

С. Г. Герман-Галкин, д-р техн. наук, проф., ggsg@yandex.ru,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет

информационных технологий, механики и оптики "ИТМО", Морская академия, г. Щецин, Польша,

В. В. Лебедев, ген. дир., lebedevv57@mail.ru,

ОАО "Ковровский электромеханический завод",

А. В. Бормотов, аспирант, art_b02@mail.ru,

Санкт-Петербургский Балтийский государственный технический университет им. Д. Ф. Устинова "Военмех"

Модульная синхронная индукторная машина в системе электропривода

Представлены результаты исследований и модельных испытаний синхронной индукторной машины модульной конструкции. Выделен ряд положительных аспектов практической реализации данной конструкции и отличительных особенностей ее математического описания в сравнении с синхронной реактивной машиной модульной конструкции. Рассмотрен алгоритм расчета параметров машины и создана компьютерная модель электропривода в пакете MATLAB-Simulink.

Ключевые слова: модульная конструкция, вентильная синхронная индукторная машина, индуктивность, математическая модель, компьютерная модель, MATLAB-Simulink, Ansys Maxwell, электропривод

1. Конструкция модульной синхронной индукторной машины

Идея создания модульной электрической машины (МЭМ) была запатентована в работе [1]. Два последующих конструктивных решения запатентованы в работах [2, 3]. Одна из конструкций МЭМ подробно описана в статье [4], где разработана методика исследования МЭМ, обоснование этой методики приведено в статье [5].

Конструкция МЭМ позволяет:

- максимально сократить длину магнитных линий и, соответственно, падение магнитного потенциала на пути замыкания магнитного потока;
- исключить лобовые части обмоток в машине;
- соответствующей группировкой катушек реализовать в одной конструкции различные машины, обмотки фаз которых рассчитаны на ряд напряжений и токов;
- реализовать в одной конструкции двухфазную, трехфазную и m -фазную обмотки;
- наращивать габаритную мощность машины в радиальном и осевом направлениях без изменения конструкции электромагнитного модуля;
- в зависимости от конструкции подвижных и неподвижных частей сконструировать линейную или вращающуюся электрическую машину.

Базовая конструкция МЭМ представлена на рис. 1. Машина содержит два статорных диска, выполненных из немагнитного материала, между которыми размещается ротор из ферромагнитного

материала. Электромагнитные модули расположены на статорном диске и состоят из сердечников трансформаторного типа с якорными обмотками. Фотография лабораторного макета машины показана на рис. 2.

Представленная конструкция испытана в статическом режиме. Параметры машины приведены ниже:

Число модулей	18
Число фаз	3
Средний момент, Н · м	100
Максимальная скорость (расчетная), рад/с	200
Масса, кг	35
Напряжение питания, В	560
Средний ток фазы, А	20

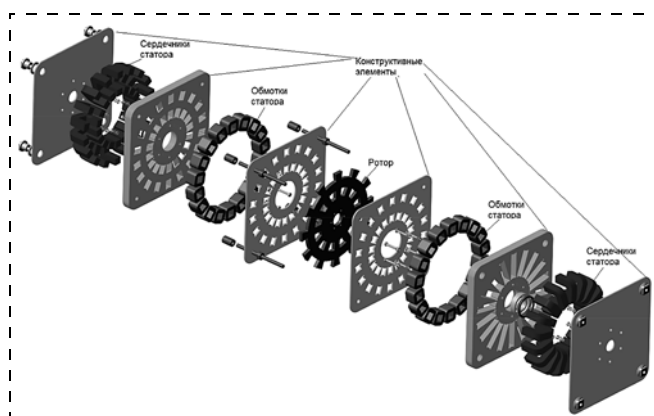


Рис. 1. Конструкция МЭМ

Проведенные исследования [4, 8] и испытания данной машины позволили выявить следующие особенности.

1. По принципу действия эту машину следует отнести к синхронным реактивным машинам [6, 7]. Чтобы подчеркнуть особенности конструкции, эта машина в работах [5, 8] названа модульной синхронной реактивной машиной (МСРМ).

2. Для определения параметров МСРМ необходимо рассчитывать магнитные поля с использованием специализированных компьютерных пакетов конечно-элементного анализа (КЭА) в трехмерной постановке задачи, например Ansys Maxwell.

3. Индуктивности обмоток фаз нелинейно зависят от токов в этих обмотках и угла поворота ротора. Поэтому отсутствует возможность аналитического

представления параметров машины и, соответственно, аналитического описания ее статических и динамических свойств.

4. Практически отсутствует магнитная связь между сердечниками модулей различных фаз. Это свойство позволяет не учитывать взаимную индуктивность между фазами и, следовательно, упростить математическое описание и исследование машины.

5. В зависимости от способа соединения катушек в фазе основной магнитный поток может замыкаться по ротору как аксиально, так и радиально. Это свойство МСРМ позволяет изменять статические и динамические характеристики машины, подстраивая их под заданные технические требования.

6. Для обеспечения работоспособности системы электропривода с МСРМ требуется особая коммутация токов в обмотках, обеспечивающая их перекрытие в фазах в начале и конце импульса, следовательно, параметры и характеристики машины необходимо рассчитывать вместе с конкретной системой управления, так как алгоритм управления влияет на параметры машины и ее характеристики.

