

УДК 621.313.323

Ф.А. Гельвер^{1,2}, И.В. Белоусов^{1,2}, В.Ф. Самосейко^{1,2}¹Филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия²ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, филиал «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский
государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА РЕАКТИВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА

Приведен анализ различных типов реактивных электрических машин, наиболее часто используемых в регулируемом электроприводе. На основе анализа показано и доказано, что реактивная машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора имеет лучшие энергетические, массогабаритные и эксплуатационные характеристики среди различных типов реактивных электрических машин и является самой распространенной асинхронной электрической машиной. Представлены результаты экспериментальных исследований реактивных машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора (РЭМАПР) с установленной мощностью от 1,5 до 500 кВт, а также апробации теории проектирования и управления реактивной электрической машиной с анизотропной магнитной проводимостью. Подробно описаны конструкция и технология изготовления макетного образца ротора реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью с продольной шихтовкой. Проведено сопоставление результатов исследований реактивных электрических машин, у которых свойства анизотропной магнитной проводимости ротора получены за счет его продольной и поперечной шихтовки. По результатам экспериментальных исследований построены различные графики рабочих характеристик электропривода. Выполнено исследование динамических свойств электропривода с РЭМАПР. Приведены временные диаграммы пуска в ход исследуемой электрической машины. Результаты тепловых испытаний позволили установить предельные возможности, заложенные в конструкцию опытного образца машины с номинальной установленной мощностью 500 кВт. Выполнено сравнение опытного образца реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с асинхронной машиной по показателю удельной мощности. Проведенные исследования и испытания позволили выполнить верификацию теоретических исследований и разработанной методики проектирования РЭМАПР и показали их адекватность.

Ключевые слова: реактивная электрическая машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора, продольный и поперечный контур тока, магнитная проводимость, электромагнитный момент, ток намагничивания, ток нагрузки, экстремум момента, настройка на технический оптимум, робастность.

F.A. Gelver^{1,2}, I.V. Belousov^{1,2}, V.F. Samoseiko^{1,2}

¹Branch of the Central Research Institute SET, FSUE Krylov State Research Center, GUMRF them. Admiral S.O. Makarov, Saint Petersburg, Russian Federation

²GUMRF them. Admiral S.O. Makarov, branch of the Central Scientific Research Institute SET of the Federal State Unitary Enterprise Krylovsky State Research Center, Saint Petersburg, Russian Federation

RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF AN EXPERIMENTAL SAMPLE OF REACTIVE ELECTRICAL MACHINE WITH ANISOTROPIC MAGNETIC CONDUCTIVITY OF THE ROTOR

The analysis of various types of reactive electric tanks of the most frequencies used in an adjustable electric drive is presented. On the basis of the analysis, it has been shown and proved that the reactive machine with anisotropic magnetic conductivity of the rotor has the best energy, weight and size, and operational characteristics among various types of jet electric machines and the most popular asynchronous electric machine. The results of experimental studies of jet machines with anisotropic magnetic conductivity of the rotor (SynRM) with installed capacity from 1.5 kW to 500 kW, as well as approbation of the design and control theory of a reactive electric machine with anisotropic magnetic conductivity are presented. The design and manufacturing technology of a prototype rotor model of a reactive machine with anisotropic magnetic conductivity with longitudinal loading is described in detail. A comparison was made of the results of studies of reactive electric machines, in which the properties of the anisotropic magnetic conductivity of the rotor were obtained by its longitudinal and transverse blending. According to the results of experimental studies, various graphs of the operating characteristics of the electric drive were constructed. The study of the dynamic properties of the electric drive with SynRM. The timing diagrams of the start-up of the investigated electric machine are given. The results of thermal tests allowed us to establish the limiting possibilities inherent in the design of a prototype machine with a nominal installed capacity of 500 kW. A comparison of the prototype of a reactive electric machine with the anisotropic magnetic conductivity of the rotor with an asynchronous machine in terms of specific power. Studies and tests allowed verification of theoretical studies and the developed design methodology of SynRM and showed their adequacy.

Keywords: reactive electric machine with anisotropic magnetic conductivity of the rotor (SynRM), longitudinal and transverse current loop, magnetic conductivity, electromagnetic moment, magnetizing current, load current, torque extremum, tuning for a technical optimum, robustness.

Введение. Реактивные электрические машины известны достаточно давно [1–3]. Считалось, что такие машины имеют низкие коэффициенты мощности и полезного действия. Поэтому реактивным машинам в электромашиностроении отводилась незначительная роль (диапазон рациональных мощностей – до нескольких киловатт).

В настоящее время на реактивные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора (РЭМАПР) обратили серьезное внимание. Ротор такой электрической машины пассивный и может быть выполнен с применением двух технологий: продольной

шихтовки полюса ротора и поперечной шихтовки ротора со специальными вырезами. Им посвящается все большее количество работ [4] – [9]. Европейский концерн АВВ осуществляет серийный выпуск электроприводов на основе четырехполюсных реактивных электрических машин (SynRM) с поперечной шихтовкой ротора [10].

Принцип действия реактивных машин основан на пульсациях индуктивностей обмоток статора [11–13]. Обмотки статора также могут быть двух видов: с длинными (классическими) лобовыми частями и коротким лобовыми частями, исключаящими взаимную магнитную связь между фазами. Анизотропная магнитная проводимость ротора при его вращении приводит к пульсациям индуктивностей фаз обмоток статора. Реактивные электрические машины с короткими лобовыми частями обмоток, как правило, выполняются с зубчатым статором и ротором и получили в литературе название вентильно-индукторных [14, 15].

В Крыловском научном центре совместно с кафедрой электропривода Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова выполнены теоретические исследования реактивных электрических машин, по результатам которых опубликованы две монографии [16, 17]. Теоретические исследования проводились с целью обоснования перспективности использования РЭМАПР в электроприводах большой мощности (десятки МВт), в частности в электроприводах гребных винтов. Как известно [18, 19], массогабаритные показатели машин определяет величина электромагнитного момента. При прямой связи электрической машины с гребным винтом машины имеют малое число оборотов (100–300 об/мин) и большой электромагнитный момент. Поэтому особенностью гребных электрических машин являются большие массогабаритные показатели. Вследствие чего массогабаритные показатели являются одним из основных критериев выбора гребных электрических машин.

Результаты проведенных исследований [16, 17] показывают, что машины с длинными лобовыми частями обмоток статора имеют меньшие массогабаритные показатели. Поэтому их применение для электрических машин большой мощности является предпочтительным. Реактивные электрические машины, имеющие зубчатый ротор и обмотки с короткими лобовыми частями на статоре, по своим массогабаритным показателям существенно уступают всем другим видам электрических машин [20].

Другим наиболее важным фактором, влияющим на массогабаритные показатели электрической машины, является величина потерь мощности. РЭМАПР не имеют обмоток на роторе и дополнительных обмоток возбуждения на статоре [9]. Это обуславливает их конкурентное преимущество по сравнению с классическими машинами, имеющими обмотки на роторе. У асинхронного электродвигателя наличие обмотки на роторе увеличивает электрические потери по сравнению с РЭМАПР в 1,6–1,8 раза. По показателю электрических потерь РЭМАПР уступают лишь синхронным машинам с постоянными магнитами (СМПМ), у которых токи намагничивания могут отсутствовать. Необходимость намагничивать анизотропный ротор машины приводит к увеличению тока в обмотке статора на 5–13 %. Однако возможность управлять намагниченностью ротора дает РЭМАПР существенные конкурентные преимущества по сравнению с СМПМ. Кроме того, ротор РЭМАПР конструктивно существенно проще и дешевле ротора СМПМ. Следует отметить, что РЭМАПР имеют также лучшие эксплуатационные характеристики по сравнению с СМПМ.

