

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ*

А.М. Журавлев, Е.В. Белоусов**, А.Е. Бычков**, В.Л. Кодкин**, С.П. Гладышев*****

**** г. Челябинск, Южно-Уральский государственный университет**

***** США, Деборнское отделение Мичиганского университета**

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRIC DRIVE WITH SYNCHRONOUS RELUCTANCE INDEPENDENT EXCITATION MACHINE

A.M. Zhuravlev, E.V. Belousov**, A.E. Bychkov**, V.L. Kodkin**, S.P. Gladyshev*****

**** Chelyabinsk, South Ural State University**

***** USA, Dearborn Branch of Michigan University**

Рассматривается математическая модель электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения (СРДНВ). Дается оценка удельным и перегрузочным показателям на основании проведенного моделирования.

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

In the article the mathematical model of the electric drive with synchronous reluctance independent excitation motor (SRIEM) is considered. On the basis of completed modeling the specific and overload parameters are estimated.

Keywords: mathematical model, electrical drives with synchronous reluctance independent excitation motor, finite element method.

Постановка задачи. Известно, что электропривод с СРМНВ имеет ряд привлекательных качеств, при этом обращается внимание на то, что электропривод по своим функциональным качествам ближе к электроприводу постоянного тока. Существующие модели реактивных машин эти обстоятельства объяснить не могут, что потребовало создания обобщенной математической модели, объективно описывающей процессы в электроприводе с СРМНВ и позволяющей оценить области применения существующих инженерных методов расчета применительно к рассматриваемому электроприводу.

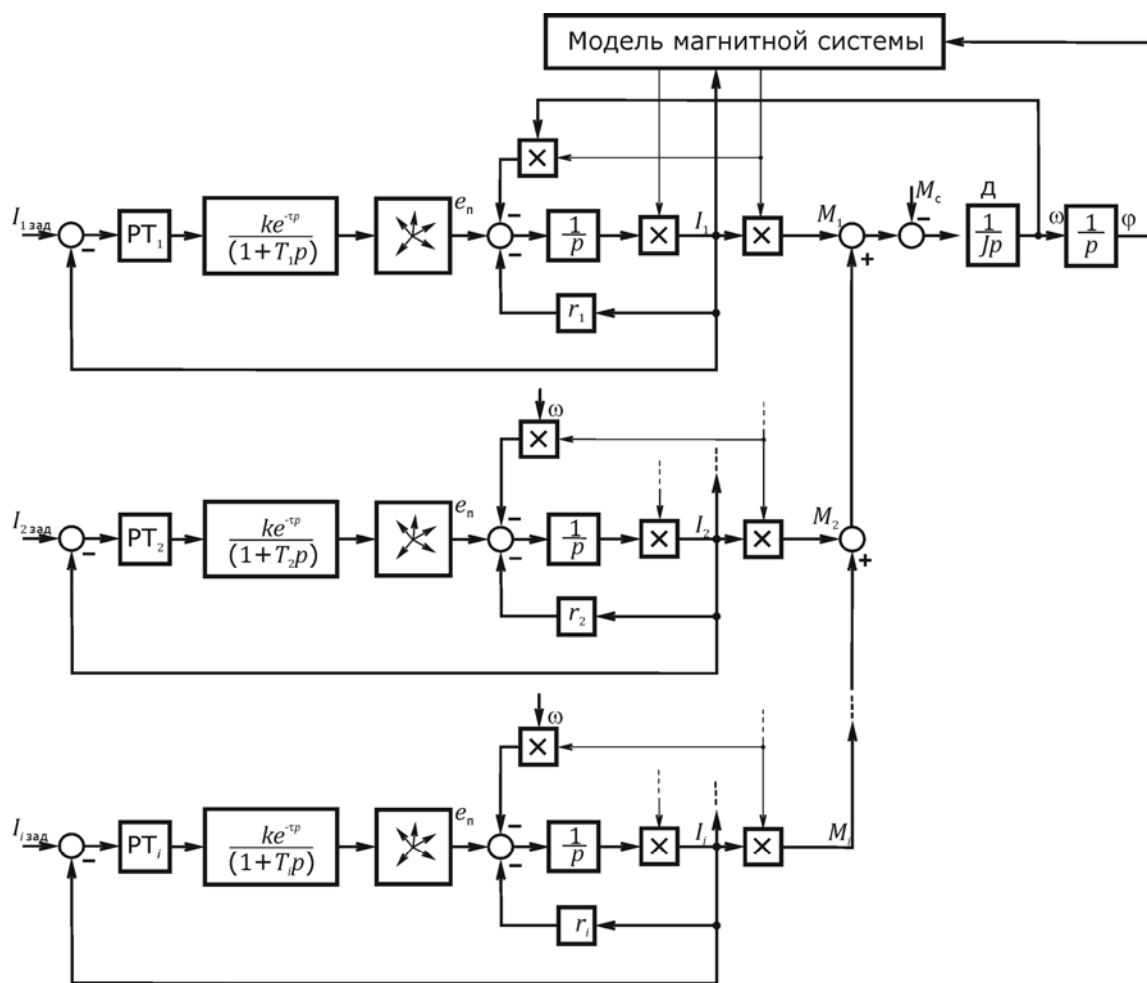
Обзор литературы. Наиболее часто электроприводы описываются электрической схемой замещения [1]. В этом случае обмотки электрической машины и её магнитная система рассматриваются как элементы с сосредоточенными параметрами. В некоторых случаях приходится уточнять параметры новых типов машин. При этом магнитная система рассчитывается методом конечных элементов [2]. Так как возможности вы-