7. Система электропривода с МСРМ (рис. 3) строится по классической подчиненной структуре, содержащей внешний скоростной и внутренний токовый контуры. Работоспособность такой структуре придает контур синхронизации управления силовым полупроводниковым преобразователем (СУСП) с датчиком положения ротора (ДПР). Этот контур является внешним по отношению к контуру тока. В этом случае регулятор тока (РТ) выполняется релейным, обеспечивающим скользящее управление током на выходе силового полупроводникового преобразователя, т. е. в фазной обмотке машины [9–11].

Расчет и проектирование МСРМ, осуществленные в пакете Ansys Maxwell [5, 8], привели к созданию модернизированной конструкции, которую в соответствии с классификацией работы [6] следует отнести к синхронным индукторным машинам. Эта машина названа модульной синхронной индукторной машиной (МСИМ). Статорный диск машины представлен на рис. 4.

История создания синхронных индукторных электрических машин в основном касается создания высокочастотных индукторных генераторов. Началом этих работ можно считать 1854 г., когда В. Пайт получил английский патент на индукторный генератор. В России разработкой индукторных генераторов занимались П. Н. Яблочков (1877 г.), М. О. Доливо-Добровольский (1882 г.), Ю. А. Клименко (1882 г.), В. П. Вологдин (1912 г., 1930 г.), А. Е. Алексеев (1930 г.). Среди зарубежных ученых следует отметить труды Н. Тесла (1890 г.), Г. Гюи (1901 г.), П. Штейнмеца (1909 г.) и др.

В МСИМ, разработанной авторами и рассматриваемой в настоящей статье, тороидальные обмотки возбуждения являются общими для всех электромагнитных модулей каждой половины статора. Остальные элементы аналогичны конструкции МСРМ (см. рис. 1) [8].

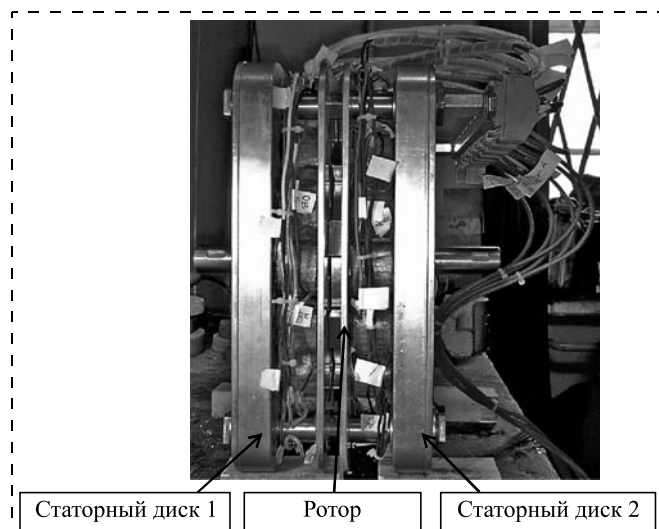


Рис. 2. Лабораторный макет машины

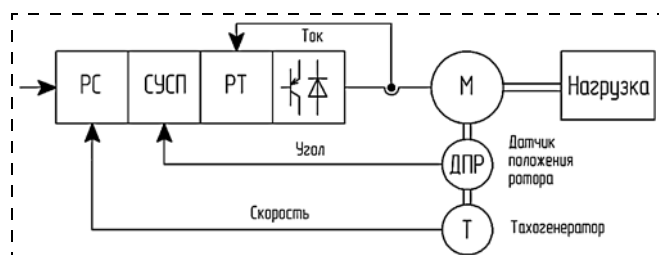


Рис. 3. Система электропривода с МСРМ

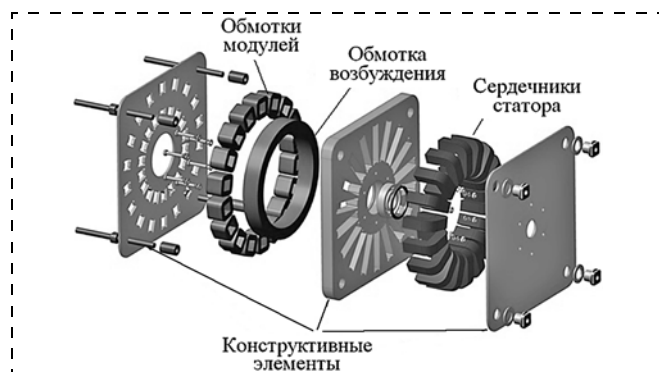


Рис. 4. Конструкция одной половины статора МСИМ

2. Расчет параметров модульной синхронной индукторной машины

В рассматриваемой конструкции МСИМ кривая распределения магнитного потока в воздушном зазоре, созданного обмоткой возбуждения, не изменяется, а перемещается вместе с ротором на одинаковый угол. Это приводит к периодическому изменению по величине (без изменения знака) потокосцепления обмотки модуля, в то время как поток обмотки возбуждения остается неизменным.

