

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ*

А.М. Журавлев, Е.В. Белоусов, Д.А. Сычев, С.И. Кинас

Рассмотрена математическая модель электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (СРДНВ). Модель состоит из нескольких блоков: электромеханического преобразователя, который описан методом конечных элементов, электрического преобразователя, представленного в виде непрерывных звеньев. Обращается внимание на допущения, принятые при синтезе обобщенной математической модели. Сопоставлены расчетные данные модели со значениями, полученными на основании традиционных электрических схем замещения. Представлены результаты моделирования и экспериментального исследования на лабораторных образцах электроприводов с СРДНВ.

Ключевые слова: математическая модель, электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения, метод конечных элементов.

Сегодня в силу высокого развития силовой полупроводниковой преобразовательной техники наиболее распространенным в промышленном применении является частотно-регулируемый асинхронный электропривод. Однако современные технологии производства постоянно повышают требования по быстродействию, перегрузочной способности и надежности систем электроприводов. В этой связи уместно рассмотреть и другие варианты исполнения электромеханических преобразователей.

Лучше всего вышеуказанным требованиям отвечает синхронная реактивная машина независимого возбуждения СРМНВ (*Field regulated reluctance machine*). Применяя новые подходы к управлению приводом [1, 2], можно достичь существенных результатов. Так, компания АВВ сегодня выпускает линейку электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения. По данным компании, инженерам удалось разработать привод, у которого масса-габаритные показатели на 40 % лучше по сравнению с АД. Кроме того, отсутствие обмоток на роторе СРМНВ улучшает энергетические показатели машины.

Моделирование процессов в электроприводе с СРМНВ производилось нами в конечно-элементной системе *ANSYS Maxwell*. Отличительной особенностью данного продукта является возможность его работы в связке с программой *ANSYS Simplorer*, где моделируется силовая часть электропривода и система управления, что позволяет учитывать работу электрической машины от преобразователя частоты. Разработанная модель позволяет учесть также нелинейность кривой намагничивания стали, из которой выполнена машина, насыщение источников питания, краевые эффекты.

Конечно-элементная модель электрической машины, разработанная в программном продукте *ANSYS Maxwell*, интегрируется в модель системы управления, расчет обеих моделей происходит одновременно (рис. 1). Питание машины производится от шести независимых источников тока ИТ1...ИТ6, сигнал управления на которые приходит с узла формирования фазных токов УФФТ. Амплитуда этого сигнала зависит от выхода регулятора скорости РС, а частота переключения – от скорости вращения ротора, текущее положение которого фиксируется датчиком положения ДП. Кроме того, модель позволяет имитировать статическую нагрузку на валу и варьировать момент инерции ротора.

Синтез структуры управления в установившихся режимах сводится к оптимизации зоны коммутации тока посредством корректировки угла поворота ротора [3–5]. Дело в том, что для обеспечения наилучших энергетических показателей, необходимо, чтобы машина работала на максимуме угловой характеристики [6–8]. При увеличении скорости из-за инерционности источников тока этот максимум будет смещаться. Корректирующий угол подбирается таким образом, чтобы среднеквадратичный фазный ток за период был минимальным.

Наилучшие энергетические показатели удалось получить в шестифазном электроприводе с трапецеидальной формой фазного тока [9, 10]. В этом случае при постоянстве момента статической нагрузки привод потребляет наименьший ток из сети. На рис. 2 представлен сравнительный анализ различных форм фазного тока и различного числа фаз питания машины.

Наиболее приемлемым, с нашей точки зрения, является число фаз, равное 6. При увеличении

* Работа выполнена в рамках реализации хоздоговорной темы № 13411.1007499.09.078 от 19 ноября 2013 г. «Разработка электрического привода и блока дистанционного управления, контроля положения и работоспособности для арматуры судовой вентиляции с использованием современных типов приводов, датчиков и сигнализаторов».