числительной техники ограничены, в технической литературе динамические режимы работы редко учитывают распределённый характер параметров магнитной системы электрических машин.

Математическая модель разрабатывалась с использованием аппарата структурных схем. На рисунке дана обобщенная модель электропривода с СРМНВ. Здесь необходимо выделить два крупных узла.

Первый узел на структурной схеме был получен в форме дифференциальных уравнений в полных производных и учитывал уравнения баланса напряжений в статорных обмотках, частный случай уравнения Лагранжа для тел, совершающих вращательное движение вокруг оси. Передаточная функция вентильного преобразователя была аппроксимирована последовательным соединением двух апериодических звеньев первого порядка, а в качестве переключающей функции использовался ШИМ-модулятор. Такие допущения для вентильного преобразователя вполне приемлемы, исходя из опыта наладки авторами современных электро-

* Работа выполняется в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» («Энергосберегающие тяговые электроприводы электровозов»).



Обобщённая математическая модель электропривода

приводов объектов металлургического производства.

Второй узел включал в себя уравнения магнитной системы в частных производных, для решения которых использовался метод конечных элементов в вариационной постановке, выбор в пользу которого обусловлен интегральным учётом свойств элементарной треугольной области и корректным учётом частной производной вида:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right).$$

Эта производная имеет физический смысл элементарной МДС, в которой непосредственное дифференцирование (как это делается в методе конечных разностей) может дать значительные погрешности в силу скачкообразного изменения магнитной проницаемости при переходе из одной среды в другую.

Расчет предложенной обобщённой модели стал возможен только сейчас с появлением суперкомпьютерных технологий и, как следствие, развитых методов параллельных вычислений.

С целью оптимизации временных ресурсов и эффективного использования суперкомпьютерного центра были определены программно-технические требования к суперкомпьютеру Скиф-Аврора (необходимое число параллельных каналов расчета, типы программных модулей для выполнения расчетов), разработан алгоритм работы препроцессора и постпроцессора для автоматизации расчетов электромагнитных состояний электрических машин. Установлено, что для оптимального по быстродействию решения уравнений, описывающих плоскопараллельные и пространственные модели электрической машины, достаточно иметь 24 параллельных канала. Дальнейшее увеличение каналов расчета не дало увеличения быстродействия. На следующем этапе увеличение быстродействия расчетов выполнялось за счет уменьшения количества конечных элементов при соблюдении погрешности расчетов, не превышающей 5 %. Указанные процедуры позволили оптимизировать расчет (менее 30 с на одну точку).