Параметры МСИМ, как и МСРМ [8], определяются на основании расчета электромагнитного поля. Основными этапами расчета электромагнитного поля в рассматриваемой конструкции модульной машины в 3D-постановке задачи являются [12, 13]:

- 1) выбор типа решаемой задачи;
- 2) построение геометрии: подвижных и неподвижных частей магнитопровода, катушек;
- 3) назначение свойств материалов всем элементам конструкции;
- 4) формирование источников возбуждения, задание токов в обмотках;
- 5) задание граничных условий;
- 6) задание расчетных параметров (индукция, поток, потокосцепление, индуктивность и т. д.);
- 7) формирование и генерация сетки конечных элементов;
- 8) проведение расчета;
- 9) визуализация и анализ результатов.

Для построения электропривода на базе МСИМ математическое описание машины должно быть осуществлено в параметрах теории электрических цепей, т. е. схема замещения машины должна содержать сопротивление, индуктивность и противоЭДС вращения. Последний параметр содержит две составляющие:

- 1) составляющую ЭДС, обусловленную изменением потокосцепления фазной обмотки, состоящей из обмоток модулей, вследствие вращения потока возбуждения, связанного с ротором:

$$e_1 = \omega_m \frac{\partial \psi_f(\theta_m)}{\partial \theta_m};$$

- 2) составляющую ЭДС фазной обмотки, обусловленную изменением индуктивности обмотки:

$$e_2 = \omega_m \frac{\partial L_k(\theta_m, i_k)}{\partial \theta_m},$$

где ψ_f — потокосцепление возбуждения, θ_m — механический угол поворота ротора, ω_m — механическая скорость вращения ротора.

Для МСИМ на первом этапе рассчитывается магнитное поле, создаваемое обмоткой возбуждения, и противоЭДС обмотки модуля, обусловленная этим полем. Поле возбуждения является периодическим, знакопостоянным, вращающимся вместе с ротором. Потокосцепление возбуждения в фазах статора МСИМ при перемещении ротора на 30° и постоянном токе в обмотке возбуждения, получен-

ное в результате проведенного расчета (этап 8), представлено на рис. 5.

Зависимость потокосцепления ψ_f от угла поворота ротора θ_m можно записать в виде

$$\psi_f(\theta_m) = \frac{\psi_{f\max} + \psi_{f\min}}{2} + \frac{\psi_{f\max} - \psi_{f\min}}{2} \cdot \cos z_2 \theta_m, \quad (1)$$

где z_2 — число полюсов ротора; $\psi_{f\max}$, $\psi_{f\min}$ — максимальное и минимальное значения потокосцепления соответственно.

Составляющая ЭДС, обусловленная изменением потокосцепления фазной обмотки вследствие вращения потока возбуждения, связанного с ротором, равна

$$e_1 = \omega_m \frac{\partial \psi_f(\theta_m)}{\partial \theta_m} = -\frac{\omega_m z_2 (\psi_{f\max} - \psi_{f\min})}{2} \sin z_2 \theta_m. \quad (2)$$

Расчет индуктивности статорной обмотки и ее производных осуществляется на базе расчета магнитного поля для сектора машины, включающего три модуля трех различных фаз с учетом алгоритма коммутации токов в фазах, представленного на рис. 6.

Характер распределения магнитной индукции в секторе машины на периоде, соответствующем приведенному алгоритму коммутации токов в фазах (рис. 6), и при постоянном токе возбуждения приведен на рис. 7 (см. вторую сторону обложки). За начальное положение принято согласованное поло-

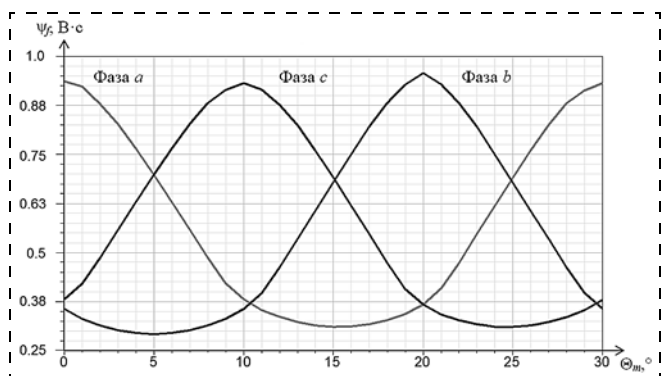


Рис. 5. Потокосцепление возбуждения в фазах статора МСИМ

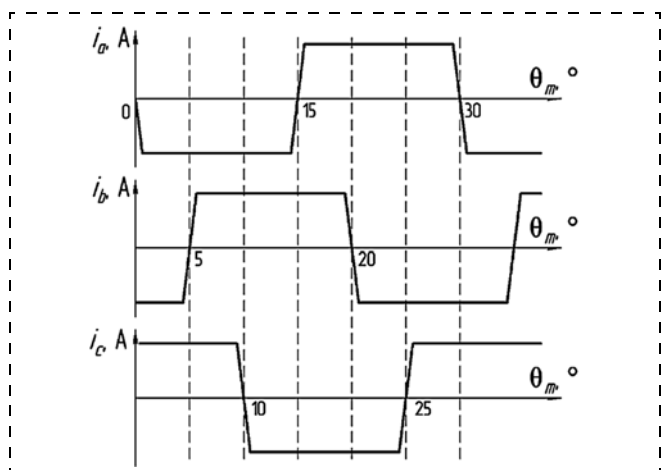


Рис. 6. Алгоритм коммутации токов в фазах МСИМ

жение зубца ротора по отношению к модулю фазы "а", модуль фазы "а" — крайний левый, направление вращения ротора — против часовой стрелки.