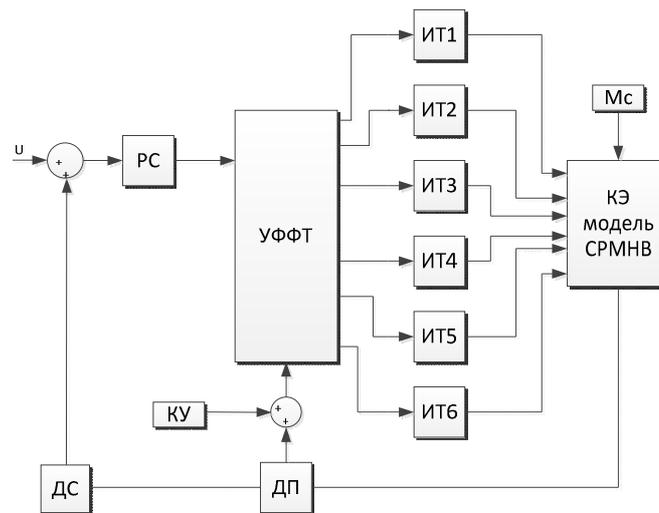


Рис. 1. Функциональная схема модели Simpler

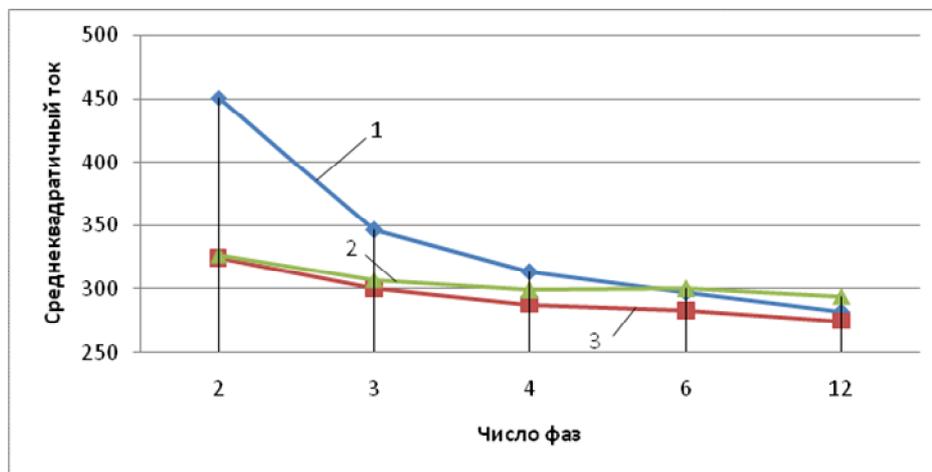


Рис. 2. Сравнительный анализ форм фазного тока машины: 1 – кривая для прямоугольной формы тока; 2 – кривая для синусоидальной формы тока; 3 – кривая для трапецидальной формы тока

числа фаз схема значительно усложняется. При меньшем числе фаз увеличиваются коммутационные пульсации момента и нагрев машины. Переход к нетрадиционной форме фазного тока, возможность высокой перегрузочной способности машины, ее количественная оценка также делают актуальным тепловой расчет электродвигателя.

Основным источником выделения тепла в СРМНВ являются обмотки с током, однако следует учитывать добавочные потери на гистерезис и вихревые токи, обусловленные высшими гармониками МДС статора и зубцовыми пульсациями. Дополнительно нагрев происходит из-за механических потерь, например, трения в подшипниках двигателя.

Количественную оценку этих потерь можно получить в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Преимуществом такого подхода является получение картины распределения тепла в машине, что позволяет выявить местный перегрев отдельных частей двигателя.

На первом этапе теплового исследования необходимо было верифицировать конечно-элементную модель. Для этого проводился следующий эксперимент. Ротор машины затормаживался, а по обмоткам пропускался гладкий постоянный ток, другими словами, оценивались только активные потери. После расчета в конечно-элементной системе ANSYS Maxwell эти потери экспортировались в тепловую конечно-элементную модель ANSYS Transient-thermal. В принятой математической модели учитывался лучистый и конвективный теплообмен между обмоткой и магнитопроводом.

Создана трехмерная тепловая модель СРМНВ с учетом только активных потерь в меди. Как и ожидалось, наиболее горячей получается обмотка, которая выделяет тепло по большей части в статор. Ротор же при этом нагревается гораздо меньше. Для корректности расчета результаты моделирования проверялись на лабораторном образце СРДНВ, выполненном в корпусе асинхронного

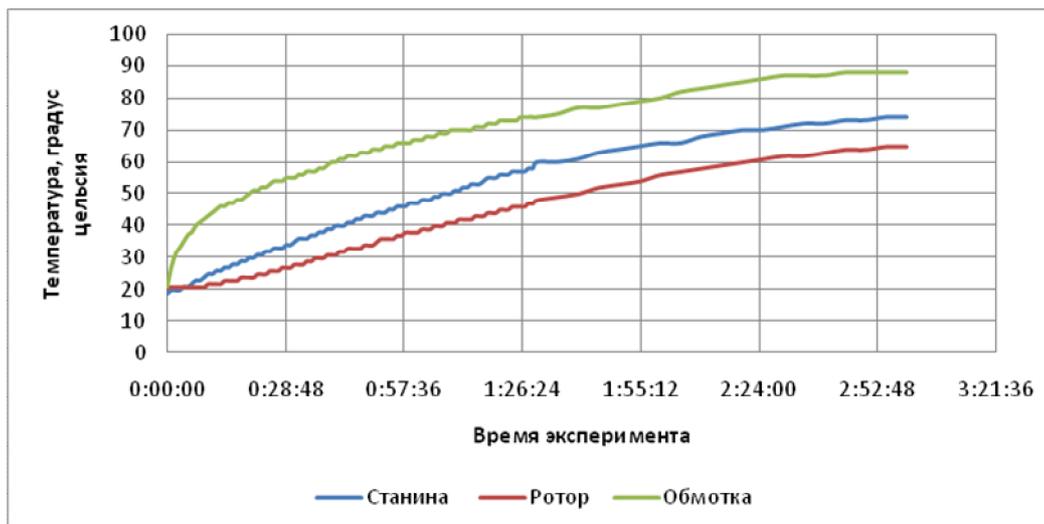


Рис. 3. Результаты натурного эксперимента: 1 – температура станины; 2 – температура ротора; 3 – температура обмотки

двигателя 4A100L4. На рис. 3 приведены результаты эксперимента.

При работе СРМНВ от преобразователя важно также учесть магнитные потери, вызванные коммутацией токов.

Наибольшие потери выделяются в «набегающем» крае полюса за счет коммутации токов. Потери в зубцовой зоне обусловлены перемагничиванием. Важно отметить, что для получения корректных результатов моделирование необходимо производить с шагом порядка 1 мс. Постоянная времени нагрева машины при этом составляет не менее 2 часов (см. рис. 3). Наиболее точным решением в случае, когда нет необходимости учитывать самовентиляцию, является усреднение потерь за несколько периодов коммутации и их дальнейший экспорт в стационарную трехмерную тепловую модель.

На последнем этапе производилась оптимизация формы и габаритных размеров рифлений ротора в трехмерной модели, что позволило снизить нагрев машины на 5 %.

Таким образом, можно сделать вывод, что в СРДНВ за счет «холодного» шихтованного ротора и оптимизированной формы рифлений можно увеличивать линейную нагрузку в среднем на 15 % по сравнению с АД тех же габаритных размеров, что не приведет к перегреву машины.

Литература

1. Смирнов, Ю.С. Информационное обеспечение электромехатронных преобразователей / Ю.С. Смирнов, А.Н. Лысов, П.Б. Серебряков // Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». – 2012. – Вып. 17, № 16 (275). – С. 31–36.
2. Смирнов, Ю.С. Особенности динамики замкнутых электромехатронных преобразователей с шаговыми электродвигателями / Ю.С. Смир-

нов, А.В. Соколов // Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 15, № 3 (262). – С. 87–90.

3. Алтунин, Б.Ю. Математическая модель компенсатора неактивной мощности на базе многоуровневого инвертора с зонной ШИМ на высокой частоте / Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. – № 4. – С. 219–225

4. Бухтояров, В.Ф. Зависимости между затратами на охрану труда и показателями производственного электротравматизма (на примере Южно-Уральской железной дороги) / В.Ф. Бухтояров, К.Ю. Рыбалченко // Журнал РАЕ «Фундаментальные исследования». – 2013. – № 8, ч. 1. – С. 49–52.

5. Бухтояров, В.Ф. Концепция системы управления процессами обеспечения безопасности при эксплуатации электроустановок / В.Ф. Бухтояров, К.Ю. Рыбалченко // Журнал РАЕ «Фундаментальные исследования». – 2013. – № 8, ч. 6. – С. 1303–1306.

6. Математическая модель электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / А.М. Журавлев, Е.В. Белоусов, А.Е. Бычков и др. // Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». – 2012. – Вып. 18, № 37 (296). – С. 34–37.

7. Параметрическая оптимизация частотно-регулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». – 2012. – Вып. 18, № 37 (296). – С. 30–33.

8. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика». – 2011. – Вып. 15, № 15 (232). – С. 40–45.

9. Григорьев, М.А. Удельные массогабаритные показатели электроприводов / М.А. Григорьев // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика»*. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 111–117.

10. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // *Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Энергетика»*. – 2013. – Т. 13, № 1. – С. 118–123.

Журавлев Артем Михайлович, аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8(351)2679321, e-mail: epasusu@gmail.com.

Белоусов Евгений Викторович, аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8(351)2679321, e-mail: epasusu@gmail.com.

Сычев Дмитрий Александрович, аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8(351)2679321, e-mail: epasusu@gmail.com.

Кинас Станислав Игоревич, аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, тел.: 8(351)2679321, e-mail: epasusu@gmail.com.

Поступила в редакцию 25 декабря 2013 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series “Power Engineering”
2014, vol. 14, no. 1, pp. 66–70**

THE MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTRICAL DRIVE WITH FIELD REGULATED RELUCTANCE MACHINE

A.M. Zhuravlev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
epasusu@gmail.com,

E.V. Belousov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
epasusu@gmail.com,

D.A. Sychev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
epasusu@gmail.com,

S.I. Kinas, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,
epasusu@gmail.com

The article presents the mathematical model of electric drive with a field regulated reluctance machine (FRRM). The model consists of several parts: an electromechanical transducer that is described with the finite element technique, electric converter that is presented in the form of continuous links. Attention is directed to the assumptions used in the synthesis of generalized mathematical model. Comparison of calculated data is obtained by the proposed model with the values obtained by traditional electric equivalent circuits. The article presents the results of simulation and experimental research on laboratory samples of electric drives with the FRRM.

Keywords: mathematical model, electric drives with field regulated reluctance machine, finite element technique.

References

1. Smirnov Yu.S., Lysov A.N., Serebrjakov P.B. [Dataware Elektromehatronnyh Wandler]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2012, iss. 17, no. 16 (275), pp. 31–36. (in Russ.)

2. Smirnov Yu.S., Sokolov A.V. [Features of the Dynamics of Closed Electricmechatronic Converters Stepper Motors]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2012, iss. 15, no. 3 (262), pp. 87–90. (in Russ.)

3. Altunin B.Yu., Karnavsky I.A. [Mathematical Model of Inactive Power Compensator Based on Multilevel Inverter with the Band at a High Frequency PWM]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the Novosibirsk State Technical University Named After R.E. Alexeev], 2010, no. 4, pp. 219–225. (in Russ.)
4. Bukhtoyarov V.F., Rybalchenko K.Yu. [Dependence Between the Cost of Labor Protection and Industrial Elektrotravmatizma Indicators (For Example, South-Ural Railway)]. *Zhurnal PAE "Fundamental'nye issledovaniya"* [Journal of PAE "Fundamental Research"], 2013, no. 8, part 1, pp. 49–52. (in Russ.)
5. Bukhtoyarov V.F., Rybalchenko K.Yu. [Concept Process Control Systems Operational Safety of Electrical]. *Zhurnal PAE "Fundamental'nye issledovaniya"* [Journal of PAE "Fundamental Research"], 2013, no. 8, Part 6, pp. 1303–1306. (in Russ.)
6. Zhuravlev A.M., Belousov E.V., Bychkov A.E., Kodkin V.L., Gladyshev S.P. [A Mathematical Model of the Electric Drive with Synchronous Reluctance Machine with Separate Excitation]. *Bulletin of the South Ural State University, Ser. Power Engineering*, 2012, iss. 18, no. 37 (296), pp. 34–37. (in Russ.)
7. Usynin Yu.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N., Lokhov S.P., Zhuravlev A.M. [Parametric Optimization of Variable Frequency Drives]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2012, iss.18, no. 37 (296), pp. 30–33. (in Russ.)
8. Usynin Yu.S., Grigorev M.A., Shishkov A.N., Bychkov A.E., Kashaev D.I. [Energy Saving in Electric Forced-Draft Mechanisms Multiply Objects]. *Bulletin of the South Ural State University, Ser. Power Engineering*, 2011, no.15 (232), pp. 40–45. (in Russ.)
9. Grigoriev M.A. [Unit Dimensions and Weight of Electric]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 111–117. (in Russ.)
10. Grigoriev M.A. [Electric Drive with Field Regulated Reluctance Machine]. *Bulletin of the South Ural State University, Ser. Power Engineering*, 2013, vol. 13, no. 1, pp. 118–123. (in Russ.)

Received 25 December 2013