Электромагнитный момент РЭМАПР пропорционален размаху пульсаций индуктивностей. Поэтому важным показателем эффективности РЭМАПР является отношение ξ продольной (максимальной) индуктивности L_d к минимальной (поперечной) L_q . У РЭМАПР с поперечной шихтовкой показатель $\xi \approx 6 \dots 8$, а у машин с продольной шихтовкой $\xi \approx 10 \dots 12$. Поэтому при теоретических исследованиях основное внимание было сосредоточено на РЭМАПР с продольной шихтовкой [21].

На базе выполненных теоретических исследований была разработана методика проектирования РЭМАПР [17]. Для верификации теоретических положений требовалась их экспериментальная проверка, которая была выполнена путем проектирования и изготовления макетных образцов РЭМАПР малой мощности 1,5 кВт, а также на опытном образце мощностью 500 кВт. Параллельно с теоретическими работами велись работы по разработке методов и средств управления ими. Было разработано программное обеспечение для исследования и практического применения электроприводов с РЭМАПР. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований опытного образца РЭМАПР мощностью 500 кВт с целью проверки соответствия параметров, заложенных изготовителем, теоретических положений и методики проектирования, разработанной в Крыловском научном центре.

1. Конструкция и технология изготовления макетного образца. Аппаратные и программные средства для проведения испытаний. Конструкция и технология. Для проверки теоретических положений и работоспособности предложенной конструкции РЭМАПР был спроектирован и изготовлен макетный образец ротора с анизотропной магнитной проводимостью с продольной шихтовкой [22]. Статор был взят от шестипольсного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором типа АИР90L6У3 с установленной мощностью 1,5 кВт: число пазов 36, число зубцов 36, активная длина магнитопровода статора 111,54 мм.

Полюса ротора с продольной шихтовкой были набраны из загнутых под определенным углом листов электротехнической стали с немагнитными промежутками. Полюса ротора крепятся на шпильки к валу ротора с помощью прижимных шайб и гаек. Параметры ротора: число пластин в полюсе – 15, толщина пластин 0,55 мм, материал пластин – трансформаторная сталь, зазор между пластинами ~ 0,15 мм, диаметр ротора 99,6 мм, активная длина ротора 108,5 мм. На рис. 1 представлена технология изготовления такого ротора.

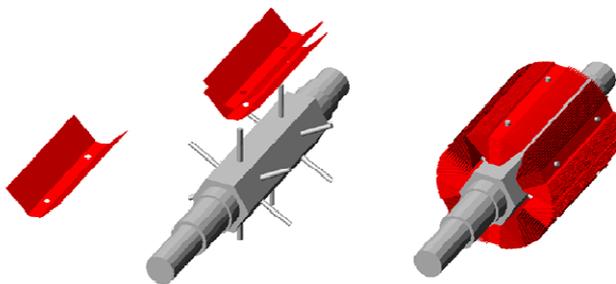


Рис. 1. Технология изготовления ротора реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с продольной шихтовкой

Для придания механической прочности такой конструкции ротора все пустоты между пластинами полюсов и ротором были залиты компаундом на основе эпоксидной смолы, после чего выполнена проточка ротора до требуемого диаметра. Такая технология изготовления позволила в кратчайшие сроки, без использования дорогостоящего оборудования, изготовить ряд роторов различной конструкции.

Так, в частности, были изготовлены роторы со скосом полюсов относительно магнитопровода статора (рис. 2). Скос пакета полюса ротора был выполнен на одно зубцовое деление магнитопровода статора. Использование скоса полюсов ротора относительно магнитопровода статора позволило сгладить зубцовые пульсации индуктивности статорных обмоток и уменьшить пульсации электромагнитного момента. Также для проведения экспериментов по прямому пуску РЭМАПР были изготовлены различные конструкции роторов с пусковой (демпферной) обмоткой.



Рис. 2. Заготовка ротора реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью со скосом полюсов ротора (до компаундирования и проточки)

Испытания макетов РЭМАПР проводились в составе электропривода с преобразователем частоты. При этом отработывалась методика управления такими машинами. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность и высокие энергетические характеристики предложенной конструкции реактивной электрической машины. Подробные результаты экспериментальных исследований макетных образцов РЭМАПР с продольной шихтовкой представлены в [22, 23]. По результатам исследований макетных образцов проведена работа по совершенствованию методики проектирования, технологии изготовления и теории управления РЭМАПР. В результате теоретических исследований авторами опубликовано множество научных работ в рецензируемых научных журналах [12], [24–27].

Опытный образец РЭМАПР. В рамках опытно конструкторской работы была спроектирована РЭМАПР с продольной шихтовкой ротора. Однако по ряду причин в ПАО «НИПТИЭМ» была изготовлена РЭМАПР с поперечной шихтовкой ротора [5], габаритный чертеж

которой приведен на рис. 3. Охлаждение машины принудительное жидкостное. Номинальные данные опытного образца РЭМАПР с поперечной шихтовкой, установленные изготовителем, приведены в таблице (взяты с шильдика).

Номинальные данные опытного образца РЭМАПР с поперечной шихтовкой, установленные изготовителем

Тип	Электрические параметры					Масса, кг
	P , кВт	Частота вращения, об/мин	U , В	$\cos \varphi$	I_n , А	
СРД 549/6-ОМ5	500	1000	796	0,77	495	2100

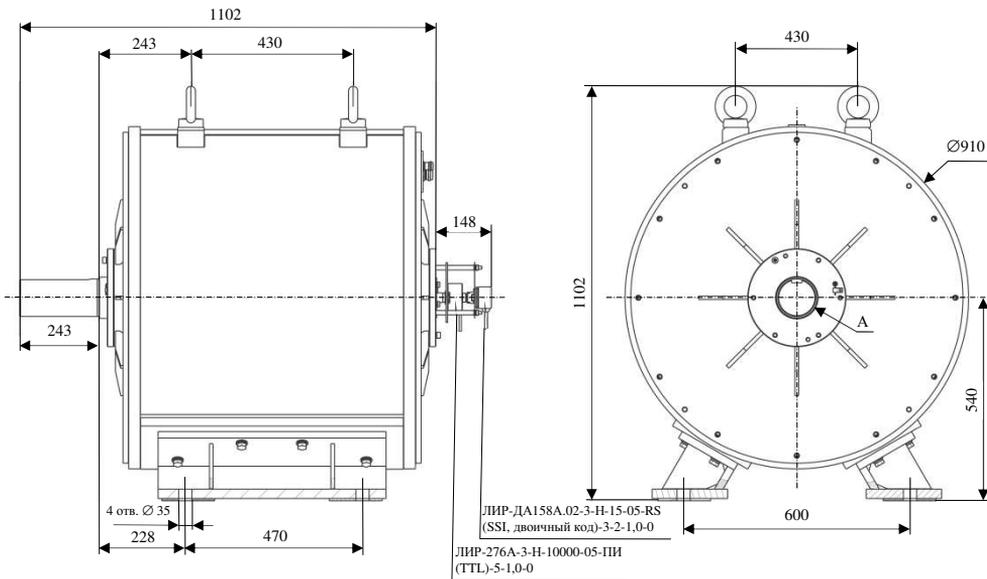


Рис. 3. Габаритный чертеж реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с поперечной шихтовкой

На рис. 4 представлено фото ротора реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с поперечной шихтовкой ротора.