Адекватность математической модели проверялась на физическом образце электропривода. С

этой целью на реальном двигателе в режиме холостого хода и при нагрузке регистрировалась картина магнитной индукции в зазоре вдоль расточки статора. Установлено, что на зубцовом шаге амплитуда пульсаций магнитной индукции, полученная на физическом образце выше, чем те, что на математической модели, однако интегральные показатели (результатирующий поток) и характер распределения линий индукции на краях полюсов ротора как в линейном режиме, так и в зоне насыщения получились одинаковыми. Анализ результатов кривых индукции в воздушном зазоре, полученных в результате исследований на модели показал, что картина магнитных полей в электроприводах постоянного тока и СРМНВ аналогичны.

Анализ результатов. С целью определения границ использования существующих упрощенных моделей для СРМНВ сопоставлялись модели: на основе уравнений баланса напряжений в статорных цепях, в квазиустановившихся режимах, обращенной машины постоянного тока, и модели СРМНВ с синусоидальным возбуждением.

В первом случае (модель 1), когда электропривод описывался только уравнениями на основе баланса напряжений, система представлялась в матричной форме, размерность которой определялась количеством фаз [3].

Установлено, что предлагаемая модель адекватна только в линейной области, когда магнитная система машины не насыщена. Очень часто зона линейной работы СРМНВ оказывается очень маленькой. Тогда, когда приходилось учитывать зону насыщения, коэффициенты собственных и взаимных индуктивностей изменялись в очень широком диапазоне, что резко затрудняло работу с такой моделью.

Во втором случае (модель 2) предполагалось, что электропривод работает в квазиустановившемся режиме. Показано, что в основной зоне регулирования (до $n < n_n$) сигнал задания на ток абсолютно точно воспроизводится контуром регулирования тока, а следовательно, контур принимался безынерционным звеном. Показано, что анализ магнитных полей удобно выполнять при числе фаз, равном количеству пазов, приходящихся на полюс и фазу [4].

В некоторых случаях удобно выполнять анализ и синтез системы электропривода с СРМНВ с синусоидальным возбуждением (модель 3), например, при решении оптимизационных задач или при частотном анализе. Оценим правомерность замены прямоугольного закона изменения фазного тока на синусоидальную.

При частотном анализе в качестве тестовой функции выбирается гармонический сигнал задания, поэтому в линейной схеме высшие гармоники не влияют на результат. Ситуация изменяется, если магнитная система машины насыщается, поэтому необходимо сравнить электромагнитное состояние машины при синусоидальном и при

прямоугольном возбуждении. Анализ выполнялся на модели 2. Как показали результаты расчета, картина полей машины при разных законах возбуждения отличается на локальных участках: так, при прямоугольной форме наиболее насыщенным оказывается набегаящий край полюса. Однако, если сравнивать интегральные показатели - зависимость потока в функции тока, то анализ показал, что эти характеристики отличаются незначительно (не более 5 %).

В [5, 6] показано, что электропривод с СРМНВ имеет улучшенные удельные показатели и высокую перегрузочную способность. Полезно дать этому аналитическое обоснование.

Для этого сравнивались удельные показатели в электроприводе с обычным реактивным двигателем, который запитывался от синусоидального источника и электропривод с СРМНВ. Сравнение выполнялось на модели 2. Установлено, что в традиционных синхронных реактивных двигателях, имеющих массивный ротор и синусоидальное питание статорных цепей, удельные показатели обычно улучшают усложнением конструкции ротора (например, продольной шихтовкой, составным ротором с немагнитными вставками), при этом удельные показатели улучшаются, но не более чем на 25 %. Если обычный синхронный реактивный двигатель с массивным ротором и синусоидальным питанием заменить на СРМНВ с полным шагом обмотки статора и прямоугольной диаграммой тока статора, то удельные показатели улучшаются не менее чем на 30 %. Попытки добиться дальнейшего улучшения этих показателей усложнением конструкции ротора ощутимых результатов не дают. Так, продольная шихтовка ротора и применение немагнитных вставок увеличивают удельный момент не более чем на 10 %.

