МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

УДК 681.587.72

DOI: 10.17587/mau.16.625-631

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,

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

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

Аналитическое и модельное исследование модульной синхронной реактивной машины в системе электропривода

Представлены результаты исследований и модельных испытаний синхронной реактивной машины модульной конструкции. Выделен ряд положительных аспектов практической реализации данной конструкции и отличительные особенности ее математического описания. Рассмотрен алгоритм расчета параметров элементарного модуля машины и создана компьютерная модель электропривода в пакете MATLAB-Simulink, подтвердившая заложенные при проектировании предельные характеристики машины.

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

Введение

Начиная с 60-х годов прошлого века для устранения недостатков традиционных конструкций электрических машин осуществляется переход на новые конструкции [1—3]. Эти машины, включенные в замкнутую систему по положению ротора, названы вентильными электрическими машинами (ВЭМ).

Такие конструкции позволяют выполнить статорные обмотки сосредоточенными и значительно сократить пути замыкания магнитного потока. Как показывают исследования последних лет [4—14], такие конструкции позволяют существенно улучшить энергетические характеристики, уменьшить массу и габаритные размеры электрических машин. Применение такого подхода подразумевает отказ от традиционных путей конструктивного решения и реформирование устоявшихся взглядов относительно проектирования электрической машины для электропривода.

1. Конструкция модульной синхронной реактивной машины

Идея создания модульной электрической машины (МЭМ) была запатентована в работе [15]. Два последующих конструктивных решения запатентованы в работах [16, 17]. Одна из конструкций МЭМ подробно описана и исследована в работах [18, 19].

Модульная конструкция электрической машины 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 2-, 3- 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 и способа соединения обмоток электромагнитных модулей сконструировать линейную или вращающуюся электрическую машину.

Проведенные исследования [18, 19] и испытания данной машины позволили выявить следующие особенности:

1. Для определения параметров машины необходимо рассчитывать магнитные поля с использованием современных специализированных компьютерных пакетов конечно-элементного анализа (КЭА) в трехмерной постановке задачи, например Ansys Maxwell, применение которого позволяет с высокой точностью аппроксимировать любую геометрию модулей электрической машины и учесть нелинейные свойства ферромагнитных материалов [18, 20].

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

3. Необходимо рассматривать характеристики машины совместно с системой управления, так как алгоритм управления влияет на параметры самой машины.

4. Для обеспечения минимума пульсаций электромагнитного момента требуется особая коммутация токов в обмотках, обеспечивающая перекрытие их в фазах в начале и конце импульса.

5. Изменение индуктивности фазы аппроксимируется гармонической зависимостью.

6. Практически отсутствует магнитная связь между сердечниками модулей различных фаз.

Проектирование машины, осуществляемое в пакете Ansys Maxwell, позволило создать конструкцию, представленную на рис. 1 (см. третью сторону обложки). Эта машина названа модульной синхронной реактивной машиной (МСРМ).

МСРМ состоит из отдельных электромагнитных модулей. Электромагнитные модули размещены на неподвижных частях, выполненных из немагнитного материала. Каждый электромагнитный модуль содержит два П-образных сердечника, расположенных торцами зубцов друг к другу так, что полюсы ротора, установленного между сердечниками, совпадают в проекции с торцами зубцов этих сердечников. Обмотки в электромагнитном модуле выполнены раздельно на каждом зубце П-образного сердечника, расположенном дальше от вала. Электромагнитные модули закреплены по окружности без радиального смещения сердечников друг относительно друга, при этом обмотки одной фазы могут соединяться последовательно, параллельно или в последовательно-параллельные группы. Ротор МСРМ выполнен в виде зубцово-пазовой конструкции из ферромагнитного материала. Представленная конструкция реализована в макетном варианте и испытана в статическом режиме на кафедре "Мехатроники и робототехники" Балтийского государственного технического университета им. Д. Ф. Устинова "Военмех". 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	50600
Средний ток обмотки модуля, А	7

2. Математическое описание модульной синхронной реактивной машины

При составлении математического описания электромагнитных процессов *m*-фазной MCPM, следует, прежде всего, определиться, какие из трех переменных состояния (ψ — потокосцепление, *i* — ток, θ_m — угол смещения между полюсами статора и ротора) необходимо выбрать как независимые [3]. Обычно в качестве независимых переменных состояния выбираются ток и угол смещения между полюсами статора и ротора (*i*, θ_m). В этом случае

