз); 2) применением ШИМ напряжения; 3) релейным регулированием

ем тока (заданием  $I_{max}$ ,  $I_{min}$ ). Расчеты, проведенные при номинальной скорости для разных значений выходной мощности с помощью имитационной модели для установившихся режимов [2] показали, что технико-экономические показатели мало отличаются для разных управляющих параметров. Недостатком этой работы является отсутствие анализа переходных процессов из одного режима в другой.

В работах [3, 4] автора этой статьи приведены результаты моделирования переходных процессов в режиме рекуперативного торможения и при переходе из режима двигателя в режим рекуперативного торможения для ВИД рудничного электровоза мощностью 27 кВт и частотой вращения 1146 мин<sup>-1</sup> с использованием фазового регулирования. Для проведения моделирования были разработаны дополнительные субмодели для моделей двигателя в программе Simulink пакета программ Matlab для установившихся и переходных режимов [2,5]. В работе [3] рассмотрено два варианта способов изменения углов: непрерывное изменение углов по определенному закону и конечное приращение углов в определенные моменты времени. Первый способ предполагает бездатчиковое управление углами коммутации.

В работе [6] рассматривается ВИД для рудничного электровоза мощностью 7,5 кВт и номинальной скоростью 1100 мин<sup>-1</sup>. Углы включения и отключения фиксированы для режима двигателя и режима рекуперативного торможения. Для задания углов используется датчик положения ротора. При низких скоростях двигателя используется ограничение тока, при

высоких скоростях и в режиме рекуперативного торможения используется ШИМ напряжения. В работе отсутствует анализ переходного процесса при изменении момента нагрузки двигателя и при переходе в режим рекуперативного торможения.

В работе [7] рассматривается ВИД мощностью 35 кВт, скоростью 2000 мин<sup>-1</sup> для привода гибридного автомобиля. Для регулирования режимов используется ограничение тока. В этой работе также как в предыдущей отсутствует анализ переходных процессов.

**Цель работы.** Разработать законы изменения скважности импульсов для обеспечения постоянства скорости в режиме двигателя и при переходе из режима двигателя в режим рекуперативного торможения при фиксированных значениях углов в этих режимах для вентильно-индукторного двигателя с помощью имитационной модели в программе Simulink пакета программ Matlab.

**Описание эксперимента.** Для двигателя мощностью 27 кВт, частотой вращения 1146 мин<sup>-1</sup>, спроектированного для привода рудничного электровоза на базе двигателя постоянного тока, были рассчитаны статические механические характеристики в режиме двигателя и в режиме рекуперативного торможения при постоянных углах включения и отключения и при изменении скважности импульсов. С помощью этих характеристик определены скважности импульсов для моделирования переходных процессов и проведено моделирование. Значения средних значений моментов и скважностей импульсов занесено в таблицу 1, а результаты моделирования представлены на рис. 1–4.

Таблица 1 – Значения средних моментов для режима двигателя и режима рекуперативного торможения при изменении угловой скорости и скважности импульсов

Ω, рад/с	Режим двигателя Θ <sub>он</sub> =30 град, Θ <sub>оф</sub> =11град				Режим рекуперативного торможения Θ <sub>он</sub> =8 град, Θ <sub>оф</sub> =-11град			
	PV=0,4	PV=0,6	PV=0,8	PV=1	PV=0,4	PV=0,6	PV=0,8	PV=1
120	34,18	71,98	124,4	233,8	-14,63	-32,4	-77,81	-226,8
180	22,39	35,09	57,25	84,14	-9,693	-19,58	-37,3	-82,7
240	16,92	25,97	35,1	48,61	-7,314	-14,62	-26,65	-47,88