Поясним эту ситуацию. В классических реактивных машинах электромагнитный момент определяется:

$$M = \frac{3}{2} p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d).$$

Второй член учитывает составляющую потокоцепления, создаваемую полями выпучивания. Момент, создаваемый ими, направлен встречно полезному. Для того, чтобы улучшить удельные показатели в классических машинах, усложняют конструкцию ротора и тем самым снижают долю потоков выпучивания. В электроприводе с СРМНВ эффект от усложнения конструкции ротора незначительный. Это следует объяснить тем, что перераспределение линий магнитной индукции (снижение влияние потоков выпучивания) происходит в первую очередь за счет законов управления (отличных от синусоидальных).

Перегрузочные показатели электропривода исследовались на модели 2. Показано, что в электроприводах с СРМНВ не наблюдается ограниченный предельного значения момента по электромагнитным причинам. При этом если токи якоря и

возбуждения изменяются пропорционально друг другу, то на зависимости электромагнитного момента от тока статора можно выделить три характерных участка: при малых токах (до номинального значения), когда магнитная система двигателя ненасыщена, зависимость носит квадратичный характер аналогично характеристике двигателя постоянного тока последовательного возбуждения; на втором участке, когда магнитная система насыщается, эта характеристика не увеличивает свой наклон, а близка к линейной; наконец, на последнем, третьем участке в зоне больших токов, которые близки к токам короткого замыкания, когда за счет краевых эффектов магнитная индукция в межполюсном промежутке практически выравнивается с индукцией над полюсом, момент не снижается, но очень слабо увеличивается, приближаясь к горизонтальной прямой. Модель позволяет определить границы этих участков, положения которых в СРМНВ, как правило, определяются насыщением спинки статора.

Литература

1. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Юрайт», 2011. – 767 с.

2. Law, J.D. *Magnetic Circuit Modeling of the Field Regulated Reluctance Machine, Part 1: Model Development* / J.D. Law, T.J. Busch, T.A. Lipo // *IEEE Trans. on Energy Conversion*. – 1996. – Vol. 11. – No 1. – P. 49–56; *Part 2: Saturation Modeling and Results*. – P. 56–62.

3. Усынин, Ю.С. *Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // *Электричество*. – 2007. – № 3. – С. 21–26.

4. Бычков, А.Е. *Оптимизация новых типов электромеханических преобразователей в электротехнических комплексах* / А.Е. Бычков, Д.И. Кашаев, Т.Т. Москов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2011. – Вып. 15. – № 15 – С. 62–66.

5. Усынин, Ю.С. *Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах* / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шников // *Электричество*. – 2012. – № 4. – С. 54–59.

6. Григорьев, М.А. *Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения* / М.А. Григорьев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2009. – Вып. 12. – № 34(167). – С. 51–55.

Поступила в редакцию 16.06.2012 г.

Журавлев Артем Михайлович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8-952-509-00-96.

Zhuravlev Artem Mikhaylovich – postgraduate of “Electric Drive and Production Units Automation” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Contact telephone number: 8-952-509-00-96.

Белоусов Евгений Викторович – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8-919-123-67-13.

Belousov Evgeniy Viktorovich – postgraduate of “Electric Drive and Production Units Automation” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Contact telephone number: 8-919-123-67-13.

Бычков Антон Евгеньевич – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8-919-123-67-13.

Bychkov Anton Evgenievich – postgraduate of “Electric Drive and Production Units Automation” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Contact telephone number: 8-919-123-67-13.

Кодкин Владимир Львович – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8-919-123-67-13.

Kodkin Vladimir Lvovich – Doctor of Science (Engineering), Professor of “Electric Drive and Production Units Automation” Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Contact telephone number: 8-919-123-67-13.

Гладышев Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор, преподаватель Деборнского отделения Мичиганского университета (Деборн, Мичиган, США).

Gladyshev Sergey Pavlovich – Doctor of Science (Engineering), Professor of Dearborn Branch of Michigan University (Dearborn, Michigan, USA).