Аппаратные и программные средства испытаний. Для управления опытным образцом РЭМАПР мощностью 500 кВт был спроектирован и изготовлен преобразователь частоты со звеном постоянного тока. Выпрямление напряжения сети осуществляется двумя трехфазными диодными мостами, образующими двенадцатипульсную схему

выпрямления. Выпрямленное напряжение преобразуется в переменное напряжение трехфазным двухуровневым инвертором напряжения. Фото преобразователя частоты представлено на рис. 5.



Рис. 4. Ротор реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора с поперечной шихтовкой

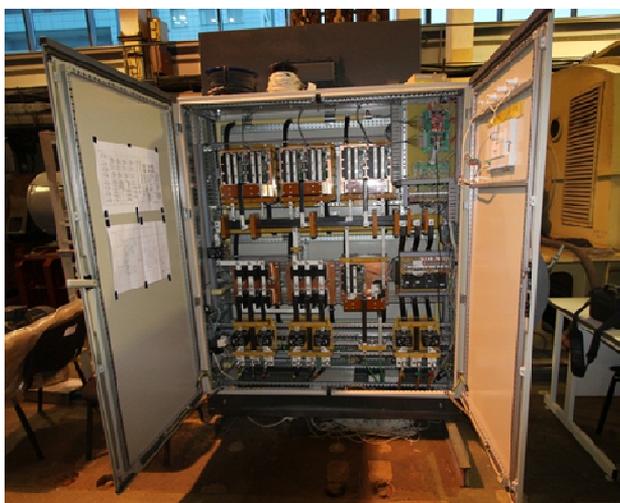


Рис. 5. Преобразователь частоты для управления реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора

Для управления реактивной электрической машиной была спроектирована, изготовлена и отлажена плата системы управления (рис. 6), которая обладает широкими функциональными возможностями. Она позволяет осуществлять управление различными типами электрических преобразователей и электроприводами с различными типами электрических машин.

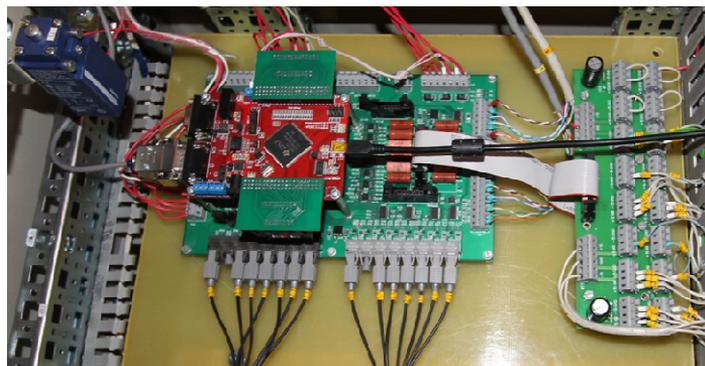


Рис. 6. Платы системы управления

Плата изготовлена с использованием микроконтроллера фирмы Texas Instruments TMS320F28335. Для расширения функциональных возможностей процессорной платы была спроектирована и изготовлена переходная кросс-плата, которая обладает аналоговыми и дискретными входами и выходами и различными интерфейсами связи. В частности, на плате предусмотрено 8 ШИМ-каналов управления силовыми транзисторами с возможностью управления как по оптическому каналу, так и потенциальными сигналами управления, 8 каналов обработки информации ошибок с драйверов. С целью исключения возникновения аварийных ситуаций на плате системы управления предусмотрена аппаратная блокировка одновременного включения верхнего и нижнего силового ключа одного полумоста. На плате системы управления также предусмотрены 16 каналов аналоговых входов, 2 аналоговых выхода, 8 дискретных входов, 4 релейных выхода и 2 транзисторных ШИМ-выхода, а также возможность одновременной обработки информации с абсолютного и инкрементального энкодеров. Помимо того на плате предусмотрены быстродействующие входы и выходы синхронизации, позволяющие использовать несколько плат при управлении сложными электрическими преобразователями, содержащими большое количество полностью управляемых силовых ключей. Широкие функциональные возможности разработанной платы позволяют использовать ее для решения широкого круга задач, связанных с управлением различными электрическими преобразователями и электроприводами на их основе.

Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять управление, настройку, а также и осциллографирование переменных управления и значений, получаемых с различных датчиков в режиме

реального времени. На рис. 7 представлен интерфейс пользователя компьютерной системы управления электроприводом на базе реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

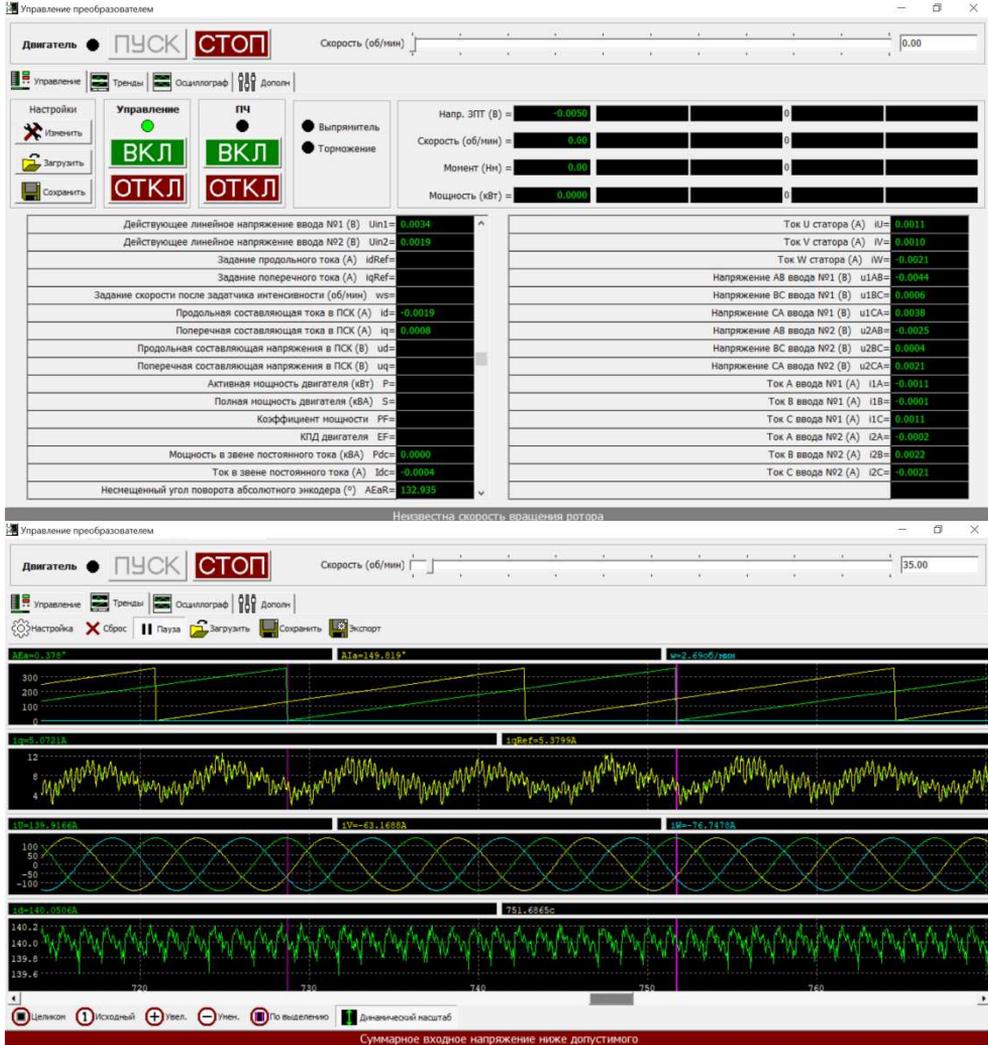


Рис. 7. Интерфейс пользователя

Компьютерная программа позволяет осуществлять построение и запись различных графиков динамических процессов в электроприводе, а также автоматизированно производить идентификацию параметров реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

Система управления и программное обеспечение испытаний.

Характеристики электрической машины определяются не только ее параметрами, заложенными при ее изготовлении, но используемой системой управления. В классической теории электрических машин характеристики функционирования машины обычно приводятся при номинальной постоянной амплитуде и частоте синусоидального напряжения [2, 3]. Однако в настоящее время электрические машины обычно питаются от преобразователей частоты, что позволяет использовать для их управления различные алгоритмы. Наиболее распространены алгоритмы управления, предполагающие представление тока статора в виде вектора в системе координат $d-q$, одна из координат которого (обычно d) является током намагничивания i_d , а другая (q) – током нагрузки i_q .

Структурная схема системы управления, использовавшаяся при испытаниях опытного образца РЭМАПР, приведена на (рис. 8). Настройка регуляторов выполнена по принципу технического оптимума. Сигналы управления y_D^* и y_Q^* задают значения соответственно тока намагничивания и нагрузки.

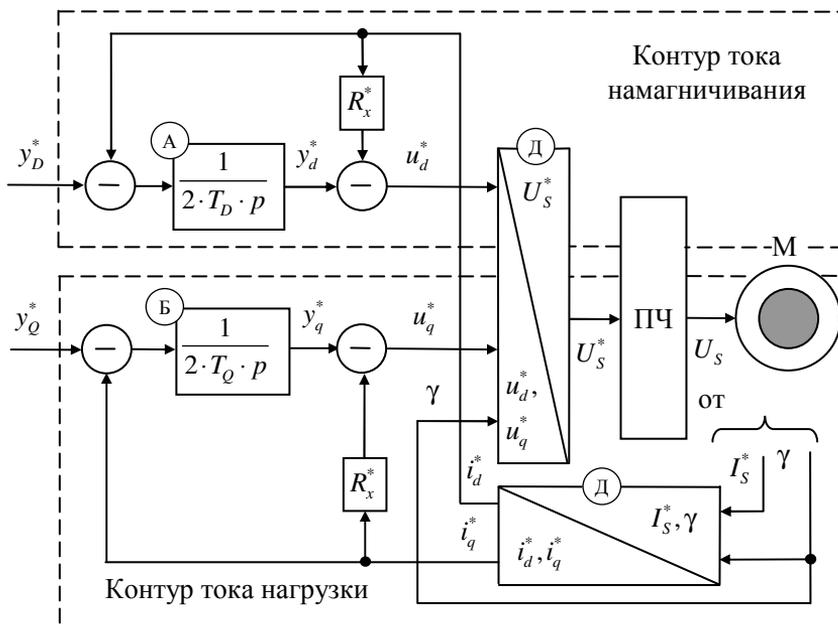


Рис. 8. Структурная схема системы управления реактивной машиной с анизотропной магнитной проводимостью ротора реализующая алгоритм управления с максимальным быстродействием: А – регулятор тока намагничивания; Б – регулятор тока нагрузки; Д – блоки преобразования напряжений и токов статора; ПЧ – преобразователь частоты

Испытательный стенд. Испытания РЭМАПР с номинальной мощностью 500 кВт и номинальным числом 1000 об/мин проводились на испытательной установке, схема которой приведена на рис. 9. Нагрузка РЭМАПР производилась тремя нагрузочными машинами постоянного тока номинальной мощностью 400 кВт и номинальным числом 1500 об/мин. На рис. 10 представлено фото исследовательского стенда опытного образца РЭМАПР (на переднем плане).

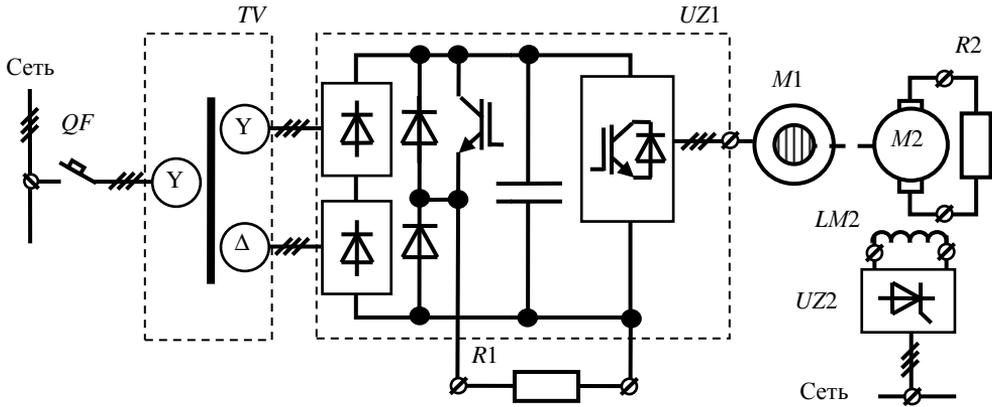


Рис. 9. Схема испытательной установки РЭМАПР: QF – автоматический выключатель; TV – согласующий трансформатор; $UZ1$ – преобразователь частоты; $M1$ – РЭМАПР; $M2$ – нагрузочные машины постоянного тока; $UZ2$ – тиристорный преобразователь; $R1$ – тормозной резистор; $R2$ – нагрузочный резистор



Рис. 10. Исследовательский стенд опытного образца РЭМАПР

2. Результаты статических испытаний опытного образца РЭМАПР. Относительные единицы. При анализе результатов испытаний использованы относительные единицы – отношения именованных величин к базовым. Переменные и параметры, представленные в относительных единицах, помечаются верхним индексом*. За основные базовые величины приняты номинальный ток статора $I_n = 495$ А, номинальное фазное напряжение $U_n = 460$ В и угловая частота сети $\omega_6 = 314$ рад/с. Производные базовые величины определяются из основных по соотношениям:

$$R_6 = U_n / I_n = 0,929 \text{ Ом}; L_6 = R_6 / \omega_6 = 2,96 \text{ мГн};$$

$$P_6 = S_n = 3 \cdot U_n \cdot I_n = 683 \text{ кВт}; M_6 = p_n \cdot P_6 / \omega_6 = 6,53 \text{ кНм};$$

$$\Omega_6 = \omega_6 / p_n = 104,7 \text{ рад/с},$$

где p_n – число пар полюсов электрической машины (для исследуемого макетного образца $p_n = 3$).

Кривые намагничения – зависимости модуля действующего значения фазного напряжения на обмотке статора U^* от тока намагничивания I_d^* – приведены на рис. 11 при относительных токах нагрузки $I_q^* = 0, 0,5$ и 1.

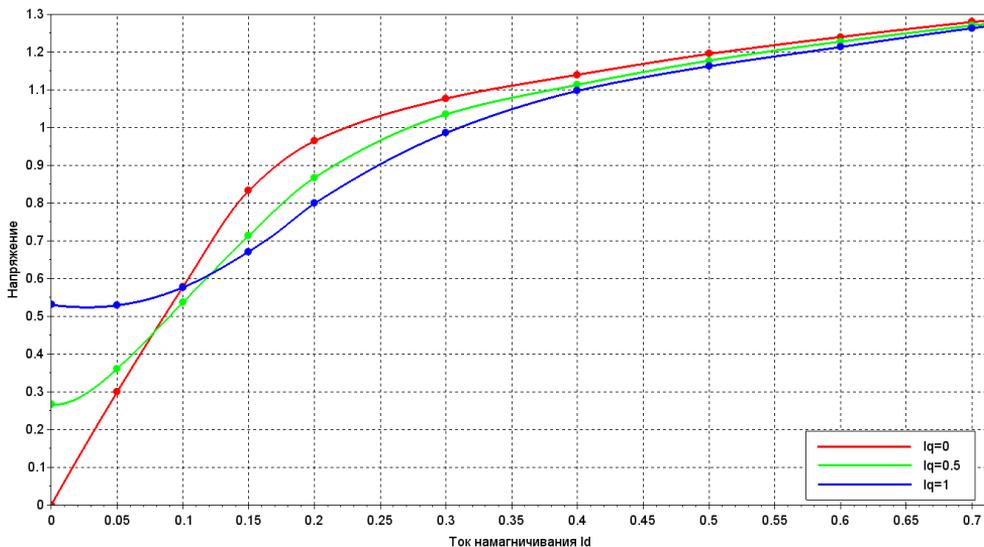


Рис. 11. Кривая намагничивания опытного образца РЭМАПР в относительных единицах

Поскольку номинальный ток намагничивания не определен изготовителем РЭМАПР, то он был выбран по кривой намагничивания, $I_d^* = 0,311$, так, чтобы под номинальной нагрузкой напряжение на обмотках статора было равно номинальному значению. Из значения номинального тока намагничивания номинальный ток нагрузки определен выражением:

$$I_{qn}^* = \sqrt{I_n^{*2} - I_d^{*2}} = 0,95.$$

Таким образом, принятое относительное номинальное значение токов намагничивания и нагрузки $I_d^* = 0,311$ и $I_{qn}^* = 0,95$.

Электромагнитный момент РЭМАПР. В испытательном стенде отсутствовало оборудование для непосредственного измерения электромагнитного момента. Поэтому относительный электромагнитный момент РЭМАПР определяется путем вычислений по формуле:

$$M^* = (L_d^* - L_q^*) \cdot I_d^* \cdot I_q^*, \quad (1)$$

где L_d^* – полная относительная статическая продольная индуктивность; L_q^* – полная относительная статическая поперечная индуктивность; I_d^* и I_q^* – относительные токи намагничивания и нагрузки в системе координат $d-q$.

Исследования показали, что полная поперечная индуктивность машины не зависит от тока нагрузки, а ее относительная величина при номинальном токе намагничивания и номинальном токе нагрузки $L_q^* = 0,38$. Идентификация полной продольной индуктивности опытного образца РЭМАПР по математической модели показала, что ее величина зависит не только от тока намагничивания, но и от тока нагрузки. На рис. 12 приведена зависимость полной продольной индуктивности обмотки статора от тока нагрузки при номинальном токе намагничивания в относительных единицах. При относительном значении тока нагрузки $I_q^* = 1,18$ полная продольная индуктивность обмотки статора уменьшилась на 21 %.

Таким образом, из приведенных данных следует, что увеличение тока нагрузки ведет к размагничиванию машины и снижению электромагнитного момента. Влияние на полную продольную индуктивность токов нагрузки I_q^* кратностью больше 1,18 оказалось невозможным из-за ограничений по максимальному току преобразователя частоты. Однако из проведенных исследований следует, что целесообразно

варьировать токи намагничивания и нагрузки так, чтобы получать максимальные значения электромагнитного момента при заданном токе обмотки статора.

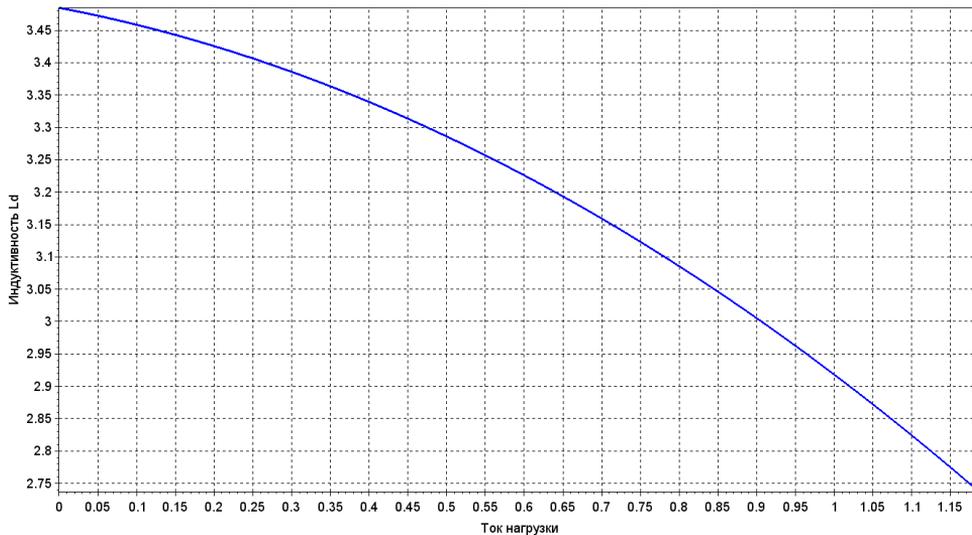


Рис. 12. Зависимость полной продольной индуктивности обмотки статора от тока нагрузки при номинальном токе намагничивания в относительных единицах

Рабочие характеристики. Рабочие характеристики снимались в стационарном режиме работы. Под рабочими характеристиками понимаются зависимости, представленные в относительных единицах, от коэффициента загрузки при номинальном токе намагничивания ($I_d^* = 0,311$) и номинальной частоте ($\omega^* = 1$): частоты вращения ω^* , тока статора I^* , электромагнитного момента M^* , коэффициента мощности $\cos(\varphi)$ и коэффициента полезного действия η . Коэффициент загрузки машины определяется как отношение $k_3 = I_q/I_{qn}$.

Электромагнитный момент вычислялся по формуле (1). Относительный ток статора вычислялся по формуле:

$$I^* = \sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}}.$$

Коэффициент мощности и коэффициент полезного действия вычислялись по формулам:

$$\cos(\varphi) = \frac{U_d^* \cdot I_d^* + U_q^* \cdot I_q^*}{\sqrt{U_d^{*2} + U_q^{*2}} \cdot \sqrt{I_d^{*2} + I_q^{*2}}}; \quad \eta = \frac{\omega^* \cdot M^*}{U_d^* \cdot I_d^* + U_q^* \cdot I_q^*},$$

где U_d^* и U_q^* – относительные напряжения на обмотке статора в системе координат $d-q$; ω^* – относительная частота токов статора.

Графики рабочих характеристик при постоянном токе намагничивания приведены на рис. 13.

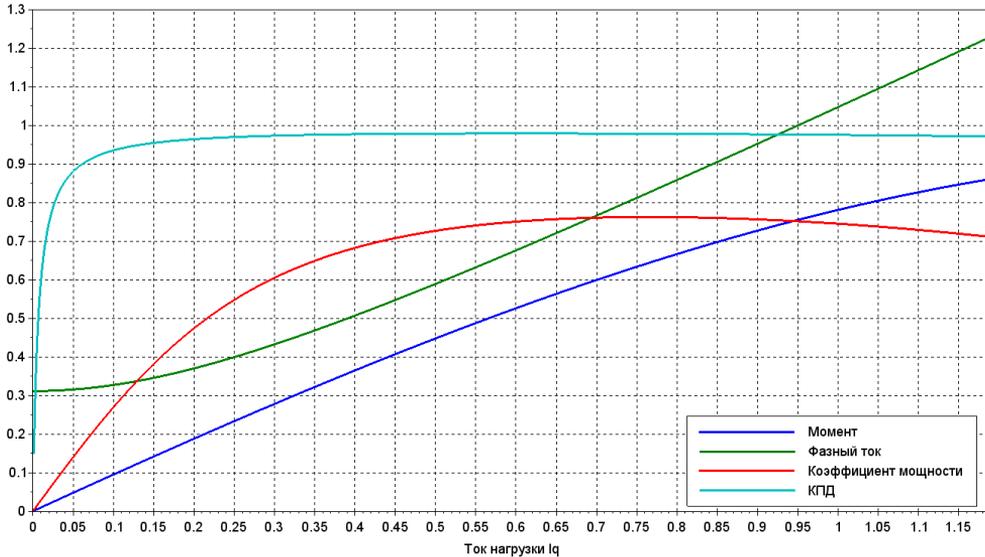


Рис. 13. Рабочие характеристики РЭМАПР в относительных единицах при постоянном номинальном токе намагничивания

Динамические характеристики РЭМАПР. Динамические характеристики определяются как физическими параметрами машины, так и настройками системы управления. Испытания опытного образца РЭМАПР проводились при использовании алгоритма управления, определенного структурной схемой, представленной на рис. 8, и настройке регуляторов тока намагничивания и нагрузки на технический оптимум. В результате испытаний снимались переходные характеристики переменных состояния электропривода: относительный ток намагничивания i_d^* и нагрузки i_q^* , а также относительная скорость вращения ротора ω^* .

На рис. 14 представлены графики переходного процесса при пуске в ход РЭМАПР без осуществления предварительного намагничивания, а на рис. 15 – графики переходного процесса при пуске в ход РЭМАПР с предварительным намагничиванием током $I_d^* = 0,311$, при этом максимальная величина пускового тока I_q^* была ограничена возможностями преобразователя частоты ($I^* = 1,227$) и не могла превышать значения 1,18.

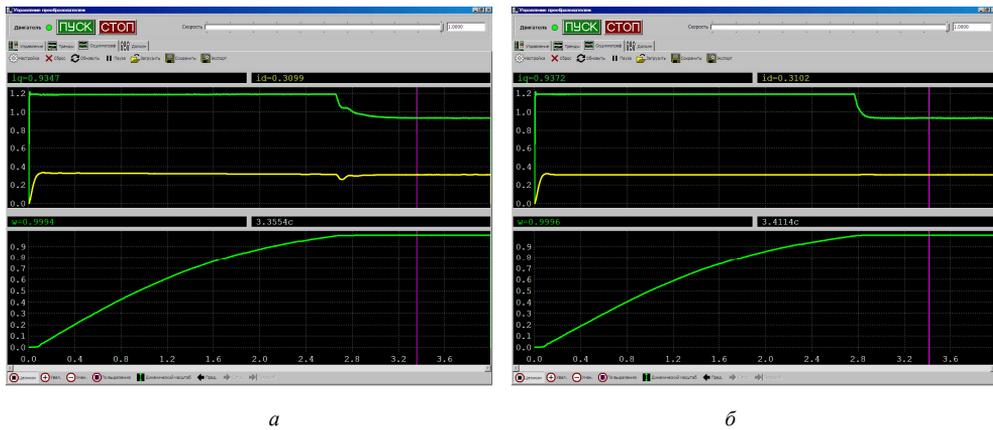


Рис. 14. Графики токов статора i_d^* , i_q^* и скорости вращения ротора ω^* при пуске без предварительного намагничивания в относительных единицах:
 а – без компенсации влияния тока i_q^* на i_d^* ; б – с компенсацией

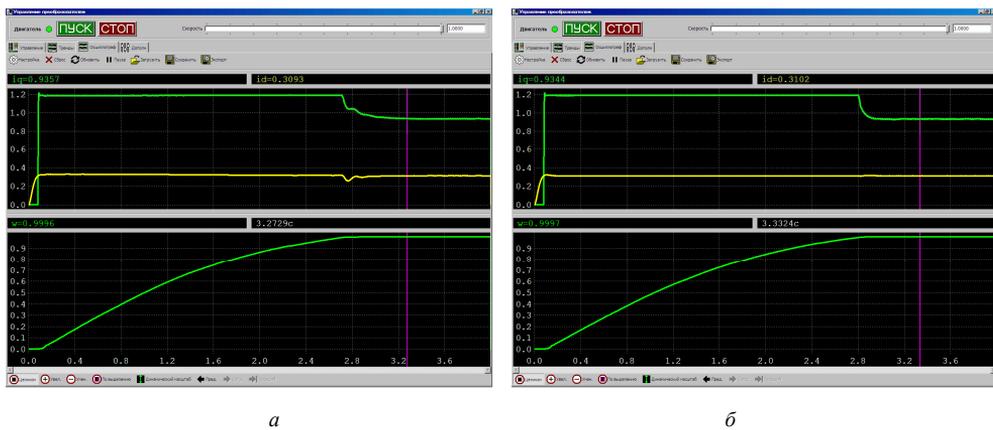


Рис. 15. Графики токов статора i_d^* , i_q^* и скорости вращения ротора ω^* при пуске с предварительным намагничиванием в относительных единицах:
 а – без компенсации влияния тока i_q^* на i_d^* ; б – с компенсацией

Тепловые испытания РЭМАПР. Тепловой режим работы машины определяет нагрузка. Наиболее нагретым элементом машины является обмотка статора. На тепловое повреждение изоляции приходится наибольшее число отказов. Чем выше нагрузка, тем выше температура изоляции обмотки статора. Ресурс изоляции уменьшается вдвое при увеличении рабочей температуры на каждые 10°C и может быть вычислен по формуле

$$T \approx T_n \cdot \exp(\Delta\tau / 15),$$

где $\Delta\tau$ – снижение температуры относительно температурного индекса изоляции, в $^{\circ}\text{C}$; T_n – ресурс изоляции при нагреве до температуры, соответствующей температурному индексу ($T_n = 20\,000$ ч). Температурный индекс изоляции класса H составляет 180°C . Обычно для повышения ресурса машины допустимую температуру нагрева изоляции снижают на $\Delta\tau = 20^{\circ}\text{C}$ относительно ее температурного индекса. Допустимая температура обмотки для изоляции класса H составляет 160°C .

При тепловых испытаниях температура нагрева обмотки измерялась в ее лобовой части. Температура окружающей среды при тепловых испытаниях составляла $\sim 20^{\circ}\text{C}$. Результаты испытаний показали, что при длительном режиме работы с номинальным значением относительного тока статора $I_n^* = 1$ температура перегрева обмотки составила $71,8^{\circ}\text{C}$. При относительном токе статора $I^* = 1,227$ температура перегрева обмотки статора составила 108°C . Температуре перегрева обмотки 120°C в длительном режиме работы будет соответствовать относительное значение тока $I^* = 1,29$. При этом расчетный ресурс изоляции обмотки составит $80\,000$ ч.

Выводы. Испытания опытного образца РЭМАПР показали, что он удовлетворяет заявленным данным и может быть использован на судах в качестве гребного электродвигателя. При принятом относительном значении тока намагничивания $I_d^* = 0,311$ коэффициент мощности машины при номинальном токе нагрузки достигает значения $0,76$. Исследования показали, что для достижения максимального электромагнитного момента целесообразно поднять относительный ток намагничивания до $I_d^* = 0,45$, а напряжение увеличить на 11% . При этом коэффициент мощности составит $0,75$, а номинальная мощность, которую можно получить на валу электрической машины, составит 565 кВт. Номинальный коэффициент полезного действия машины составил $0,97$.

Тепловые испытания показали, что установленное номинальное значение тока статора 495 А может быть повышено до значения 650 А. В этом случае температура перегрева обмотки РЭМАПР будет составлять 120°C , а мощность на валу – 670 кВт при ресурсе изоляции обмотки $80\,000$ ч.