уравнения электрического равновесия в машине можно представить в виде системы из *m* уравнений Кирхгофа, записанных для каждой фазы [3]:

$$u_k = r_k i_k + \frac{d\psi_k(i_k, \theta_m)}{dt}, \qquad (1)$$

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; θ_m — механический угол поворота ротора. Уравнения механического равновесия запишутся на основании второго закона Ньютона:

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

где $\sum_{k=1}^{m} T_{ek}(i_k, \theta_m)$ — результирующий электромаг-

нитный момент от действия всех *m* фаз; *T*_l — момент нагрузки, приложенный к валу машины.

Представим математическую модель машины в функции индуктивности обмотки статора. Для получения этой зависимости преобразуем производную от потокосцепления по формуле

$$\frac{d\psi_k(i_k, \theta_m)}{dt} = \frac{d[L_k(i_k, \theta_m)i_k]}{dt} =$$
$$= L_k(i_k, \theta_m)\frac{di_k}{dt} + \frac{dL_k(i_k, \theta_m)}{dt}i_k.$$
(3)

Производная от индуктивности k-й обмотки L_k , являясь неявной функцией времени, находится из уравнения

$$\frac{dL_k(i_k, \theta_m)}{dt} = \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} \omega_m.$$
(4)

Из уравнений (1), (3), (4) получим

$$u_{k} = r_{k}i_{k} + L_{k}(i_{k}, \theta_{m})\frac{di_{k}}{dt} + \frac{\partial L_{k}(i_{k}\theta_{m})}{\partial \theta_{m}}\omega_{m}i_{k}.$$
 (5)

Умножим уравнение (5) на ток обмотки:

$$u_k i_k = r_k i_k^2 + L_k(i_k, \theta_m) \frac{di_k}{dt} i_k + \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} \omega_m i_k^2.$$
(6)

В уравнении (6) левая часть представляет собой электрическую мощность, потребляемую обмоткой. Первое слагаемое правой части — это потери в обмотке, второе — электромагнитная мощность в обмотке, третье — механическая мощность на валу машины. Разделив механическую мощность на угловую скорость, получим электромагнитный момент, создаваемый k-й обмоткой:

$$T_{ek}(i_k, \theta_m) = \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} i_k^2.$$
(7)

Полное математическое описание МСРМ, полученное из уравнений (2), (5), (7), запишется в виде

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{1}{L_k(i_k, \theta_m)} \left(u_k - r_k i_k - \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m} \omega_m i_k \right);$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(\sum_{ek=1}^m T_{ek}(i_k, \theta_m) - T_l \right);$$
(8)
$$d\theta_m$$

$$\frac{d\sigma_m}{dt} = \omega_m.$$

Уравнения (8) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений. Для ее решения необходимо знать зависимости параметров машины от ее переменных состояния $L_k(i_k, \theta_m)$,

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

Поскольку в рассматриваемой конструкции отсутствует взаимоиндукция между отдельными моду-

лями, то зависимости $L_k(i_k, \theta_m), \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m}$ могут

быть получены при расчете и анализе магнитного поля отдельно взятого модуля.

Расчет поля в электромагнитном модуле (рис. 2, см. третью сторону обложки) не удается свести к решению двумерной задачи. Для расчета магнитного поля в трехмерной постановке используется метод конечных элементов (МКЭ) программного продукта Ansys Maxwell [18, 20].

Основными этапами расчета электромагнитного поля и индуктивности электромагнитного модуля рассматриваемой модульной машины в 3D постановке являются:

1. Выбор типа решаемой задачи.

2. Построение геометрии магнитопровода (подвижных, неподвижных частей) и катушек.

3. Назначение свойств материалов модели.

4. Формирование граничных условий.

5. Формирование обмоток, задание тока в обмотках.

6. Формирование и генерация сетки конечных элементов.

7. Проведение расчета.

8. Визуализация и анализ результатов.

Результаты расчета электромагнитного поля модуля в рассогласованном и согласованном состояниях представлены на рис. 3 (см. третью сторону обложки).

