

МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Одним из возможных типов электрических машин в составе автономных энергетических установок является вентильный индукторный генератор с самовозбуждением. Исследование электромагнитных процессов, протекающих в вентильных индукторных машинах с самовозбуждением, позволило создать вентильный индукторный генератор с новым способом возбуждения и коммутации фазных обмоток в естественном режиме. В основу данного способа легла такая особенность подобных электрических машин, как возможность обеспечения трапецеидальной формы фазных ЭДС, что позволяет осуществлять коммутацию и возбуждение фазных обмоток в естественном режиме без необходимости отслеживания и коммутации фазных токов в зависимости от положения ротора, за счет коммутации конденсаторов неработающей фазы. Такое решение позволило значительно упростить и снизить стоимость электронной аппаратуры управления вентильного индукторного генератора. В силу новизны конструкции рассматриваемое техническое решение не было исследовано ни зарубежными, ни отечественными учеными. В данной статье представлена математическая модель вентильного-индукторного генератора с конденсаторным возбуждением и тиристорным управлением током возбуждения путем изменения соотношения между полупериодами тока, пропускаемого тиристорами и полупериодами напряжения, прикладываемого к ним, выполненная в динамической связке *ANSYS Maxwell* и *ANSYS Simplorer*. Проведен междисциплинарный расчет построенной модели, результаты которого в виде зависимостей токов и ЭДС обмоток и конденсаторов возбуждения от времени приведены в статье. По результатам исследований, проведенных на представленной модели спроектирован и изготовлен на предприятии ООО НПП «Резонанс» экспериментальный образец вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением и микропроцессорным управлением. Осциллограммы, зафиксированные на испытательном стенде, в большой степени совпадают с расчетными зависимостями токов и напряжений, что подтвердило адекватность модели.

Ключевые слова: автономная энергетическая установка, вентильный индукторный генератор, компьютерная модель, конечно-элементная модель, электрическая машина, электрический ток, ЭДС.

ВВЕДЕНИЕ

Основой автономных энергетических установок могут служить различные типы электрических машин: коллекторные и вентильные машины постоянного тока, синхронные генераторы с контактными кольцами, с клювообразным ротором, с вращающимся выпрямителем, с постоянными магнитами, асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением и вентильным возбуждением, индукторные генераторы, синхронные реактивные машины независимого возбуждения, вентильные индукторные машины с независимым возбуждением и с самовозбуждением [1, 2].

Тем не менее при проектировании новых самоходных машин на электрической тяге в основном применяют синхронные генераторы с постоянными магнитами, контактными кольцами или вращающимся выпрямителем. Такой выбор обоснован достоинствами данных машин: высокие массогабаритные показатели, высокий КПД и коэффициент мощности, а касемо последних двух – хорошими регулировочными характеристиками [3, 4]. Но не стоит забывать и об основных недостатках указанных машин.

У синхронных генераторов с постоянными магнитами отсутствует возможность регулировать магнитный поток, ЭДС в значительной степени зависит от скорости вращения ротора, что сказывается на повышенной пожароопасности и требованиях к силовой

электронике. Синхронные генераторы с контактными кольцами имеют механический щеточный узел, который усложняет производство и повышает уровень электромагнитных помех. Синхронные генераторы с вращающимся выпрямителем сложны в производстве, а полупроводниковые компоненты в роторе накладывают значительные ограничения по рабочей температуре.

Ужесточение требований, предъявляемых к тяговым генераторам, актуализирует применение вентильных индукторных генераторов с самовозбуждением (ВИГ) [5, 6]. Это обусловлено характерными для индукторных машин достоинствами: регулируемое электромагнитное возбуждение, пассивный ротор, концентрические катушки, охватывающие по одному зубцу статора, простая конструкция и высокая технологичность изготовления. К недостаткам ВИГ следует отнести необходимость установки специализированного преобразователя, который имеет большую стоимость и габариты в сравнении с инверторами классических электрических машин, необходимость контроля фазных токов в зависимости от положения ротора, а соответственно, датчик положения ротора, большое количество датчиков тока, нелинейные регулировочные характеристики и необходимость обеспечения минимального воздушного зазора [7, 8].

Аналогичными достоинствами обладают и другие типы индукторных машин: разноименнополюсные и одноименнополюсные индукторные генераторы, в том числе и их вариации в виде синхронно-реактивных

машин и вентильных индукторных машин с независимым возбуждением. Основным недостатком разноименнополюсных индукторных генераторов и синхронно-реактивных машин является сложность достижения высоких удельных показателей, так как значительную часть статора занимает обмотка возбуждения [9, 10]. Для одноименнополюсных индукторных генераторов и вентильных индукторных машин с независимым возбуждением основными недостатками являются необходимость применения специальных мер по предотвращению замыкания магнитного потока через подшипниковые узлы, сложность монтажа обмотки возбуждения и балансировки ротора, а также протекание магнитного потока обмотки возбуждения поперек направления шихтовки стали статора [11,12].

Каждый из перечисленных типов машин обладает своими достоинствами и недостатками, а требования, предъявляемые к энергетическим установкам, носят достаточно противоречивый характер и вынуждают инженеров находить компромиссное решение. Поэтому говорить о явных преимуществах тех или иных электрических машин над другими нельзя.

Большой вклад в изучение вентильных индукторных машин с самовозбуждением внесли отечественные и зарубежные ученые: Ильинский Н.Ф., Кузнецов В.А., Фисенко В.Г., Голландцев Ю.А., Miller T., Lawrenson P. [13–17]. Однако большинство исследований посвящены двигательному режиму работы и лишь малая часть генераторному режиму работы.

Изучение работы вентильного индукторного генератора привело к идее использования физических особенностей электромагнитных процессов машины, а именно трапецеидальной формы фазных ЭДС с крутыми фронтами, для возбуждения и коммутации обмоток в естественном режиме без необходимости отслеживания и коммутации фазных токов в зависимости от положения ротора, что позволяет значительно упростить электронную аппаратуру управления. В результате была разработана новая конструкция и электрическая схема вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением (ВИГ КВ) [18, 19]. Важной особенностью конструкции ВИГ КВ является малое количество витков дополнительной обмотки (в рассматриваемом варианте в 10 раз меньше, чем у якорной обмотки), что позволяет для управления током возбуждения использовать низковольтные электронные компоненты, а сама дополнительная обмотка занимает малое количество полезного объема электрической машины [18]. К недостаткам ВИГ КВ следует отнести повышенные токовые нагрузки вследствие протекания постоянной составляющей тока по якорным обмоткам, отсутствие возможности работы в двигательном режиме и необходимость устройства первоначального возбуждения. В качестве возбудителя авторами выбрана конденсаторная батарея достаточно большой емкости, подключенная параллельно одной из цепей возбуждения. Батарея конденсаторов формирует импульс тока с амплитудой, равной номинальному току якоря, и длительность в несколько миллисекунд, который независимо от положения ротора протекает по всем якорным за счет полупроводниковых компо-

нентов в электрической цепи, после чего начинается генерация электрической энергии.

Рассмотренная в данной статье автономная энергетическая установка на базе ВИГ КВ была внедрена в производство и использована в качестве тягового генератора электромеханической трансмиссии универсального колесного трактора компанией ООО НПП «Резонанс», что позволило значительно снизить себестоимость и получить экономическую выгоду.

Новизна конструкции ВИГ КВ исключает возможность использования существующих моделей вентильных индукторных двигателей для исследования электромагнитных процессов, протекающих в нем, в различных режимах работы при разнообразных внешних воздействиях. Это актуализирует создание компьютерной модели на базе конечно-элементного метода, которая позволит производить междисциплинарные расчеты для исследования электромагнитных процессов генератора и алгоритмов его управления.

КОНСТРУКЦИЯ ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

На рис. 1 приведен простой вариант ВИГ КВ на основе трехфазной электрической машины с одной парой полюсов.

На рис. 1: *A, B, C* и *a, b, c* – совмещенные якорные и дополнительные обмотки фаз генератора; L_A, L_B, L_C и l_a, l_b, l_c – собственные индуктивности якорных и дополнительных обмоток *VD1 – VD3* – шунтирующие диоды; *VS1 – VS3* – тиристоры в цепи возбуждения; *C1 – C3* – конденсаторы возбуждения; *VD4 – VD9* – диоды силового выпрямителя; *C4* – конденсатор силового выпрямителя, $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе выпрямителя генератора.

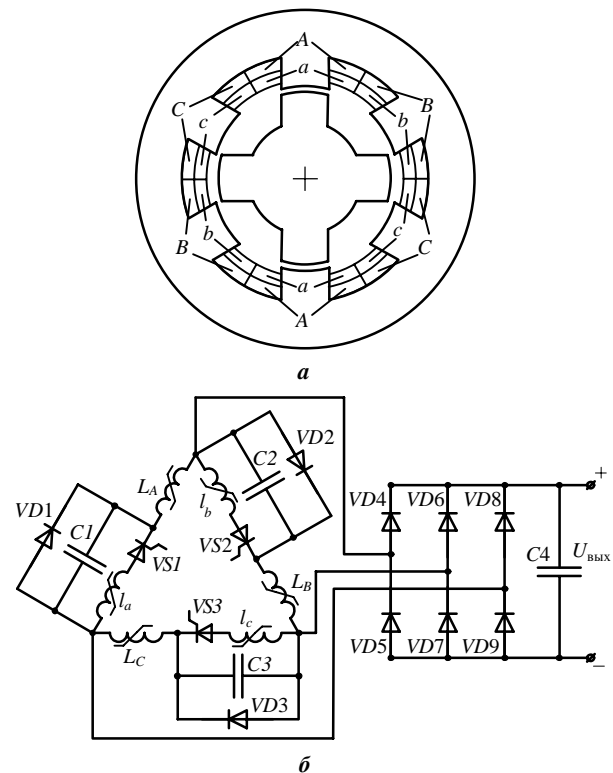


Рис. 1. Магнитная система (а) и электрическая схема нового ВИГ (б)

Представленное решение (рис. 1) заключается в отделении от якорных обмоток A, B, C дополнительных синфазных обмоток возбуждения a, b, c , которые совместно с конденсаторами $C1 - C3$ и полупроводниковыми компонентами в виде шунтирующих диодов $VD1 - VD3$ и тиристоров $VS1 - VS3$ образуют цепь возбуждения. В процессе работы дополнительные обмотки l_a, l_b, l_c осуществляют заряд конденсаторов $C1 - C3$, которые при выходе фазы, параллельно которой включены, из такта генерации вырабатывают значительный импульс тока за счет резкого спада напряжения на якорной и дополнительной обмотке. Формируемый импульс тока за счет соединения обмоток в многоугольник протекает по всем якорным обмоткам L_A, L_B, L_C , тем самым возбуждая фазу, находящуюся в такте генерации [12]. Тиристоры $VS1 - VS3$ позволяют с высокой точностью осуществлять регулирование выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ за счет изменения соотношения между полупериодами тока пропускаемых ими и полупериодов напряжения, прикладываемого к ним [13].

Для понимания процесса генерации на рис. 2 представлены идеализированные зависимости индуктивности, ЭДС и тока фазы.

Здесь условно выделены 4 участка, соответствующие характеру изменения индуктивности. Первый участок характеризуется практически постоянным минимальным значением индуктивности, в это время происходит коммутация между фазами, не представленными на рисунке. Второй участок характеризуется практически линейным ростом индуктивности. Рассматриваемая фаза не вырабатывает электрической энергии. Третий участок соответствует полному перекрытию зубцов статора и ротора и практически постоянным максимальным значением индуктивности, после этого момента начинается возбуждение рассматриваемой фазы, что осуществляется с помощью цепи возбуждения (конденсатора) предшествующей фазы. Четвертый участок характеризуется уменьшением эквивалентной площади перекрытия зубцов и линейным уменьшением индуктивности, на данном участке происходит генерация электрической энергии.

Особенностью электромагнитных процессов, протекающих в ВИГ, является возможность обеспечения трапециевидальной формы фазных ЭДС с крутыми фронтами. Совместно с нестандартными для данных электрических машин схемотехническими решениями – расщепление фазных обмоток на синфазные обмотки, обмотку якоря A, B, C и дополнительную обмотку (обмотку возбуждения) a, b, c – включение в схему диодов $VD1 - VD3$, обеспечивающих коммутацию дополнительных обмоток a, b, c , тиристоров $VS1 - VS3$ для регулирования тока возбуждения и конденсаторов $C1 - C3$, формирующих ток возбуждения за счет крутого заднего фронта фазного ЭДС, позволяет в генераторном режиме осуществлять коммутацию и возбуждение фазных обмоток в естественном режиме за счет выходящей из фазы генерации обмотки.

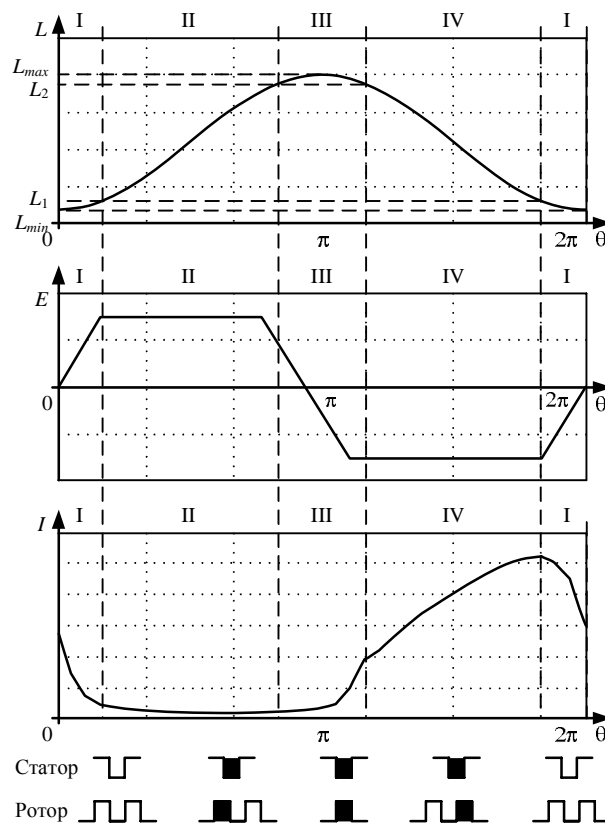


Рис. 2. Модель электрической схемы ВИГ KB в ANSYS Simpler

Напряжение на конденсаторе возбуждения повторяет по форме отрицательный полупериод напряжения на фазе. Здесь условно выделены 4 участка, соответствующие характеру изменения индуктивности. Первый участок характеризуется практически постоянным минимальным значением индуктивности, в это время происходит коммутация между фазами, не представленными на рисунке. Второй участок характеризуется практически линейным ростом индуктивности. Рассматриваемая фаза не вырабатывает электрической энергии. Третий участок соответствует полному перекрытию зубцов статора и ротора и практически постоянным максимальным значением индуктивности, после этого момента начинается возбуждение рассматриваемой фазы, что осуществляется с помощью цепи возбуждения (конденсатора) предшествующей фазы. Четвертый участок, характеризуется уменьшением эквивалентной площади перекрытия зубцов и линейным уменьшением индуктивности, на данном участке происходит генерация электрической энергии.

Результатом, достигаемым данным техническим решением, является исключение необходимости контроля фазных токов в зависимости от положения ротора, что позволяет убрать из системы датчик положения ротора и датчики фазных токов, инвертор, а также упрощение системы управления, что дает возможность использовать простой микропроцессор или заменить его на логику на интегральных компонентах [14].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Создание математической модели на основе взаимосвязей, полученных по аппроксимированным средним значениям эмпирических или расчетных зависимостей вместе с принимаемыми допущениями,

приводит к снижению достоверности результатов, что увеличивает объем требуемых экспериментальных исследований [15]. Доступные в настоящее время инструменты (программно-вычислительные комплексы и высокопроизводительные электронно-вычислительные машины) позволяют разработать универсальную модель ВИГ КВ и получать достоверные результаты, максимально приближенные к реальным условиям работы, включая аварийные и аномальные режимы.

Несмотря на большое количество программно-вычислительных средств, специалисты в области информационных технологий в математическом моделировании и исследователи в области электрического привода предпочтение отдают ANSYS [16–20].

Для достижения наибольшей энергетической эффективности и использования активных материалов ВИГ КВ был выбран трехфазный вариант генератора с 3 парами полюсов. В динамической связке ANSYS Simplorer и Ansys Maxwell была разработана модель ВИГ КВ, состоящая из модели электрической схемы и конечно-элементной модели электромеханического преобразователя (рис. 3).

На рис. 3: FEA1 – конечно-элементная модель электромеханического преобразователя, PhaseA_in, PhaseB_in, PhaseC_in, PhaseVA_in, PhaseVB_in, PhaseVC_in, PhaseA_out, PhaseB_out, PhaseC_out, PhaseVA_out, PhaseVB_out, PhaseVC_out – выходы обмоток, подключенные к внешней электрической цепи, в которой C1 – C3 – конденсаторы возбуждения, D1 – D3 – шунтирующие диоды, TH1 – TH3 – тиристоры цепи возбуждения, D4 – D9 – диоды силового выпрямителя, D10 – D12 – диоды измерительного выпрямителя, R5 и C5 – резистор и конденсатор фильтра измерительного выпрямителя, C4 – конденсатор фильтра

силового выпрямителя, R0 – активная нагрузка, AM1 – датчик тока, VM1 – датчик напряжения, скорость вращения двигателя задается фиксированной с учетом момента инерции ротора $J=1 \text{ кг/м}^2$, корпус электрической машины жестко зафиксирован.

В предложенной модели применен разработанный авторами алгоритм регулирования тока возбуждения, основанный на изменении соотношения между полупериодами тока, пропускаемыми ими, и полупериодами напряжения, прикладываемаемого к ним. На рис. 4 представлена модель в ANSYS Simplorer, реализующая данный алгоритм, которая отражает систему подчиненного регулирования по напряжению.

На рис. 4: 1 – ПИ-регулятор напряжения, 2 – тиристорный регулятор тока возбуждения ВИГ КВ путем изменения количества полупериодов пропускаемого тока тиристорами за некоторый интервал времени, 3 – ВИГ КВ, 4 – блок обратной связи по напряжению, $U_{\text{зад}}$ – заданное напряжение, ΔU – ошибка по напряжению, f – частота формирования управляющих импульсов для тиристоров за период времени; $I_{\text{в}}$ – ток возбуждения; $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе силового выпрямителя ВИГ КВ, $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки, $U_{\text{ос}}$ – напряжение обратной связи с вольтметра VM1.

В ходе проведения компьютерных исследований были получены осциллограммы токов и напряжений основных компонентов ВИГ КВ, характеристики при различных скоростях вращения и нагрузках. Данные исследования были проведены в ходе разработки экспериментального образца ВИГ КВ номинальной мощностью 132 кВт. Осциллограммы токов (обозначены красным цветом) и напряжений (обозначены черным цветом) обмоток и конденсаторов одной из фаз для номинального режима работы представлены на рис. 5.

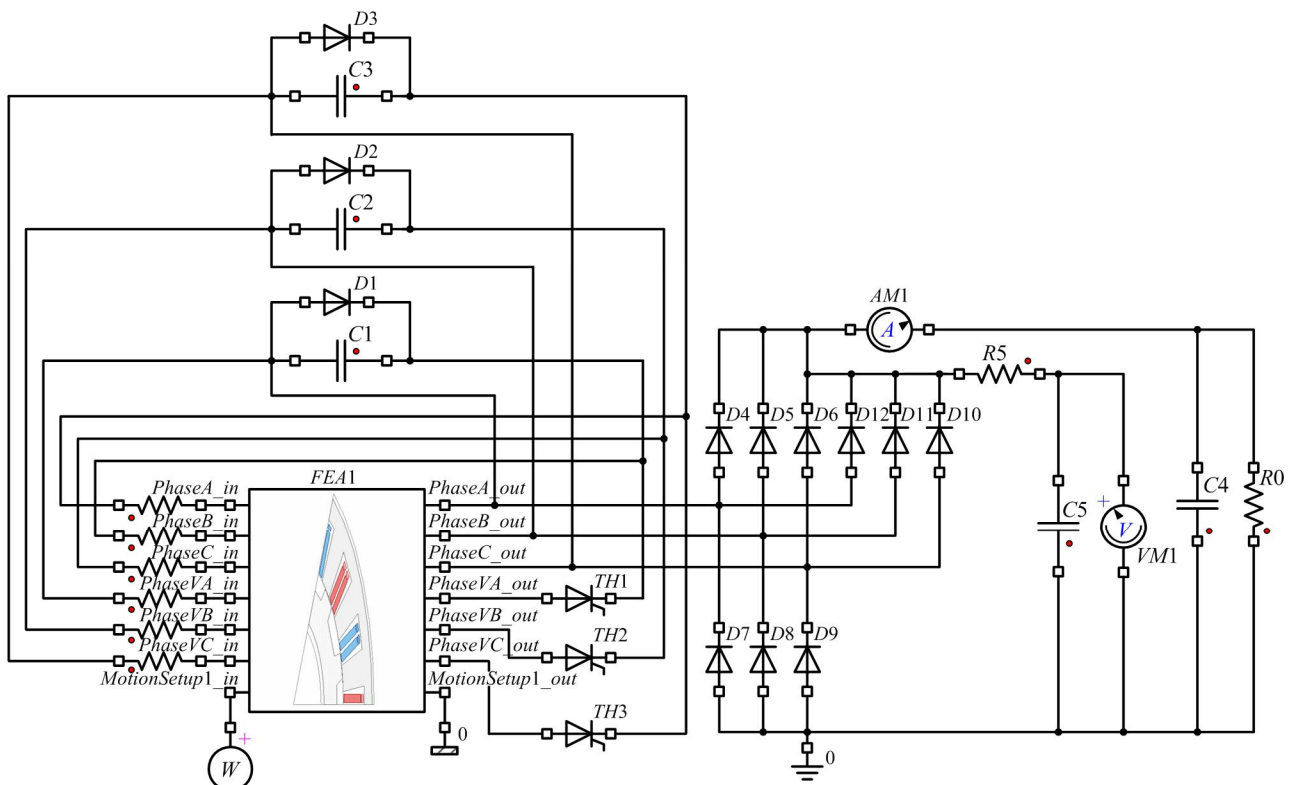


Рис. 3. Модель электрической схемы ВИГ КВ в ANSYS Simplorer

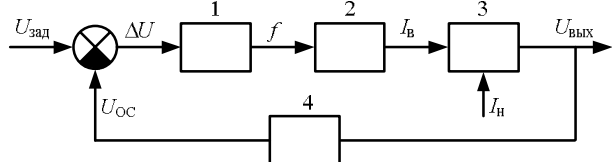


Рис. 4. Структурная схема системы управления ВИГ КВ

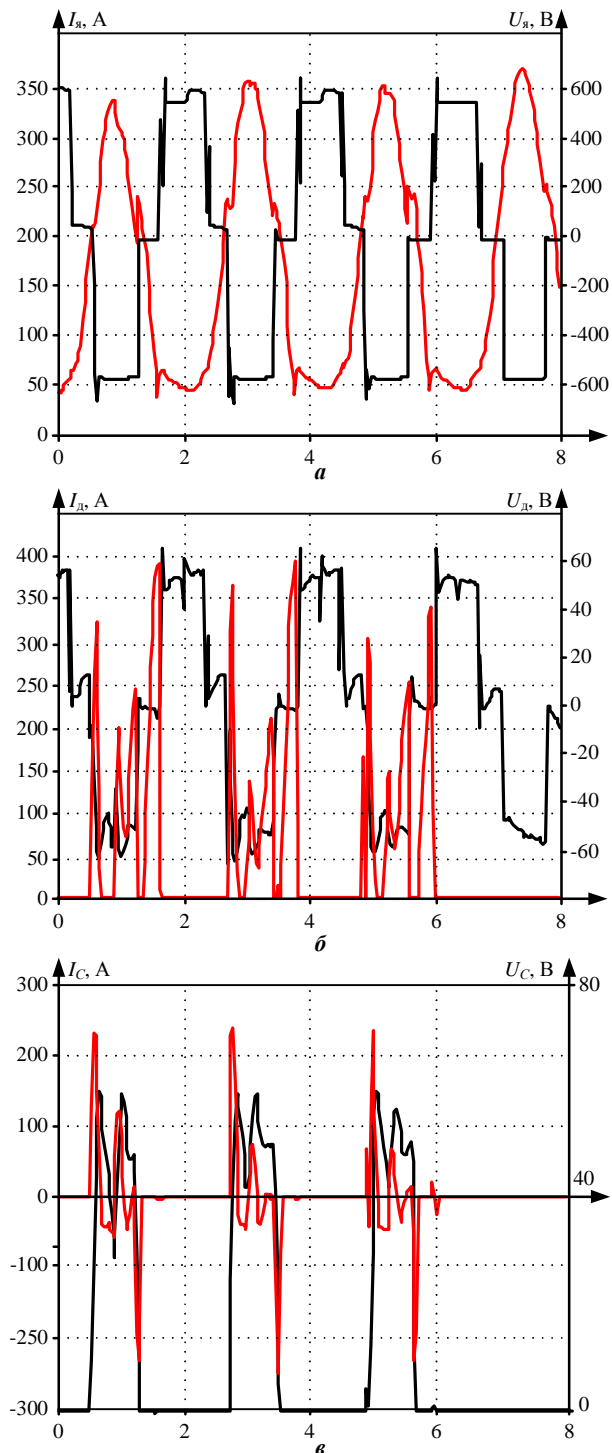


Рис. 5. Расчетные осциллограммы токов и напряжений ВИГ КВ: а – ток и ЭДС якорной обмотки; б – ток и ЭДС дополнительной обмотки; в – ток и ЭДС конденсатора возбуждения

Анализируя полученные графики, можно отметить следующие моменты. Ток якорной обмотки имеет постоянную составляющую. ЭДС обмотки возбуждения имеет значительные броски, обусловленные коммутацией, что

усложняет выбор полупроводниковых компонентов. По конденсаторам возбуждения протекают значительные импульсные токи, что вызывает необходимость выбора более качественных компонентов с меньшим внутренним сопротивлением и индуктивностью. ЭДС якорной и дополнительной обмотки отличается в N раз, что обусловлено отношением количества витков.

Используя предложенную математическую модель, были проведены расчеты для различных режимов работы при фиксированном задании напряжения 550 В: скорости вращения от 900 об/мин до 2300 об/мин, нагрузки от 40 до 2 Ом. В том числе были сняты нагрузочные характеристики, характеристики холостого хода и регулировочные характеристики генератора. В результате были получены зависимости крутящего момента, входной и выходной мощности, потерь в магнитопроводе и обмотках, токов и ЭДС фазных обмоток якоря и возбуждения, а также конденсаторов возбуждения и всех компонентов электрической схемы. По результатам были вычислены средние значения КПД для каждого режима работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ВИГ КВ

Адекватность модели была проверена на экспериментальном образце (рис. 6), изготовленном предприятием ООО НПП «Резонанс» в рамках создания «Перспективных электромеханических трансмиссий специальных транспортных средств повышенной экономичности и безопасности» [5, 6]. В данном случае для ВИГ КВ был использован серийно выпускаемый предприятием контроллер на базе микропроцессора *STM32F405VGT7*, производства *STMicroelectronics*. Алгоритм управления для микроконтроллера был выполнен на языке программирования C++ в среде разработки *Code Composer Studio*, что позволяет отлаживать систему в реальном времени, осуществлять мониторинг параметров и запись «логов» [21].

В ходе экспериментальных исследований были зафиксированы выходные характеристики генератора при заданных значениях скорости: действующие значения тока и напряжения нагрузки, тока и ЭДС фазных обмоток якоря и возбуждения, крутящего момента. Данные исследования позволили получить экспериментальные нагрузочные характеристики, характеристики холостого хода и регулировочные характеристики генератора. С помощью цифрового осциллографа проводились наблюдения за токами и ЭДС фазных и дополнительных обмоток и конденсаторов возбуждения. На рис. 7 представлены данные осциллограммы для номинального режима работы.

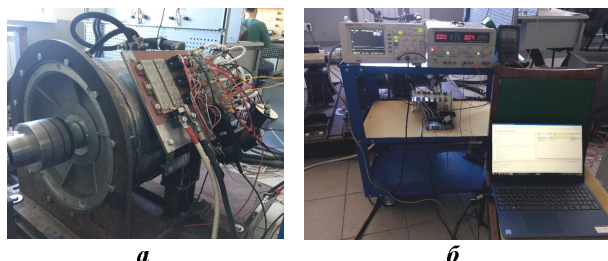


Рис. 6. Экспериментальный образец: а – электрическая машина и силовая электроника; б – средства измерения и управления: цифровой осциллограф, лабораторный источник питания, контроллер, драйверная плата, ЭВМ с программным обеспечением

Таблица 1

Экспериментальная зависимость напряжения холостого хода от скорости вращения

Параметр	Значения				
	902	1096	1298	1696	2295
n , об/мин	902	1096	1298	1696	2295
U , В	390	469	550	549	545

Таблица 2

Экспериментальная регулировочная характеристика для номинальной скорости вращения

Параметр	Значение				
	90	124	181	215	261
I_R , А	90	124	181	215	261
I_b , А	24	34	44	66	93

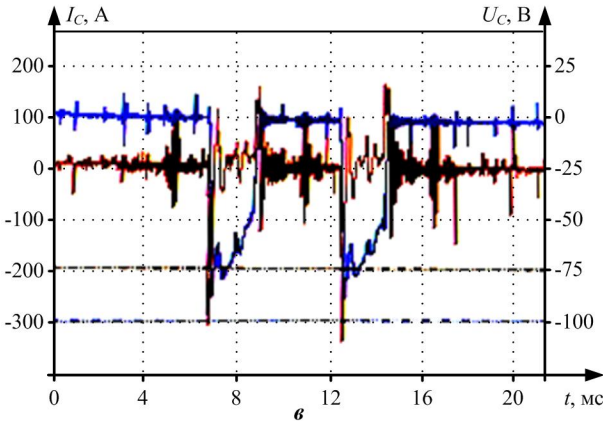
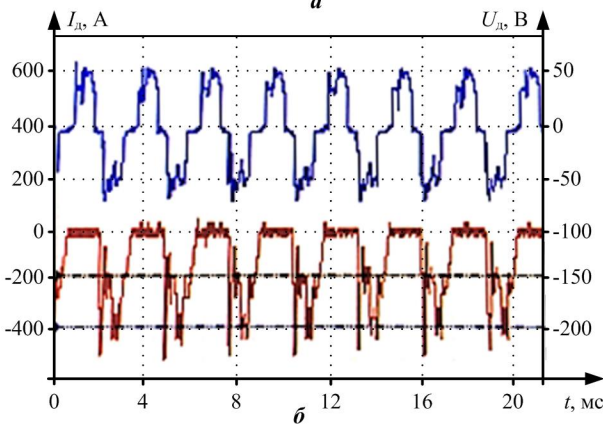
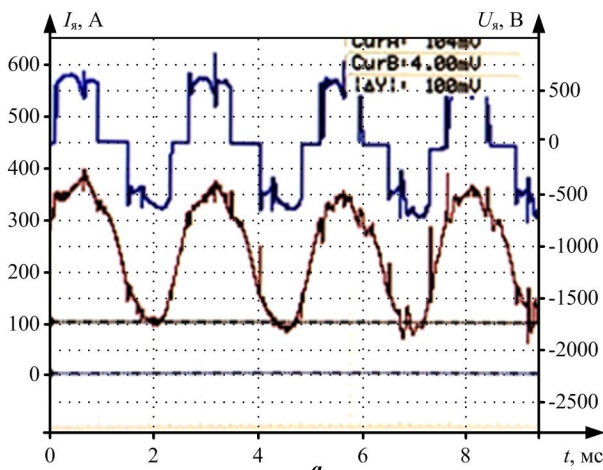


Рис. 7. Опытные осциллограммы токов и напряжений ВИГ КВ: а – ток и ЭДС якорной обмотки, б – ток и ЭДС дополнительной обмотки, в – ток и напряжение конденсатора возбуждения

В табл. 1 представлены экспериментальные зависимости напряжения холостого хода от скорости вращения при фиксированном задании напряжения.

В табл. 2 представлены экспериментальные зависимости тока обмотки возбуждения от тока нагрузки при номинальной скорости вращения и фиксированном значении выходного напряжения.

По табл. 1 можно сделать заключение, что на малой скорости напряжение значительно ниже задания. Это обусловлено зависимостью тока возбуждения, формируемого конденсаторами от ЭДС фазы, что следует из электрической схемы (рис. 1), что дополнительно увеличивает зависимость ЭДС фазы от скорости вращения.

По табл. 2 видна почти линейная зависимость тока дополнительной обмотки от тока нагрузки, что обусловлено алгоритмом управления, а именно увеличением количества полупериодов тока, пропускаемых тиристорами за фиксированный период времени с увеличением тока нагрузки для поддержания напряжения на выходе силового выпрямителя на заданном уровне.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИГ КВ

Проведенный междисциплинарный расчет ВИГ КВ посредством моделирования электрохимического преобразователя и электрической схемы позволил получить зависимости токов и ЭДС фазных обмоток, а также токов и напряжений конденсаторов в номинальном режиме работы (рис. 5). Данные зависимости были сопоставлены с осциллограммами, полученными на испытательном стенде (рис. 7), и показали высокую сходимость между собой как в качественном, так и в количественном отношении.

На рис. 8 представлено сопоставление расчетной и экспериментальной зависимости напряжения холостого хода от скорости вращения при заданном напряжении 550 В в системе управления. Корреляция между моделью и экспериментом составляет $R=0,95$.

На рис. 9 представлено сопоставление расчетной и экспериментальной зависимости тока обмотки возбуждения от тока нагрузки при номинальной скорости вращения и фиксированном напряжении на выходе силового выпрямителя. Корреляция между моделью и экспериментом составляет $R=0,99$.

На рис. 10 представлено сопоставление расчетной и экспериментальной зависимости мощности от тока нагрузки при номинальной скорости вращения и фиксированном напряжении на выходе силового выпрямителя. Корреляция между моделью и экспериментом составляет $R=0,99$.

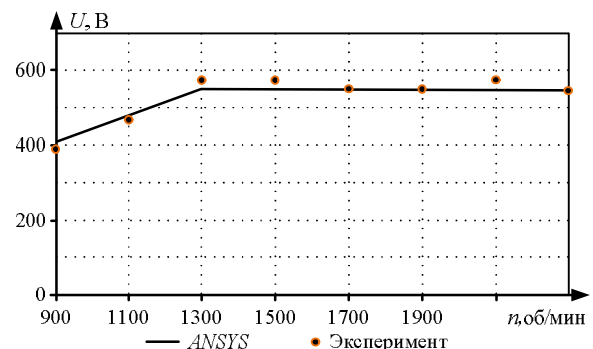


Рис. 8. Характеристики холостого хода ВИГ КВ

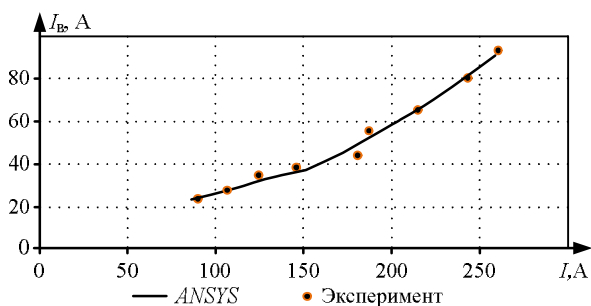


Рис. 9. Регулировочные характеристики ВИГ КВ

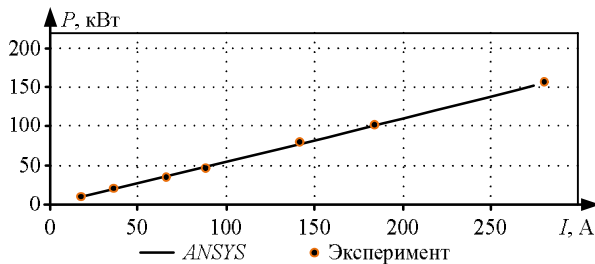


Рис. 10. Зависимость мощности от тока нагрузки

Исследования, проведенные на экспериментальном образце, позволяют отметить высокую сходимость результатов расчетов и экспериментов. В количественном отношении отличие среднего значения результатов составляет менее 5%, корреляция для динамических режимов составляет $R=0,95...0,99$, что указывает на высокую точность модели и подтверждает ее адекватность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построена компьютерная модель ВИГ КВ с использованием ANSYS Maxwell для электрической машины и ANSYS Simplorer для электрической схемы и алгоритма управления и выполнен междисциплинарный расчет.

2. Разработан и изготовлен экспериментальный образец ВИГ КВ мощностью 132 кВт с микропроцессорным управлением, позволяющим осуществлять мониторинг и запись параметров его работы, а также осуществлять отладку алгоритма управления в режиме реального времени.

3. Адекватность модели подтверждается тем, что расчетные токи и ЭДС достаточно близко совпадают с экспериментальными осциллограммами ВИГ КВ, полученными на испытательном стенде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов К.М. Автономная энергетическая установка с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2006. 173 с.
2. Чернышев А.Д. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электрической трансмиссии транспортного средства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2018. № 1. С. 5-16.
3. Лашкевич М.М. Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными двигателями: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 175 с.
4. Гребенников Н.В. Динамика и энергоэффективность перспективных единиц подвижного состава, оснащаемых вентильно-индукторными электрическими машинами: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2012. 148 с.
5. Коровин В.А., Чернышов А.Д. Инновационная электро-механическая трансмиссия повышенной безопасности и

- экономичности // Вторая научно-практическая конференция «Разработка и использование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники», 26 апреля 2018 г., Санкт-Петербург.
6. Чернышев А.Д. Электромеханическая трансмиссия для системы управления и контроля ISOBUS сельскохозяйственной техникой / А.Д. Чернышев // Конференция – совещание «Универсальные системы управления и мониторинга для техники сельскохозяйственного назначения (ISOBUS)», 18 октября 2018 г., Москва.
7. Голландцев Ю.А. Сравнение механических характеристик асинхронных и вентильных индукторно-реактивных двигателей // Информационно-управляющие системы. 2006. №6. С. 50–53.
8. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 148 с.
9. Weh. H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output / H. Weh // Electrical Machines Institute of the Technical University of Braunschweig. 1984. Bd. 6. P. 135-144.
10. Matsuo T., Lipo T. Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine // IEEE Transaction on Energy Conversion. 1994. № 22. Vol. 9. P. 359-365.
11. Жарков А.А. Разработка и исследование вентильного индукторного электропривода с независимым возбуждением и микроконтроллерным управлением: дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 150 с.
12. Новое направление в электроприводе – мощный много-секционный вентильно-индукторный электропривод с векторным управлением / В.Ф. Казаченко, В.Н. Остриров, А.М. Русакаков, А.В. Дроздов // Электронные компоненты. 2006. №11. С. 30-35.
13. Фисенко В.Г., Попов А.Н. Проектирование вентильных индукторных двигателей. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 56 с.
14. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели прецизионных следящих систем электропривода: дис. ... док. техн. наук. Санкт-Петербург, 2004. 299 с.
15. Miller T.J.E. Switched Reluctance motor and their Control. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. 203 p.
16. Lawrenson P. Variable-Speed Switched Reluctance Motors / P. Lawrenson // IEEE Proc. July 1980. Vol. 127. № 24.
17. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 70 с.
18. Пат. 2658636 Российская Федерация. Индукторный генератор с совмещенными обмотками возбуждения и статора / В.А. Коровин; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «Резонанс». 2017130438; заявл. 28.08.2017; опубл. 22.06.2018 Бюл. № 18.
19. Пат. 2702615 Российская Федерация. Индукторный генератор с совмещенными обмотками возбуждения и статора / А.Д. Чернышев, В.А. Коровин; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «Резонанс». – 2019100979; заявл. 10.01.2019; опубл. 09.10.2019.
20. Сергеев Ю.С., Сандалов В.М., Карпов Г.Е. Моделирование вентильно-индукторного электровибропривода // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. №4. С. 90–98.
21. Воронин С.Г., Петрищев С.А., Сергеев Ю.С. Моделирование электромагнитных процессов в электромеханических преобразователях энергии с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS Workbench // Математическое моделирование и краевые задачи: труды Седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 4: Информационные технологии в математическом моделировании. Самара: СамГТУ, 2010. С. 174–176.

22. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS / С.В. Вишняков, Н.М. Гордюхина, Е.М. Федорова и др.; под ред. проф. Ю.А. Казанцева. М: Изд-во МЭИ, 2003. 62 с.
23. Борзунова Т.Л., Розниченко Г.Ю. Информационные технологии в математическом моделировании // «Математика. Компьютер. Образование»: сб. трудов XII международной конференции. Т.1. Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. С. 277–288.
24. Сергеев Ю.С. Приводы вибрационных машин на базе вентильных индукторных двигателей: дис.... канд. техн. наук : 05.09.03. Челябинск, 2011. 173 с.
25. Сергеев Ю.С., Карпов Г.Е., Кононистов А.В. Разработка микропроцессорной системы управления вентильно-индукторными электровиброприводами // Наука ЮУрГУ: материалы 68-й научной конференции. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2016. С. 950–954.

Поступила в редакцию 24 ноября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MODELING OF SWITCH RELUCTANCE GENERATOR WITH CAPACITOR EXCITATION

Sergey G. Voronin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Aeronautical Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: voroninsg@susu.ru

Aleksey D. Chernyshev

Engineer, Electric Drive Design Department, Rezonans plc., Chelyabinsk, Russia. E-mail: ad.chernyshev@icloud.com

The switch reluctance generator is one of the types of electric machines for autonomous power plants. The creation of a switch reluctance generator with a new method of excitation and switching phase winding in natural mode is the result of the study of electromagnetic processes of the switch reluctance generator. The new principle of exciting phase windings is based on the operating features of such electrical machines. One of them is the trapezoidal form of phase voltages. That is, this technical solution eliminates the need for tracking and switching phase currents depending on the position of the rotor. The winding is excited by switching capacitors of the idle phase. This can greatly simplify and reduce the cost of electronic control equipment of the switch reluctance generator. Due to the novelty of the design, neither foreign nor domestic scientists have ever investigated the considered technical solution. This article presents a mathematical model of a valve-inductor generator with capacitor excitation and thyristor control of the excitation current. The regulation of the excitation current is carried out by changing the ratio between the half-periods of the current transmitted by the thyristors and half-periods of the voltage applied to them. The mathematical model is created in a dynamic combination of ANSYS Maxwell and ANSYS Simplorer. The authors conducted an interdisciplinary calculation. The calculation results are given in the article in the form of time dependences of currents and EMF of windings and capacitors of excitation. As a result of the research, an experimental sample of a switch reluctance generator with capacitor excitation and microprocessor control was designed and manufactured at the enterprise NPP Resonance LLC. The oscillograms recorded on the test bench to a large extent coincide with the calculated dependences of currents and voltages, which confirms the adequacy of the model.

Keywords: autonomous power plant, switch reluctance generator, computer model, finite element model, electric machine, electric current, EMF.

REFERENCES

- Vinogradov K.M. Avtonomnaya energeticheskaya ustanovka s sinkhronnoy reaktivnoy mashinoy nezavisimogo vzbuzhdeniya. Kand. diss. [Autonomous Power Plant with A Synchronous Reactive Independent Excitation Machine. Ph.D. diss.]. Chelyabinsk, 2006, 173 p.
- Chernyshev A.D. Mechanical Characteristics Estimation of the Traction Motor Electric Transmission of a Vehicle. Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2018, no. 1, pp. 5–16. (In Russian)
- Lashkevich M.M. Razrabotka sistemy upravleniya dlya elektrottransmissii s tyagovymi ventil'no-induktornymi dvigatelyami. Kand. diss. [Development of a control system for electric transmissions with traction switch reluctance motors. Ph.D. diss.]. Moscow, 2013, 175 p.
- Grebennikov N.V. Dinamika i energoeffektivnost perspektivnykh edinits podvizhnogo sostava, osnashchaemykh ventil'no-induktornymi elektricheskimi mashinami. Kand. diss. [Dynamics and energy efficiency of promising rolling stock units equipped with switch reluctance machines. Ph.D. diss.]. Rostov-na-Donu, 2012, 148 p.
- Korovin V.A., Chernyshev A.D. Innovative electromechanical transmission with improved safety and efficiency. Vtoraya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Razrabotka i ispolzovanie elektricheskikh transmissiy dlya obrazov vooruzheniya i voennoy tekhniki». [The second scientific-practical conference "Development and use of electric transmissions for arms and military equipment images"]. 2018, Saint-Petersburg. (in Russian)
- Chernyshev A.D. Electromechanical transmission ISOBUS control system of agricultural equipment. Konferentsiya – soveshchanie «Universalnye sistemy upravleniya i monitoringa dlya tekhniki selskokhozyaystvennogo naznacheniya (ISOBUS)». [Conference - meeting "Universal control and monitoring systems for agricultural machinery (ISOBUS)"]. 2018. Moscow. (in Russian)
- Gollandtsev Yu.A. Comparison of Mechanical Characteristics of Asynchronous and Switched Reluctance Motors. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Management Information Systems], 2006, no. 6, pp. 50–53. (In Russian)
- Gollandtsev Yu.A. Ventilnye Induktorno-Reaktivnye Dvigateli [Switch Reluctance Motors]. St. Petersburg, 2003, 148 p. (In Russian)
- Weh. H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output. Electrical Machines Institute of the Technical University of Braunschweig, 1984, no. 6, pp. 135–144.
- Matsuo T. Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1994, no. 22, pp. 359–365.
- Zharkov A.A. Razrabotka i issledovanie ventilnogo induktornogo elektroprivoda s nezavisimym vzbuzhdeniem i mikro-kontrollernym upravleniem. Kand. Diss. [Development and research of a switch reluctance electric drive with independent excitation and micro-controller control. Ph.D. diss.]. Moscow, 2008, 150 p.

12. Kazachenko V.F., Ostrirov V.N., Rusakakov A.M., Drozdov A.V. A new direction in the electric drive – a powerful multi-section switch reluctance electric drive with vector control. *Elektronnye komponenty* [Electronic Components], 2006, no. 11, pp. 30–35. (In Russian)
13. Fisenko V.G., Popov A.N. *Proektirovanie Ventilnykh Induktornykh Dvigatelye* [Design of Switch Reluctance Motors]. Moscow, MEI Publ., 2005, 56 p. (In Russian)
14. Gollandtsev Yu.A. *Ventilnye Induktorno-Reaktivnye Dvigateli Pretsizionnykh Sledyashchikh Sistem Elektroprivoda*. D.Sc. Diss. [Switch Reluctance Motors of precision servo systems of electric drive. D.Sc. Diss.]. St. Petersburg, 2004, 299 p.
15. Miller, T.J.E. *Switched Reluctance motor and their Control*. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993, 203 p.
16. Lawrenson P. Variable-Speed Switched Reluctance Motors. *IEEE Proc*, July 1980, vol. 127, no. 24.
17. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. *Ventilno-induktornye dvigateli* [Switch Reluctance Motors]. Moscow, MEI Publ., 2003, 70 p. (In Russian)
18. Korovin V.A. *Induktornyy Generator S Sovmeshchennymi Obmotkami Vozbuzhdeniya I Statora* [Inductor Generator with Combined Field Windings And Stator]. Patent RF, no. 2658636, 2018.
19. Korovin V.A., Chernyshev A.D. *Induktornyy Generator S Sovmeshchennymi Obmotkami Vozbuzhdeniya I Statora* [Inductor Generator with Combined Field Windings And Stator]. Patent RF, no. 2702615, 2019.
20. Sergeev Yu.S., Sandalov V.M., Karpov G.E. Modeling of Switched Reluctance Electric Vibration Drive. *Vestnik Yu-zhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University, Series Power Engineering], 2017, no. 4, pp. 90–98. (In Russian)
21. Voronin S.G., Petrishchev S.A., Sergeev Yu.S. Simulation of Electromagnetic Processes in Electromechanical Energy Converters Using ANSYS Workbench Programming and Computing Suite. *Sedmaya vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya: Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi*. [Seventh All-Russia Scientific Conference: Mathematical modeling and boundary problems], Samara, 2010. (In Russian)
22. Vishnyakov S.V., Gordyukhina N.M., Fedorova E.M. *Raschet elektromagnitnykh poley s pomoshchyu programmnoogo kompleksa ANSYS* [Calculation of Electromagnetic Fields Using ANSYS Software Package]. Moscow, MEI Publ., 2003, 62 p. (In Russian)
23. Borzunova T.L., Roznichenko G.Yu. Information Technology in Mathematical Simulation. *XII mezhdunarodnaya konferentsiya: Matematika. Kompyuter. Obrazovanie*. [XII International Conference: Mathematics. Computer. Education], Izhevsk, 2005. (In Russian)
24. Sergeev Yu.A. *Privody vibratsionnykh mashin na baze ventilnykh induktornykh dvigateley*. Kand. diss. [Drives of Vibrating Machines Based on Switch Reluctance Motors. Ph.D. Diss.]. Chelyabinsk, 2011, 173 p. (In Russian)
25. Sergeev Yu.S., Karpov G.E., Kononistov A.V. Development of a Microprocessor Control System for a Valve Inductor Electric Vibration Motor. *68-ya nauchnaya konferentsiya: Nauka YuUrGU*. [68th Scientific Conference: Science of SUSU], Chelyabinsk, 2016. (In Russian)

Воронин С.Г., Чернышев А.Д. Модель вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 1(46). С. 4-12. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-4-12)

Voronin S.G., Chernyshev A.D. Modeling of Switch Reluctance Generator with Capacitor Excitation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 4-12. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-4-12)