

Разработка на тестовой модели алгоритмов управления реактивной синхронной машиной

Г. Г. Розбицкий^{1✉}, И. А. Дикун²

¹ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ rozbitsky_gleb@mail.ru

Аннотация. Тестовая модель реактивной синхронной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора, разработанная ранее на языке C++ на основе расчетов в ANSYS Maxwell, дополнена новыми алгоритмами управления для оценки характеристик электроприводов. Реализовано двухзонное векторное управление. В зоне пониженных частот вращения сдвиг вектора тока относительно поперечной оси ротора постоянный, а амплитуда тока регулируется. При повышенных частотах сдвиг вектора тока относительно поперечной оси уменьшается по модулю для ограничения напряжения статора. Рассмотрены алгоритмы экстренного и плавного реверса ротора, рекомендован плавный реверс. При плавном реверсе знак угла сдвига вектора тока относительно поперечной оси ротора изменяется в зоне малых токов. На персональных ЭВМ расчеты на тестовой модели выполняются в реальном времени, что обеспечено использованием методологии моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам.

Ключевые слова: реактивная синхронная машина, анизотропная магнитная проводимость, моделирование, расчет, управление, затраты машинного времени

Для цитирования: Розбицкий Г. Г., Дикун И. А. Разработка на тестовой модели алгоритмов управления реактивной синхронной машиной // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 2. С. 73–81. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-73-81.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Development on a Test Model of Algorithms Control of Synchronous Reluctance Machine

G. G. Rozbitsky^{1✉}, I. A. Dikun²

¹ ITMO University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ rozbitsky_gleb@mail.ru

Abstract. The test model of a synchronous reluctance machine, with anisotropic magnetic conductivity of the rotor, designed earlier in C++ on the basis of calculations in ANSYS Maxwell, is supplemented with new control algorithms for evaluating the characteristics of electric drives. Two-zone vector control is realized. In the zone of low rotational frequencies the current vector shift relative to the cross axis of the rotor is constant, and the current amplitude is controlled. At higher frequencies the current vector shift relative to the cross axis is reduced modulo limit the stator voltage. The algorithms of emergency and smooth reversal of the rotor are considered, and smooth reversal is recommended. At smooth reversal the sign of the angle of current vector shift relative to the transverse axis of the rotor changes in the zone of small currents. On personal computers calculations on the test model are performed in real time, which is ensured by using the methodology of modeling systems by interconnected subsystems.

Keywords: synchronous reluctance machine, anisotropic magnetic conductivity, modeling, calculation, control, machine time costs

For citation: Rozbitsky G. G., Dikun I. A. Development on a Test Model of Algorithms Control of Synchronous Reluctance Machine // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 73–81. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-2-73-81.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Реактивные электрические машины относятся к классу синхронных машин (PCM). В них отсутствуют обмотка возбуждения и контактные кольца. Электромагнитный момент обеспечивается за счет несимметрии магнитопровода ротора и различия индуктивностей по продольной и поперечной осям, т. е. за счет анизотропии магнитных свойств. Для увеличения реактивного момента используются специальные конструкции ротора [1]–[3]. Как указано в [4], в рассматриваемых машинах возникают многократные изменения индуктивностей намагничивания в зависимости от силы тока (от насыщения) и от угла смещения вектора тока относительно поперечной оси ротора. В PCM мощностью 500 кВт (проект АО «Силовые машины», номинальное напряжение 660 В, ток 580 А) индуктивность намагничивания по продольной оси изменяется от 5.6 до 1.9 мГн при изменении тока от 212 до 1063 А и при изменении угла сдвига вектора тока относительно поперечной оси от 0 до 90°. При этом индуктивность намагничивания по поперечной оси изменяется в пределах 0.2...0.35 мГн. Зависимости индуктивностей указаны на рис. 1.

Конструкция PCM сравнительно проста, момент инерции ротора мал, потери энергии в роторе малы, КПД сравнительно высок, охлаждение ротора обычно не требуется. Массогабаритные характеристики реактивной машины также лучше, чем у машины асинхронной. Стоимость реактивной машины сравнительно невелика, но для эффективного управления машиной необходим датчик положения ротора (ДПР). Для регулирования частоты вращения необходимо питание PCM от регулируемого источника, например от трехфазного транзисторного автономного инвертора напряжения (АИН).

Разработка математических и компьютерных моделей PCM – одна из задач развития технологии проектирования электромехатронных систем. В этом направлении работ создаются и совершенствуются модели для выбора структур систем, идентификации параметров устройств, разработки и тестирования алгоритмов управления,

для оценки характеристик устройств и последующего выбора лучших технических решений. Модели выполняются по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам, обеспечивающей минимизацию затрат машинного времени на расчеты [5]. Модели реализуются на языке C++ и ориентируются на использование в среде ComSim [6].