Уравнение (7) показывает, что знак момента, а значит, и режим работы машины определяются знаком производной индуктивности по углу. При положительной производной машина развивает положительный момент, т. е. работает в двигательном режиме. При отрицательной производной машина развивает отрицательный момент и работает в генераторном режиме. Поэтому формирование тока в фазе машины необходимо согласовывать с режимом работы машины и зависимостью $L_k(i_k, \theta_m)$.

Изменение индуктивности $L_k(i_k, \theta_m)$ в фазе имеет периодический характер, при этом период повторения определяется числом полюсов ротора. Для трехфазной МСРМ с 18 модулями на статоре и 12 полюсами на роторе период повторения равен $360^{\circ}/12 = 30^{\circ}$. Приблизительная зависимость индуктивности фазы "а" двигателя от угла поворота ротора и алгоритм формирования тока в этой фазе для рассматриваемой машины представлены на рис. 4.

Угол включения (Угол вкл.) и выключения (Угол выкл.) за счет датчика положения ротора устанавливается таким образом, чтобы ток в двигательном режиме работы формировался на участке возрастания индуктивности.

Реальные зависимости $L_a(i_a, \theta_m)$ в диапазонах изменения угла поворота ротора θ_m от 15 до 30° и тока i_a от 2 до 14 А, рассчитанные для одного модуля (рис. 2) фазы "а", показаны на рис. 5. Аналогичные зависимости, смещенные, соответственно, на 10° и 20°, имеют место для фаз "в" и "с".



Рис. 4. Приблизительная зависимость индуктивности фазы от угла поворота ротора и алгоритм формирования тока в фазе двигателя





3. Построение структурной модели электропривода с модульной электрической машиной в пакете Simulink [21—25]

Первоначально рассмотрим зависимости пара-

метров машины $L_k(i_k, \theta_m), \frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m}$ от ее пере-

менных состояния. Эти зависимости на основании расчетных данных (рис. 5) можно выразить приближенными уравнениями:

$$L_{k}(i_{k}, \theta_{m}) =$$

$$= \frac{L_{\max}(i_{k}) + L_{\min}}{2} + \frac{L_{\max}(i_{k}) - L_{\min}}{2} \cos z_{2}\theta_{m},$$

$$\frac{\partial L_{k}(i_{k}, \theta_{m})}{\partial \theta_{m}} = -\frac{z_{2}(L_{\max}(i_{k}) - L_{\min})}{2} \sin z_{2}\theta_{m},$$
(9)

где *z*₂ — число полюсов ротора.

В уравнениях (9) зависимость максимальной индуктивности обмотки электромагнитного модуля от тока при согласованном положении полюса статора и ротора $L_{\max}(i_k)$ можно представить в табличной форме (см. таблицу).

Ток обмотки, А	2	4	6	8	10	12	14
Инлуктивность, мГн	30.2		30.2	30.2	30	28.2	25
индуктивноств, мг н	50,2	50,2	50,2	50,2	50	20,2	25

При этом минимальная индуктивность модуля при рассогласованном положении полюса статора и ротора практически не зависит от тока и равна 9,9 мГн.

Модель электромагнитной части двигателя, построенная по уравнениям (5), (7), представлена на рис. 6, *а*. Зависимости параметров машины $L_k(i_k, \theta_m)$,

 $\frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m}$ от ее переменных состояния рассчиты-

ваются по уравнениям (9). Модель, реализующая эти зависимости в блоке *Subsystem* (рис. 6, *a*), приведена на рис. 6, *б*. В блоке *Lookup Table* модели задается индуктивность $L_{max}(i_k)$ по табличным данным. В блоках *F1* и *F2* реализуются уравнения (9).

Структурная модель электропривода с МСРМ показана на рис. 7. Датчик положения ротора реализован в блоке *Position_Sensor*, содержание которого представлено на рис. 8. В цифровых интеграторах (блоки *Discrete-Time Integrator*) формируются три пилообразных сигнала углового положения ротора, сдвинутые на 10°. Длительность этих сигналов формируется блоками *Math Function* и составляет 15°. Далее сигналы поступают на блоки *Relational Operator*, где сравниваются с сигналами, задающими включение соответствующей фазы *Turn-on angle* и ее выключение *Turn-off angle*.