Результаты расчета индуктивностей $L_k(i_k, \theta_m)$ обмоток трех модулей трех различных фаз с учетом алгоритма формирования токов в них приведены на рис. 8 (см. третью сторону обложки). Расчет проводился в диапазоне изменений угла поворота ротора $0...15^\circ$ (рис. 7, а—в, см. вторую сторону обложки). За начальное положение, как и при расчете поля, принято согласованное положение зубца ротора по отношению к фазе "а" (рис. 7, а), за конечное — рассогласованное положение зубца ротора по отношению к фазе "а" (рис. 7, з, см. вторую сторону обложки).

При дальнейшем изменении угла θ_m зависимости $L_k(i_k, \theta_m)$ циклически повторяются. Изменение индуктивности $L_k(i_k, \theta_m)$ в фазе имеет периодический характер, при этом период повторения определяется числом зубцов ротора. Для рассматриваемой трехфазной МСИМ ($z_1 = 18$, $z_2 = 12$) период составляет $360^\circ/12 = 30^\circ$. Положительный ток в фазе "а" формируется на участке изменения угла θ_m от 15 до 30° , отрицательный — на участке изменения угла θ_m от 0 до 15° . Формирование токов в фазах машины согласовывается с зависимостью $L_k(i_k, \theta_m)$ для каждой фазы, что в системе осуществляется датчиком положения ротора.

Индуктивности $L_k(i_k, \theta_m)$ представляют собой семейство характеристик, которые для каждого модуля и, соответственно, каждой фазы можно описать уравнением

$$L_k(i_k, \theta_m) = \frac{L_{\max}(i_k) + L_{\min}(i_k)}{2} + \frac{L_{\max}(i_k) - L_{\min}(i_k)}{2} \cos z_2 \theta_m. \quad (3)$$

Отличительная особенность этого уравнения, по сравнению с уравнением, приведенным в работе [8], состоит в том, что максимальная и минимальная индуктивности являются функциями тока в обмотке, что видно из рис. 8 (см. третью сторону обложки), и учитываются при построении модели МСИМ.

Первоначально рассмотрим получение зависимостей параметров машины $\frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial i_k}$, $\frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m}$ от ее переменных состояния. Используя уравнение (3), получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} &= -\frac{z_2 [L_{\max}(i_k) - L_{\min}(i_k)]}{2} \cdot \sin z_2 \theta_m; \\ \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial i_k} &= \frac{\partial L_{\max}(i_k)}{\partial i_k} \left(\frac{1 + \cos z_2 \theta_m}{2} \right) + \\ &+ \frac{\partial L_{\min}(i_k)}{\partial i_k} \left(\frac{1 - \cos z_2 \theta_m}{2} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Зависимости максимальной и минимальной индуктивностей модуля от тока, построенные в со-

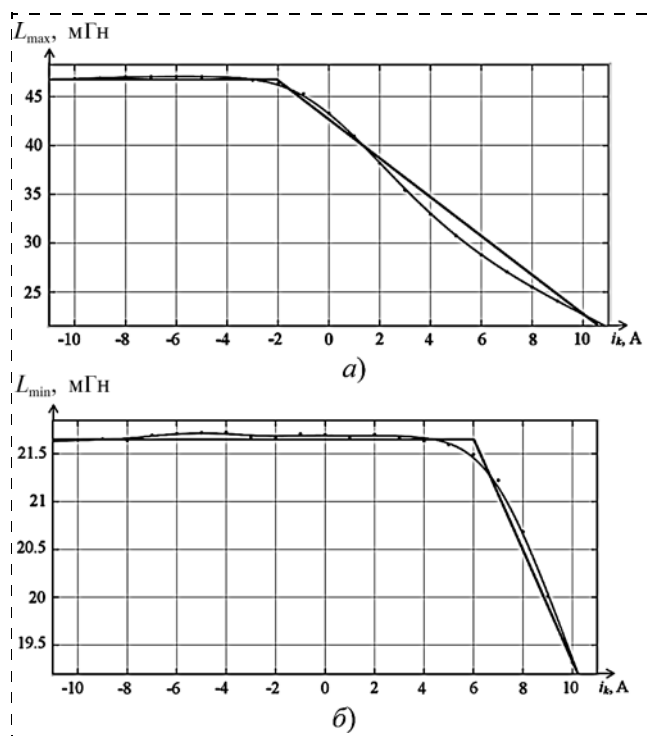


Рис. 9. Зависимости максимальной и минимальной индуктивности от тока

ответствии с данными рис. 8 (см. третью сторону обложки) в пакете MATLAB — Curve Fitting Tool, приведены на рис. 9.

При построении структурной модели для получения зависимостей $\frac{\partial L_{\max}(i_k)}{\partial i_k}$ и $\frac{\partial L_{\min}(i_k)}{\partial i_k}$ зависимости $L_{\max}(i_k)$ и $L_{\min}(i_k)$ (рис. 9) можно аппроксимировать двумя отрезками прямых.

Уравнения электрического равновесия в машине можно представить в виде системы из m уравнений Кирхгофа, записанных для каждой фазы [14, 15]:

$$u_k = r_k i_k + \frac{d\psi_k(i_k, \theta_m)}{dt}, \quad (5)$$

где u_k — напряжение, приложенное к k -й фазе; r_k — сопротивление k -й фазы; i_k — ток, протекающий в k -й фазе; ψ_k — потокосцепление k -й фазы. Потокосцепления фазы находятся из выражений

$$\psi_k(i_k, \theta_m) = L_k(i_k, \theta_m) i_k + \psi_f(\theta_m). \quad (6)$$

Уравнения механического равновесия запишутся на основании второго закона Ньютона:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \sum_{k=1}^m T_{ek}(i_k, \theta_m) - T_l, \quad (7)$$

где $\sum_{k=1}^m T_{ek}(i_k, \theta_m)$ — результирующий электромагнитный момент от действия всех m фаз, T_l — момент нагрузки, приложенный к валу машины.

Полное математическое описание МСИМ с учетом уравнений (2)–(7) может быть представлено в виде

$$u_k(\theta_m) = r_k i_k + \left(\frac{[L_{\max}(i_k) + L_{\min}(i_k)]}{2} + \frac{[L_{\max}(i_k) - L_{\min}(i_k)] \cos z_2 \theta_m}{2} \right) \frac{di_k}{dt} - \frac{z_2 [L_{\max}(i_k) - L_{\min}(i_k)]}{2} \omega_m i_k \sin z_2 \theta_m - \frac{\omega_m z_2 (\psi_{f\max} - \psi_{f\min})}{2} \sin z_2 \theta_m + \left[\frac{\partial L_{\max}(i_k)}{\partial i_k} \cdot \frac{1 + \cos z_2 \theta_m}{2} + \frac{\partial L_{\min}(i_k)}{\partial i_k} \cdot \frac{1 - \cos z_2 \theta_m}{2} \right] i_k \frac{di_k}{dt}. \quad (8)$$

Момент, создаваемый одной фазой машины, определяется из уравнения

$$T_{ek} = - \frac{z_2 [L_{\max}(i_k) - L_{\min}(i_k)]}{2} i_k^2 \sin z_2 \theta_m - \frac{z_2 (\psi_{f\max} - \psi_{f\min}) i_k}{2} \sin z_2 \theta_m. \quad (9)$$

Заметим, что в уравнениях (8), (9) все параметры определены из анализа и расчета магнитного поля. Исследуемая электрическая машина описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, использование этой системы уравнений для построения электропривода с МСИМ осуществляется в программном пакете MATLAB-Simulink.

3. Построение структурной модели электропривода с модульной синхронной индукторной машиной в пакете MATLAB-Simulink [16]

Структурная модель для определения тока и момента фазы "a" двигателя, построенная по уравнениям (8), (9), приведена на рис. 10.

Расчет параметров модели осуществляется в блоке *Subsystem_a*, структурная схема которого приведена на рис. 11. В блоках *L_min*, *L_max* модели задаются индуктивности $L_{\min}(i_k)$, $L_{\max}(i_k)$ по данным рис. 8 с учетом алгоритма формирования токов в фазах МСИМ (см. рис. 6). В блоках *Relay* — *Relay3*, *Delay*, *Dot Product* и *Dot Product1* реализуются зависимости $\frac{\partial L_{\max}(i_k)}{\partial i_k}$ и $\frac{\partial L_{\min}(i_k)}{\partial i_k}$. В блоках *F1*, *F2* и *F3* реализуются уравнения (3), (4), в блоке *F4* — уравнение (2).

Вычисление производной от тока фазы осуществляется в блоке *Subsystem_ia* (рис. 12). Сигнал с выхода этого блока подается на вход интегратора, на выходе которого вычисляется ток фазы.

В блоке *F5* (см. рис. 10) рассчитывается момент, создаваемый одной фазой машины по уравнению (9). Электропривод с МСИМ, модель которого

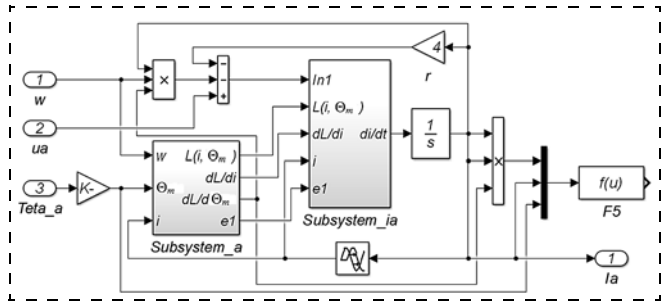


Рис. 10. Модель фазы МСИМ

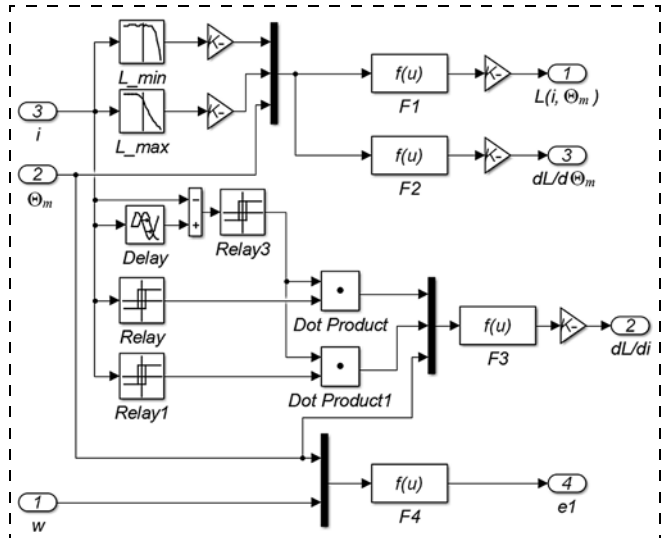


Рис. 11. Модель расчета параметров МСИМ (блок *Subsystem_a*)