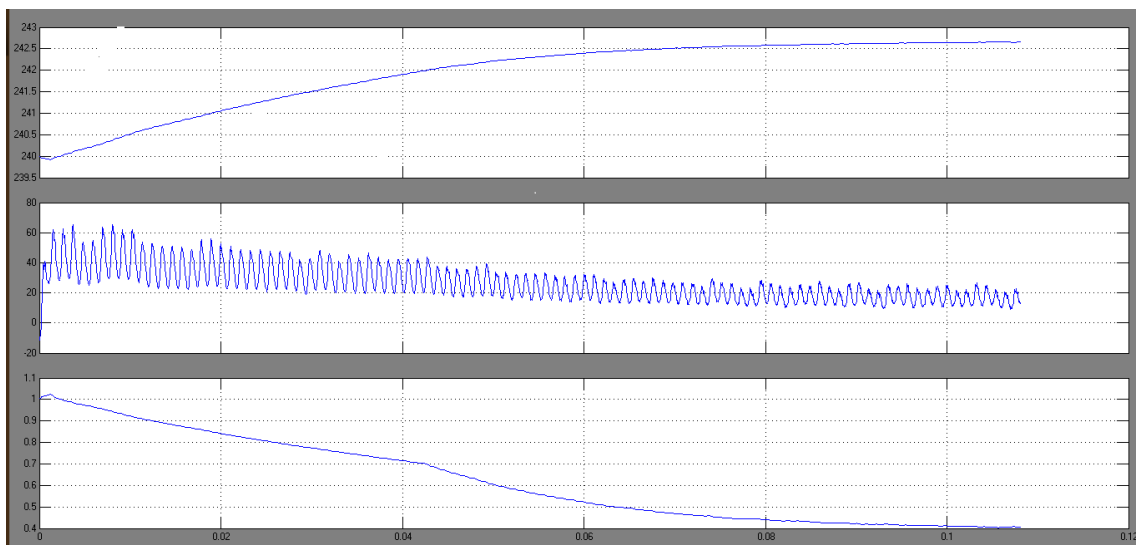


Рис. 1. Зависимости угловой скорости, мгновенного значения момента, скважности импульсов от времени при изменении момента нагрузки от значения 48,61 Н·м до значения 16,92 Н·м при значении скорости 240 + ΔΩ, где ΔΩ – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке ΔΩ < 10%)

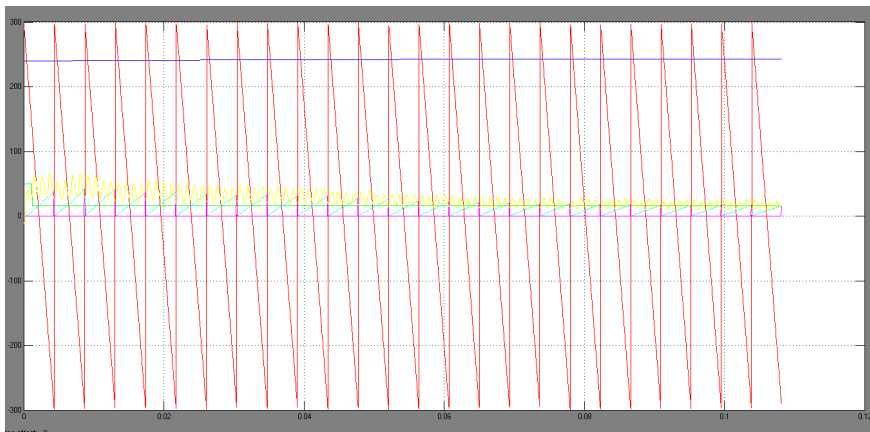


Рис. 2. Зависимости мгновенного и среднего значения результирующего момента, момента нагрузки, угла фазы А и угловой скорости от времени при изменении момента нагрузки от значения 48,61 Н·м до значения 16,92 Н·м при значении скорости  $240 + \Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega$  – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке  $\Delta\Omega < 10\%$ )

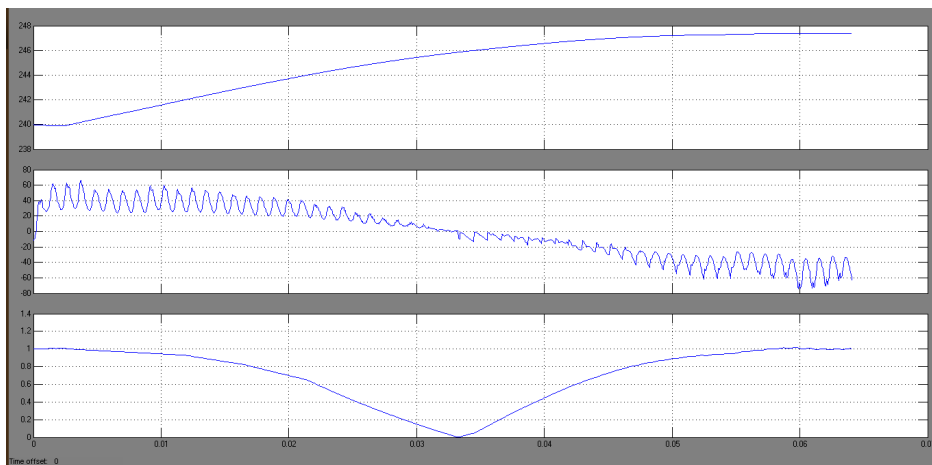


Рис.3. Зависимости угловой скорости, мгновенного значения момента, скважности импульсов от времени при изменении нагрузки от значения 48,61Н·м до значения -47,88 Н·м при значении скорости  $240 + \Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega$  – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке  $\Delta\Omega < 10\%$ )

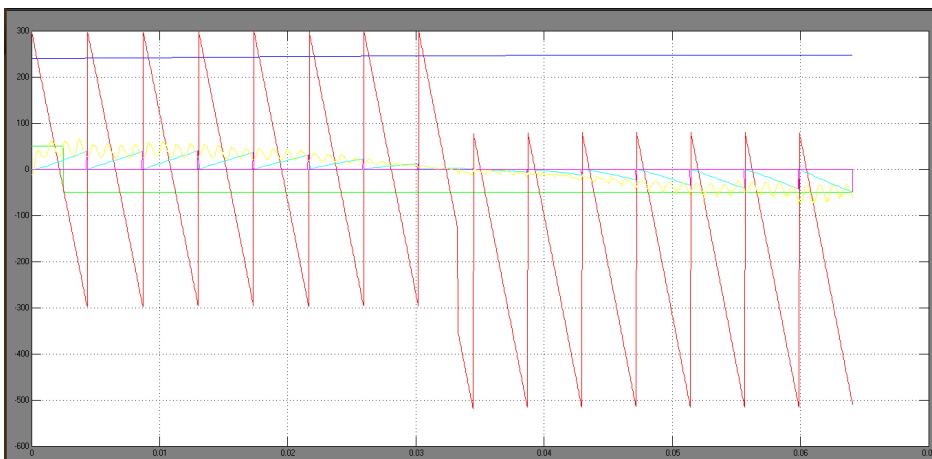


Рис. 4. Зависимости мгновенного и среднего значения результирующего момента, момента нагрузки, угла фазы А и угловой скорости от времени при изменении момента нагрузки от значения 48,61 Н·м до значения -47,88Н·м при значении скорости  $240 + \Delta\Omega$ , где  $\Delta\Omega$  – погрешность регулирования при поддержании постоянства скорости (на рисунке  $\Delta\Omega < 10\%$ )

**Анализ результатов эксперимента.** Рис. 1 иллюстрирует переход вентильно-индукторного двигателя в режиме двигателя от нагрузки 48,61Н·м до нагрузки 16,92 Н·м. За время переходного процесса угловая скорость возросла до значения 242,7 рад/с, погрешность регулирования составила 1,125 %. Значения начальных и конечных скважностей импульсов

соответствуют приведенным в таблице ( $PV_H=1$ ,  $PV_K=0,4$ ). Рис. 2 иллюстрирует предыдущий опыт. Он показывает, что в режиме двигателя угол включения остается постоянным, равным 30 град. Средний момент постепенно уменьшается и при  $t=0,108$  с становится равным моменту нагрузки 16,92 Н·м. Рис. 3 иллюстрирует переход из режима двигателя при нагруз-

ке 48,61Н·м в режим рекуперативного торможения при нагрузке -47,88 Н·м. За время переходного процесса угловая скорость возросла до значения 247,4 рад/с, погрешность регулирования составила 3,08 %. Значения начальных и конечных скажностей импульсов соответствуют приведенным в таблице ( $PV_n=1$ ,  $PV_k=1$ ). Рис. 4 иллюстрирует предыдущий опыт. Он показывает, что при переходе из режима двигателя в режим рекуперативного торможения угол включения изменяется скачком от значения 30 град до значения 8 град в момент времени, при котором равен нулю средний момент двигателя ( $t=0,033$  с). На рис. 3 в этот момент времени скажность равна нулю.

Выводы. Проведенное моделирование переходных процессов показало возможность качественной работы ВИД рудничного электровоза при выбранных управляющих параметрах и при разработанных законах изменения этих параметров. Для окончательного оптимального выбора управляющих параметров необходимо рассмотреть другие возможные варианты и провести сравнение по выбранным критериям.

#### Список литературы

1. Галайко, Л.П. Формирование механической характеристики вентильно-индукторного двигателя для стиральной машины малой мощности / Л.П.Галайко. – Материалы Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах». 24-28 сентября 2007 г. Севастополь 2007. С. 36-38.
2. Галайко, Л. П. Имитационное моделирование установившихся режимов работы вентильно-индукторного двигателя. / Л. П. Галайко. – Электротехника і електромеханіка, 2005, №1, с. 24–26.
3. Галайко, Л.П. Моделирование режима рекуперативного торможения в имитационной модели вентильно-индукторно двигателя. / Л.П. Галайко// Электротехнічні і комп'ютерні системи. – 2017. Одесса. №25(101). С.146-153.
4. Галайко, Л.П. Анализ режима рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза. / Л. П. Галайко. – Вестник НТУ «ХПИ», 34'2017, Харьков, 20017, с. 38-41.
5. Галайко, Л.П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах. / Л. П. Галайко. – Вестник НТУ «ХПИ», 48'2005, Харьков, 2005, с. 24–27.
6. H.Chen and G. Xie. Double 7.5-kW Three-Phase Switched Reluctance Motors Parallel Drive System for Electric Locomotive Traction. 978-1-4244-1833-6-08/\$25.00 ©2008 IEEE.
7. Minguao Ma. An Integrated Switched Reluctance Motor Drive Topology With Voltage-Boosting and On-Board Charging Capabilities for Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) / Minguao Ma, Zhongyi Chang, Yihua Hu, et al. IEEE Access, V.6, 2018, p. 1550-1559.

#### References (transliterated)

1. Galayko, L.P. Formirovanie mehanicheskoy harakteristiki ventilno-induktornogo dvigatelya dlya stiral'noy mashini maloy moshchnosti. [Formation of the mechanical characteristics of the Switched Reluctance motor for low power washer], (2007), *Materiali Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskyy konerentsii "Problemi vishenyja energoefektivnosti elektromkhanicheskikh preobrazovateley v elektroenergeticheskikh sistemakh"*. Sevastopol., pp. 36-38,. (In Russian).
2. Galayko, L. P. Imitatsionnoe modelirovanie ustanovivshixsya rezhimov raboti ventil'no-induktornogo dvigatelya [Simulation modeling of steady state Switched Reluctance motor], "Elektrotehnika i Elektromekhanika", (2005), №1, p.24–26.
3. Galayko, L.P. Modelirovanie rezhima rekuperativnogo tormozheniya v imitacionnoy modeli ventilno-induktornogo dvigatelya. [Modeling of the recuperative braking working mode in imitating model of the switched reluctance motor]. *Elektrotehnicheskie i komputernie sistemi*. [Elektrik and computer system]. Odesa. 2017. №25 (101)
4. Galayko, L. P. Analiz rezhima rekuperativnogo tormozheniya ventil'no – induktornogo dvigatelja rudnichnogo elektrovoza. [Analyse of the recuperative braking working mode of Switched Reluctance motor], *Vestnik NTU "HPI"*, 34'2017, Kharkiv, pp. 38-41.
5. Galayko, L. P. Imitatsionnoje modelirovanije ventil'no – induktornogo dvigatelja v perekhodnikh rezhimakh. [Simulation of Switched Reluctance motor in transient conditions], *Vestnik NTU "HPI"*, 48'2005, Kharkiv, pp. 24–27.
6. H.Chen and G. Xie. Double 7.5-kW Three-Phase Switched Reluctance Motors Parallel Drive System for Electric Locomotive Traction. 978-1-4244-1833-6-08/\$25.00 C 2008 IEEE.
7. Minguao Ma. An Integrated Switched Reluctance Motor Drive Topology With Voltage-Boosting and On-Board Charging Capabilities for Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) / Minguao Ma, Zhongyi Chang, Yihua Hu, et al. IEEE Access, V.6, 2018, p. 1550-1559.

Поступила (received) 05.10.2018

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

**Галайко Лідія Петрівна (Галайко Лидия Петровна, Galayko Lidiya Petrivna)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних машин, м. Харків, Україна; e-mail: lidagalayko@gmail.com.