На выходе блока *Position Sensor* генерируются единичные (*sig*, *sig1*, *sig2*) и пилообразные (*Teta_a*,

Teta_b, *Teta_c*) импульсы длительностью 15°, смещенные на 10°, полный цикл повторения составляет 30°. Единичные сигналы (*sig, sig1, sig2*) обеспечивают формирование токов в соответствующих фазах двигателя. Пилообразные сигналы (*Teta_a*,





Рис. 7. Структурная модель электропривода с МСРМ





Рис. 9. Переходной процесс в электроприводе с МСРМ

Teta_b, *Teta_c*) обеспечивают вычисление $L_k(i_k, \theta_m)$ и

 $\frac{\partial L_k(i_k, \theta_m)}{\partial \theta_m}$ для каждой фазы по уравнениям (9).

В блоке Subsystem "собраны" три модели фаз МСРМ (см. рис. 6). Суммарный электромагнитный момент трех фаз поступает на блок Mechanic (см. рис. 7), в котором реализуется уравнение (2).

Электропривод с модульной синхронной реактивной машиной построен по подчиненному принципу — внешним контуром является скоростной контур, внутренним — токовый. В каждой фазе МСРМ в токовых контурах реализован скользящий режим ("токовый коридор") за счет релейных регуляторов. Ограничение тока в фазах осуществляется блоками Saturation. Регулятор скорости представляет собой цифровой ПИ регулятор.

Переходные процессы по скорости, электромагнитному моменту и токам в фазах при пуске и "набросе" момента нагрузки в электроприводе с МСРМ показаны на рис. 9.

Заключение

В двухконтурном электроприводе переходные процессы по моменту и скорости носят апериодический характер. Пульсации момента в установившемся режиме не превышают 10 %. Электромагнитные и электромеханические характеристики, полученные при моделировании, полностью совпадают с характеристиками, рассчитанными полевыми методами [18, 20] и полученными экспериментально (см. раздел 1). Проектирование МСРМ для электропривода конкретного транспортного средства сводится к выбору числа отдельных электромагнитных модулей и их размещению в объеме машины.

Список литературы

1. 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.

2. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). Курс лекций. СПб.: КОРОНА — Век, 2006. 336 с. 3. Шмитц Н., Новотный Д. Введение в электромеханику:

Пер. с англ. М.: Энергия, 1969. 336 с.

4. Козаченко В. Ф., Обухов Н. А., Анучин А. С. и др. Модульная микроконтроллерная система управления для отечественной серии преобразователей частоты "Универсал" // Тр. V Междунар. конф. "Электромеханика, электротехнология и электроматериаловедение" МКЭЭЭ-2003. Ч. 1. Украина, Крым, 2003. C. 725-726.

5. Козаченко В. Ф., Остриров В. Н., Русаков А. М. Перспективные типы тяговых электроприводов // VII Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2012. Россия, Иваново, 2012. С. 16-21.

6. Радимов И. Н., Рымша В. В. Сопоставительный анализ вентильных двигателей для электропривода мотор-колес легких транспортных средств // Електромашинобуд. та електрообладн. 2005. Вип. 64. С. 33—36.

7. Bahram A. Variable Reluctance Machines: Analysis Design and Control. Paris: Jouve, 2003. 207 p.

8. Bienkowski K., Szczypior J., Bucki B., Biernat A., Rogalski A. Influence of geometrical parameters of Switched Reluctance Motor on electromagnetic torque // Proc. 16th Int. Conf. of Electrical Machines. Poland, Krakow, 2004. P. 5–8.
9. Deshpande U. S. Recent Advances in Materials for Use in

Permanent Magnet Machines Review // Proc. of IEEE Electrical Machines and Drives Conf. (IEMDC'03). USA, Madison, 2003. Vol. 1. P. 509—515.

10. Huang S., Aydin M., Lipo T. A. TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies // Proc. of IEEE Industry Applications Conf. USA, IL, Chicago, 2001. Vol. 3. P. 1619-1625.

11. Hull J. R., Turner L. R. Magnetomechanics of Internal-Dipole Halbach-Array Motor/Generators // IEEE Trans Mag. 2000. Vol. 36. P. 2004—2011.

12. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. Florida: CRC Press LLC, 2001. 416 p.

13. Qu R., Aydin M., Lipo T. A. Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines // Proc. of IEEE International Electric machines and Drives Conf. (IEMDC'03). USA, Madison, 2003. V. 3. P. 1948-1954.

14. Wichert T., Kub H. Influence of power electronics on design of Switched Reluctance Machines // Proc. of the EPE 2005. Germany, Dresden, 2005. P. 10.

15. Hrynkiewicz J., Afonin A., German-Galkin S., Kramarz W., Szymczak P., Cierzniewksi P. Modular reluctance electric machine // International patent № 2001003270. 2001.

16. Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В., Верюжский В. В. Модульная электрическая машина // Патент РФ на полезную модель № 105540. 2010. Бюл. № 16.

17. Бормотов А. В., Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В., Лебедев В. В. Модульная электрическая машина // Патент РФ № 2510121. 2014. Бюл. № 28.

18. Герман-Галкин С. Г., Бормотов А. В. Модульная вентильная машина с коммутацией магнитного потока // Силовая электроника. 2012. № 4. С. 46-50.

19. German-Galkin S., Bormotov A. Analytical and model study of a modular electric machine in the electric drive // American Jour-nal of Scientific and Educational Research. 2014. N (4). P. 614–623.

20. User's guide — Maxwell 3D // Ansys Inc. USA, 2012. Rev. 6. 21. Рымша В. В., Радимов И. Н., Баранцев М. В. Технология расчета трехмерного стационарного магнитного поля в вентильно-реактивных электродвигателях на платформе Ansys Workbench // Електротехніка і Електромеханіка. 2006. № 6. C. 25-32.

22. Голландцев Ю. А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб.: ГНЦ РФ — ЦНИИ "Электроприбор", 2003. 148 с. 23. Любарский Б. Г., Рябов Е. С., Оверьянова Л. В., Емель-

янов В. Л. Имитационная модель тягового вентильно-индук-торного электропривода // Електротехніка і Електромеханіка. 2009. № 5. C. 67-72.

24. Козаченко В. Ф., Корпусов Д. В., Остриров В. Н. Электропривод на базе вентильных индукторных машин с электромагнитным возбуждением // Электронные компоненты. 2005. № 6. C. 60–64.

25. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną. Szczecin: Wydaw-nictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2000. 242 p.

Analytical and Model Study of a Modular Switched Reluctance Machine in the Electrical Drive

S. G. German-Galkin, ggsg@yandex.ru⊠, Saint Petersburg National Research University of Information

Technologies, Mechanics and Optics ("ITMO"), St. Petersburg, 197101, Russian Federation,

Maritime University of Szczecin, Szczecin, 70-205, Poland,

A. V. Bormotov, art_b02@mail.ru, Saint Petersburg Baltic State Technical University

named after D. F. Ustinov ("VOENMEH"), St. Petersburg, 190005, Russian Federation

Corresponding author: German-Galkin Sergei G., Professor, Saint 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 May 13, 2015 Accepted May 29, 2015

The paper presents the results of research and model tests a modular switched reluctance machine (MSRM) and shows the construction implemented in a prototype and tested in static mode, with a detailed explanation of the construction of an electromagnetic modules. It emphasized a number of positive aspects of the practical implementation of this construction, in particular the principle of increasing the overall capacity and distinctive features of its mathematical description. An algorithm for calculating the parameters of the electromagnetic module of the machine in the FEA software package Ansys Maxwell is shown too. On the basis of the calculation results presented in the analytical and graphical form, developed a mathematical description MSRM and created a computer model of the MSRM and a computer model of an electric drive on its basis in the software package MATLAB-Simulink, which confirmed the limit characteristics of the machine specified in the design. Electric drive with the considered machine built by principle of subordination control with the internal current loop, which use the relay s in each phase, i.e. sliding mode, and the outer loop speed, which use the PI regulator.

Keywords: modular construction, switched reluctance machine, mathematical model, computer model, software package MATLAB-Simulink, software package Ansys Maxwell, electric drive

For citation:

German-Galkin S. G., Bormotov A. V. Analytical and Model Study of a Modular Synchronous Switched Reluctance Machine in the Electrical Drive, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 5, pp. 625–631.