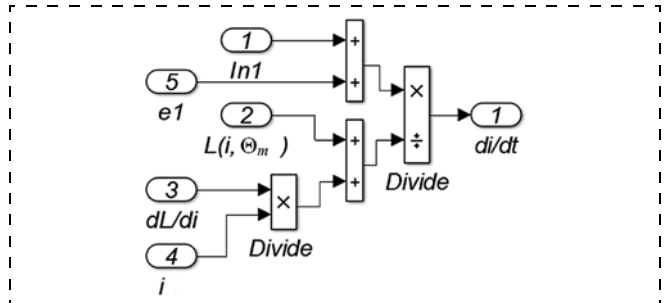


Рис. 12. Модель вычисления производной тока фазы (блок *Subsystem_ia*)

приведена на рис. 13, построена по подчиненному принципу. Внешним контуром является скоростной контур, внутренним — токовый контур. В каждой фазе МСИМ в токовых контурах реализован скользящий режим ("токовый коридор") за счет релейных регуляторов. Регулятор скорости представляет собой цифровой ПИ регулятор. Коммутация токов в фазах МСИМ осуществляется датчиком положения ротора (*Position_Sensor*), модель которого показана на рис. 14.

Переходные процессы по скорости, электромагнитному моменту и токам в фазах при пуске без нагрузки, с последующим "набросом" нагрузки в электроприводе показаны на рис. 15.

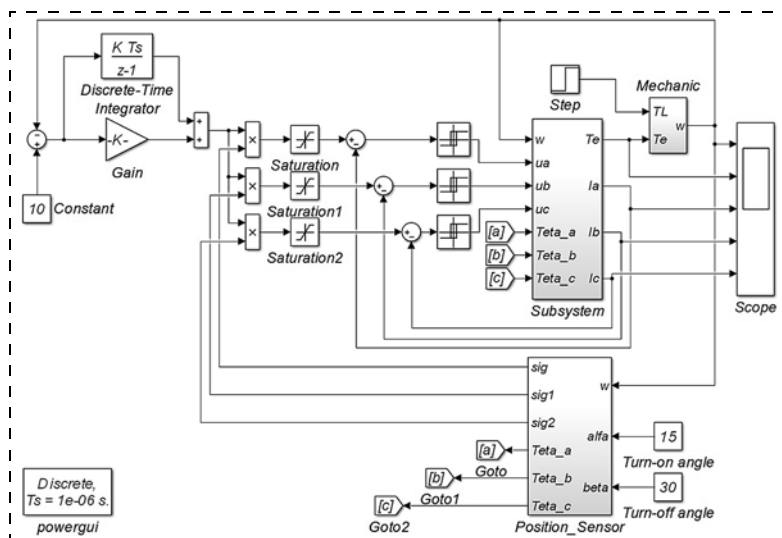


Рис. 13. Модель электропривода с МЭМ

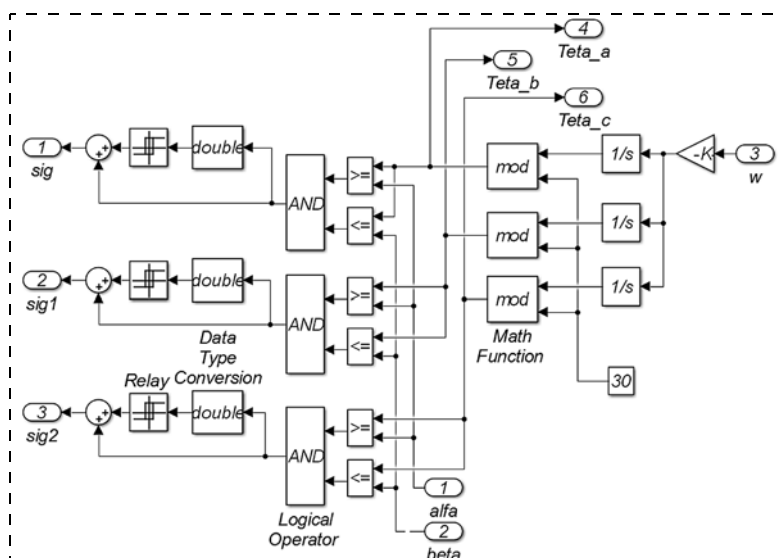


Рис. 14. Модель датчика положения ротора

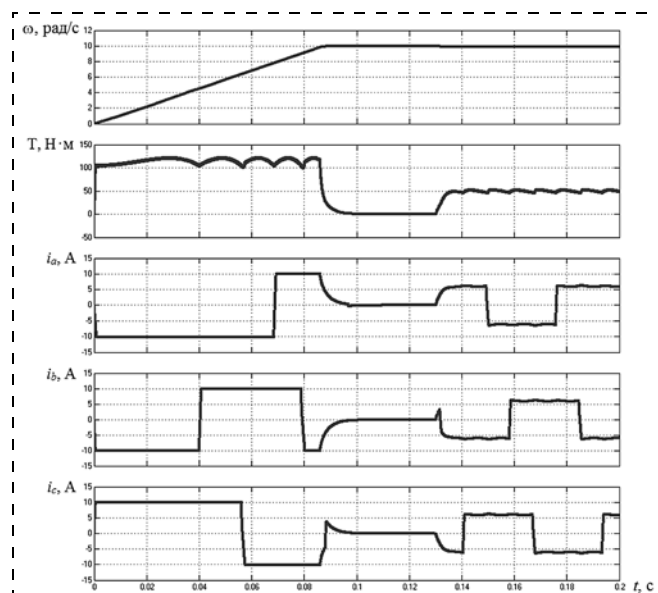


Рис. 15. Переходные процессы при пуске, набросе нагрузки и в установившемся режиме в электроприводе с МСИМ

Сравнение результатов анализа модульной синхронной индукторной машины с модульной синхронной реактивной машиной [8] в составе электропривода показывает, что МСИМ развивает больший на 20 % момент при одинаковом действующем токе и в два раза меньшем максимальном токе в обмотке фазы.

Заключение

При построении электропривода на базе МСИМ ее параметры рассчитываются путем анализа магнитного поля методом конечных элементов. Эти параметры являются нелинейными, зависящими от протекающих по обмоткам токов и от положения ротора. При этом полное математическое описание машины в составе электропривода представляется системой нелинейных дифференциальных уравнений. В настоящее время авторам неизвестны аналитические методы исследования таких систем. Неизвестны также методы их структурного и параметрического синтеза. В связи с этим синтез и исследование электропривода с МСИМ могут быть осуществлены исключительно численными методами. Для решения таких задач наиболее эффективным следует признать программные пакеты MATLAB — Simulink и Ansys Maxwell. Использование этих пакетов позволило провести исследование МСИМ в составе замкнутого электропривода.

Список литературы

1. Hryniewicz J., Afonin A., German-Galkin S., Kramarz W., Szymczak P., Cierzniewski P. Modular reluctance electric machine // International patent № 2001003270. 2001.
2. Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В., Верожский В. В. Модульная электрическая машина // Патент РФ на полезную модель № 105540. 2010. Бюл. № 16.
3. Бормотов А. В., Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В., Лебедев В. В. Модульная электрическая машина // Патент РФ № 2510121. 2014. Бюл. № 28.
4. Герман-Галкин С. Г., Бормотов А. В. Модульная вентильная машина с коммутацией магнитного потока // Силовая электроника. 2012. № 4. С. 46—50.
5. German-Galkin S., Bormotov A. Analytical and model study of a modular electric machine in the electric drive // American Journal of Scientific and Educational Research. 2014. N. 1 (4). P. 614—623.
6. Альпер Н. Я., Терзян А. А. Индукторные генераторы. М.: Энергия, 1970. 192 с.
7. Козаченко В. Ф., Корпусов Д. В., Остриров В. Н. Электропривод на базе вентильных индукторных машин с электромагнитным возбуждением // Электронные компоненты. 2005. № 6. С. 60—64.
8. Герман-Галкин С. Г., Бормотов А. В. Аналитическое и модельное исследование модульной синхронной реактивной машины в системе электропривода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 9. С. 625—630.
9. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). СПб.: КОРОНА — Век, 2006. 336 с.
10. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną. Szczecin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2000. 242 p.

11. German-Galkin S., Hrynkiewicz J. Modułowa maszyna magnetokomutacyjna // Przegląd Elektrotechniczny. 2014. N. 11. P. 196—199.
12. Рымша В. В., Радимов И. Н., Баранцев М. В. Технология расчета трехмерного стационарного магнитного поля в вентильно-реактивных электродвигателях на платформе Ansys Workbench // Электротехника і електромеханіка. 2006. № 6. С. 25—32.
13. User's guide — Maxwell 3D // Ansys Inc. USA, 2012. Rev.6.

14. Чиликин М. Г., Ивоботенко И. А., Рубцов В. П. и др. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / Под общ. ред. М. Г. Чиликина. М.: Энергия, 1971. 624 с.
15. Шмитц Н., Новотный Д. Введение в электромеханику: пер. с англ. М.: Энергия, 1969. 336 с.
16. Любарский Б. Г., Рябов Е. С., Оверьянова Л. В., Емельянов В. Л. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода // Электротехника і Електромеханіка. 2009. № 5. С. 67—72.

Modular Synchronous Inductor Machine in the Electric Drive System

S. G. German-Galkin, ggsg@yandex.ru✉, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO), St. Petersburg, 197101, Russian Federation,
Maritime University of Szczecin, Szczecin, 70-205, Poland,

V. V. Lebedev, lebedevvv57@mail.ru,

Kovrov Electromechanical Plant Co., Kovrov, 601903, Russian Federation,

A. V. Bormotov, art_b02@mail.ru, St. Petersburg Baltic State Technical University named after D. F. Ustinov (VOENMEH), St. Petersburg, 190005, Russian Federation

Corresponding author: **German-Galkin Sergey G.**, Professor,
St. Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics (ITMO), St. Petersburg, 197101, Russian Federation,
Maritime University of Szczecin, Szczecin, 70-205, Poland, e-mail: ggsg@yandex.ru

Received on July 31, 2015

Accepted on August 04, 2015

The paper presents the results of research and model tests of a modular synchronous inductor machine (MSIM). It demonstrates the design of the machine, implemented in a prototype based on the existing design of the modular switched reluctance machine (MSRM) [8]. It emphasizes a number of positive aspects of a practical implementation of this design and distinctive features of its mathematical description. An algorithm for calculation of the parameters of the electromagnetic module of the machine in Ansys Maxwell software package is presented, too. The paper also discloses a method for calculation of a back-EMF component caused by a change in the flux of the phase winding, consisted from the module's windings, due to rotation of the excitation flux associated with the rotor. On the basis of the calculation the results are presented in analytical and graphic forms, a mathematical description and a computer model of MSIM were developed, as well as a computer model of the electric drive on its basis in Matlab — Simulink software package, which confirmed the limit characteristics of the machine, specified in the design. The electric drive with the above machine is built on the principle of subordination control with the internal current loop, which employs relays in each phase, i.e. sliding mode, and the outer loop speed, which uses PI regulator.

Keywords: modular construction, synchronous inductor machine, inductance, mathematical model, structural model, Matlab-Simulink, Ansys-Maxwell, electric drive

For citation:

German-Galkin S. G., Lebedev V. V., Bormotov A. V. Modular Synchronous Inductor Machine in the Electric Drive System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 11, pp. 731—737.

DOI: 10.17587/mau.16.731-737

References

1. Hrynkiewicz J., Afonin A., German-Galkin S., Kramarz W., Szymczak P., Cierzniewski P. Modular reluctance electric machine. Patent WO 2001003270 A1. 11.01.2001.
2. German-Galkin S. G., Zagashvili Yu. V., Voryuzhskii V. V. Modul'naya elektricheskaya mashina (Modular electrical machine). Useful model patent RU 105540 U1. 10.06.2010 (in Russian).
3. Bormotov A. V., German-Galkin S. G., Zagashvili Yu. V., Lebedev V. V. Modul'naya elektricheskaya mashina (Modular electrical machine). Patent RU 2510121 C2. 20.03.2014 (in Russian).
4. German-Galkin S. G., Bormotov A. V. Modul'naya ventil'naya mashina s kommutatsiei magnitnogo potoka (Modular machine with a magnetic flux switching), *Power electronics*, 2012, no. 4, pp. 46—50 (in Russian).
5. German-Galkin S., Bormotov A. Analytical and model study of a modular electric machine in the electric drive, *American Journal of Scientific and Educational Research*, 2014, no. 1 (4), pp. 614—623.
6. Al'per N. Ya., Terzyan A. A. Induktornye generatory (Inductor generators), Moscow, Energiya, 1970, 190 p. (in Russian).
7. Kozachenko V. F., Korpusev D. V., Ostirov V. N. Elektroprivod na haze ventil'nykh induktornykh mashin s elektromagnitnym vozbuзhdeniem (Electrical drive based on synchronous inductor machines with electromagnetic excitation), *Electronic Components*, 2005, no. 6, pp. 60—64 (in Russian).

8. German-Galkin S. G., Bormotov A. V. Analiticheskoe i model'noe issledovanie modul'noi sinkhronnoi reaktivnoi mashiny v sisteme elektroprivoda (Analytical and model study of a modular synchronous switched reluctance machine in the electrical drive), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 625—630 (in Russian).
9. Ovchinnikov I. Ye. Ventil'nye elektricheskie dvigateli i privod na ikh osnove (malaya i srednyaya moshchnost'): kurs lektsii (Synchronous motors and the drive based on them: a course of lectures), St. Petersburg, KORONA-Vek, 2006, 336 p. (in Russian).
10. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2000, 242 p. (in Polish).
11. German-Galkin S., Hrynkiewicz J. Modułowa maszyna magnetokomutacyjna, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, no. 11, pp. 196—199 (in Polish).
12. Rymsha V. V., Radimov I. N., Barantsev M. V. Tekhnologiya rascheta trekhmernogo statsionarnogo magnitnogo polya v ventil'no-reaktivnykh elektrodvigatelyakh na platforme Ansys Workbench (Ansys-Workbench powered calculation technique of stationary 3D magnetic field in switched-reluctance motors), *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 2006, no. 6, pp. 25—32 (in Russian).
13. User's guide — Maxwell 3D, Ansys Inc., USA, 2012, Rev. 6.
14. Chilikin M. G., Ivobotenko I. A., Rubtsov V. P., Sadovskij L. A., Cacenkin V. K. Diskretnyi elektroprivod s shagovymi dvigatelyami (Step electric drive with stepping motors), Moscow, Energiya, 1971, 624 p. (in Russian).
15. Shmitz N. L., Novotny D. V. Vvedenie v elektromekhaniku: per. s angl. (Introduction into electromechanics: Translated from English), Moscow, Energiya, 1969, 336 p. (in Russian).
16. Lubarskii B. G., Ryabov Ye. S., Overyanova L. V., Emel'yanov V. L. Imitatsionnaya model' tyagovogo ventil'no-induktornogo elektroprivoda (Simulation model of a synchronous inductor traction motor), *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 2009, no. 5, pp. 67—72 (in Russian).