

Развитие методологии моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам и комплекс моделей в ComSim

А. Г. Воронцов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия
ag.voroncov@gmail.com

Аннотация. Описан комплекс моделей электромеханотронных систем, разработанный на языке C++ в среде моделирования ComSim. Модели построены по методологии моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам, что позволяет значительно сократить затраты машинного времени на расчеты. В методологию введены новые методы расчета, ускоряющие процесс вычислений и позволяющие уточнить модели. Создана библиотека моделей электрических систем и их элементов. Приведены примеры построения моделей сложных установок. В частности, описана модель ветроэлектрической установки с асинхронным генератором и модульным многоуровневым преобразователем частоты. Описана модель асинхронизированной электромеханической вставки в систему электроснабжения мегаполиса. Приведены схемы вставки с двумя асинхронизированными генераторами-двигателями и транзисторными активными преобразователями частоты в цепях возбуждения и пуска электромашинного агрегата. Приведены диаграммы напряжений, токов, частоты вращения машин и других переменных в различных режимах работы системы.

Ключевые слова: моделирование, электромеханотронная система, трехуровневый преобразователь, каскадный преобразователь, модульно многоуровневый преобразователь

Для цитирования: Воронцов А. Г. Развитие методологии моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам и комплекс моделей в ComSim // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 3. С. 57–65. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-3-57-65.

Original article

Development of the EMTS Simulation Methodology by for Interconnected Subsystems and a Complex of Models in ComSim

A. G. Vorontsov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia
ag.voroncov@gmail.com

Abstract. A set of models of electromechanotronics systems (EMTS) developed in C++ in the ComSim simulation environment is described. The models are built according to the methodology of modeling systems for interconnected subsystems, which allows to significantly reduce the cost of computer time for calculations. New calculation methods have been introduced into the methodology, which speed up the calculation process and allow the models to be refined. A library of models of electrical systems and their elements has been created. Examples of building models of complex installations are given. In particular, a model of a wind power plant with an asynchronous generator and a modular multilevel frequency converter is described. A model of an asynchronous electromechanical insert in the power supply system of a metropolis is described. Insertion circuits with two asynchronous generator-motors and transistor active frequency converters in the excitation and start circuits of the electric machine unit are given. Diagrams of voltages, currents, rotational speeds of machines and other variables in various operating modes of the system are given.

Keywords: simulation, electromechanotronic system, three-level converter, cascade converter, modular multi-level converter

For citation: Vorontsov A. G. Development of the EMTS Simulation Methodology by for Interconnected Subsystems and a Complex of Models in ComSim // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 3. P. 57–65. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-3-57-65.

Введение. Электромеханотронные системы (ЭМТС), содержащие электрические машины (ЭМ), полупроводниковые преобразователи (ПП), системы управления (СУ) и другие элементы, в настоящее время интенсивно развиваются. Широко внедряются машины с постоянными магнитами, многообмоточные и многофазные машины, асинхронизированные и реактивные. Используются ПП различных типов, в том числе новых – модульные многоуровневые преобразователи частоты (ММПЧ), статические компенсаторы, активные ПП, каскадные преобразователи частоты (КПЧ) и др. Совершенствуются методы управления ЭМТС – алгоритмы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и широтно-импульсного преобразования постоянного напряжения (ШИП), алгоритмы векторного управления (ВУ) устройствами. Одновременно с развитием ЭМТС увеличивается число предприятий, разрабатывающих ЭМТС, усиливается их конкуренция, ведется борьба за повышение качества изделий, снижение их стоимости, за сокращение сроков поставок оборудования.

Оптимизация процесса создания ЭМТС обеспечивается улучшением условий исследований, расчетов и разработки. Одним из главных факторов, эффективно влияющих на указанный процесс, является возможность достаточно полного математического и компьютерного моделирования ЭМТС. В настоящее время для моделирования на ЭВМ наиболее широко применяется среда MatLab с расширением Simulink. Основой создания MatLab (матричная лаборатория) стало математическое описание динамических систем с использованием матриц. В процессе развития MatLab комплекс программ дополнялся множеством математических методов, графическими и другими возможностями и стал основным инструментом разработки систем различного назначения на многих предприятиях во всем мире. Вместе с тем, при расчетах процессов в системах на ЭВМ переменные находятся в MatLab обращением матриц. Время обращения увеличивается по степенной зависимости при увеличении размерности матриц. Процессы в ЭМТС с большим количеством элементов (транзисторов, диодов и др.)

рассчитываются с большими затратами машинного времени. Построение в MatLab подробных моделей ЭМТС повышенной сложности во многих случаях оказывается нецелесообразным.

Существуют и другие возможности моделирования ЭМТС. В 2006 г. М. В. Пронин предложил методологию моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам (опубликовано в соавторстве с А. Г. Воронцовым ранее [1], [2]). Основная идея методологии – сложная ЭМТС разделяется на подсистемы, связанные минимальным количеством зависимых переменных (источников напряжения, тока и др.). Полупроводниковые элементы (ПЭ) рассматриваются как идеальные (открытые ПЭ замыкают участки схем, закрытые – разрывают их). Подсистемы рассматриваются предварительно и неизвестные в уравнениях определяются в явном виде. При расчетах используются итерационные алгоритмы вычислений, и в каждый момент времени решается система уравнений минимального порядка. Кроме того, следует иметь в виду, что при расчетах с малым шагом интегрирования в итерационном цикле вычисленные значения производных токов и напряжений зависимых источников быстрее сходятся, что позволяет уменьшить количество итераций, а в некоторых случаях обойтись без них. Сокращение количества искомых переменных, уменьшение количества итераций и оптимизированное описание подсистем позволяют сократить затраты машинного времени на расчеты в десятки и сотни раз и более, что особенно ярко проявляется при анализе ЭМТС повышенной сложности.

Методология моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам использовалась в ЦНИИ СЭТ, в АО «Силовые машины», в НПЦ СЭС, в курсах лекций ЛЭТИ. В 2020 г. опубликована монография [3], в которой описаны новые методы моделирования по подсистемам, новые модели ЭМТС и результаты исследований. Эта информация представлена и в других публикациях ([4]–[7] и др.). Для обеспечения работ по моделированию ЭМТС по указанной методологии разработана среда моделирования и расчета ComSim1_3 для 32-разрядных ЭВМ. В 2019 г. зарегистрирована среда моделирования и расчета

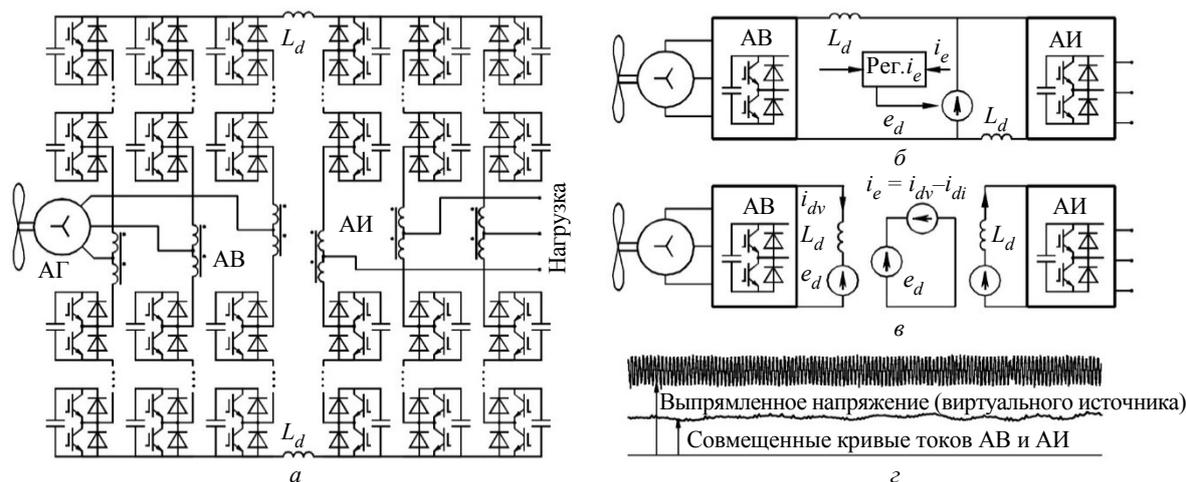


Рис. 1. ВЭУ с ММПЧ, ее разделение на подсистемы, выпрямленные токи и напряжения:
 а – схема ВЭУ с АГ и ММПЧ; б – виртуальный регулируемый источник напряжения;
 в – разделение подсистемы на части; г – результаты расчета

Fig. 1. Wind turbine with MMFC, its division into subcircuits, rectified currents and voltages
 а – scheme of wind turbines with AG and MMFC; б – virtual regulated voltage source;
 в – division of a subsystem into parts; г – calculation results

ComSim1_5 для 64-разрядных ЭВМ [8]. Некоторые данные по снижению затрат машинного времени на расчеты на ЭВМ при использовании моделей по подсистемам по сравнению с аналогичными моделями в MatLab представлены в публикации [3] (в зависимости от сложности ЭМТС выигрыш ComSim от 25 до 300 раз и более). При использовании предложенных автором новых методов расчета (расчет по гладким составляющим кривых, по двоянным моделям) преимущество увеличивается, например еще в 200 раз в [4].