DOI: 10.17587/mau.16.625-631

References

1. Chilikin M. G., Ivobotenko I. A., Rubtcov 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).

 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).
 Shmitz N. L., Novotny D. V. Vvedenie v elektromekhaniku: per.

3. 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).

4. Kozachenko V. F., Obukhov N. A., Anuchin A. S., Zharkov A. A. Modul'naya mikrokontrollernaya sistema upravleniya dlya otechestvennoi serii preobrazovatelei chastoty "Universal" (Modular control system for microcontroller series of domestic frequency converters "Universal"), Trudy V-i Mezhdunar. konf "Elektromekhanika, elektrotekhnologiya i elektromaterialovedenie" MKEEE-2003 "Modul'naya mikrokontrollernaya sistema upravleniya dlya otechestvennoi serii preobrazovatelei chastoty "Universal" (Proc. 5th Int. Conf. "Electromechanics, electrical technologies and electrical material science" ICEEE-2003 "Modular microcontroller system of control for indigenous frequency converters "Universal"), Crimea, Ukraine, 2003, vol. 1, pp. 725–726 (in Russian).

5. Kozachenko V. F., Ostrirov V. N., Rusakov A. M. Perspektivnye tipy tyagovykh elektroprivodov (Perspective types of traction electric drives), VII Mezhdunar. konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2012 "Perspektivnye tipy tyagovykh elektroprivodov" (Proc. 7th Int. Conf. on automatic electric drives "Advanced types of traction electric drive"), Ivanovo, Russia, 2012, pp. 16–21 (in Russian).

6. **Radimov I. N., Rymsha V. V.** Sopostavitel'nyi analiz ventil'nykh dvigatelei dlya elektroprivoda motor-koles legkikh transportnykh sredstv (Benchmarking study of synchronous motors for the electrical wheel-motor drive of light transportation vehicles), *Electrical Ma*- *chine-Building and Electrical Equipment*, 2005, Issue 64, pp. 33–36 (in Russian).

7. Bahram A. Variable Reluctance Machines: Analysis Design and Control, Jouve, Paris, 2003, 207 p.

8. **Bienkowski K., Szczypior J., Bucki B., Biernat A., Rogalski A.** Influence of geometrical parameters of Switched Reluctance Motor on electromagnetic torque, *Proc. 16th Int. Conf. of Electrical Machines* "Influence of geometrical parameters of Switched Reluctance Motor on electromagnetic torque", Krakow, Poland, 2004, pp. 5–8.

9. **Deshpande U. S.** Recent Advances in Materials for Use in Permanent Magnet Machines Review, *Proc. of IEEE Electrical Machines and Drives Conf (IEMDC'03)* "Recent Advances in Materials for Use in Permanent Magnet Machines Review", Madison, USA, 2003, vol. 1, pp. 509–515.

10. **Huang S., Aydin M., Lipo T. A.** TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies, *Proc. of IEEE Industry Applications Conf.* "TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies" Chicago, IL., USA, 2001, vol. 3, pp. 1619–1625.

11. **Hull J. R., Turner L. R.** Magnetomechanics of Internal-Dipole Halbach-Array Motor/Generators, *IEEE Trans Mag.* "Magnetomechanics of Internal-Dipole Halbach-Array Motor/Generators", 2000, vol. 36, pp. 2004–2011.

12. Krishnan R. Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications, CRC Press LLC, Florida, 2001, 416 p.

13. Qu R., Aydin M., Lipo T. A. Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines, *Proc. of IEEE International Electric machines and Drives Conf (IEMDC'03)* "Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines", Madison, USA, 2003, vol. 3, pp. 1948–1954.

14. Wichert T., Kub H. Influence of power electronics on design of Switched Reluctance Machines, *Proc. of the EPE 2005* "Influence of power electronics on design of Switched Reluctance Machines", Dresden, Germany, 2005, pp. 10.

15. Hrynkiewicz J., Afonin A., German-Galkin S., Kramarz W., Szymczak P., Cierzniewksi P. Modular reluctance electric machine. Patent WO 2001003270 A1. 11.01.2001.