Первый вариант тестовой модели PCM разработан в 2019 г. [4]. В этой модели использованы результаты проектирования PCM по традиционным методикам, а также расчеты нелинейных параметров в среде ANSYS Maxwell. Описана также другая модель PCM, разработанная по схемам замещения в осях dq с использованием сплайн-аппроксимации нелинейностей [7]. Доказано соответствие результатов расчетов на двух указанных моделях (по многим параметрам различия не превышают 1 %). Приведены данные по быстродействию модели при расчетах в ComSim – на персональной ЭВМ при шаге интегрирования переменных 5 мкс расчет выполняется быстрее реального времени. Но в [4] не рассмотрено регулирование PCM в различных режимах (пуск, установившиеся режимы, реверс и др.).

Известны алгоритмы векторного управления PCM во взаимно-перпендикулярных осях [8]. В указанной публикации не рассмотрены задачи оптимизации режимов работы PCM, задачи ограничения напряжения статора, не представлен анализ процессов реверса PCM.

В данной статье тестовые модели PCM усовершенствованы в части дополнения их алгоритмами управления. Предложено двухзонное регулирование, обеспечивающее удовлетворительные параметры PCM при пониженных частотах и ограничение напряжения статора в зоне повышенных частот. Предложен алгоритм реверса PCM. Сохранено преимущество модели по быстродействию.

Модели реактивной синхронной машины. Для последующего рассмотрения алгоритмов управления PCM далее приводится краткое описание разработанных ранее моделей силовой части PCM [4].

Проектирование электропривода с РСМ номинальной мощностью 500 кВт и частотой вращения 1000 об/мин выполнено по традиционным методикам, но для оценки нелинейных характеристик машины выполнены расчеты электромагнитных процессов в установившихся режимах работы в ANSYS Maxwell [4]. РСМ имеет 6 полюсов, трехфазную обмотку статора, номинальное напряжение 660 В, частоту напряжения 50 Гц. Исходными данными для конечно-элементной модели служат геометрические размеры РСМ, результаты аналитического расчета индуктивности рассеяния в лобовой зоне и активного сопротивления обмотки статора. Индуктивность рассеяния лобовой части фазы статора 47 мкГн, активное сопротивление фазы при температуре 115 °С – 0.0076 Ом. В конечно-элементной модели использована геометрия одного полюсного деления и применены симметричные граничные условия для уменьшения числа конечных элементов и времени решения задачи. Расчетная область разбита на 11 208 конечных элементов. Длительность рассчитываемого установившегося режима работы машины 0.3 с при шаге расчета по времени 200 мкс. По результатам расчетов в ANSYS Maxwell определены в номинальном режиме: фазный ток 579.8 А; коэффициент мощности 0.776; угол $\psi = 29.5^\circ$ между осью q и вектором тока. Определены суммарные потери мощности 14.1 кВт, а также составляющие потерь и коэффициент полезного действия 97.26 %. Рассчитаны зависимости индуктивностей намагничивания по осям d и q от тока и угла ψ . Эти зависимости представлены на рис. 1. Расчеты в ANSYS Maxwell выполнил Г. А. Чесноков.

Параметры РСМ, рассчитанные на модели с распределенными параметрами, использованы в

модели для расчетов процессов в РСМ по схеме замещения с сосредоточенными параметрами рис. 2 [5]. Схема на рисунке представляет несколько подсхем, взаимосвязанных зависимыми источниками напряжения и тока. Через зависимые источники реализуются также связи РСМ с внешними устройствами.

Подсхема трехфазной обмотки статора неподвижна и содержит трехфазную систему ЭДС e_n , индуктивности рассеяния фаз L_s и активные сопротивления фаз R_1 . Фазы имеют напряжения u_n и токи i_n . Связь подсхемы статора с другими подсхемами осуществляется через ЭДС фаз, которые при вращении ротора формируются потокоцеплениями намагничивания, а также через токи фаз.

На рис. 2 две подсхемы роторных контуров по взаимно-перпендикулярным осям d и q вращаются синхронно с ротором. Эти подсхемы содержат источники токов реакции якоря i_d и i_q , которые определяются как проекции токов фаз на соответствующие оси. Подсхемы содержат индуктивности намагничивания L_{ad} и L_{aq} с токами намагничивания i_{ad} и i_{aq} . В подсхемах ротора учтены потери энергии в стали ротора в виде демпферных цепей с активными сопротивлениями R_{kd} и R_{kq} и индуктивностями L_{kd} и L_{kq} . В демпферах протекают токи i_{kd} и i_{kq} . Подсхемы ротора связаны с подсхемой статора также через потокоцепления намагничивания. Подсхемы роторных контуров связаны с механическими устройствами на валу через электромагнитный момент, который определяется суммой произведений потокоцеплений намагничивания на ортогональные проекции токов реакции якоря с учетом знаков.

На рис. 2 изображены также две подсхемы, которыми учитываются потери энергии в стали

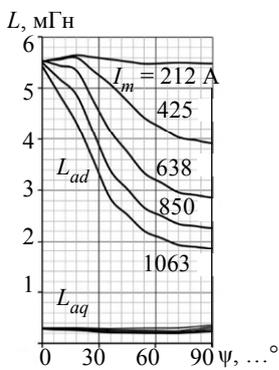


Рис. 1. Индуктивности намагничивания РМ
Fig. 1. SynRM magnetizing inductances

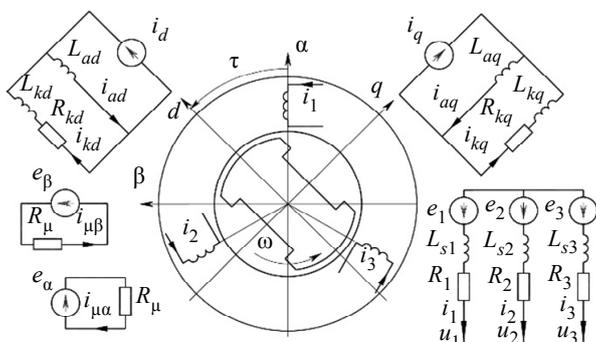


Рис. 2. Схема замещения реактивной синхронной машины
Fig. 2. SynRM substitution diagram

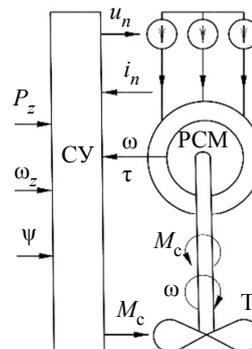


Рис. 3. Схема тестовой модели
Fig. 3. Diagram of test model

статора. В этих подсетях использованы проекции ЭДС e_α и e_β на оси $\alpha\beta$, а также сопротивления R_μ , в которых протекают токи $i_{\mu\alpha}$ и $i_{\mu\beta}$. Указанные ЭДС создаются вращающимися в воздушном зазоре потокосцеплениями.

В модели РСМ зависимости индуктивностей намагничивания от амплитуды вектора токов статора I_m и от его фазы учтены в соответствии с рис. 1 при использовании сплайн-аппроксимации кривых.

Модель РСМ включена в тестовую модель установки рис. 3. Тестовая модель предназначена для приведения параметров установки в соответствие с проектом РСМ и для отработки алгоритмов управления при минимальных затратах машинного времени на расчеты. РСМ может работать двигателем или генератором, что задается знаками момента сопротивления на валу и направлением вращения.

В соответствии с рис. 3 РСМ питается от трехфазной симметричной системы синусоидальных напряжений u_n , которые формируются системой управления (СУ). В фазах протекают токи i_n , мгновенные значения которых передаются в СУ. РСМ содержит ДПР, от которого в СУ передаются сигналы по частоте вращения ω и угловому положению оси d ротора τ . На входы СУ поступают также сигналы по заданной частоте вращения ротора РСМ ω_z , по заданной мощности P_z , по сдвигу вектора тока относительно вращающейся оси q на угол ψ . Если рассчитываются режимы работы системы электродвижения судна с гребным винтом на валу, то во многих случаях используется вентиляторная характеристика нагрузки T на валу, при которой момент сопротивления M_c пропорционален квадрату частоты вращения.

В соответствии с описанием РСМ разработана тестовая модель на языке C++ для ComSim. Одно из назначений модели – отработка алгоритмов управления РСМ, в частности задач регулирования, настройки регуляторов при изменениях частоты вращения ротора РСМ и при реверсах.

Установившиеся режимы работы. Расчеты установившихся режимов работы РСМ выполнены при вентиляторной характеристике нагрузки и при указанных параметрах РСМ, а также в табл. 1 для номинального режима работы. При регулировании частоты тока РСМ вниз от номинальной частота вращения задается в исходных данных для каждого режима, а угол ψ принят неизменным во всех режимах. Результаты расчетов установившихся режимов работы РСМ представлены в табл. 2.

Табл. 1. Номинальный режим работы РСМ
Tab. 1. Nominal operating mode of SynRM

Параметры	По проекту	По модели
$U_{дл}$, В	660	661
$I_{ф}$, А	579.8	573
$\cos \varphi$	0.776	0.777
КПД, %	97.18	97.06
ψ , ... °	29.5	29.5

Табл. 2. Параметры при регулировании
Tab. 2. Parameters during regulation

ω , %	$U_{дл}$, В	$I_{ф}$, А	$\cos \varphi$	КПД, %
120	511.5	756	0.76	97
100	382.6	573	0.777	97.06
80	262	423.2	0.788	96.95
60	155	299.2	0.796	96.62
40	70.7	195.4	0.8	95.7
20	16	112.2	0.8	90.8

В табл. 1 и 2 представлены линейное $U_{дл}$ и фазное U_ϕ напряжения статора РСМ, фазный ток статора I_ϕ , коэффициент мощности $\cos \varphi$. В соответствии с табл. 2 при увеличении частоты вращения РСМ ток, напряжение и активная мощность обмотки статора возрастают в соответствии с вентиляторной характеристикой нагрузки, достигая номинальных значений при номинальной частоте ($\omega = 100\%$). При этом коэффициент мощности изменяется незначительно и близок к 0.8. КПД достаточно высок и максимальный его уровень обеспечивается в номинальном режиме. При увеличении частоты, например до 120 %, активная мощность РСМ возрастает приблизительно до 173 %, а напряжение обмотки статора увеличивается до 134 %.

Если питание РСМ осуществляется от транзисторного преобразователя частоты (ПЧ), то указанное увеличение напряжения обычно неприемлемо. В зоне повышенных частот РСМ необходимо ограничивать напряжение РСМ. Это ограничение обеспечивается изменением сдвига вектора тока относительно оси q , т. е. изменением угла ψ . В табл. 3 представлены результаты расчетов установившихся режимов работы РСМ в зоне повышенных частот при ограничении напряжения статора номинальным уровнем путем изменения угла ψ . Полученные зависимости отображены на рис. 4.

Из табл. 3 и рис. 4 видно, что при увеличении частоты вращения РСМ выше номинальной и ограничении напряжения на номинальном уровне нагрузка статора по току существенно возрастает. При увеличении частоты до 125 % ток увеличивается почти до 200 %. При этом угол ψ уменьшается от 29.5 до 8.5 °, т. е. резервы по воздействию на процесс изменением угла ψ уменьшаются.

Приведенный анализ характеристик справедлив для рассматриваемой конкретной РСМ мощностью 500 кВт. Для других машин анализ нужно уточнять.

Табл. 3. Работа РСМ при повышении частоты и ограничении напряжения
 Tab. 3. SynRM operation at frequency rise and voltage limitation

ω , %	ψ , ...°	$U_{\text{л}}$, В	$I_{\text{ф}}$, А	$\cos \varphi$	КПД, %
125	8.5	379.8	1089	0.79	95.5
120	11	380	953	0.82	96.06
115	14.5	380.2	822	0.83	96.48
110	18.5	381.3	717	0.83	96.77
105	22.5	381.6	629	0.82	96.99
100	29.5	382.6	573	0.78	97.06

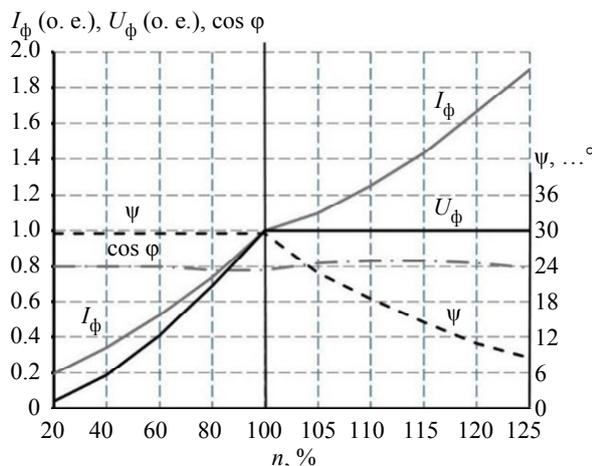


Рис. 4. Параметры РСМ в зависимости от частоты
 Fig. 4. SynRM parameters at increased frequency

Экстренный реверс реактивной машины.

Экстренный реверс РСМ осуществляется путем скачкообразного изменения знака угла ψ , т. е. при переводе машины из режима двигателя в режим генератора (или наоборот). В модели РСМ кроме указанной операции осуществляется аperiodическая фильтрация заданного угла ψ с небольшой постоянной времени, что позволяет исключить нежелательные колебания напряжений и токов фаз.

На рис. 5 представлена диаграмма экстренного реверса РСМ мощностью 500 кВт. Для удобства иллюстрации процесса реверса момент инерции ротора задан минимальным – 1 кг · м².

На рис. 5 на оси 1 размещены кривые неотфильтрованного и отфильтрованного заданного угла ψ , на оси 2 сверху размещены кривые напряжений трех фаз, на оси 3 – кривые токов фаз, на оси 4 – потокосцепление в зазоре машины, на оси 5 – электромагнитный момент РСМ и момент сопротивления на валу, на оси 6 – заданная и фактическая частоты вращения, на оси 7 – угол поворота ротора. В левой части диаграммы – фрагмент номинального режима работы до реверса (при отрицательной скорости), в правой части – фрагмент режима после реверса (при положительной скорости).