В данной статье представлена информация о некоторых новых разработках в рамках методологии моделирования и расчета ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам.

Метод моделирования ЭМТС с использованием виртуальных регулируемых источников напряжения. Одним из перспективных направлений развития электроэнергетических систем (ЭЭС) является внедрение в них высоковольтных ММПЧ. На рис. 1, а представлена схема ветроэлектрической установки (ВЭУ) с асинхронным генератором (АГ) и ММПЧ.

В состав ММПЧ входит активный выпрямитель АВ и автономный инвертор (АИ). Индуктивность L_d может отсутствовать, если все оборудование ММПЧ размещается в ВЭУ. Если ВЭУ расположена в море и в ней размещается только АГ и АВ, то АИ размещается на материке, а L_d соответствует линии электропередачи (ЛЭП) постоянного тока. При напряжении АГ и напряжении нагрузки 6 кВ в каждом плече мостов АВ и АИ используется 10 низковольтных полумостовых транзисторно-

конденсаторных ячеек или блоков преобразования частоты (БПЧ), включенных последовательно. При этом общее количество ПЭ в ММПЧ равно 480 (при напряжении каждого БПЧ около 1 кВ).

При моделировании ВЭУ построена модель части системы – модель АГ и АВ, работающих на пассивную нагрузку. Моделирование выполнено при учете в плечах АВ произвольного количества БПЧ. В СУ предусмотрены: стабилизация тока нагрузки на заданном уровне, векторное управление АГ с формированием токов фаз, близких по форме к синусоиде. Особенностью СУ стало использование алгоритмов быстрой сортировки напряжений конденсаторов в БПЧ и алгоритмов выравнивания этих напряжений с учетом направлений токов в плечах АВ.

Другая модель построена для АИ, питающегося от источника постоянного напряжения и работающего на пассивную трехфазную нагрузку. В модель с АИ перенесены все соответствующие алгоритмы управления АВ.

В результате моделирования подсистем ВЭУ с АВ и АИ возникла задача объединения этих моделей подсистем в единую модель ВЭУ. Задача решена следующим образом. Предложено использовать виртуальный регулируемый источник напряжения при подключении его к положительному и отрицательному полюсам ЛЭП, как изображено на рис. 1, б. На входы ПИ-регулятора источника поступают сигналы по заданному и фактическому току, на выходе формируется мгновенное значение напряжения источника. Заданный ток источника равен нулю. Если регулятор под-

держивает нулевой ток, то мощность виртуально-го источника равна нулю и он не оказывает влияния на электромагнитные процессы в системе. Использование виртуального источника позволяет преобразовать расчетную схему ВЭУ. Источник напряжения e_d переносится в ветви ЛЭП, полюса ЛЭП соединяются и подсистемы АВ и АИ оказываются связанными одной точкой. Это позволяет разделить подсистемы на части, как изображено на рис. 1, в. Токи, определенные в подсистемах АВ (i_{dv}) и АИ (i_{di}), образуют ток i_e виртуального источника. При этом математические модели трех подсистем сводятся в единую модель ВЭУ.

Для подтверждения правильности метода виртуальных источников выполнены расчеты электромагнитных процессов в ВЭУ мощностью 2500 кВт с номинальными напряжениями АГ и нагрузки 3 кВ при использовании в каждом плече АВ и АИ 6 БПЧ в каждом плече каждого моста [9]–[12]. Некоторые результаты расчета представ-

лены на рис. 1, з. На рисунке выпрямленные токи АВ и АИН практически совпадают по мгновенным значениям. На этой же диаграмме указано напряжение ЛЭП. В напряжении имеются значительные пульсации. Они обусловлены низким напряжением ЛЭП и небольшим количеством БПЧ в плечах мостов. Вместе с тем, в рассматриваемой ВЭУ напряжения и токи на входе (u_{v1}, i_{v1}) и выходе ($u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}, i_{i1}, i_{i2}, i_{i3}$) ММПЧ имеют сравнительно небольшие искажения, что подтверждается рис. 2, где представлены также пилообразные опорных напряжения АВ ($u_{ov1}–u_{ov6}$), напряжение управления фазы АВ (u_{yv1}), опорных напряжений АИ ($u_{oi1}–u_{oi6}$) и напряжение управления фазы АИ (u_{yi1}).

