DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-54-67
УДК 004.9:629.5.03-83

И.М. Калинин[1], М.А. Николаев[1], М.В. Третьяк[1], А.Н. Опарин[2]
[1] ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия
[2] ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Россия

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫМ ГРЕБНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является система электродвижения с вентильно-индукторным гребным электродвигателем. Цель работы – создание компьютерной модели вентильно-индукторного гребного электропривода и исследование гармонического состава напряжения в судовой электроэнергетической системе с таким электроприводом.

Материалы и методы. Применена компьютерная модель объекта исследования. Используются методы схемотехнического моделирования электроэнергетических систем и их элементов.

Основные результаты. Разработана и проверена на соответствие реальному объекту компьютерная схемотехническая модель вентильно-индукторного гребного электропривода. Определен гармонический состав напряжений и токов в элементах электропривода. Выполнена оценка влияния допущений на расхождения результатов физического и расчетного экспериментов. Рассчитаны значения коэффициента несинусоидальности кривой напряжения на главном распределительном щите в электроэнергетической системе с синхронным генератором и вентильно-индукторным гребным электроприводом соизмеримой мощности. Определены пути улучшения гармонического состава.

Заключение. Компьютерная схемотехническая модель вентильно-индукторного гребного электропривода позволяет рассчитать значения параметров переходных и установившихся процессов вентильно-индукторного двигателя. Характер электромагнитных процессов в системе, обмен энергией между фазными обмотками и звеном постоянного тока преобразователя-коммутатора моделируются адекватно реальному объекту. Разработанная модель пригодна для исследования влияния режимов вентильно-индукторного гребного электропривода на качество электроэнергии судовой электроэнергетической системы. Исследованиями подтверждено, что существует возможность улучшения качества электроэнергии в судовой электроэнергетической системе путем оптимизации соотношения длительностей, управляющих ключами фазных модулей импульсов.

Ключевые слова: ледокол, судовая электроэнергетическая система, система электродвижения, вентильно-индукторный гребной электропривод, компьютерная модель, схемотехническая модель, гармонический состав.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2020-3-393-54-67
UDC 004.9:629.5.03-83

I. Kalinin[1], M. Nikolaev[1], M. Tretyak[1], A. Oparin[2]
[1] Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia
[2] St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

COMPUTER-BASED SIMULATION OF MARINE ELECTRIC POWER SYSTEM WITH SWITCHED-RELUCTANCE PROPULSION MOTOR

Object and purpose of research. This paper discusses an electric propulsion (EPS) system with switched-reluctance motor (SRM) to develop and verify the computer-based model of SRM propulsion drive and investigate voltage harmonics in an SRM-powered marine EPS.

Для цитирования: Калинин И.М., Николаев М.А., Третьяк М.В., Опарин А.Н. Компьютерное моделирование судовой электроэнергетической системы с вентильно-индукторным гребным электроприводом. Труды Крыловского государственного научного центра. 2020; 3(393): 54–67.

For citations: Kalinin I., Nikolaev M., Tretyak M., Oparin A. Computer-based simulation of marine electric power system with switched-reluctance propulsion motor. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2020; 3(393): 54–67 (in Russian).

Materials and methods. The study was performed on a computer-based model of EPS as per common circuit simulation methods for electric power systems and their elements.
Main results. This work included development and validation of a computer-based circuit model of an SRM propulsion drive. It identified of voltage and current harmonics in drive elements and estimated the effect of assumptions upon the deviations between calculation results and experimental data, with calculation of main switchboard (MSB) voltage nonsinusoidality ratio in an EPS with synchronous generator and SRM propulsion drive of commensurable capacity. The study also outlined the ways for further improvement of harmonics.
Conclusion. Computer-based circuit model of SRM propulsion drive enables sufficiently accurate calculation of transitory and steady processes taking place in switched-reluctance motor. Simulated electromagnetic processes in the system, as well as power exchange between phase windings and DC link of commuting converter correspond to the real ones. This model could be used to investigate the effect of SRM drive operation conditions upon EPS power quality that might be further improved by the optimization of control pulse duration ratios for phase module keys.
Keywords: icebreaker, marine electric power system, electric propulsion system, SRM propulsion drive, computer-based model, circuit model, harmonics.
Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

В Российской Федерации принят комплексный проект развития Северного морского пути (СМП) с целью реализации возможностей этой акватории как для транзитного судоходства, так и для доставки грузов из пунктов, находящихся на севере России, и в них [1].

Ледокольная проводка судов включает обеспечение безопасности плавания судна в акватории СМП при нахождении судна в зоне действия радиосвязи с ледоколом, а именно: ледовую разведку ледоколом, прокладку ледоколом каналов во льду, формирование группы судов и расстановку судов для следования за ледоколом/ледоколами, плавание судна в проложенном во льду канале за ледоколом на буксире, без буксира в одиночном плавании или в составе группы судов [2].

Тарифы (стоимость в рублях за единицу валовой вместимости судна) на ледокольную проводку судов дифференцируются с учетом вместимости судна, его ледового класса, расстояния, на которое осуществляется проводка этого судна, и периода навигации [3].

С повышением ледового класса увеличивается скорость движения судна (v), что ведет к уменьшению полного времени транспортировки ($t_{тр}$), снижению тарифов ледокольного обеспечения и его стоимости за счет сокращения времени услуг ледокола ($t_{ул}$) и, в итоге, к снижению полной стоимости ледокольного сопровождения и транспортировки (Стр) [4]. К росту скорости транспортировки также приводит увеличение мощности энергетической установки (Рэу) и снижение сопротивления движению судна (R).

Увеличение вместимости судна ведет к снижению тарифов на ледокольную проводку и, соответственно, к уменьшению ее удельной стоимости, увеличивается грузооборот (Гр), что также вызывает снижение удельной стоимости ледокольного сопровождения, увеличение полного грузооборота и большие экономические выгоды (В) судовладельца (товаропроизводителя) и государства. В конечном счете, экономические выгоды (доходы) за вычетом суммарных издержек должны обеспечить получение прибыли. Схема получения выгод по транспортной составляющей представлена на рис. 1.

Исходя из указанных выше целей было принято решение о строительстве атомного ледокола пр. 10510 (рис. 2, см. вклейку) с системой электродвижения (СЭД) и мощностью на винтах 120 МВт. Планируемая скорость движения ледокола во льдах толщиной 2 м составляет 10–12 уз. Упрощенная схема единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) ледокола пр. 10510 приведена на рис. 3 (см. вклейку).

СЭД ледокола (рис. 3) представляет собой совокупность четырех идентичных электроприводов гребных винтов (гребных электроприводов (ГЭП)), при разработке которых использовались технические решения, принятые в ходе создания СЭД для ледоколов пр. 22220. Однако двойное увеличение мощности СЭД обусловило их значительную коррек тировку. В частности, в проекте 10510 приняты четыре асинхронных гребных электродвигателя (ГЭД)

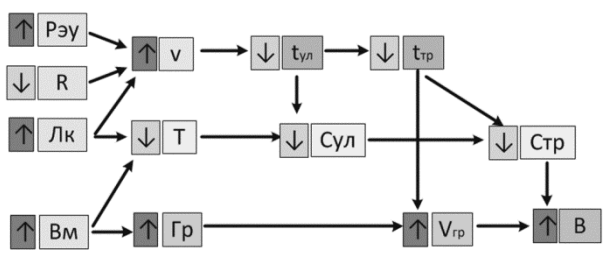
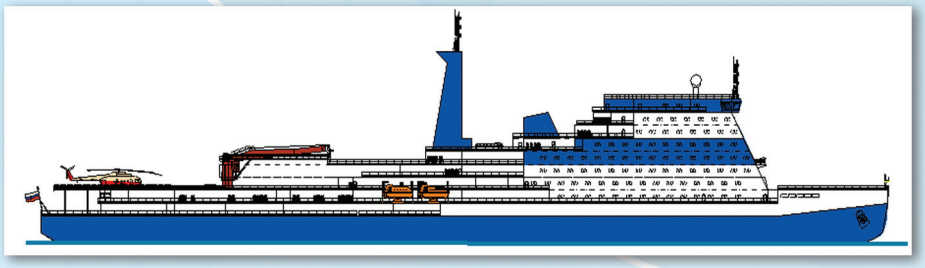