В средней части диаграммы рис. 5 в момент скачкообразного изменения знака угла ψ начинается быстрое уменьшение потокосцепления в зазоре

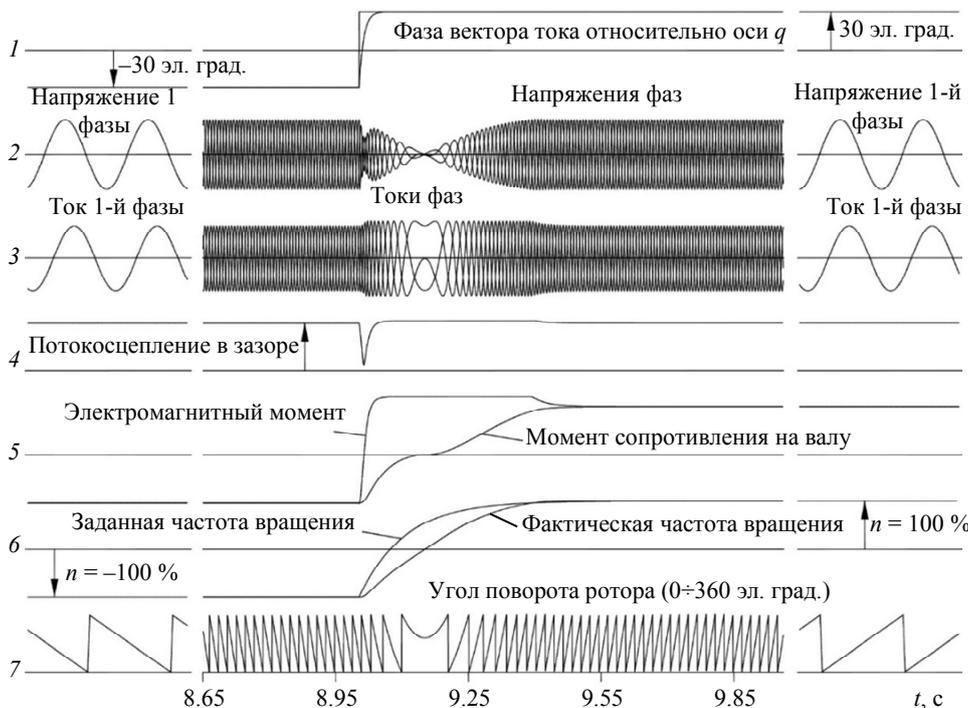


Рис. 5. Диаграмма экстренного реверса РСМ
 Fig. 5. SynRM emergency reversal diagram

PCM. Это изменение соответствует переходу направления вектора тока через направление поперечной оси машины. Время завершения этого перехода определяется постоянной апериодического фильтра заданного угла ψ (на верхней оси I).

В процессе реверса регулятор частоты вращения ротора форсирует электромагнитный момент PCM за счет увеличения токов фаз. При этом амплитуда токов ограничивается уровнем 110 %. Соответственно ограничивается и электромагнитный момент. В интервале ограничения момента при реверсе частота вращения изменяется в сторону задания в соответствии с характеристикой нагрузки. При приближении фактической скорости к заданной исчезает форсировка переменных.

В табл. 4 представлены результаты анализа напряжений и токов фаз PCM до и после реверса.

Представляет интерес также переход частоты вращения PCM на другой заданный уровень, например при реверсе. На рис. 6 представлена

диаграмма работы PCM при экстренном реверсе из номинального режима с отрицательной скоростью -100% в режим работы с положительной скоростью $+20\%$. На диаграмме представлены те же кривые, что и на рис. 5.

В рассмотренных случаях на рис. 5 и 6 представлены процессы общей длительностью около 1.4 с (с учетом установившихся режимов). При расчетах принят сравнительно малый момент инерции ротора PCM, равный $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. В результате экстренный реверс осуществляется за доли секунды, без перерегулирования, без нежелательных отклонений момента, токов и напряжений.

Плавное изменение частоты вращения реактивной машины. Плавное изменение частоты вращения PCM осуществляется без скачкообразного изменения фазы вектора тока в начале процесса. При этом задается скачкообразное изменение заданной скорости, которая апериодически фильтруется (в приведенных далее расчетах по-

Табл. 4. Номинальный режим работы PCM до и после реверса
Tab. 4. Nominal operation mode of SynRM before and after reversal

Параметр	Режим работы до реверса			Режим работы после реверса		
	Действующее значение	Фаза	Коэффициент мощности	Действующее значение	Фаза	Коэффициент мощности
Напряжение 1-й фазы	382.92 В	102.42 эл. град.	0.773	384.34 В	81.73 эл. град.	0.774
Ток 1-й фазы	573.31 А	63.03 эл. град.		574.66 А	42.40 эл. град.	

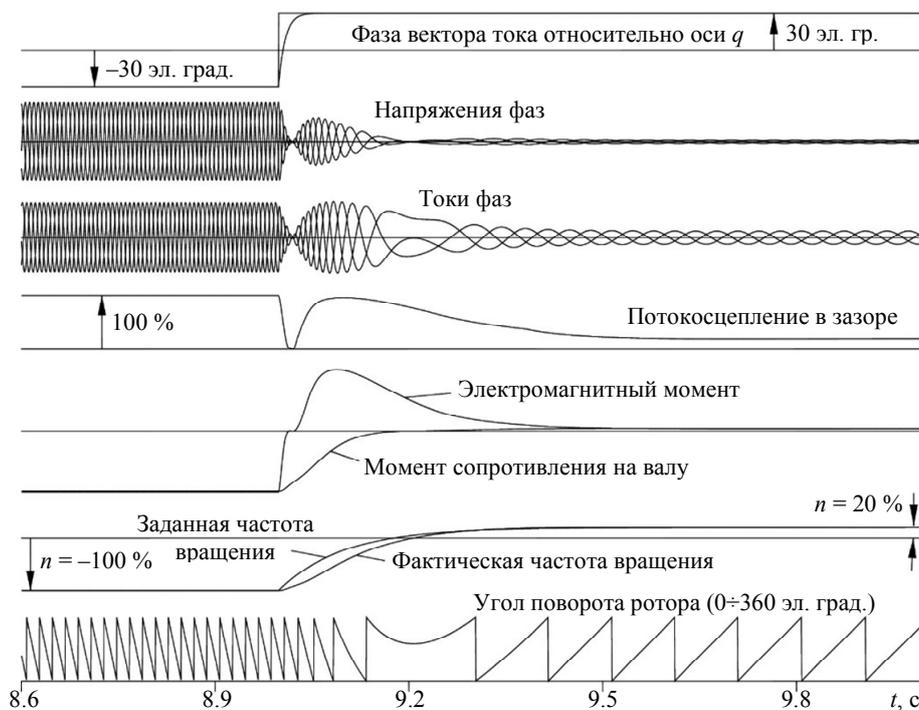


Рис. 6. Диаграмма экстренного реверса PCM из номинального режима на промежуточную частоту вращения
Fig. 6. Diagram of SynRM emergency reversal from rated mode to intermediate speed

стоянная времени принята равной 2 с). В результате фильтрации заданная скорость изменяется плавно. В зависимости от соответствия или различия знаков начальной частоты вращения ротора и заданного конечного значения определяется алгоритм перехода к заданному режиму. Если знаки указанных скоростей совпадают, то знак угла ψ не изменяется. Если знаки скоростей различны, то знак угла ψ изменяется, но при пониженных частоте вращения, токах и потокосцеплении в зазоре. Расчет реверса при плавном изменении частоты вращения рассматриваемой РСМ мощностью 500 кВт выпол-

нен при моменте инерции ротора $7 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Результаты расчета представлены на рис. 7.

До реверса РСМ работает в номинальном режиме с отрицательной скоростью вращения -100% . В момент времени 18.6 с задается частота вращения $+70\%$, и она фильтруется с постоянной времени 2 с. Соответственно начинают изменяться напряжения фаз, токи, электромагнитный момент и фактическая частота вращения ротора. В процессе реверса значительное время напряжения минимальны из-за малых токов фаз и малой частоты вращения. В течение значительного промежут-

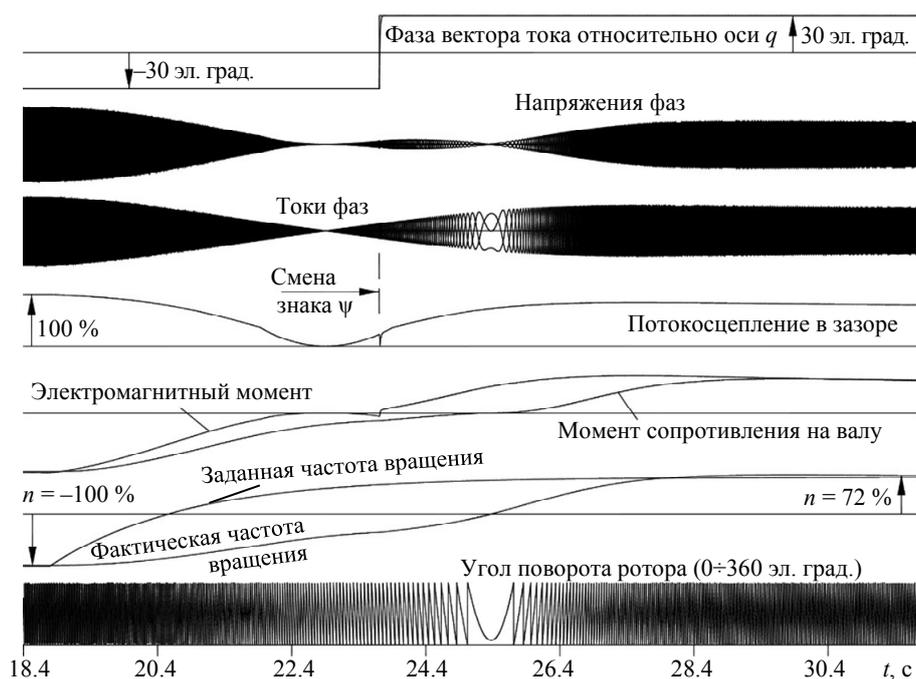


Рис. 7. Диаграмма плавного реверса РСМ из номинального режима на промежуточную частоту вращения

Fig. 7. Diagram of SynRM smooth reversal from nominal mode to intermediate speed

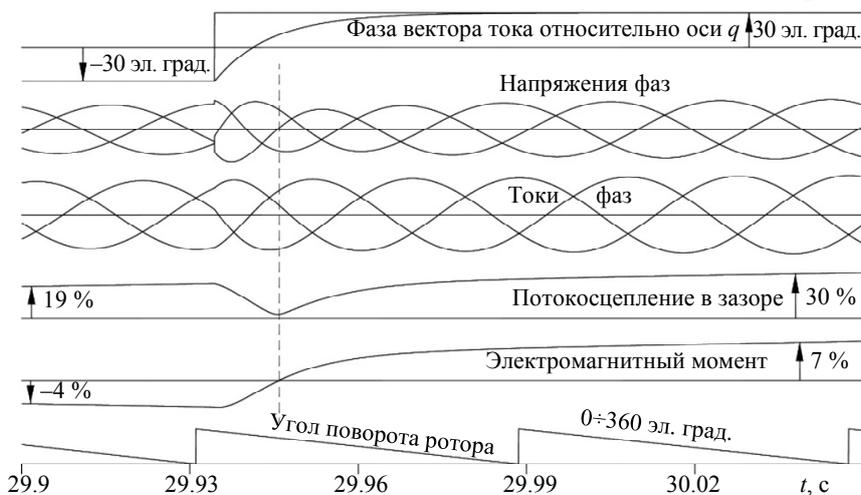


Рис. 8. Процесс изменения фазы вектора тока (угла ψ) относительно оси d

Fig. 8. The process of changing the phase of the current vector (angle ψ) relative to the d -axis

ка времени электромагнитный момент близок к нулю. Но после 23.5 с происходит смена знака угла ψ . При этом изменяется знак электромагнитного момента и ротор ускоряется в заданном направлении.

На рис. 8 представлен фрагмент процесса реверса в зоне изменения угла ψ рис. 7.

На рис. 7 и 8 после скачкообразного изменения заданного угла ψ он фильтруется апериодическим фильтром с постоянной времени 0.01 с. Как видно из рис. 7, рассматриваемый процесс происходит при небольших напряжениях, токах и потокосцеплении. Фрагмент этого процесса представлен на рис. 8 при измененных масштабах кривых. Из диаграммы видно, что после изменения знака отфильтрованного угла ψ знак электромагнитного момента изменяется с небольшим запаздыванием. При этом потокосцепление в зазоре машины также спадает до минимального уровня. Однако потокосцепление начинает восстанавливаться сравнительно быстро.

Замечания по быстродействию тестовой модели. Рассматриваемая тестовая модель используется при проектировании электроприводов с реактивными машинами для уточнения параметров силовых схем и систем управления электроприводов (уточнение напряжений и частот полупроводниковых преобразователей в цепях питания статоров машин, настройка уставок и коэффициентов систем регулирования, оценка характеристик систем). Длительность и трудоемкость выполнения этих работ зависят от быстродействия используемых для анализа моделей.

На персональной ЭВМ средней производительности описанная ранее тестовая модель реактивной синхронной машины с анизотропной маг-

нитной проводимостью ротора работает в режиме реального времени при шаге интегрирования уравнений по времени 2 мкс. Это преимущество позволяет существенно повысить эффективность выполнения проектных работ.

Выводы:

1. Разработана тестовая модель системы с реактивной синхронной машиной с анизотропной магнитной проводимостью ротора, отличающаяся реализацией новых предложенных алгоритмов управления. Модель разработана на языке C++ для расчетов в среде ComSim. В модели используются нелинейные параметры машины, определенные в ANSYS Maxwell.

2. Предложено двухзонное регулирование частоты вращения реактивной машины. В зоне пониженных частот регулируется амплитуда тока статора при постоянном сдвиге вектора тока относительно поперечной оси машины. В зоне повышенных частот вращения ротора напряжение статора стабилизируется посредством регулирования указанного сдвига вектора тока.

3. Реверс ротора реактивной синхронной машины предложено осуществлять при плавном изменении задания по скорости вращения ротора и смене знака угла сдвига вектора тока относительно поперечной оси ротора при малых токах и несоответствии знаков заданной и фактической скоростей.

4. Разработанная тестовая модель реактивной синхронной машины может работать в режиме реального времени на персональных ЭВМ средней производительности.

Список литературы

1. Захаров А. В. Перспективы технического применения синхронных электродвигателей с анизотропной магнитной проводимостью ротора // Материалы междунауч. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения). Иваново: изд-во ИванГЭУ, 2015. С. 124–127.

2. Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В. Ф. Самосейко, Ф. А. Гельвер, В. А. Хомяк, Д. А. Хайров; под ред. В. Ф. Самосейко СПб.: ФГУП «Крыловский гос. научный центр», 2016. 174 с.

3. Самосейко В. Ф., Шарашкин С. В. Анализ преимуществ реактивных электрических машин при построении гребной электрической установки / Вестн. ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». 2017. Т. 17, № 2. С. 14–22.

4. Моделирование реактивной синхронной машины с анизотропной проводимостью ротора в ANSYS и по

методологии взаимосвязанных подсистем / М. В. Пронин, А. С. Григорян, Г. А. Чесноков, А. Г. Воронцов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 3. С. 72–77.

5. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромехатронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: изд-во «Ладoga», 2020. 336 с.

6. Воронцов А. Г. Программа для ЭВМ ComSim1_5 / Свид-во № 2019661058. Заявка № 2019619973 от 12.08.2019. Дата регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ 19.08.2019.

7. Стечкин С. Б., Субботин Ю. Н. Сплайны в вычислительной математике. М.: Наука, 1976. 248 с.

8. Гребной электропривод на основе реактивной электрической машины для судов ледового класса / Ф. А. Гельвер, И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев // Российская Арктика. 2024. Т. 6, № 3. С. 15–25.

Информация об авторах

Розбитский Глеб Геннадьевич – магистрант факультета систем управления и робототехники, Национальный исследовательский университет ИТМО, Кронверкский пр., д. 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия.

E-mail: rozbitsky_gleb@mail.ru

Дикун Ирина Александровна – канд. техн. наук, доцент кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: iapimenova@yandex.ru

References

1. Zaharov A. V. Perspektivy tehničeskogo primeneniya sinhronnyh jelektrodivigatelej s anizotropnoj magnitnoj provodimost'ju rotora // Materialy mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Sostojanie i perspektivy razvitija jelektro- i teplotehnologii» (XVIII Benardosovskie chtenija). Ivanovo: izd-vo IvanGJeU, 2015. S. 124–127. (In Russ.).
2. Sinhronnye mashiny s anizotropnoj magnitnoj provodimost'ju rotora. Metodika proektirovanija. Algoritmy upravlenija / V. F. Samosejko, F. A. Gel'ver, V. A. Homjak, D. A. Hajrov; pod red. V. F. Samosejko SPb.: FGUP «Krylovskij gos. nauchnyj centr», 2016. 174 s. (In Russ.).
3. Samosejko V. F., Sharashkin S. V. Analiz preimushhestv reaktivnyh jelektricheskij mashin pri postroenii grebnoj jelektricheskij ustanovki / Vestn. JuUrGU. Ser. «Jenergetika». 2017. T. 17, № 2. S. 14–22. (In Russ.).
4. Modelirovanie reaktivnoj sinhronnoj mashiny s anizotropnoj provodimost'ju rotora v ANSYS i po metodologii vzaimosvjazannyh podsystem / M. V. Pronin, A. S. Grigorjan, G. A. Chesnokov, A. G. Voroncov // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2019. № 3. S. 72–77. (In Russ.).
5. Pronin M. V., Voroncov A. G. Jelektromehanotronnye komplekxy i ih modelirovanie na JeVM po vzaimosvjazannym podsystemam. SPb.: izd-vo «Ladoga», 2020. 336 s. (In Russ.).
6. Voroncov A. G. Programma dlja JeVM ComSim1_5 / Svid-vo № 2019661058. Zajavka № 2019619973 ot 12.08.2019. Data registracii v Federal'noj sluzhbe po intellektual'noj sobstvennosti RF 19.08.2019. (In Russ.).
7. Stechkin S. B., Subbotin Ju. N. Splajny v vychislitel'noj matematike. M.: Nauka, 1976. 248 s. (In Russ.).
8. Grebnoj jelektroprivod na osnove reaktivnoj jelektricheskij mashiny dlja sudov ledovogo klassa / F. A. Gel'ver, I. V. Belousov, V. F. Samosejko, A. V. Saushev // Rossijskaja Arktika. 2024. T. 6, № 3. S. 15–25. (In Russ.).

Information about the authors

Gleb G. Rozbitsky – master student of the Faculty of Control Systems and Robotics, ITMO University, Kronverksky Av. 49, St. Petersburg, 197101, Russia.

E-mail: rozbitsky_gleb@mail.ru

Irina A. Dikun – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Departments of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: iapimenova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; принята к публикации после рецензирования 25.12.2024; опубликована онлайн 28.02.2025.

Submitted 29.10.2024; accepted 25.12.2024; published online 28.02.2025.