Удельная масса опытного образца РЭМАПР при мощности 670 кВт составит $3,13$ т/МВт. Аналогичный образец асинхронной машины имеет удельную массу ~ 6 т/МВт.

Проведенные испытания позволили выполнить верификацию теоретических исследований и разработанной методики проектирования РЭМАПР, а также показали их адекватность.

Библиографический список

1. Кононенко Е.В. Синхронные реактивные машины. – М.: Энергия, 1970. – 208 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для студ. высш. учеб. завед. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
4. Шрейнер Р.Т., Шилин С.И., Медведев А.В. Математическое моделирование синхронных реактивных двигателей в составе частотно-регулируемого электропривода // Электроприводы переменного тока – ЭПТТ: материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 26–30 марта 2018 г. – Екатеринбург, 2018. – С. 58–63.
5. Захаров А.В. Перспективы технического применения синхронных электродвигателей с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVIII Бернадосовские чтения): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. – Иваново, 2015. – С. 124–127.
6. Tammi A., Termini P., Kansakangas T. Magnet-free motor technology for field speed applications reaching “IE5” efficiency level // Eemods 15, Helsinki 15–17 September 2015. – URL: http://www.eemods15.info/midcomserveattachmentguid-1e55dfbb33f02fc5dfb11e5ac6fc777b4bb692d692d/motor_s6_ari_tammi.pdf
7. Oprea C., Dziechciarz A, Martis C. Comparative analysis of different synchronous reluctance motor topologies // International Conference on Environment and Electrical Engineering; June 10–13, 2015. – Rome, 2015.
8. Characteristics analysis and optimum design of anisotropy rotor synchronous reluctance motor using coupled finite element method and response surface methodology / J. Ho Lee, K. Lee, Y. Hyun Cho, T. Won Yun // IEEE Transactions on Magnetics. – October 2009. – Vol. 45. – P. 4696–4699.
9. Development of a high efficient electric drive with synchronous reluctance motor / V. Dmitrievskii, V. Prakht, V. Kazakbaev, A. Pozdeev, S. Oshurbekov // Electrical Machines and Systems (ICEMS): 18th International Conference on, IEEE, Pattaya, Thailand. – October 2015. – № 4. – P. 876–881.

10. Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications // Katalog ABB. – June, 2013. – URL: <http://www.abb.com/motors&generators>

11. Самосейко В.Ф. Теоретические основы управления электроприводом. – СПб.: Элмор, 2007. – 464 с.

12. Гельвер Ф.А., Белоусова Н.В., Самосейко В.Ф. Реактивный электрический преобразователь с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП 2014) (г. Саранск, 7–9 октября 2014 г.). – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 394–398.

13. Казакбаев В.М. Разработка высокоэффективного синхронного реактивного двигателя: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург: Изд-во Урал. федерал. ун-та им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – 128 с.

14. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода // Электричество. – 1997. – № 8. – С. 35–44.

15. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели // СПб. ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор». – СПб., 2003. – 148 с.

16. Реактивные электрические машины с зубчатым статором и ротором. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В.Ф. Самосейко, Ф.А. Гельвер, В.А. Хомяк, Н.А. Лазаревский. – СПб.: Изд-во Крылов. гос. науч. центра, 2016. – 174 с.

17. Синхронные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В.Ф. Самосейко, Ф.А. Гельвер, В.А. Хомяк, Д.А. Хайров. – СПб.: Изд-во Крылов. гос. науч. центра, 2016. – 174 с.

18. Гельвер Ф.А., Белоусова Н.В., Самосейко В.Ф. Реактивный электромеханический преобразователь с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП 2014) (г. Саранск, 7–9 октября 2014 г.). – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 394–398.

19. Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного электродвигателей / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, В.М. Казакбаев [и др.] // Электроприводы переменного тока (ЭППТ 2015): материалы XVI науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 05–09 октября 2015 г.). – Екатеринбург, 2015. – С. 19–22.

20. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А. Сравнение различных типов реактивных электрических машин по энергетическим показателям // Труды Крылов. гос. науч. центра. – СПб., 2015. – № 89(373). – С. 201–208.

21. Пат. RU2013118822 (А) Рос. Федерация, МПК H02K1/22, H02K19/20. Синхронная машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора / Ф.А. Гельвер, В.Ф. Самосейко, Н.А. Лазаревский, И.В. Гагаринов, В.А. Хомяк; заяв. и патентообл. ООО «Науч.-производ. центр "Судовые электротехнические системы"» (ООО НПЦ «СЭС»). № 2541513; заявл. 23.04.2013, опубл.27.10.2014. Бюл. № 30.

22. Гельвер Ф.А. Реактивная электрическая машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Материалы конф. молодых и спец. – СПб.: Изд-во Крылов. гос. науч. центра, 2014. – С. 25–34.

23. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Хомяк В.А. Синхронная машина с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Труды Крылов. гос. науч. центра. – СПб., 2014. – Т. 2, № 365. – С. 143–150.

24. Самосейко В.Ф., Гельвер Ф.А., Белоусов И.В. Перспективы использования реактивных электрических машин в электроприводе // Труды 9-й Междунар. (10-й Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП 2016; Пермь, 3–7 октября 2016 г. (ICPDS 2016). – Пермь, – С. 359–363.

25. Гельвер Ф.А., Самосейко В.Ф. Магнитные проводимости многополюсной реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 27. – С. 7–29.

26. Перспективный электропривод на основе реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора / Ф.А. Гельвер, В.Ф. Самосейко, И.В. Белоусов, А.В. Саушев // Труды X Междунар. конф. по автоматизированному электроприводу АЭП 2018: Новочеркасск, 3–6 октября. – Новочеркасск: Лик, 2018. – С. 9–13.

27. Гельвер Ф.А., Самосейко В.Ф. Магнитные проводимости двухполюсной реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 71–81.

References

1. Kononenko E.V. Sinkhronnye reaktivnye mashiny [Synchronous reluctance motor]. Moscow: Energiia, 1970. 208 p.
2. Ivanov-Smolenskii A.V. Elektricheskie mashiny [Electric machine]. Moscow: Energiia, 1980. 928 p.
3. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machine]. Leningrad: Energiia, 1978. 832 p.
4. Shreiner R.T., Shilin S.I., Medvedev A.V. Matematicheskoe modelirovanie sinkhronnykh reaktivnykh dvigatelei v sostave chastotno-reguliruemogo elektroprivoda [Mathematical modeling of synchronous reluctance motors as part of a variable frequency drive]. *Elektroprivody peremennogo toka - EPPT. Materialy XVII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 26-30 March 2018. Ekaterinburg, 2018, pp. 58-63.
5. Zakharov A.V. Perspektivy tekhnicheskogo primeneniia sinkhronnykh elektrodvigatelei s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Prospects for the technical application of synchronous motors with rotor magnetic anisotropic conductivity]. *Sostoianie i perspektivy razvitiia elektrotekhnologii (XVIII Bernadosovskie chteniia). Tezisy dokladov mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Ivanovo, 2015, pp. 124-127.
6. Tammi A., Termini P., Kansakangas T. Magnet-free motor technology for field speed applications reaching “IE5” efficiency levelю. Eemods 15, Helsinki 15-17 September 2015, available at: http://www.eemods15.info/midcom-serveattachmentguid-1e55dfbb33f02fc5dfb11e5ac6fc777b4bb692d692d/motors6_ari_tammi.pdf
7. Oprea C., Dziechciarz A, Martis C. Comparative analysis of different synchronous reluctance motor topologies. *International Conference on Environment and Electrical Engineering*, June 10-13, 2015. Rome, 2015.
8. Ho Lee J., Lee K., Hyun Cho Y., Won Yun T. Characteristics analysis and optimum design of anisotropy rotor synchronous reluctance motor using coupled finite element method and response surface methodology. *IEEE Transactions on Magnetics*. October 2009, vol. 45, pp. 4696-4699.
9. Dmitrievskii V., Prakht V., Kazakbaev V., Pozdeev A., Oshurbekov S. Development of a high efficient electric drive with synchronous reluctance motor. *Electrical Machines and Systems (ICEMS): 18th International Conference on, IEEE, Pattaya, Thailand*. October 2015, no. 4, pp. 876-881.

10. Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications. *Katalog ABB*. June, 2013, available at: <http://www.abb.com/motors&generators>

11. Samoseiko V.F. Teoreticheskie osnovy upravleniia elektroprivodom [Theoretical basics of motor control]. Saint Petersburg: Elmor, 2007. 464 p.

12. Gel'ver F.A., Belousova N.V., Samoseiko V.F. Reaktivnyi elektricheskii preobrazovatel' s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Reactive electric converter with anisotropic magnetic rotor conductivity]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP 2014)*, 7-9 October 2014. Saransk: Mordovskii universitet, 2014, pp. 394-398.

13. Kazakbaev V.M. Razrabotka vysokoeffektivnogo sinkhronnogo reaktivnogo dvigatel'ia [Development of high-performance synchronous reluctance motor]. Abstract of Ph.D. thesis. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina, 2017. 128 p.

14. Bychkov M.G. Elementy teorii ventil'no-induktornogo elektroprivoda [Elements of the theory of valve-inductor electric]. *Elektrichestvo*, 1997, no. 8, pp. 35-44.

15. Gollandtsev Iu.A. Ventil'nye induktorno-reaktivnye dvigateli [Valve inductor-jet engines]. Saint Petersburg: Gosudarstvennyi nauchnyi tsentr Rossiiskoi Federatsii AO "Kontsern "TSNII "Elektroribor", 2003. 148 p.

16. Samoseiko V.F., Gel'ver F.A., Khomiak V.A., Lazarevskii N.A. Reaktivnye elektricheskie mashiny s zubchatym statorom i rotorom. Metodika proektirovaniia. Algoritmy upravleniia [Reactive electric machine with crenellated stator and rotor. The design technique. Control algorithms]. Saint Petersburg: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2016. 174 p.

17. Samoseiko V.F., Gel'ver F.A., Khomiak V.A., Khairov D.A. Sinkhronnye elektricheskie mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora. Metodika proektirovaniia. Algoritmy upravleniia [Synchronous electrical machines with anisotropic magnetic rotor conductivity. The design technique. Control algorithms]. Saint Petersburg: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2016. 174 p.

18. Gel'ver F.A., Belousova N.V., Samoseiko V.F. Reaktivnyi elektromekhanicheskii preobrazovatel' s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Reactive electromechanical transducer with anisotropic mag-

netic rotor conductive]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoi (XIX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP 2014)*, 7-9 Oktober 2014. Saransk: Mordovskii universitet,, 2014, pp. 394-398.

19. Dmitrievskii V.A., Prakht V.A., Kazakbaev V.M. et al. Eksperimental'noe sravnenie asinkhronnogo i sinkhronnogo reaktivnogo elektrodvigatelyi [An experimental comparison of asynchronous and synchronous reluctance motors]. *Elektroprivody peremennogo toka (EPPT 2015). Materialy XVI Nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*, 05-09 Oktober 2015. Ekaterinburg, 2015, pp. 19-22.

20. Samoseiko V.F., Gel'ver F.A. Sravnenie razlichnykh tipov reaktivnykh elektricheskikh mashin po energeticheskim pokazateliam [Comparison of different types of reactive electric cars on the energy performance of]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. Saint Petersburg, 2015, no. 89(373), pp. 201-208.

21. Gel'ver F.A., Samoseiko V.F., Lazarevskii N.A., Gagarinov I.V., Khomiak V.A. Sinkhronnaia mashina s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Synchronous machine rotor magnetic anisotropic conductivity]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2541513 (2014).

22. Gel'ver F.A. Reaktivnaia elektricheskaiia mashina s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Reactive electrical machine with a rotor magnetic anisotropic conductivity]. *Materialy konferentsii molodykh uchennykh i spetsialistov*. Saint Petersburg: Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2014, pp. 25-34.

23. Samoseiko V.F., Gel'ver F.A., Khomiak V.A. Sinkhronnaia mashina s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Synchronous machine rotor magnetic anisotropic conductivity]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. Saint Petersburg, 2014, vol. 2, no. 365, pp. 143-150.

24. Samoseiko V.F., Gel'ver F.A., Belousov I.V. Perspektivy ispol'zovaniia reaktivnykh elektricheskikh mashin v elektroprivode [Prospects for the use of reactive electric cars in the drive]. *Trudy 9-i Mezhdunarodnoi (10-i Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2016*, 3-7 Oktober 2016. Perm, pp. 359-363.

25. Gel'ver F.A., Samoseiko V.F. Magnitnye provodimosti mnogopoliusnoi reaktivnoi mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Magnetic conductance multipolar reluctance machine with

anisotropic magnetic rotor conductive]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 27, pp. 7-29.

26. Gel'ver F.A., Samoseiko V.F., Belousov I.V., Saushev A.V. Perspektivnyi elektroprivod na osnove reaktivnoi elektricheskoi mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Promising actuator based reactive electric machine with a rotor magnetic anisotropic conductivity]. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP 2018*, 3-6 October. Novocherkassk: Lik, 2018, pp. 9-13.

27. Gel'ver F.A., Samoseiko V.F. Magnitnye provodimosti dvukhpoliusnoi reaktivnoi mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'iu rotora [Magnetic conductance of the bipolar reluctance machine with anisotropic magnetic rotor conductive]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 71-81.

Сведения об авторах

Гельвер Фёдор Андреевич (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории филиала «ЦНИИ СЭТ» Крыловского государственного научного центра (196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6), доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: gелver@bk.ru).

Белоусов Игорь Владимирович (Санкт-Петербург, Россия) – доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7), ведущий инженер филиала «ЦНИИ СЭТ» Крыловского государственного научного центра (196128, Санкт-Петербург, ул. Благодатная, 6, e-mail: ibel@bk.ru).

Самосейко Вениамин Францевич (Санкт-Петербург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7), e-mail: samoseyko@mail.ru).

About the authors

Gelver Fedor Andreevich (Saint Petersburg, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the laboratory of the branch “TsNII SET” Krylov State Research Center (196128, Saint Petersburg, 6, Blagodatnaya str.), Associate Professor "Electric drive and electrical equipment of shore installations" GUMRF them. Admiral S.O. Makarov (198035, Saint Petersburg, 5/7, Dvinskaya str., e-mail: gelver@bk.ru).

Belousov Igor Vladimirovich (Saint Petersburg, Russian Federation) is a Associate Professor of the Department “Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations” FSBEI HE “GUMRF them. Admiral S.O. Makarov (196128, Saint Petersburg, 1980, 5/7, Dvinskaya str.), leading engineer of the branch «TsNII SET» FGUP «Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr» (196128, Saint Petersburg, 6, Blagodatnaya str., e-mail: ibel@bk.ru).

Samoseiko Veniamin Frantsevich (Saint Petersburg, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor Department of the electric drive and electrical equipment onshore installations Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (198035, Saint Petersburg, 5/7, Dvinskaya str., e-mail: samoseyko@mail.ru).

Получено 17.01.2019