Пример построения модели сложной ЭМТС. Рассматривается модель асинхронизированной электромеханической вставки (АСЭМПЧ) в систему электроснабжения мегаполиса. На рис. 3

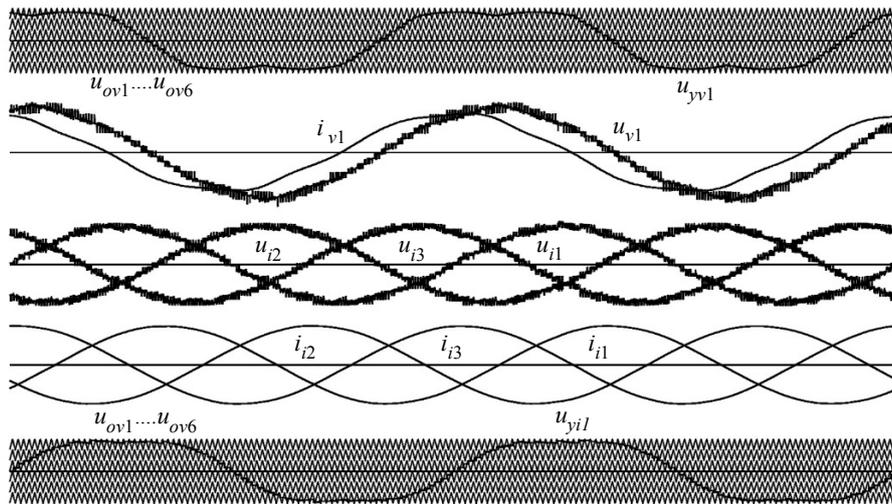


Рис. 2. Напряжения и токи ММПЧ на входе и выходе
Fig. 2. Modular-multilevel frequency converter (MMFC) voltages and currents at the input and output

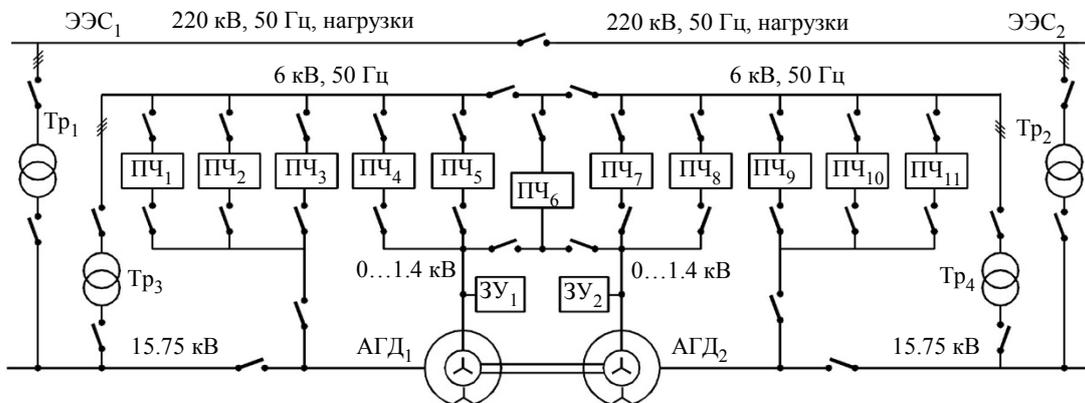


Рис. 3. Структурная схема АСЭМПЧ в системе электроснабжения мегаполиса
Fig. 3. Structural diagram of ASEMFC in the power supply system of the metropolis

представлена упрощенная схема АСЭМПЧ. Электроснабжение мегаполиса осуществляется от двух взаимно независимых энергетических систем ЭЭС₁ и ЭЭС₂ с напряжением 220 кВ при частоте 50 Гц. Основным устройством АСЭМПЧ является электромашинный агрегат с двумя асинхронизированными генераторами-двигателями (АГД) на общем валу. Мощность каждого АГД 200 МВт, напряжение обмоток статоров 15.75 кВ. Через вал АГД обеспечивается энергетическая связь двух ЭЭС при отсутствии между ними гальванических контактов.