Рис. 1. Схема получения выгод по транспортной составляющей

Fig. 1. Layout for obtaining transportation gains

Рис. 2. Ледокол пр. 10510
Fig. 2. Project 10510 icebreaker



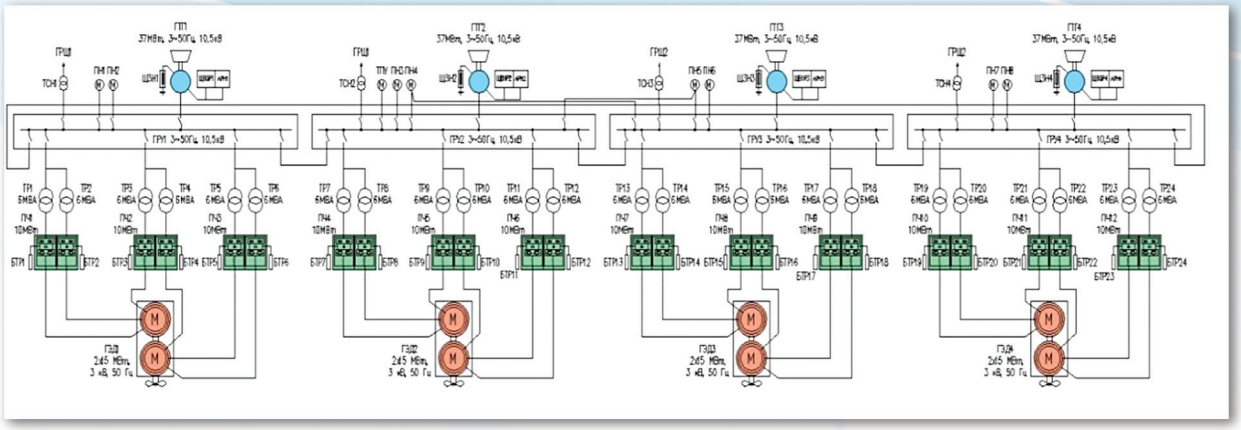


Рис. 3. Упрощенная схема единой электроэнергетической системы ледокола пр. 10510 с электроприводом гребных винтов на основе асинхронных электродвигателей

Fig. 3. Simplified layout of integrated electric propulsion system aboard Project 10510 icebreaker with propellers driven by asynchronous motor

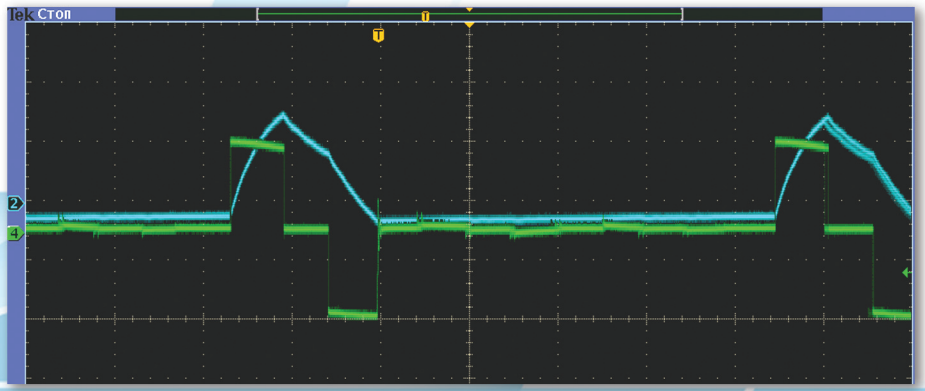


Рис. 10. Осциллограмма управления ключами поставочного изделия – вентильно-индукторного гребного электропривода (2 МВт)

Fig. 10. Key control oscillogram for 2MW SRM propulsion drive

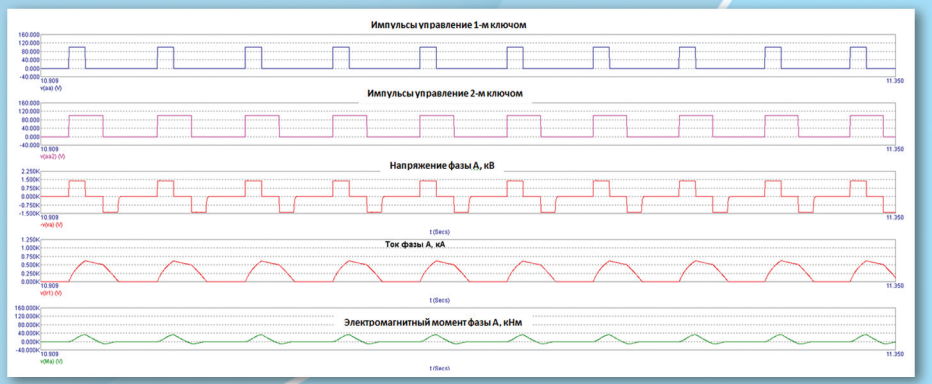


Рис. 11. Расчетные осциллограммы параметров работы фазы А вентильно-индукторного гребного электропривода (2 МВт) при пуске

Fig. 11. Design oscillograms of Phase A startup performance parameters for 2MW SRM propulsion drive

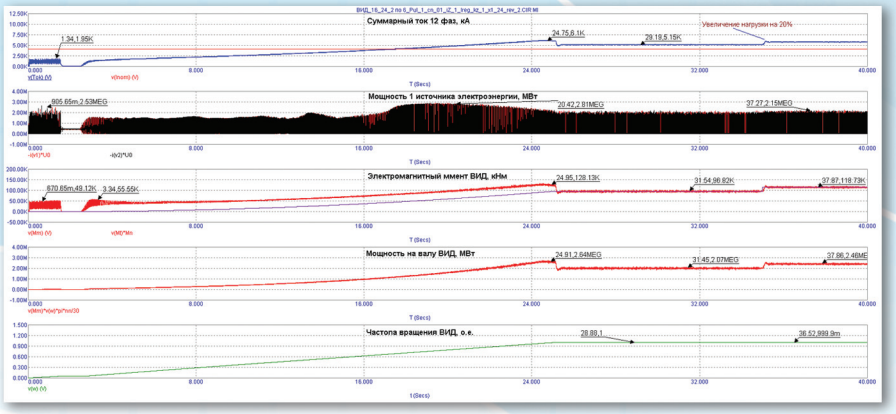


Рис. 12. Расчетные осциллограммы параметров режима работы вентильно-индукторного гребного электропривода (2 МВт) при пуске и увеличении нагрузки на 20 %

Fig. 12. Design oscillograms for operational parameters of 2MW SRM propulsion drive: startup and 20% growth of load

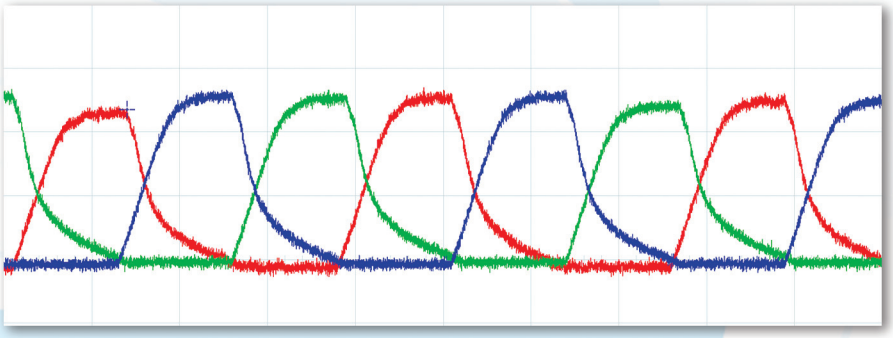


Рис. 13. Осциллограммы токов фаз при пуске вентильно-индукторного электродвигателя (2 МВт, 200 об/мин)

Fig. 13. Startup phase current oscillograms of a 200 RPM 2MW switched-reluctance motor

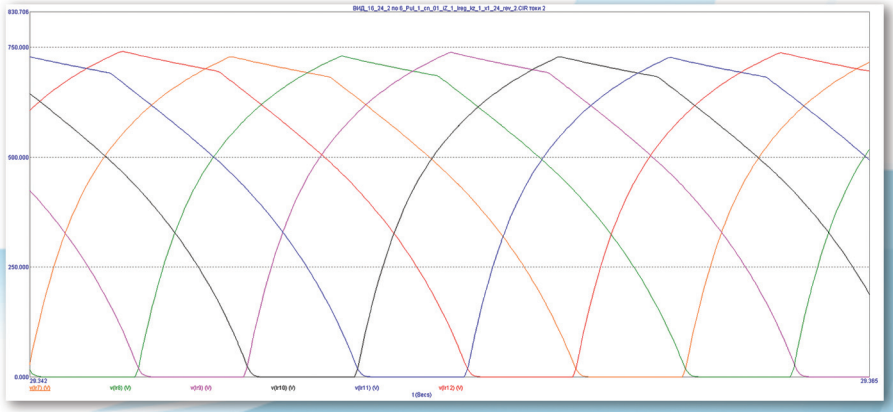


Рис. 14. Расчетные осциллограммы токов фаз пакета статора при пуске вентильно-индукторного электродвигателя (200 об/мин)

Fig. 14. Design startup oscillograms of phase currents in 200 RPM 2MW SRM stator packs

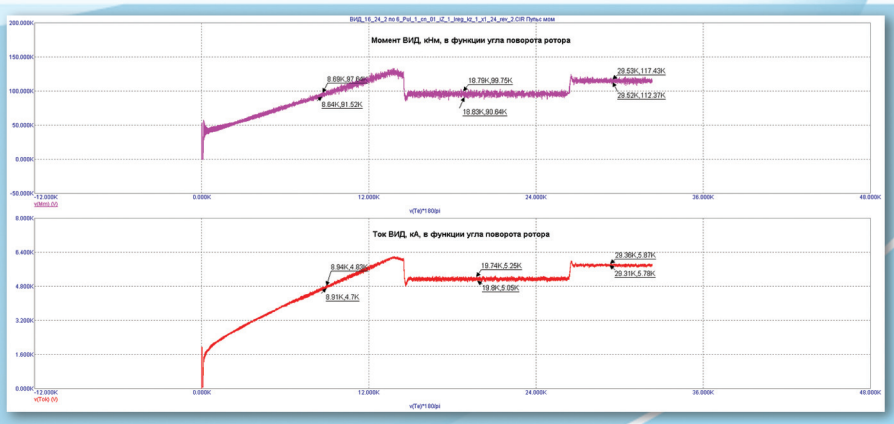


Рис. 15. Момент и суммарный ток вентильно-индукторного электродвигателя (2 МВт) в зависимости от угла поворота ротора

Fig. 15. Torque and total current of 2MW SRM versus rotor angle

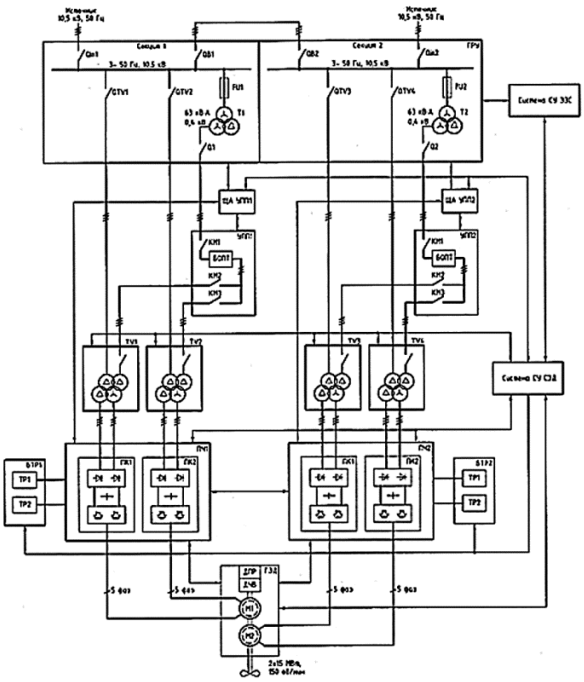


Рис. 4. Структурная схема модуля одновального гребного электропривода с вентильно-индукторным электродвигателем мощностью 30 МВт

Fig. 4. Components of single-shafted propulsion drive module powered by 30MW SRM

с тремя трехфазными обмотками на статоре. Увеличение числа обмоток обусловило и увеличение числа преобразовательных каналов в силовых частях преобразователей частоты, от которых получают питание ГЭД (схемы самих преобразовательных каналов остались практически неизмененными).

Альтернативным техническим решением по созданию СЭД является применение ГЭП с вентильно-индукторным электродвигателем (ВИД, вентильно-индукторный гребной электропривод (ВИГЭП), рис. 4). Среди отличий ВИД от традиционных типов электродвигателей можно выделить:

- различное число зубцов статора и ротора;
- реактивный характер электромагнитного момента;
- практическое отсутствие магнитной взаимосвязи между фазными катушками, их независимость и дискретность работы;
- наличие в зонах перекрытия зубцов сильного насыщения ферромагнитного материала, что обеспечивает высокую степень электромеханического преобразования энергии, но приводит к существенной нелинейности магнитных характеристик.

Выбор данного типа ГЭП основан также на опыте успешной эксплуатации ВИД типа ИД-2000 (рис. 5) на морском буксире «Виктор Конецкий» пр. 745.1 (рис. 6).

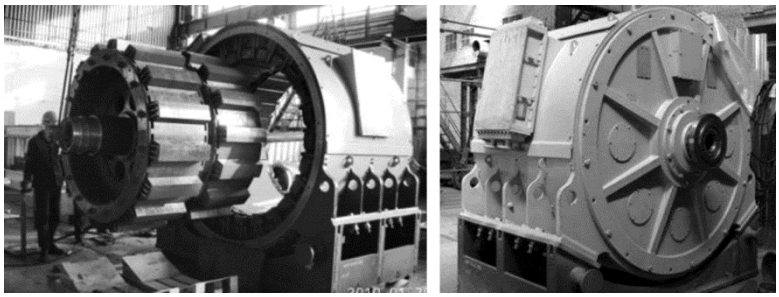


Рис. 5. Вентильно-индукторный электродвигатель типа ИД-2000

Fig. 5. ID-2000 switched-reluctance motor

Рис. 6. Морской буксир «Виктор Конецкий»

Fig. 6. *Viktor Konetsky* sea-going tug

Проект 745.1 2011 г.
Тип: буксирное судно
Мощность электростанции, кВт:
2×1500, 1×200.
Мощность на валу, кВт: 1×2000
ЕЭЭС с СЭД на основе ВИД

Таблица 1. Основные параметры ИД-2000
Table 1. Main parameters of ID-2000 SRM

№ п/п	Наименование параметров	Единицы измерения	Значение
1	Номинальная мощность	кВт	2000
2	Номинальное напряжение	В	900
3	Номинальный выходной фазный ток	А	1065
4	Номинальная частота питания обмоток двигателя	Гц	53,3
5	Номинальная частота вращения двигателя	об/мин	200 ± 10
6	Число фаз	шт.	6
7	Конфигурация зубцов ротор/статор	–	16/24
8	Коэффициент полезного действия	%	не менее 97

Искажения синусоидальности напряжения и тока в ЕЭЭС, вносимые в первую очередь статическими преобразователями электроэнергии (СПЭ), являются основными причинами ухудшения электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования. В ГОСТ 30372-95 [6] ЭМС определена как способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.

По требованию Российского морского регистра судоходства [7], в полностью укомплектованной судовой ЭЭС коэффициент несинусоидальности кривой напряжения не должен превышать 10 %. Практически единственным способом оценки качества электроэнергии в ЭЭС проектируемого судна является компьютерное моделирование (компьютерная модель – модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде [8]).

Для исследования работы ВИД в качестве нагрузки судовой ЭЭС использована математическая модель ВИД, приведенная в [10] (модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов или выражений [8]), и разработаны схемотехнические модели ЕЭЭС.

Необходимо учитывать, что однополярные токи в фазах ВИД, треугольные формы изменения потоков, локальное насыщение зубового слоя и ярко выраженная автономность и дискретность работы фаз чрезвычайно усложняют анализ динамики ВИД. Допущение об отсутствии взаимного влияния фаз, вполне оправданное при одиночной коммутации, позволяет существенно упростить динамическую модель ВИД [5].

С целью экономии машинного времени расчета компьютерной модели, обеспечения устойчивости расчета систем уравнений системы ЕЭЭС с ВИГЭП в математической модели ВИД [10] приняты следующие допущения:

- отсутствуют падения магнитодвижущей силы на участках магнитной цепи, потоки рассеяния фазных обмоток, вихревые токи;
- не учитывается насыщение магнитной цепи.

Для проверки адекватности (совокупность действий, результатом которых является подтверждение ее соответствия моделируемому объекту реального мира [8]) и учета особенностей модели ВИД требуется сравнение результатов вычислительного и физического экспериментов. В качестве физического объекта для такого сравнения выбран ВИД ИД-2000. Его основные параметры приведены в табл. 1.

Момент инерции нагруженного гребного винта (с массой присоединенной воды) – 2176 кгм.

Статор ВИД ИД-2000 состоит из двух пакетов. На каждом пакете статора расположены 24 катушки, которые распределены на 6 фаз (рис. 7).

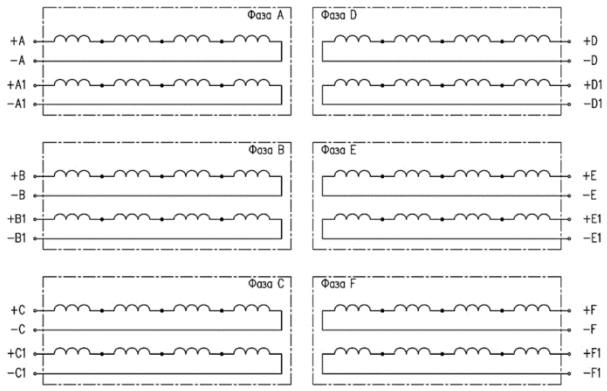


Рис. 7. Схема соединений фазных обмоток пакетов статора ИД-2000
Fig. 7. Wiring diagram of phase windings in ID-2000 SRM stator packs

Моделирование гребного электропривода мощностью 2 МВт на основе шестифазного вентильно-индукторного двигателя

Simulation of 2MW propulsion drive based on 6-phase SRM

Схемотехническая компьютерная модель ВИГЭП представлена на рис. 8. Катушки двух пакетов статора подключены к двум независимым источникам электроэнергии с конденсаторами в звене постоянного тока через фазные модули-коммутаторы (рис. 9). В модели системы управления ИД-2000 реализована одиночная симметричная коммутация фаз.

Последовательность импульсов в алгоритме управления ключами фазного модуля и осциллограмма тока фазы ВИГЭП с ИД-2000 приведены на рис. 10 (см. вклейку). Зеленым цветом изображены импульсы управления: во время первого импульса работают два ключа, второго – один ключ, во время третьего все ключи закрыты. На рис. 11 (см. вклейку) представлены расчетные осциллограммы напряжения, тока, электромагнитного момента и управляющих импульсов ключами фазы А.

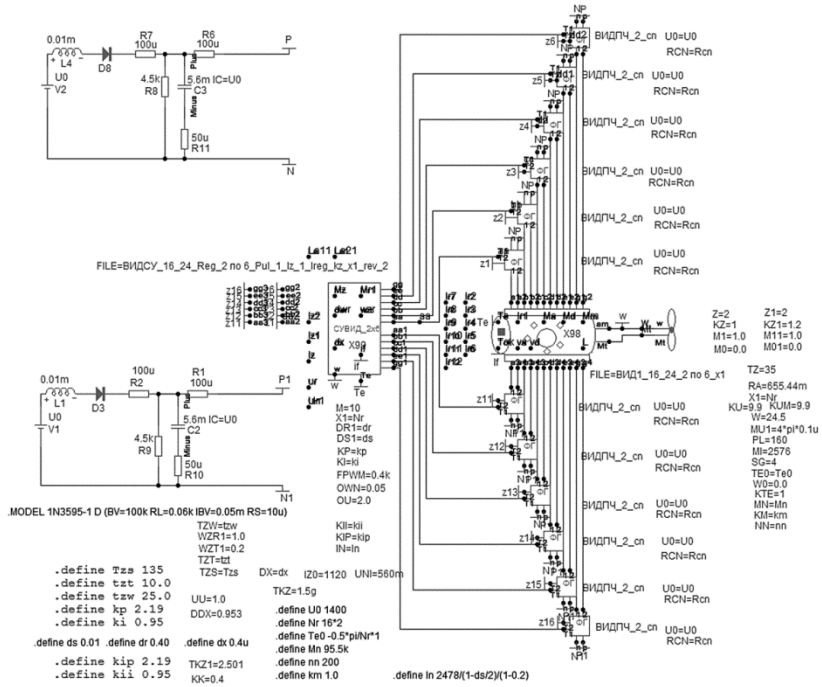


Рис. 8. Схемотехническая модель вентильно-индукторного гребного электропривода (2 МВт)

Fig. 8. Circuit-based model of 2MW SRM propulsion drive

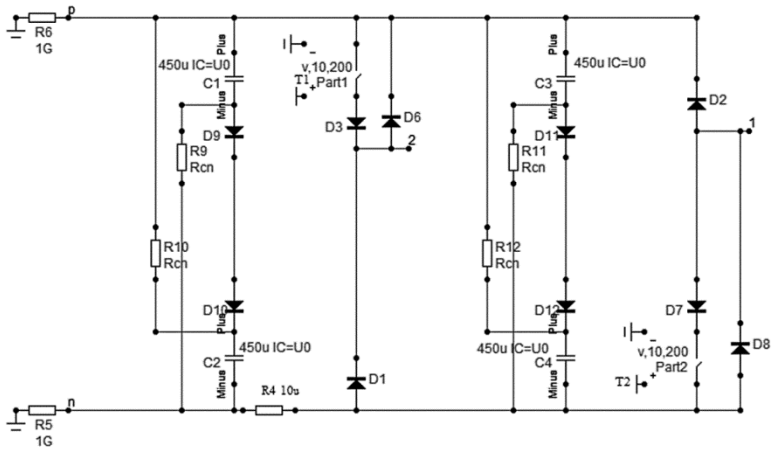


Рис. 9. Схемотехническая модель фазного модуля вентильно-индукторного гребного электропривода (2 МВт)

Fig. 9. Circuit-based model of phase module in 2MW SRM propulsion drive

На рис. 12 (см. вклейку) показаны расчетные осциллограммы параметров режима работы ВИГЭП 2 МВт при пуске и увеличении нагрузки на 20 %.

На рис. 13, 14 (см. вклейку) представлены осциллограммы, полученные при испытаниях ВИД-2000 и в результате расчета с помощью модели соответственно. Сравнение форм тока (натурного образца и полученных расчетным путем) показывает заметно более медленное уменьшение тока в его фазах, вызванное эффектом насыщения магнитной цепи.

Рассчитанные момент и суммарный ток ВИД-2000 в зависимости от угла поворота ротора ВИД представлены на рис. 15 (см. вклейку). Пульсации момента составили 9 %. Можно утверждать, что благодаря насыщению значение пульсаций электромагнитного момента реального двигателя не будет превышать указанного значения. При этом применение более сложных алгоритмов коммутации фаз позволит дополнительно снизить пульсации электромагнитного момента.

В ходе проверки адекватности модели реальному моделируемому объекту результаты, полученные при моделировании, сопоставляются с имеющейся об объекте информацией. Считают, что модель адекватна объекту, если она верно отражает интересующие исследователя свойства объекта. Существует принципиальная разница понятий адекватности и идентичности (полного совпадения) объекта и модели.

Применительно к проведенным исследованиям можно считать, что модель с достаточной степенью точности позволяет рассчитать значения напряжения фазы, мгновенного и среднего токов фаз, изменяющихся с соответствующей заданным оборотам ротора частотой, мгновенные и среднее значения электромагнитных моментов, создаваемых фазами, частоту вращения ВИД. Поэтому влияющий на качество электроэнергии ЕЭЭС характер электромагнитных процессов в системе ВИГЭП, обмен энергией между фазными обмотками ВИД и звеном постоянного тока источника электроэнергии моделируются адекватно реальному объекту.

Формы токов и моментов в отдельных режимах имеют расхождение, связанное с пренебрежением в модели насыщением магнитной цепи (отсутствуют данные натурных испытаний), что предположительно ведет к повышенным расчетным пульсациям электромагнитного момента (9 %), которые практически не влияют на частоту вращения ротора вследствие его большой инерционности.

Исследование гармонического состава напряжения в единой электроэнергетической системе с вентильно-индукторным электродвигателем–2000

Voltage harmonics in the integrated electric power system with SRM-2000 switched-reluctance motor

Для оценки влияния нагрузки в виде ВИГЭП на качество напряжения ЭЭС и вклада непосредственно ВИД-2000 в гармонический состав напряжения, а также влияния на гармонический состав напряжения режимов работы ВИД-2000 выполнены следующие вычислительные эксперименты:

- исследование гармонического состава напряжения на главном распределительном щите (ГРЩ) в системе с генератором 3 МВт, нагруженным на два трехобмоточных трансформатора с неуправляемыми выпрямителями на выхо-

Таблица 2. Параметры моделируемого синхронного генератора с $U_н$ = 400 В
Table 2. Parameters of simulated synchronous generator with $U_н$ = 400 V

Наименование параметра	Обозначение	Величина для генератора
Номинальная мощность, кВт	$P_{нг}$	3000
Номинальное напряжение, В	$U_н$	400
Номинальный ток, А	$I_{нг}$	5410
Номинальная частота, Гц	f	50
Активное сопротивление обмотки статора генератора, о.е.	$R_г$	0,014
Сверхпереходное индуктивное сопротивление по продольной оси, о.е.	X''_d	0,29
Переходное индуктивное сопротивление по продольной оси, о.е.	X'_d	0,37

де и активно-индуктивной статической нагрузкой в цепи постоянного тока;
- исследование гармонического состава напряжения на ГРЩ в системе с генератором 3 МВт, нагруженным на два трехобмоточных трансформатора с выпрямителями на выходе и ВИГЭП 2 МВт при частоте вращения ВИД 100 об/мин;
- исследование гармонического состава напряжения на ГРЩ в системе с генератором 3 МВт, нагруженным на два трехобмоточных трансформатора с выпрямителями на выходе и ВИГЭП 2 МВт при частоте вращения ВИД 200 об/мин.

Параметры моделируемого синхронного генератора (СГ) напряжением 400 В приведены в табл. 2.

В качестве моделируемого трансформатора выбран трансформатор ТСЗП-3000/0.66 ОМ4. На магнитопроводе трансформатора размещены три трехфазные обмотки, одна из которых (первичная) соединена по схеме «звезда» и подключается к трехфазному источнику переменного тока линейным напряжением 380 В. К двум другим обмоткам (вторичным) подключается нагрузка. Одна из обмоток соединена по схеме «звезда», другая – по схеме «треугольник». Такое включение обмоток позволяет получить две системы трехфазных напряжений, сдвинутых на 30 электрических градусов, что обеспечивает на входе выпрямителей режим, эквивалентный двенадцатипульсной схеме выпрямления, и позволяет компенсировать пятую и седьмую гармоники тока, потребляемого из сети, тем самым существенно уменьшив коэффициент несинусоидальности кривой напряжения на шинах ГРЩ. На основе параметров трансформатора, представленных в табл. 3, при помощи опытов холостого хода и короткого замыкания рассчитаны параметры схемы замещения трансформатора.

Схемотехническая модель ЕЭЭС с СГ с нагрузкой в виде двух трансформаторов с двенадцатипульсными схемами выпрямления на выходе и активно-индуктивной нагрузкой представлена на рис. 16. Адекватность компьютерной модели ЕЭЭС с неуправляемыми выпрямителями подтверждалась многократно путем результатов сравнения вычислительных и физических экспериментов [9, 10].

Исследование гармонического состава напряжения в единой электроэнергетической системе с ВИД-2000

Voltage harmonics in the integrated electric power system with SRM-2000 switched-reluctance motor

Гармонический состав напряжения на ГРЩ, измеренный при ходовых испытаниях судна с ГЭД типа ВИД-2000, представлен на рис. 17. Результаты рас-

Таблица 3. Параметры трансформатора ТСЗП-3000/0.66 ОМ4

Table 3. Parameters of TSZP-3000/0.66 OM4 transformer

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, кВ·А	3000
Число фаз питающей сети	3
Частота питающей сети, Гц	50
Номинальное линейное напряжение первичных обмоток СО, В	380
Номинальный линейный ток первичных обмоток, А	4558
Номинальное линейное напряжение вторичных обмоток («звезда»), В	576
Номинальное линейное напряжение вторичных обмоток («треугольник»), В	570
Номинальный линейный ток вторичных обмоток, А	1520
Ток холостого хода, %	0,16
Мощность потерь холостого хода, кВт	4,7
Напряжение короткого замыкания, %	5,5
Мощность потерь короткого замыкания, кВт	24

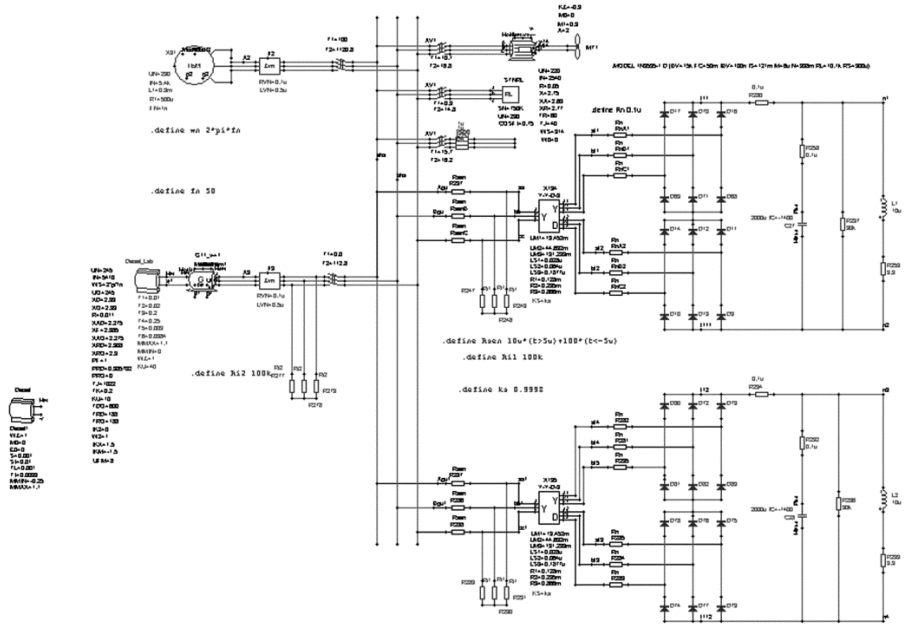


Рис. 16. Схемотехническая модель единой электроэнергетической системы с синхронным генератором мощностью 3 МВт и неуправляемыми выпрямителями с активно-индуктивной нагрузкой

Fig. 16. Circuit-based model of integrated electric power system (IEPS) with 3MW synchronous generator and uncontrollable rectifiers with active-induction load

чета установившегося режима ЕЭЭС с СГ мощностью 3 МВт и неуправляемыми выпрямителями с активно-индуктивной нагрузкой приведены на рис. 18. Схемотехническая модель ЕЭЭС с СГ мощностью 3 МВт и выпрямителями, нагруженными на ВИГЭП 2 МВт, представлена на рис. 19. Результаты расчета установившегося режима ЕЭЭС с СГ мощностью 3 МВт и выпрямителями, нагруженными на ВИД 2 МВт при 200 об/мин, представлены на рис. 20.

Результаты расчетных экспериментов для сравнения гармонического состава напряжения на ГРЩ при разных нагрузках и в различных режимах сведены в табл. 4.

Основной вклад в снижение качества напряжения на ГРЩ в физическом объекте вносят 11-я и 13-я гармоники. Моделирование показало практически одинаковые с физическим объектом значения 11-й гармоники; расчетный уровень 13-й гармоники значительно меньше. Как в физическом, так и в расчетном эксперименте, выявлено наличие 3-й гармоники напряжения.

Расхождение результатов физического и расчетного экспериментов объясняется неполным подобием алгоритмов управления реального ВИД-2000 и компьютерной модели, а также принятыми при моделировании допущениями, которые усугубляются сложными процессами обмена энергией источника электроэнергии и ВИД. Тем не менее следует признать, что разработанная модель пригодна для исследования влияния режимов ВИГЭП на качество электроэнергии судовой ЭЭС. Можно утверждать, что использование схемотехнической модели ЕЭЭС с ВИГЭП подходит для оценки качества электроэнергии в ЕЭЭС.

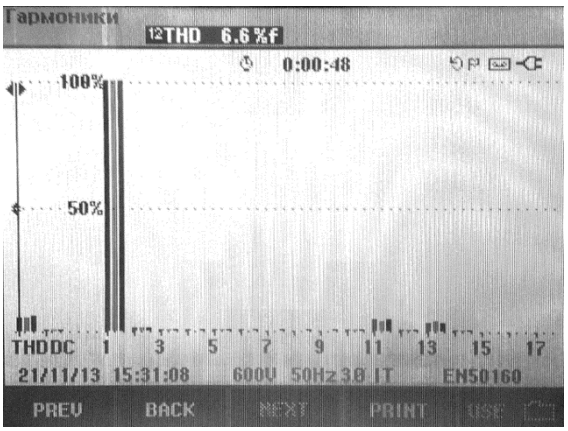


Рис. 17. Гармонический состав напряжения на главном распределительном щите в единой электроэнергетической системе с синхронным генератором и вентильно-индукторным гребным электроприводом (2 МВт) при частоте вращения вентильно-индукторного электродвигателя 200 об/мин (данные реального объекта)

Fig. 17. MSB voltage harmonics of IEPS with synchronous generator and 2MW switched-reluctance motor (at 200 RPM): real data

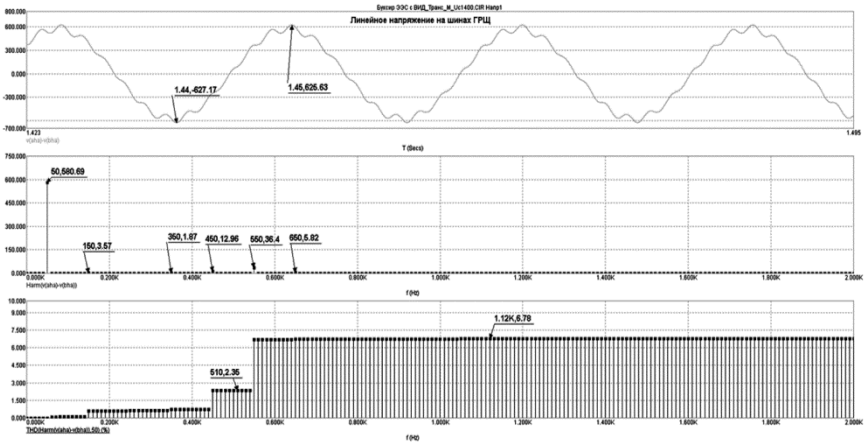


Рис. 18. Линейное напряжение на главном распределительном щите, его гармонический состав и коэффициент несинусоидальности напряжения в системе с синхронным генератором мощностью 3 МВт и выпрямителями с активно-индуктивной нагрузкой

Fig. 18. Linear MSB voltage, its harmonics and nonsinusoidality ratio in a system with 3MW synchronous generator and uncontrollable rectifiers with active-induction load

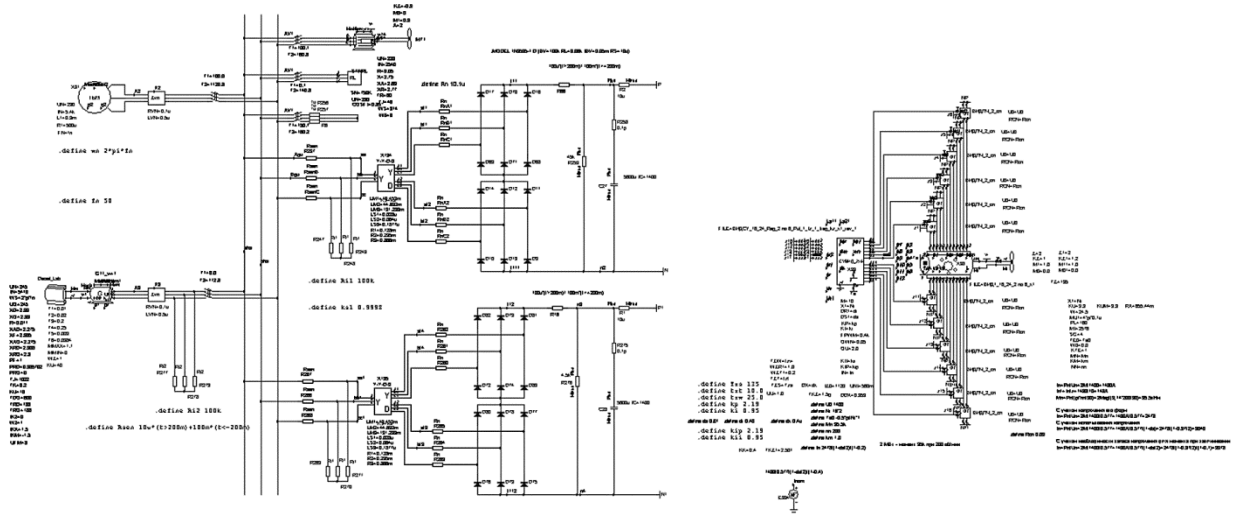


Рис. 19. Схемотехническая модель единой электроэнергетической системы с синхронным генератором мощностью 3 МВт и выпрямителями, нагруженными на вентильно-индукторный гребной электропривод (2 МВт)

Fig. 19. Circuit-based model of integrated electric power system (IEPS) with 3MW synchronous generator and rectifiers loaded by 2MW SRM propulsion drive

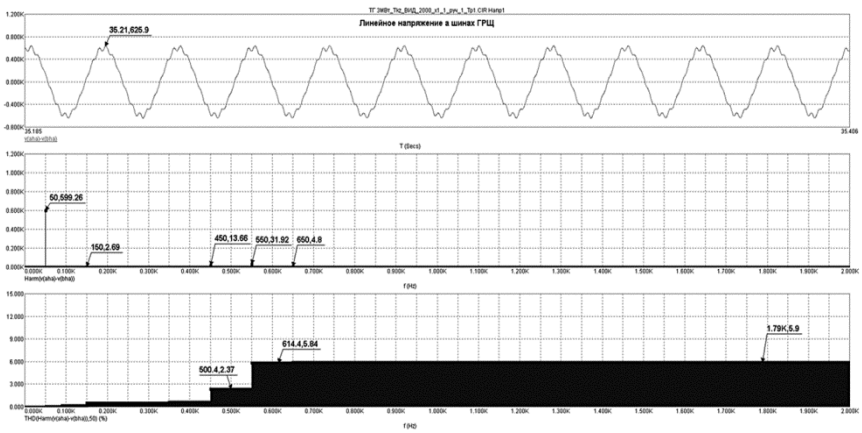


Рис. 20. Линейное напряжение на главном распределительном щите, его гармонический состав и коэффициент несинусоидальности напряжения в единой электроэнергетической системе с синхронным генератором мощностью 3 МВт и выпрямителями, нагруженными на вентильно-индукторный гребной электропривод (2 МВт) при 200 об/мин

Fig. 20. Linear MSB voltage, its harmonics and nonsinusoidality ratio in an IEPS with 3MW synchronous generator and rectifiers loaded by 200 RPM 2MW SRM propulsion drive

Таблица 4. Сравнение гармонического состава напряжения на главном распределительном щите
Table 4. Comparison of MSB voltage harmonics

Наименование параметра	Номер гармоники	Частота, Гц	Нагрузка генератора в эксперименте			
			ВИД при испытаниях на судне	Активно-индуктивная нагрузка	ВИД 2 МВт при частоте вращения 100 об/мин	ВИД 2 МВт при частоте вращения 200 об/мин
Амплитуда тока фазы генератора, кА	1	50	Нет данных	4,84	4,93	4,84
Коэффициент несинусоидальности кривой фазного тока генератора, %	–	–	Нет данных	27,6	28,9	21
Коэффициент несинусоидальности кривой линейного напряжения, %	–	–	6,6 (с учетом постоянной составляющей датчика)	6,78	6,25	5,9
Амплитуда гармоники линейного напряжения на ГРЩ, В	0	0	39	0	0	0
	1	50	600	591	599	599
	3	150	6,5	3,4	0	2,7
	7	350	0	1,9	0	0
	9	450	0	13	0	13,7
	11	550	39	36,4	36,5	31,9
	13	650	26,1	5,8	7,5	4,8

Таблица 5. Основные параметры вентильно-индукторного двигателя мощностью 15 МВт
Table 5. Main parameters of 15MW SRM

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Номинальная мощность на валу, кВт	15 000
2	Номинальное напряжение на шине постоянного тока, В	3 600
3	Номинальная частота вращения, мин$^{-1}$	107,4
4	Номинальная частота питания обмоток, Гц	57,3
5	КПД в номинальном режиме, не менее %	97,0
6	Диапазон регулирования частоты вращения, мин$^{-1}$	9,5–141,6
7	Номинальный ток, А	360
8	Максимальный ток, А, не более	1000
9	Отношение максимального момента к номинальному	1,8
10	Число пакетов	2
11	Число фаз статора на один пакет	5
12	Суммарное число фаз	10
13	Число независимых фазных ветвей статора на один пакет	20
14	Число параллельных катушек в независимой фазной ветви	2
15	Величина воздушного зазора, мм	6

Моделирование электропривода гребного винта с пятифазным вентильно-индукторным двигателем мощностью 15 МВт

Simulation of a propulsion drive with 15MW five-phase SRM

Основные технические характеристики ВИД мощностью 15 МВт приведены в табл. 5. ВИД конструктивно состоит из двух пакетов статора и ротора. На статоре каждого пакета 40 зубцов, на роторе – 32. На каждом зубце статора смонтирована катушка. Фазные обмотки ВИД 15 МВт соединены в группы, как показано на рис. 21. Катушки распределены на 5 фаз, в каждой фазе по 4 независимых ветви. Катушки, размещенные на диаметрально противоположных зубцах, включены параллельно.

Схемотехническая модель ВИГЭП 15 МВт представлена на рис. 22.

Исследование гармонического состава напряжения на главном распределительном устройстве (ГРУ) в ЕЭЭС с генератором 36 МВт, нагруженным на 2 трехобмоточных трансформатора с выпрямителями на выходе и ВИД 15 МВт при частоте вращения 160 об/мин, выполнены для двух вариантов, различающихся длительностью импульсов управ-

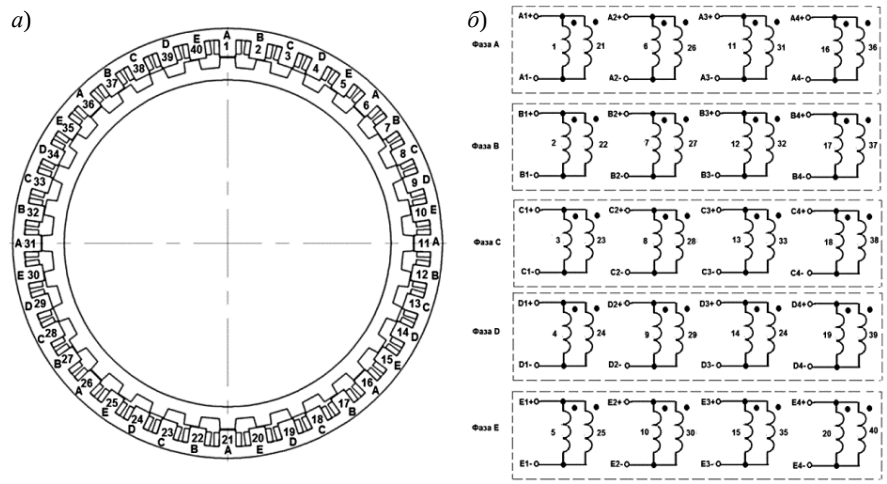


Рис. 21. Размещение катушек на статоре (*а*) и схемы их соединения (*б*)

Fig. 21. Arrangement *a*) and connection diagrams *b*) of stator coils

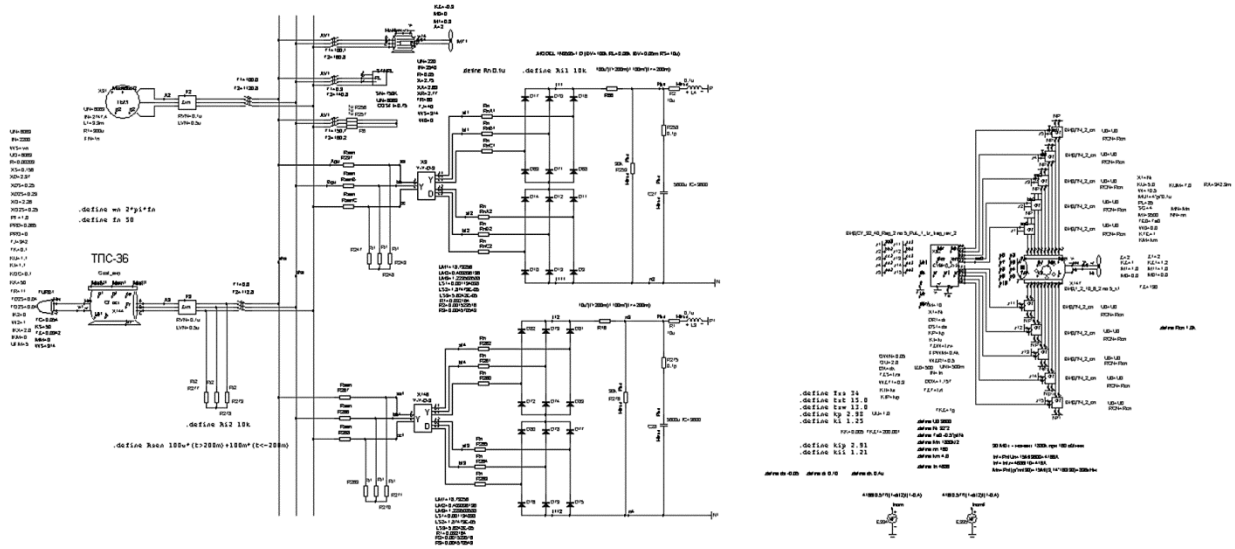


Рис. 22. Схемотехническая модель единой электроэнергетической системы с синхронным генератором типа ТПС-36 и выпрямителями, нагруженными на вентильно-индукторный двигатель (15 МВт)

Fig. 22. Circuit-based model of integrated electric power system (IEPS) with TPS-36 synchronous generator and rectifiers loaded by 15MW SRM

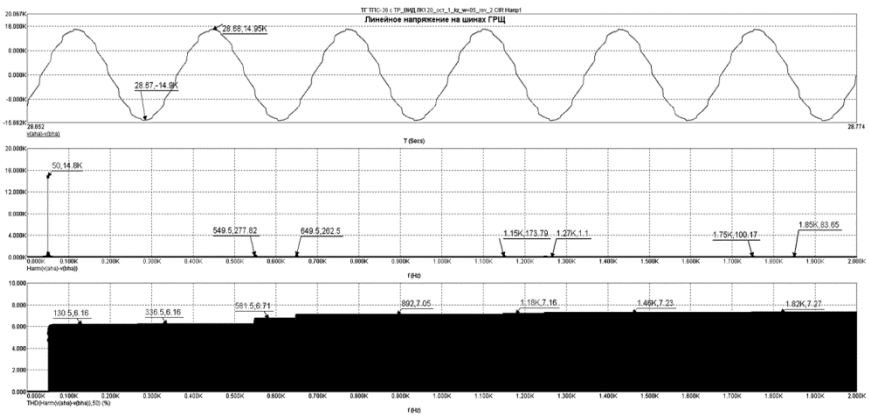


Рис. 23. Линейное напряжение на главном распределительном устройстве, его гармонический состав, коэффициент несинусоидальности напряжения в единой электроэнергетической системе с синхронным генератором типа ТПС-36 и выпрямителями, нагруженными на вентильно-индукторный двигатель (15МВт). Первый вариант

Fig. 23. Linear MSB voltage, its harmonics and nonsinusoidality ratio in an IEPS with TPS-36 synchronous generator and rectifiers loaded by 15MW SRM. Variant 1

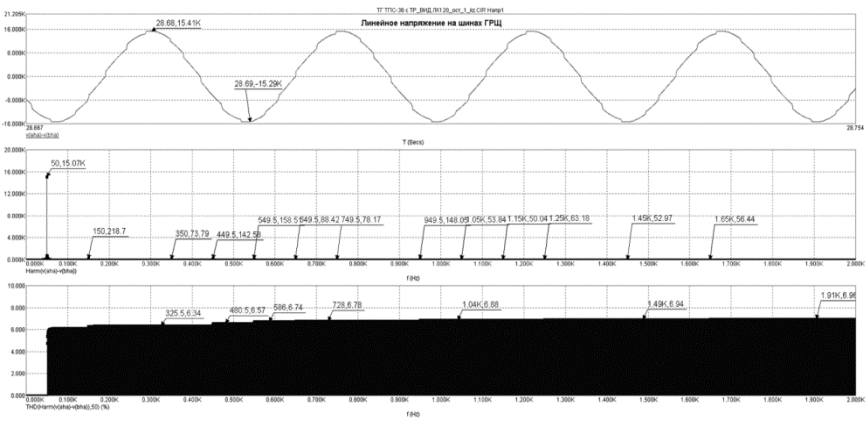


Рис. 24. Линейное напряжение на главном распределительном устройстве, его гармонический состав, коэффициент несинусоидальности напряжения в единой электроэнергетической системе с синхронным генератором типа ТПС-36 и выпрямителями, нагруженными на вентильно-индукторный двигатель (15 МВт). Второй вариант

Fig. 24. Linear MSB voltage, its harmonics and nonsinusoidality ratio in an IEPS with TPS-36 synchronous generator and rectifiers loaded by 15MW SRM. Variant 2

ления ключами фазного модуля. Результаты исследований для первого варианта представлены на рис. 23, а для второго варианта – на рис. 24.

Коэффициент несинусоидальности кривой напряжения на ГРУ в ЕЭЭС с СГ типа ТПС-36 и выпрямителями, нагруженными на ВИД 15 МВт, для первого варианта составляет 7,27 %, а для второго – 6,96 %, что указывает на возможность улучшения гармонического состава ЕЭЭС путем оптимизации соотношения длительностей, управляющих ключами импульсов.

Рассчетные пульсации момента в установившемся режиме составили 9,8 %, что предположительно превышает прогнозируемые пульсации реального ВИД по тем же, что и для ИД-2000, причинам.

Заключение
Conclusion

Решение о строительстве атомного ледокола пр. 10510 с системой электродвижения и мощностью на винтах 120 МВт принято в интересах получения выгод по транспортной составляющей СМП. Альтернативным техническим решением по созданию СЭД является применение ГЭП с вентильно-индукторным электродвигателем.

Разработанная модель вентильно-индукторного гребного электропривода с достаточной степенью точности позволяет рассчитать значения напряжения фазы, мгновенного и среднего токов фаз, изменяющихся с соответствующей заданным оборотам ротора частотой, мгновенные и средние значения электромагнитных моментов, создаваемых фазами, частоту вращения ВИД. Поэтому влияющий на качество электроэнергии ЕЭЭС характер электромагнитных процессов в системе ВИГЭП, обмен энергией между фазными обмотками ВИД и звеном постоянного тока источника электроэнергии моделируются адекватно реальному объекту.

Формы кривых токов и моментов в отдельных режимах ВИГЭП имеют расхождение, связанное с пренебрежением в модели насыщением магнитной цепи (отсутствуют данные натурных испытаний), что предположительно ведет к повышенным расчетным пульсациям электромагнитного момен-

та (9 %), которые практически не влияют на частоту вращения ротора вследствие его большой инерционности.

Основной вклад в снижение качества электроэнергии на ГРЩ в физическом образце вносят 11-я и 13-я гармоники. Моделирование показало практически одинаковый с натурным экспериментом уровень 11-й гармоники и значительно меньший расчетный уровень у 13-й гармоники.

В физическом и расчетном экспериментах выявлено наличие 3-й гармоники напряжения.

Причиной расхождений результатов физического и расчетного экспериментов является неполное подобие алгоритмов управления реального ВИД-2000 и его компьютерной модели, а также принятые при моделировании допущения, которые усугубляются сложными процессами обмена энергией источника электроэнергии и ВИД.

Разработанная модель пригодна для исследования влияния режимов ВИГЭП на качество электроэнергии судовой ЕЭЭС. Можно утверждать, что использование схемотехнической модели ЕЭЭС с ВИГЭП пригодно для оценки качества электроэнергии в ЕЭЭС.

Рассчетные пульсации моментов на установившемся режиме составили 9,8 %, что предположительно превышает прогнозируемые пульсации реального ВИД по тем же, что и для ИД-2000, причинам.

Коэффициент несинусоидальности кривой напряжения на ГРУ в ЕЭЭС с СГ типа ТПС-36 и выпрямителями, нагруженными на ВИД 15 МВт, для первого варианта составляет 7,27 %, а для второго – 6,96 %, что указывает на возможность улучшения гармонического состава ЕЭЭС путем оптимизации соотношения длительностей, управляющих ключами импульсов.

Библиографический список

1. *Калинин И.М., Загородников М.А.* Методологический подход к оценке эффективности перевозок по северному морскому пути // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2016. № 6(256). С. 86−96. DOI: 10.5862/JE.256.8.
2. Правила плавания в акватории Северного морского пути [Электронный ресурс]: утв. приказом Министерства транспорта РФ от 17.01.2013 № 7: [по сост. на 20.03.2017] // КонсультантПлюс: [сайт]. Москва, 2017. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145233/ (дата обращения: 12.07.2020).
3. Об утверждении Положения о государственном регулировании тарифов на ледокольную проводку судов, ледовую лоцманскую проводку судов в акватории Северного морского пути: Постановление Правительства Рос. Федерации от 24.04.2015 № 388 [Электронный ресурс]: [по сост. на 04.09.2015] // КонсультантПлюс: [сайт]. Москва, 2015. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_178659/ (дата обращения: 12.07.2020).
4. *Цой Л.Г., Андрюшин А.В., Штрек А.А.* Обоснование основных параметров перспективных крупнотоннажных газовозов для Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3(97). С. 46−56.
5. *Бычков М.Г.* Алгоритмы и системы управления вентильно-индукторного электропривода // Вентильно-индукторный электропривод: доклады научно-практического семинара (1 февраля 2007 г.). Москва: МЭИ, 2007. С. 34−72.
6. ГОСТ 30372–95. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. Москва: Изд-во стандартов, 2001. [III], 12 с.
7. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II: Корпус. Санкт-Петербург: Рос. морской регистр судоходства, 2020. 297 с.
8. ГОСТ Р 57412–2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. Москва: Стандартинформ, 2017. IV, 10 с.
9. Статические преобразователи и качество электроэнергии / *И.М. Васин, Г.С. Ясаков, И.М. Калинин* [и др.] // Судостроение. 2010. № 4. С. 51−54.
10. *Калинин И.М.* Моделирование судовых электроэнергетических систем. Санкт-Петербург: ВМИИ, 2011. 480 с.

References

1. *I. Kalinin, M. Zagorodnikov.* Methodological approach to efficiency assessment of NSR shipping // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics. 2016. No. 6(256). P. 86–96. DOI: 10.5862/JE.256.8 (*in Russian*).
2. Navigation rules for Northern Sea Route lanes. Approved by the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 7 dt. January 17, 2013 [as of March 20, 2017] // *Consultant+* legal support web site. Moscow, 2017. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145233/ (accessed on 12.07.2020) (*in Russian*).
3. On approval of the Provision about government regulation of tariffs for icebreaker pilotage and icebreaker assistance along Northern Sea Route lanes. Directive of the Government of the Russian Federation No. 388, dt. April 24, 2015, available at: URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_178659/ (accessed on 12.07.2020) (*in Russian*).

4. *L. Tsoy, A. Andryushin, A. Shtrek.* Justification for the main parameters of future large Arctic LNG carriers // Arctic and Antarctic Research. 2013. No. 3(97). P. 46–56 (*in Russian*).
5. *M. Bychkov.* Control algorithms and systems for SRM drive // SRM drive: compendium of Scientific & Practical Seminar papers (February 01, 2007). Moscow Power Engineering Institute, 2007. P. 34–72 (*in Russian*).
6. Standard GOST 30372-95. Electromagnetic compatibility of equipment. Terms and definitions. Moscow: Publishing house of standards, 2001 [III]. 12 p. (*in Russian*).
7. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II: Hull. St. Petersburg: Russian Maritime Register of Shipping, 2020. 297 p. (*in Russian*).
8. Standard GOST R 57412-2017. Computer-based models in development, manufacturing and operation of products. General provisions. Moscow: Standartinform, 2017, IV. 10 p. (*in Russian*).
9. *I. Vasin, G. Yasakov, I. Kalinin et al.* Static converters and power quality // Sudostroyeniye. 2010. No. 4. P. 51–54 (*in Russian*).
10. *I. Kalinin.* Simulation of marine electric power systems. St. Petersburg: Naval Engineering Institute, 2011, 480 pp. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Калинин Игорь Михайлович, д.т.н., начальник отдела перспективного развития ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (911) 935-03-11. E-mail: kaigmi@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-1532-4449.

Николаев Михаил Александрович, начальник лаборатории филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (921) 921-35-01. E-mail: nikolatv@setcorp.ru. https://orcid.org/0000-0002-7134-9870.

Третьяк Михаил Васильевич, к.т.н., начальник сектора филиала «ЦНИИ СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. Тел.: +7 (911) 220-62-63. E-mail: tretyakmv@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-0107-9606.

Опарин Александр Николаевич, преподаватель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3. Тел.: +7 (911) 782-41-20. E-mail: sandy6088@mail.ru.

About the authors

Igor M. Kalinin, Dr. Sci. (Eng.), Head of Long-Term Development Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (911) 935-03-11. E-mail: kaigmi@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-1532-4449.

Mikhail A. Nikolaev, Head of Laboratory, SET Branch of the Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (921) 921-35-01. E-mail: nikolatv@setcorp.ru. https://orcid.org/0000-0002-7134-9870.

Mikhail V. Tretyak, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, SET Branch of the Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st. St. Petersburg, Russia, post code 196128. Tel.: +7 (911) 220-62-63. E-mail: tretyakmv@mail.ru. https://orcid.org/0000-0003-0107-9606.

Alexandr N. Oparin, Lecturer, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190008. Tel.: +7 (911) 782-41-20. E-mail: sandy6088@mail.ru.

Поступила / Received: 25.03.20
Принята в печать / Accepted: 18.08.20