16. German-Galkin S. G., Zagashvili Yu. V., Veryuzhskii V. V. Modul'naya elektricheskaya mashina (Modular electrical machine). Useful model patent RU 105540 U1. 10.06.2010. (in Russian). 17. 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).

18. 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).

19. 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.

20. User's guide — Maxwell 3D, Ansys Inc., USA, 2012, Rev. 6. 21. Rymsha V. V., Radimov I. N., Barantsev M. V. Tekhnologiya rascheta trekhmernogo statsionarnogo magnitnogo polya v ventil'noreaktivnykh elektrodvigatelyakh na platforme Ansys Workbench (Ansys Workbench powered calculation technique of stationary 3D magnetic field in switched-reluctance motors), Elektrotekhnika i Elektromekhanika, 2006, no. 6, pp. 25—32 (in Russian). 22. **Gollandtsev Yu. A.** *Ventil'nye induktorno-reaktivnye dvigateli* (Synchronous inductor-reluctance motors), St. Petersburg, SSC of RF CSRI "Elektropribor", 2003, 148 p. (in Russian).

23. 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), Elektrotekhnika i Elektromekhanika, 2009, no. 5, pp. 67–72 (in Russian).

24. Kozachenko V. F., Korpusov D. V., Ostrirov V. N. Elektroprivod na baze ventil'nykh induktornykh mashin s elektromagnitnym vozbuzhdeniem (Electrical drive based on synchronous inductor machines with electromagnetic excitation), Electronic Components, 2005, no. 6, pp. 60–64 (in Russian).

25. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P. Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną, Szczecin, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecin'skiej, 2000, 242 p. (in Polish).

УДК 681.515.8

DOI: 10.17587/mau.16.631-636

H. С. Земцов, аспирант, nikita.zemtsov@tul.cz,
 Либерецкий технический университет, г. Либерец, Чешская Республика,
 Г. А. Французова, д-р техн. наук, проф., frants@ac.cs.nstu.ru,
 Новосибирский государственный технический университет

Синтез ПИД регулятора для системы управления прямоточным котлом¹

Обсуждается задача синтеза системы управления для прямоточного котла. Рассматривается упрощенная модель одного из нагревателей, для которого с учетом возможности измерения промежуточной переменной предлагается формировать каскадное управление. Показано, что во внутреннем контуре достаточно применения типового П регулятора. Параметры внешнего контура нагревателя нестационарны и существенно зависят от нагрузки на котел, поэтому предлагается использовать ПИД регулятор, коэффициенты которого рассчитываются на основе метода локализации. Представлены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность системы управления нагревателем для основных режимов функционирования.

Ключевые слова: прямоточный котел, нагреватель, каскадное управление, нестационарный объект, ПИД регулятор, метод локализации

Введение

Паровые котлы широко применяются в теплоэнергетике и промышленности. Их основным назначением является генерация насыщенного или перегретого пара высокого давления, который приводит в движение турбину. Существуют два типа паровых котлов: газотрубные и водотрубные котлы. Последние, в свою очередь, делятся на барабанные и прямоточные [1]. Главным отличием принципа действия прямоточного котла является то, что вода проходит через испарительные трубы однократно, постепенно превращаясь в пар. В случае барабанного котла кратность циркуляции воды может достигать 30 раз, что приводит к более длительному времени приведения такого типа котлов в работее состояние и замедляет время нагрева пара. В работе рассматривается система стабилизации температуры в прямоточном котле, параметры которого изменяются в ходе технологического процесса в зависимости от нагрузки. Такие котлы широко используются в качестве резервных установок, применяющихся при пиковых сбоях или при сбоях основных котельных агрегатов. Прямоточные паровые котлы малой мощности благодаря своей компактности и относительно невысокой стоимости находят широкое применение в сфере коммунального хозяйства, небольших производствах, сельском хозяйстве [2].

1. Принцип действия прямоточного котла

В работе рассматривается прямоточный котел (рис. 1), который состоит из последовательно соединенных нагревателей [3]. Здесь HP — контур высокого давления; LP — контур низкого давления; V1—V3 — клапаны, позволяющие контролировать температуру пара на входе соответствующего нагревателя; T11 — датчик температуры пара, поступающего на лопатки турбины.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию № 2014/138, тема проекта "Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности".