

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Л. П. Галайко

Национальный технический университет (Харьковский политехнический институт)

Аннотация: Проведено моделирование рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза мощностью 27 кВт и частотой вращения 1146 мин⁻¹ с помощью имитационной модели для программы Simulink пакета программ Matlab. Значение управляющих параметров определялось из механических характеристик, полученных с помощью имитационной модели установившихся режимов. Приведены механические характеристики и графики процессов.

Ключевые слова: Вентильно-индукторный двигатель, режим постоянства скорости, механические характеристики, имитационная модель, управляющие параметры.

Введение.

Достижения в области силовой электроники и микропроцессорной техники обеспечивают в современных регулируемых приводах получение требуемых статических и динамических характеристик для разнообразных применений при использовании различных типов электромеханических преобразователей, в том числе и вентильно-индукторных машин (ВИМ). Заданные требования достигаются за счет применения все более сложных алгоритмов управления, реализуемых программно в высокопроизводительных микроконтроллерах. Быстродействие и вычислительные ресурсы микроконтроллеров растут, что фактически снимает ограничение на объем обрабатываемой информации и сложность алгоритмов управления.

Однако, как отмечается в работе [1], разработка таких сложных алгоритмов управления даже при совершенных технических средствах требует больших интеллектуальных затрат. Качественное функционирование ВИМ невозможно без специального программного продукта.

Одним из применений ВИМ, требующих сложных алгоритмов управления, является транспорт. О том, что трудности разработки сложных алгоритмов управления можно преодолеть, свидетельствуют сообщения различных зарубежных фирм о серийном выпуске ВИМ для различных видов транспорта [2]. О том, что эти трудности имеются, свидетельствуют сообщения специалистов из города Новочеркасска о том, что разработанный ими ВИД для

электропоезда НТИ-350 в 2000 году все еще проходит испытания на полигоне [3]. Включились в разработку ВИМ для тягового привода городского электротранспорта и специалисты из города Санкт-Петербурга [4], однако приведенные в статье расчетные кривые изменения фазного тока и момента вызывают сомнение в успешной эксплуатации этих разработок. Однако следует отметить, что именно специалисты этих городов России работают наиболее успешно по внедрению ВИД в различных областях техники [5].

Одним из наиболее проблемных режимов ВИМ на транспорте является режим рекуперативного торможения. Вопрос торможения ВИМ рассмотрен в работах [6,7]. В работе [6] рассмотрено весьма специфическое применение ВИМ для привода аппарата искусственной вентиляции легких, поэтому режим торможения для этого применения существенно отличается от режима рекуперативного торможения на транспорте. В работе [7] рассмотрен режим рекуперативного торможения ВИД для рудничного электровоза. Указан способ перехода в этот режим путем изменения углов включения и отключения Θ_{on} , Θ_{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 Θ_{on} для режима рекуперативного торможения через угол Θ_{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. Следует отметить отличие формы тока в

данной статье от формы тока в статьях автора данной статьи, что очевидно вызвано существенным отличием геометрии сердечника статора. В работе [7] применена геометрия, описанная в патенте США Сергея Коломейцева. Существенным недостатком этой работы является отсутствие анализа переходных процессов из одного режима в другой, так как именно анализ этих процессов позволит разработать хорошую программу для микропроцессора контроллера.

Вопросу анализа и моделирования переходных процессов в различных режимах работы ВИД, в том числе и в режиме рекуперативного торможения посвящены работы [8,9,10,11]. В работах [8,9] поставлена задача разработать дополнительные субмодели к основной модели для анализа переходных процессов ВИД [12]. К девяти субмоделям основной модели, составленным по уравнениям для переходных процессов ВИД, добавлены две субмодели. Одна из них задает законы изменения углов включения и отключения, другая определяет среднее значение момента двигателя на периоде и останавливает расчет при равенстве среднего значения момента двигателя и момента нагрузки. Для апробации модели проведены расчеты переходных процессов при изменении нагрузки для ВИД стиральной машины мощностью 90 Вт, в которых с помощью фазового регулирования обеспечивалось постоянство скорости. В работах [10,11] эта модель была использована для анализа переходных процессов в режиме рекуперативного торможения при постоянстве скорости для двигателя рудничного электроваза мощностью 27 кВт, частотой вращения 1215 мин^{-1} . Законы изменения углов включения и отключения определялись с помощью механических характеристик, приведенных в работе [13], рассчитанных при постоянных углах включения и отключения с помощью имитационной модели для установившихся процессов [14]. Эти механические характеристики приведены на рис.1. Расчеты показали возможность работы вентильно-индукторного двигателя в режиме рекуперативного торможения, в чем многие специалисты сомневаются. Однако для обеспечения этого режима необходима качественная программа для микропроцессора контроллера. Качественная программа должна обеспечить устойчивую работу двигателя при широком диапазоне изменения частоты вращения и при изменении режимов работы двигателя. Имитационная модель является хорошим тренажером для разработки такой программы. С помощью имитационной модели можно определить необходимые требования по быстродействию и точ-

ности системы управления, при выполнении которых обеспечиваются заданные тяговые и скоростные параметры двигателя, а его электрические параметры находятся в необходимых пределах.

Для обоснования заявления, что режим рекуперативного торможения является наиболее проблемным, проанализируем механические характеристики, приведенные на рис.1.

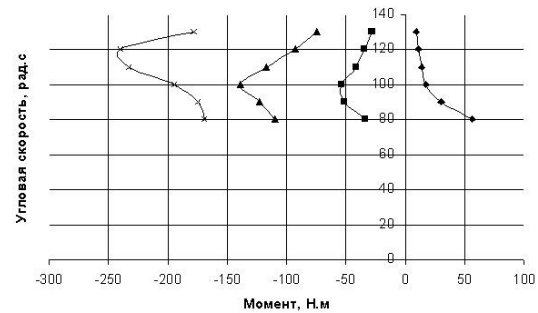


Рис.1. Механические характеристики ВИД

На рис.1 углы включения и отключения для приведенных кривых справа налево соответственно равны 20/1, 16/-3, 12/-7,8/-11. Изменение наклона характеристик при малых скоростях вызвано ограничением максимального значения тока. Как следует из рисунка, работа ВИД в тормозных режимах при постоянных параметрах управления практически невозможна. При значении скорости выше точки перегиба характеристики работа является неустойчивой. При увеличении внешнего вращающего момента скорость непрерывно растет, а тормозной момент двигателя уменьшается. При уменьшении внешнего момента скорость уменьшается, и рабочая точка перемещается на нижнюю часть кривой, которая с точки зрения устойчивости является более благоприятной. Однако в любом случае для работы с постоянной скоростью требуется изменение управляющих параметров, которое обеспечит переход с характеристики при одном значении параметра на характеристику при другом значении параметра.

1.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 с помощью имитационной модели в программе Simulink пакета программ Matlab.

2. Описание расчетного эксперимента

Исследования проведены на примере четырехфазного ВИД мощностью 27 кВт, частотой вращения 1215 мин⁻¹, спроектированного для привода рудничного электровоза на базе двигателя постоянного тока, который выпускается серийно. В качестве управляющих параметров

выбраны углы включения и отключения Θ_{on} , Θ_{off} , которые для режима постоянной скорости при скорости равной или выше номинальной являются основными управляющими параметрами, что отмечается в значительном количестве работ по исследованию ВИД. Законы изменения углов задаются в дополнительной субмодели, расположенной слева в основной модели (рис.2).

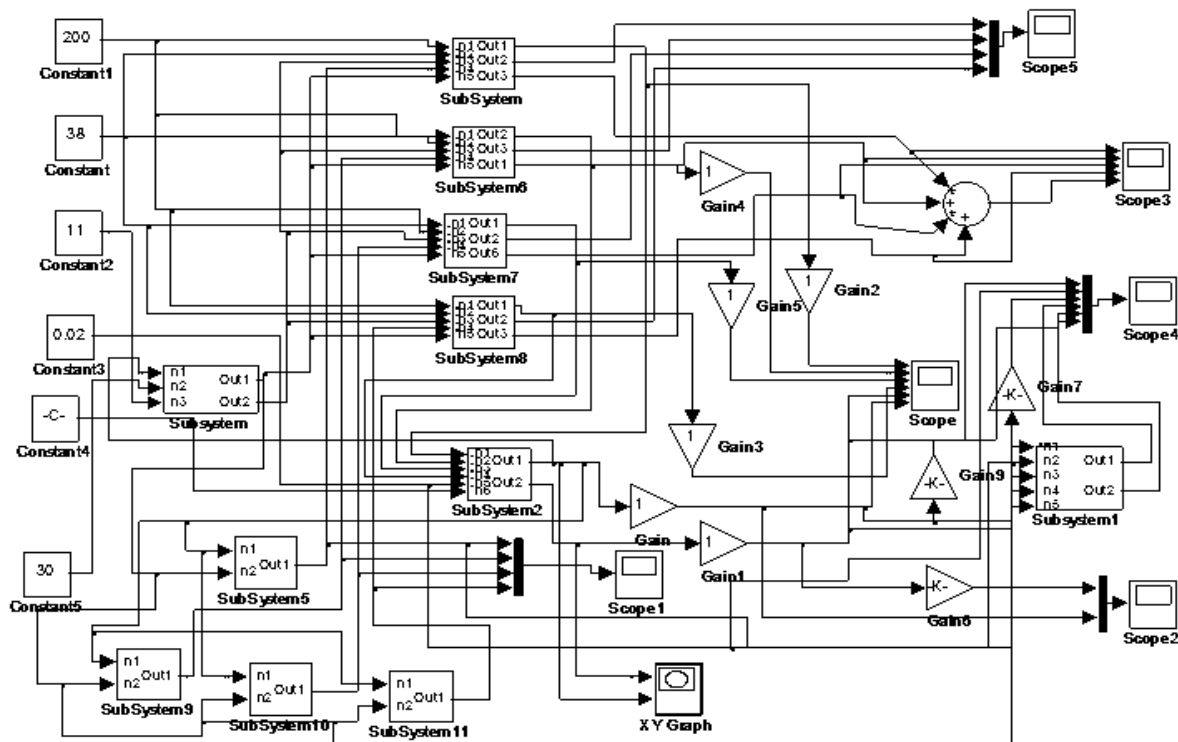


Рис.2. Модель четырехфазного ВИД

Вначале было проанализировано изменение скорости и момента двигателя при изменении внешнего момента скачком и отсутствии регулирования углов. Смотрите таблицу 1 и рис.3.

Таблица 1

Углы регулирования const $\Theta_{on}=10$, $\Theta_{off}=-9$

№	J , кг.с ²	M_{le} , Н.м	M_{me} , Н.м	Ω_e , рад/с
1	0.4	-180	-105	134
2	0.4	-240	-80	150
3	0.8	-180	-120	126
4	0.8	-240	-110	133

В таблице приняты обозначения M_{le} , M_{me} , Ω_e значения внешнего момента, момента двигателя и угловой скорости через 0.1 с после изменения внешнего момента. Начальные значения этих величин соответственно равны $M_{lb} = -140$ Н.м, $M_{mb} = -140$ Н.м, $\Omega_b = 120$ рад/с.

Как видно из таблицы, даже за короткий промежуток времени скорость существенно увеличилась, а момент двигателя уменьшился и, следовательно, небаланс моментов возрос (вариант 2).

Эти явления можно также наблюдать на рис.3, где представлены графики изменения этих величин в конце переходного процесса при постоянных значениях углов (угол Θ_{on} равен верхнему значению угла Θ для фазы А и составляет 10 градусов). При увеличении момента инерции и уменьшении скачка внешнего момента эти явления становятся не столь значительными.

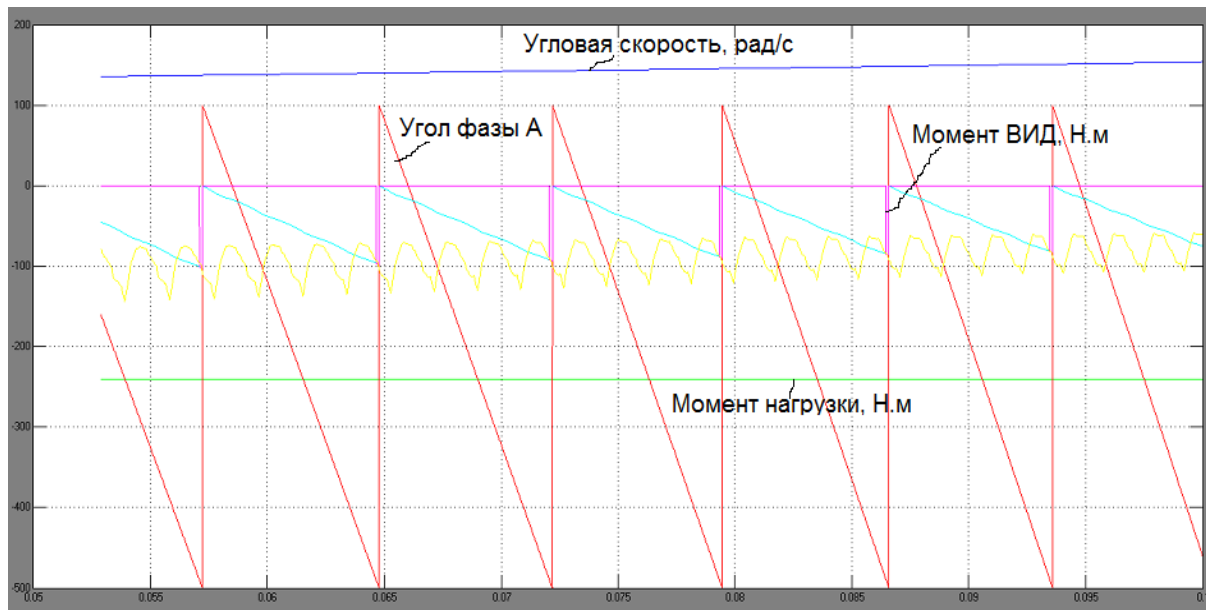


Рис.3. Зависимости угловой скорости, момента нагрузки, момента двигателя и угла фазы А в конце переходного процесса для 2 варианта в таблице 1.

Далее рассматривались два варианта способов изменения углов. Первый вариант: задавалось непрерывное изменение углов по определенному закону. Второй вариант: задавалось конечное приращение углов включения и углов отключения в определенные моменты времени.

Рассмотрим результаты опытов для первого варианта. Проведено три опыта. В первом опыте внешний момент скачком увеличивался от значения -140 Н.м до значения -240 Н.м.

Во втором опыте внешний момент скачком уменьшался от значения -240 Н.м до значения -140 Н.м. В третьем опыте машина скачком переходит из двигательного режима с моментом 225 Н.м в генераторный режим с моментом -140 Н.м.

Во всех опытах поддерживалась скорость, равная 120 рад/с. Момент инерции был принят равным 0.4 кг.с². Результаты расчетов представлены на рис.4–7.

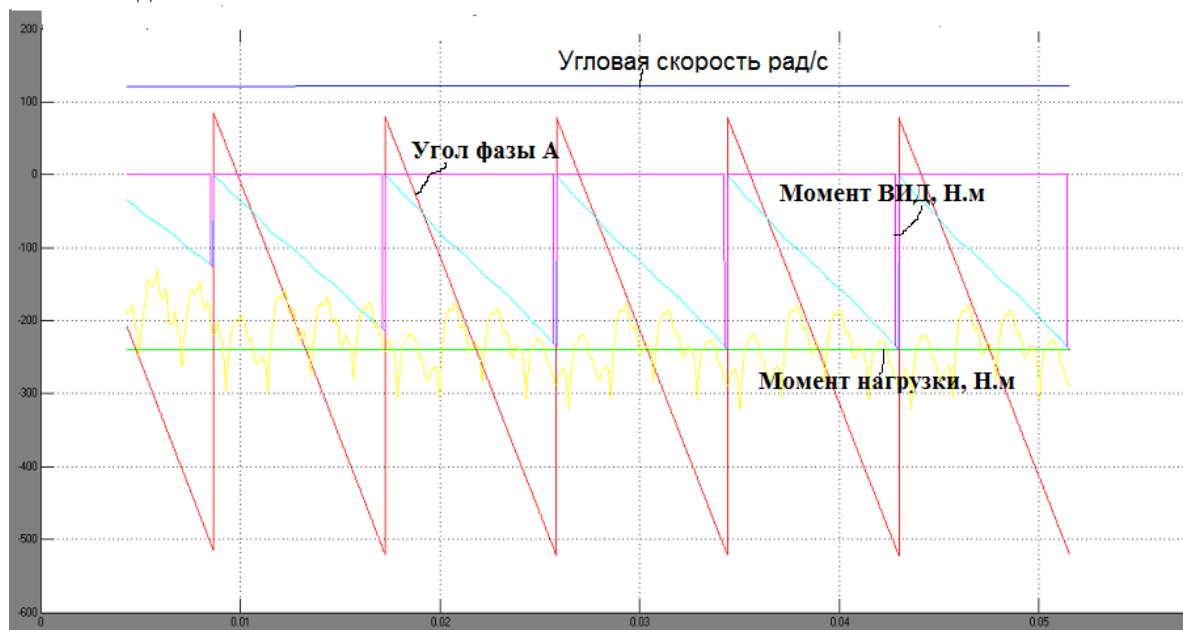


Рис.4. Зависимости угловой скорости, момента двигателя, внешнего момента и угла фазы А от времени в конце переходного процесса (опыт 1, первый способ изменения углов).

Результаты первого опыта: время переходного процесса $\Delta t = 0.052$ с. Угловая скорость в

конце процесса 122.2 рад/с, отклонение от заданной скорости 120 рад/с 1.8%.

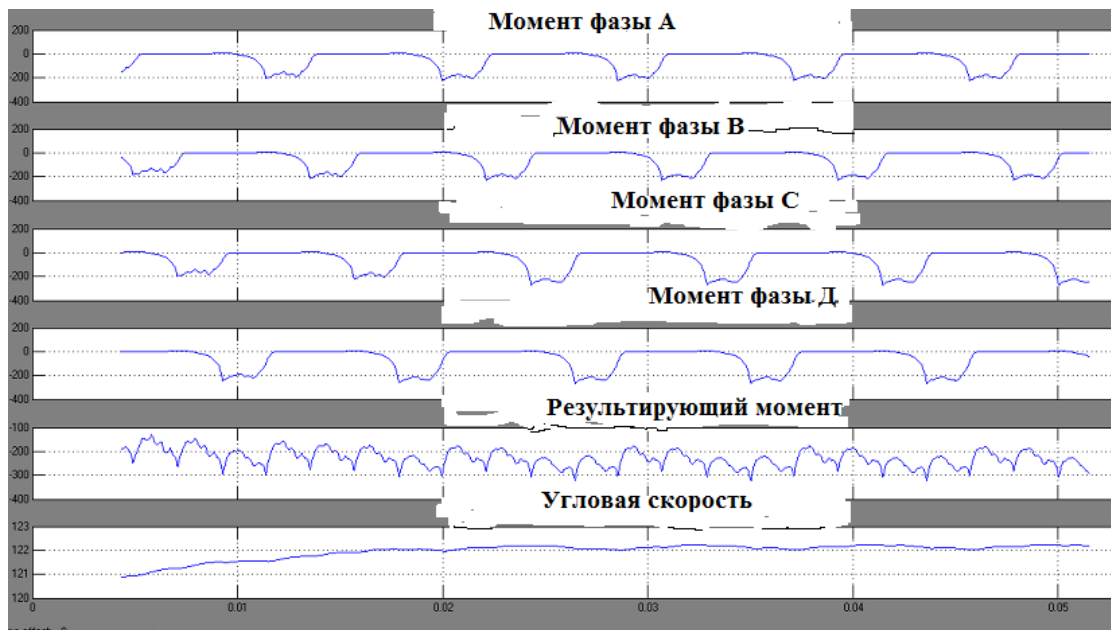


Рис.5. Зависимости моментов фаз А, В, С, Д, результирующего момента и угловой скорости от времени для первого опыта и первого варианта способа изменения углов.

С помощью рис.5 можно точно определить максимальное значение скорости 122.2 рад/с, а также коэффициент пульсаций результирующего

момента (отношение максимального значения момента к среднему значению момента), который в данном случае равен 1.25 (-300/-240).

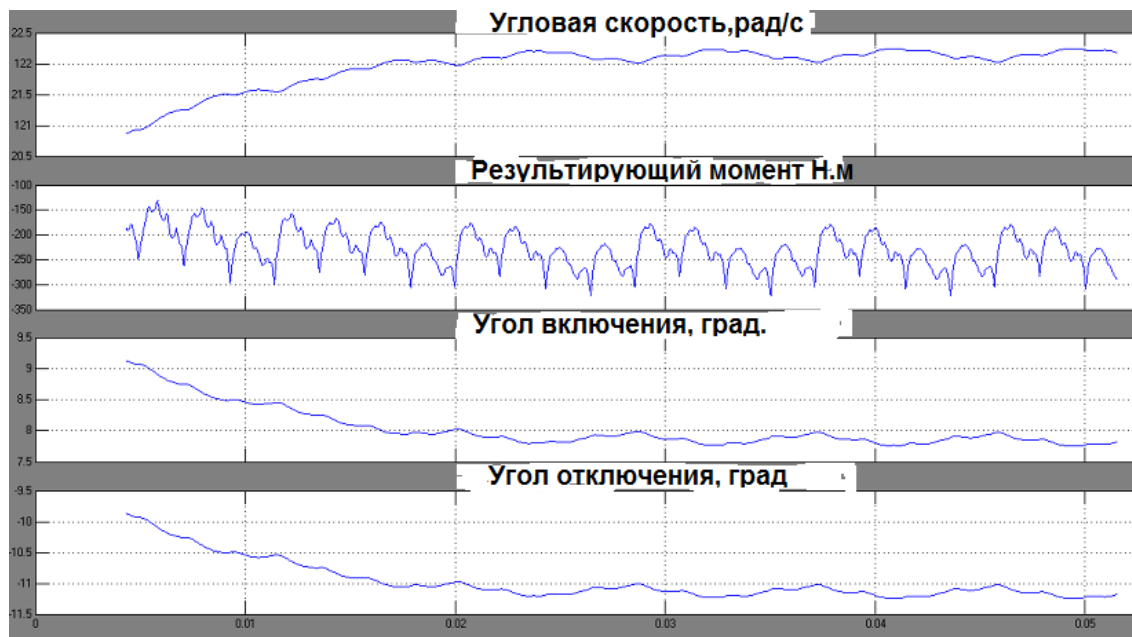


Рис.6. Зависимости угловой скорости, результирующего момента, угла включения Θ_{on} и угла отключения Θ_{off} от времени для первого опыта и первого варианта способа изменения углов.

Представляет интерес сравнить полученные значения углов включения и отключения в начале процесса и в конце процесса с их значениями на механических характеристиках (рис.1) для заданных значений момента. На рис.1 в начале процесса $\Theta_{on} / \Theta_{off} = 10/-9$, в конце $\Theta_{on} / \Theta_{off} = 8/-$

11. На рис.6 в конце переходного процесса $\Theta_{on} / \Theta_{off} = 7.8 / -11.2$. Как видим, достаточно близкое совпадение.

Во втором опыте при уменьшении момента от -240 Н.м до -140 Н.м в конце процесса было получено угловая скорость 118.2 рад/с, что на

1.5% меньше исходного значения 120 рад/с. Наименьшая точность расчета получена при значительном изменении внешнего момента от 225 Н.м (режим двигателя) до -140 Н.м (режим тормоза). Конечное значение скорости составило 136.6 рад/с, что на 13.8% больше исходного. Для второго способа регулирования углов включения и отключения скачком результаты получены несколько хуже: для первого и второго опыта погрешность составила 3.75 %, для третьего 15.8 %. В тоже время второй способ обладает преимуществом по сравнению с первым, так как он может использоваться при наличии датчика положения ротора. Первый способ предполагает бездатчиковое управление углами коммутации фаз, применение которого значительно усложняет систему управления.

Выводы

1. Проведенные расчеты с помощью разработанной имитационной модели для программы Simulink пакета программ Matlab подтвердили необходимость изменения управляющих параметров в режиме рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя.

2. Для изменения управляющих параметров при наличии в вентильно-индукторном приводе датчика положения ротора рекомендуется конечное приращение углов включения и углов отключения в определенные моменты времени.

3. Для изменения управляющих параметров в вентильно-индукторном приводе без датчика положения ротора рекомендуется непрерывное изменение углов по определенному закону.

4. Рекомендуется для задания управляющих параметров использовать механические характеристики, полученные с помощью имитационной модели для установившихся режимов.

5. Требуется дальнейшее совершенствование законов регулирования для уменьшения погрешности для получения заданного режима.

Список использованной литературы.

1. Семенчук, В. А. Техничко-економічні аспекти створення контролерів для вентильно-індукторного електропривода на основі процесора Intel 8xC196МН. [Текст] / В. А. Семенчук. – Електричність, №5, 2000, с. 41 – 44.
2. Птах, Г. К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт. [Текст] / Г. К. Птах. – Електротехніка: мережовий електронний науковий журнал, 2015, т.2, №3, с.23–33.

3. Коломейцев, Л. Ф. Применение реактивных индукторных машин на транспорте. [Текст] /Л. Ф. Коломейцев, В. И. Бибилов, С. А. Пахомин, Г.В.Коломейцев. – Известия вузов. Электромеханика, 2008, №1, с. 69–72.

4. Антипов, В. Н. Исследование характеристик базовых вентильно-индукторных электродвигателей тягового привода городского электротранспорта. [Текст] /В. Н. Антипов, Ф. Д. Грозов, А. В. Иванова. – «Электричество», 2016, №10, с. 45–51.

5. Никифоров, Б. В. Создание корабельных систем электродвижения с вентильно-индукторным электроприводом. [Текст] /Б. В. Никифоров, А. П. Тимирев, О. Е. Лозицкий. – Известия вузов. Электромеханика, 2007, №4, с. 62–66.

6. Гулый, М. В. Тормозной режим вентильно-реактивного двигателя. [Текст] / И. Н. Радимов, В. В. Рымша, З. П. Процына. – Електротехніка і електромеханіка, 2009, №1, с. 59–62.

7. Коломейцев, Л. Ф. Режимы работы тягового электропривода рудничного электровоза с трехфазным реактивным индукторным двигателем. [Текст] / Л. Ф. Коломейцев, И. А. Прокопец, С. А. Пахомин и др. – Известия вузов. Электромеханика, 2002, №2, с. 18 – 22.

8. Галайко, Л. П. Имитационное моделирование динамических характеристик вентильно-индукторного двигателя стиральной машины. [Текст] / Л. П. Галайко. – Вестник НТУ «ХПИ», 55'2010, Харьков, 2010, с. 9–12.

9. Galayko, L. P. Analysis different dynamic modes in simulation model of switched reluctance motor. [Text] – ICEEE-2010. 13 International Conference on Elektromechanics, Electrotechology, Electromaterials and Components, September 19–25, 2010, Alushta, Crimea, Ukraine, p.96.

10. Галайко, Л. П. Имитационное моделирование режима рекуперативного торможения вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза. [Текст] / Л. П. Галайко – Вестник НТУ «ХПИ» 60'2011, Харьков, 2011, с. 54–58.

11. Галайко, Л. П. Анализ режима рекуперативного торможения в имитационной модели вентильно-индукторного двигателя. [Текст] / Л. П. Галайко – Труды XIV Международной конференции « Электромеханика, Електротехнології, Електротехнічні матеріали і Компоненти», 23 – 29 вересня 2012, Крим, Алушта, с. 144 – 146.

12. Галайко, Л. П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в пере

ходных режимах. [Текст] / Л. П. Галайко. – Вестник НТУ «ХПИ», 48'2005, Харьков, 2005, с. 24–27.

13. Галайко, Л. П. Вентильно-индукторный двигатель в тормозных режимах. [Текст] / Галайко, Л. П. – Електромашинобудування та електрообладнання, «Техніка», 2004, №62, с. 109 – 112.

14. Галайко, Л. П. Имитационное моделирование установившихся режимов работы вентильно-индукторного двигателя. [Текст] / Л. П. Галайко. – Електротехніка і електромеханіка, 2005, №1, с. 24–26.

References

1. Semenchuk, V. A. – “Tehnikal and economic aspects creation of controllers for switched reluctance drive based on the processor Intel 8xC196MH” [Tekhniko-ekonomicheskie aspekty sozdaniya kontrollerov dlja ventilno-induktorного электропривода na osnove protsessora Intel 8xC196MH], Elektrichestvo, №5, (2000), p.42 – 44.

2. Ptakh, G. K. – “Switched Reluctance Drive of middle and large power : foreign and home experience.” [Ventilno-induktorный электропривод sredney I bolshoy moshnosti: zarubezhniy i otechestveniy opit], Electrotehnika: network electronic scientific magazine, (2015), т.2, №3, p.23–33.

3. Kolomeitsev, L. F., Bibikov, V. I., Pakhomin, S. A. etc. – “Aplication switched reluctance drive on transport” [Primenenie reaktivnikh induktornikh mashin na transporte], Izv. Vuzov. Electromechanics, (2008), №1, p.69–72.

4. Antipov, V. N., Grozov, A. D., Ivanova, A. V. – “Reseach the harakteristics of switched reluctance machine for traction drives of urban electric vehicles” [Isledovanie kharakteristik bazovikh ventilno-induktorных elektrodvigatelay tyagovogo privoda gorodskogo elektrotransporta], Elektrichestvo, №10, (2016), p.45–51.

5. Nikiforov, B. V., Timirev, A. P., Lozickiy, O. E. – “Creation of the ship systems of electro-motion with ventilno-induktorный электропривод” [Sozdanie korabelnikh system elektrodvizheniya s ventilno-induktorным электроприводом], Izv. vuzov. Elektromekhanics, (2007), №4, p. 62–66.

6. Guliy, M. V., Radimov, I. N., Rimsha, V. V. ets. – “Brake mode of switched reluctance motor”. [Tormoznoy rezhim ventilno-reaktivного dvigatelya], Electrotehnika i Electromekhanika, (2009), №1, p. 59–62.

7 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 rudnichного elektrovoza s trekhfaznim reaktivnim induktornim dvigatelem], (2002.), Izvestiya vuzov. Electromekhanics”, № 2., pp. 18–22.

8. Galayko, L. P. – “Simulation modeling of dynamic characteristics of switched reluctance machine of washing engine”, [Imitatsionnoe modelirovanie dinamicheskikh kharakteristik ventilno-induktorного dvigatelya stiralnoy mashini], Vestnik NTU “KHPI”, 55'2010, Kharkov, (2010), p. 9–12.

9. Galayko, L. P. – “Analysis different dynamic modes in simulation model of switched reluctance motor” ICEEE-2010. 13 International Conference on Elektromechanics, Electrotechology, Electromaterials and Components, September 19–25, (2010), Alushta, Crimea, Ukraine, p.96.

10. Galayko, L. P. – “Simulation modeling of braking mode of switched reluctance motor of a mine electric locomotive”, [Imitatsionnoe modelirovanie rezhima rekuperativного tormozheniya ventilno-induktorного dvigatelya rudnichного elektrovoza], Vestnik NTU “KHPI”, 60'2011, Kharkov, (2011), p. 54–58.

11. Galayko, L. P. – “Analysis of braking mode in simulation model of switched reluctance motor”, [Analiz rezhima rekuperativного tormozheniya v imitatsionnoy modeli ventilno-induktorного dvigatelya], ICEEE-2012. 14 International Conference on Elektromechanics, Electrotechology, Electromaterials and Components, September 23-29, (2012), Alushta, Crimea, Ukraine, p.144–146.

12. Galayko, L. P. – “Simulation of Switched Reluctance motor in transient conditions”, [Imitatsionnoye modelirovaniye ventil'no-induktorного dvigatel'ja v perekhodnikh rezhimakh], Vestnik NTU "HPI", 48'2005, Kharkiv, pp. 24–27.

13. Galayko, L. P – “ Switched reluctance motor in braking mode”, [Ventilno-induktorный dvigatel v tormoznikh rezhimakh], Electromashinobuduvanya ta elektroobladnyanya, «Техніка», (2004), №62, p 109 –112.

14. Galayko, L. P. – “Simulation modeling of steady state Switched Reluctance motor”, [Imitatsionnoe modelirovanie ustanovivshikhsya rezhimov raboti ventil'no-induktorного dvigatelya.], “Elektrotehnika i Elektromekhanika”, (2005), №1, p.24–26.

MODELLING OF THE RECUPERATIVE BRAKING WORKING MODE IN IMITATING MODEL OF THE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

L.P. Galayko

National technical university (Kharkov polytechnic institute)

Abstract. One of applications SRM, requiring the difficult algorithms of management, there is a transport. One of the most problem modes SRM on a transport is mode of the braking. 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 for SRM by means of simulation model in the program Simulink package of softwares of Matlab. Studies are undertaken on example fourphase SRM by power 27 kW, by frequency of rotation of $1215 \text{ x} \text{s}^{-1}$, mine electric locomotive projected for a drive on the base of engine of direct-current. As managing parameters the corners of including and disconnecting are chosen. Two variants of methods of change of corners were examined: continuous change of corners on a certain law and eventual increase of corners in certain moments of time. The conducted calculations confirmed the necessity of change of managing parameters for the mode of the braking of SRM. For the change of managing parameters at presence of in the SRM sensor of position of rotor the eventual increase of corners of including and corners of disconnecting is recommended in certain moments of time. For the change of managing parameters in a SRM without the sensor of position of rotor the continuous change of corners is recommended on a certain law. It is recommended for the task of managing parameters to use the mechanical descriptions got by means of simulation model for the set modes. Further perfection of adjusting laws is required for reduction of error in the receipt of set.

Key words: SRM (Switched Reluctance Motor), mode of constancy of speed, mechanical descriptions, simulation model, managing parameters.

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ В ІМІТАЦІЙНІЙ МОДЕЛІ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА

Л. П. Галайко

Національний технічний університет (Харківський політехнічний інститут)

Анотація: Проведено моделювання рекуперативного гальмування вентильно-індукторного двигуна копальневого електровоза потужністю 27 кВт і частотою обертання $1146 \text{ x} \text{s}^{-1}$ в режимі постійності швидкості за допомогою імітаційної моделі для програми Simulink пакету програм Matlab. Наближене значення параметрів, що управляють, визначалося з механічних характеристик, отриманих за допомогою імітаційної моделі режимів, що встановилися. Приведені механічні характеристики і графіки перехідних процесів.

Ключові слова: Вентильно-індукторний двигун, режим постійності швидкості, механічні характеристики, імітаційна модель, керуючі параметри.

Получено 11.05.2017



Галайко Лидія Петровна, кандидат технических наук, доцент Національного технічного університету (Харківського політехнічного інститута). Кирпичева, 2, Харків, Україна, E-mail: lidagalayko@gmail.com, тел. +38-057-707-68-44

Lidiya Galayko, PhD, Associate Professor, National technical university (Kharkov polytechnic institute), Kirpicheva st. 2, Kharkov, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-0315-477X