Каждый АГД подключается к соответствующей ЭЭС напряжением 220 кВ через трансформатор (Тр₁ и Тр₂) мощностью 250 МВА. Для питания полупроводниковых систем возбуждения АГД (СВ) и пусковых устройств (ПУ) предусмотрено создание двух сетей собственных нужд напряжением 6 кВ. Питание этих сетей осуществляется от вторичных обмоток трансформаторов Тр₁ и Тр₂ через трансформаторы Тр₃ и Тр₄ мощностью по 16 МВт. Возбуждение АГД₁ и АГД₂ осуществляется двумя СВ. Каждая СВ содержит два транзисторных ПЧ (ПЧ₄ и ПЧ₅ или ПЧ₇ и ПЧ₈). В СВ предусмотрен резервный преобразователь частоты ПЧ₆. В СВ все ПЧ выполнены активными для расширения диапазона регулирования скольжения АГД. Каждое ПУ содержит три параллельно включенных ПЧ (ПЧ₁, ПЧ₂, ПЧ₃ или ПЧ₉, ПЧ₁₀, ПЧ₁₁), которые осуществляют пуск агрегата. В ПУ все ПЧ также выполняются активными для обеспечения торможения агрегата.

В ПУ возможно использование активных ММПЧ (рис. 1, а), каскадных ПЧ (рис. 4, а), а также

трехуровневых ПЧ (рис. 4, б). ММПЧ и КПЧ позволяют запускать АГД при напряжениях обмоток статоров АГД до 6 кВ. При этом в ММПЧ исключаются трансформаторы. В трехуровневых ПЧ напряжения статоров АГД до 3 кВ при соответствующем увеличении токов фаз и при использовании на входе ПЧ трансформаторов.

В СВ также возможно применение различных типов ПЧ, но основные среди них – трехуровневые ПЧ. Напряжение контактных колец АГД ограничено уровнем 2 кВ. Поэтому на входе ПЧ в СВ используются понижающие трансформаторы.

Особенность АГД заключается в отсутствии специальной демпферной системы. При внезапном КЗ обмотки статора АГД токи, многократно превышающие номинальные, трансформируются в ротор и далее в ПЧ, замыкаясь через конденсаторы. Для защиты ПЧ от токов КЗ в системе предусмотрены защитные устройства (ЗУ₁ и ЗУ₂), через которые обмотка ротора при авариях замыкается на малые активные сопротивления. Эти устройства используются также при выходе из строя СВ для обеспечения работы АГД в асинхронном режиме для обеспечения передачи активной мощности между двумя участками ЭЭС.

Модели ЭЭС с АСЭМПЧ включают в себя математические описания двухмашинного агрегата с АГД, описания различных ПЧ, а также СУ различных устройств. Следует отметить важный фактор, влияющий на затраты машинного времени на расчеты длительных процессов. При использовании ММПЧ в ПУ и трехуровневых ПЧ в СВ в модели системы учитываются 3176 ПЭ (транзисторы, диоды, тиристоры). При использовании КПЧ в ПУ и трехуровневых ПЧ в СВ в мо-

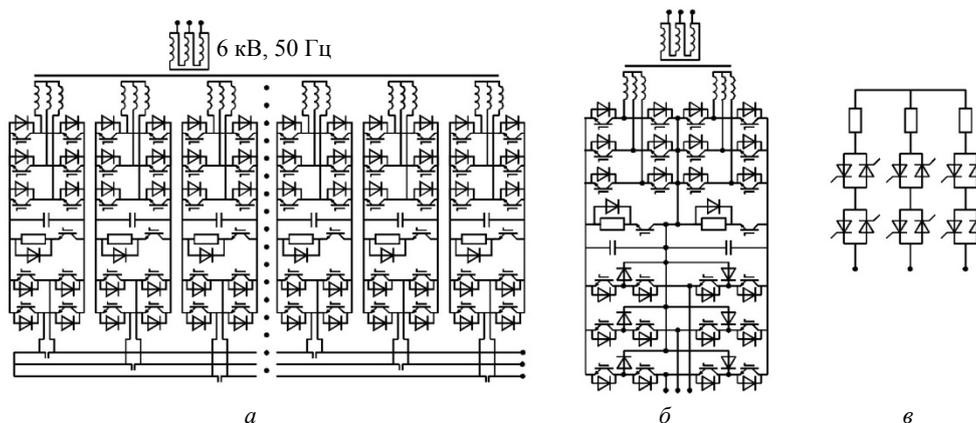


Рис. 4. Типы ПЧ в АСЭМПЧ:

а – каскадные ПЧ в СВ и ПУ; б – трехуровневые ПЧ; в – защитные устройства

Fig. 4. Types of semiconductor converters in ASEMFC:

а – cascade frequency converters in excitation systems and starting devices;

б – three-level FC; в – protective devices

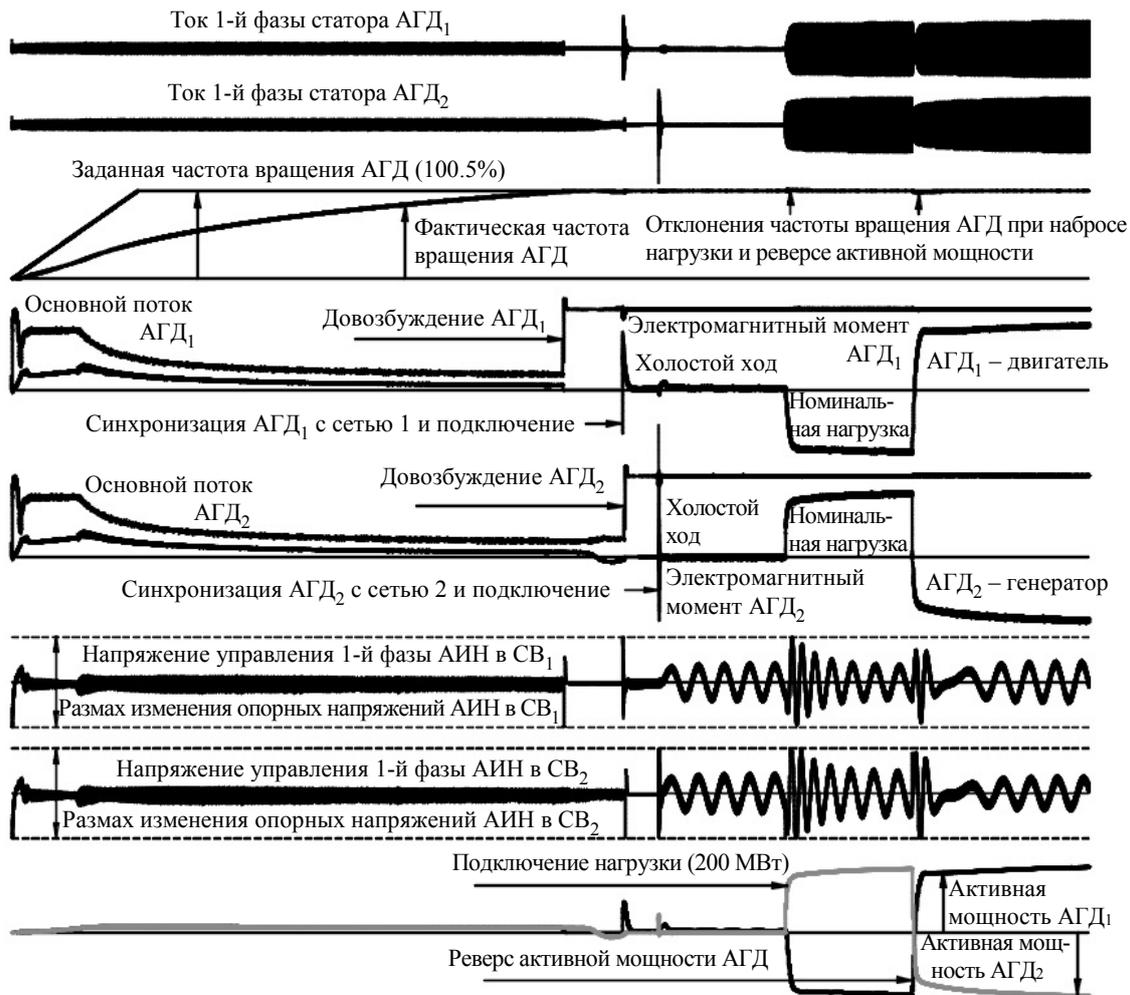


Рис. 5. Напряжения, токи и другие переменные АСЭМПЧ при пуске АГД, синхронизации их с электросетями, подключении нагрузки 200 МВт и реверсе активной мощности
Fig. 5. Voltages, currents and other variables of the AEMFC when starting the AGD, synchronizing them with the power grid, connecting a load of 200 MW and reversing active power

дели системы учитывается 2672 ПЭ. При использовании трехуровневых ПЧ в ПУ и в СВ в модели системы учитывается 644 ПЭ.

На рис. 5 представлен результат расчета электромеханических процессов в системе с АСЭМПЧ на полной модели при использовании в СВ и ПУ трехуровневых ПЧ.

Расчеты на модели системы выполнялись с шагом по времени 1 мкс. При этом в модели учитывается работа всех ПЭ. Предусмотрены возможности расчета потерь в ключах. В модели АГД учитываются потери энергии в меди, в стали, добавочные и механические, а также их зависимость от частоты вращения роторов. В моделях систем управления учтена дискретность работы микропроцессорных устройств, учтены способы измерения токов и напряжений (32 измерения за период ШИМ).

В соответствии с диаграммой рис. 5 сначала осуществляется пуск агрегата от шести ПЧ в двух ПУ. При достижении агрегатом частоты, близкой к номинальной, ПУ₁ отключается от АГД₁ и осуществляется довозбуждение АГД₁. Далее АГД₁ синхронизируется с сетью 1 и подключается к ней. Аналогичные операции выполняются с АГД₂. После переключений электромашинный агрегат работает на холостом ходу в составе ЭЭС. Далее по команде АСУ агрегат выполняет какую-либо поставленную задачу. На диаграмме представлен процесс наброса на агрегат номинальной активной мощности 200 МВт и передачи ее от ЭЭС₂ к ЭЭС₁ через вал электромашинного агрегата. В заданный момент времени по команде АСУ осуществляется реверс активной мощности, время реверса – порядка 1 с.

Из рисунка видно, что при работе АГД на холостом ходу, а также при номинальной активной

мощности в генераторном и двигательном режимах размах колебаний напряжений управления АИН в СВ в 2...2.5 раза меньше размаха колебаний пилообразных опорных напряжений. Это означает, что при принятых выпрямленных напряжениях ПЧ в СВ (2 кВ) система имеет (2...2.5)-кратную форсировку по напряжению возбуждения АГД. Эта форсировка полностью используется при набросе и реверсе номинальной активной мощности (в зонах быстрого изменения мощностей АГД амплитуда напряжений управления СВ достигает амплитуды опорных напряжений).

Электрохимический процесс АСЭМПЧ, представленный на рис. 5, имеет длительность 130 с. Машинное время, затраченное на расчет с шагом 1 мкс, равно 15 мин 33 с (в 7 раз медленнее реального времени). Расчет выполнен на ЭВМ средней производительности (процессор Intel 10700 К). При использовании алгоритмов расчета процессов по «гладким» составляющим кривых [3] затраты машинного времени сокращаются, ориентировочно, на порядок.

Новое в методологии моделирования и расчета ЭМТС по взаимосвязанным системам. Методология моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам дополнена следующими новыми элементами (описания представлены в публикациях [3]):

1. Метод моделирования ЭМТС по «гладким» составляющим кривых.
2. Метод расчета процессов в ЭМТС на основе сдвоенных моделей.
3. Метод расчета процессов в ЭМТС при их разделении на взаимосвязанные части с помощью виртуальных регулируемых источников.
4. Метод учета пространственных гармоник в магнитном поле МПМ.
5. Метод оценки потерь энергии в ЭМ от высших гармоник ШИМ на основе экспериментально определенного высокочастотных параметров.
6. Способ учета в моделях ЭМТС снабберных цепей и «мертвого времени» при переключении транзисторов.
7. Способ учета тепловых процессов в электрических машинах.
8. Сочетание методов конечных элементов и цепных методов расчета ComSim.

9. Оценка циклоустойчивости IGBT-модулей на моделях.

10. Регулирование частоты ШИМ для ограничения гармоник токов полупроводниковых преобразователей и электрических машин.

Комплекс моделей ComSim. В комплексе ComSim создана библиотека следующих объектов, позволяющих создавать модели различных ЭМТС:

1. Диодные, а также тиристорные мосты с системой импульсно-фазного формирования импульсов управления вентилями.
2. Транзисторные мосты (двухуровневые, трехуровневые, для АВ, для АИН), ММП, ШИП, преобразователи с плавающими конденсаторами и др.
3. Электрические машины – асинхронные, асинхронизированные, реактивные, синхронные с различным типом возбуждения, с постоянными магнитами, с учетом несинусоидальности поля, многофазные и др.
4. Системы управления, приспособленные для реализации в микропроцессорных устройствах (учтены дискретность работы, особенности измерений и др.).

На базе библиотечных модулей реализованы модели для различных ЭМТС. Более подробный перечень моделей и их описания представлены в публикации [3].

Заключение. Методология моделирования электромеханотронных систем по взаимосвязанным подсистемам, дополненная новыми методами моделирования, при использовании разработанных библиотек подсистем, позволяет обеспечить следующие преимущества при расчетах на ЭВМ электромеханических, электромагнитных и тепловых процессов.

Методология позволяет минимизировать затраты машинного времени на расчеты на ЭВМ длительных процессов, а также создавать модели систем повышенной сложности (с большим количеством переключаемых элементов, работающих с высокими частотами переключения). При этом достигается время расчета длительных процессов, приемлемое для использования моделей в практике проектирования устройств.

Список литературы

1. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). СПб.: ОАО «Электросила», 2003. 172 с.

2. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, П. Н. Калачиков, А. П. Емельянов // СПб.: ОАО «Электросила», 2004. 252 с.

3. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога, 2020. 336 с.

4. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих сдвоенных моделях // *Электротехника*. 2021. № 1. С. 20–25.

5. Symmetric and asymmetric operating modes of hybrid cascade frequency converters / A. G. Vorontsov, V. V. Glushakov, M. V. Pronin, A. D. Stotckaia // 22nd European Conf. on Power Electronics and Appl. Lyon, France: 2020. P. 1–7. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215589.

6. Asynchronized electromechanical converter in the electrical supply system of powerful energy consumers / A. G. Vorontsov, M. V. Pronin, A. D. Stotckaia, V. V. Glushakov, P. V. Sokur // 22nd European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'20 ECCE Europe). Lyon, France. P. 7–11. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215841.

7. The electromechanical power system link for backup power supply of consumers / A. Vorontsov, V. Shelyukh, V. Glushakov, D. Kukushkin, M. Pronin, V. Tretyakov // The 46th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society 2020. Singapore, 2020. P. 1–5.

8. Свид. регистрации 2019661058. Программа для ЭВМ ComSim1_5 / Воронцов А. Г. Дата регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ 19.08.2019.

9. High-speed models of systems with AC generators and modular multilevel converters / M. V. Pronin, A. S. Grigoryan, V. V. Glushakov, A. G. Vorontsov // 43rd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China. P. 2534–2539.

10. Dynamic impact of MMC controllers on DC voltage droop controlled MTDC grids / J. Freytes, P. Rault, F. Gruson, F. Colas, X. Guillaud // 18th European Conf. on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe). IEEE, 2016 P. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2016.7695423/

11. Hassanpoor A., Norrga S., Lindgren M. Switching pattern optimisation algorithm for modular multilevel converters // 40th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. Dallas, USA, 2014. P. 4722–4728. doi: 10.1109/IECON.2014.7049214.

12. A new modular multilevel converter for medium voltage high power oil & gas motor drive applications / P. Himmelmann, M. Hiller, D. Krug, M. Beuermann // 18th European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'16 ECCE Europe). IEEE, 2016. P. 1–11. doi: 10.1109/EPE.2016.7695692.

Информация об авторе

Воронцов Алексей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: ag.voroncov@gmail.com

References

1. Pronin M. V., Voroncov A. G. Silovye polnost'yu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet). SPb.: OAO «Elektrosila», 2003. 172 s. (In Russ.).

2. Pronin M. V., Voroncov A. G., Kalachikov P. N., Emel'yanov A. P. Elektroprivody i sistemy s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami (modelirovanie, raschet, primeneniye). SPb.: OAO «Elektrosila», 2004. 252 s. (In Russ.).

3. Pronin M. V., Voroncov A. G. Elektromekhanotronnye komplekсы i ih modelirovanie na EVM po vzaimosvyazannym podsystemam. SPb.: Ladoga, 2020. 336 s. (In Russ.).

4. Voroncov A. G., Pronin M. V. Raschet sistem s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami na bystrodejstvuyushchih sdvoennyh modelyah // *Elektrotehnika*. 2021. № 1. S. 20–25. (In Russ.).

5. Vorontsov A. G., Glushakov V. V., Pronin M. V., Stotckaia A. D. Symmetric and asymmetric operating modes of hybrid cascade frequency converters // 22nd European Conf. on Power Electronics and Appl. Lyon, France: 2020. P. 1–7. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215589.

6. Vorontsov A. G., Pronin M. V., Stotckaia A. D., Glushakov V. V., Sokur P. V. Asynchronized electromechanical converter in the electrical supply system of powerful energy consumers // 22nd European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'20 ECCE Europe). Lyon, France. P. 7–11. doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215841.

7. Vorontsov A., Shelyukh V., Glushakov V., Kukushkin D., Pronin M., Tretyakov V. The electromechanical power system link for backup power supply of consumers // The 46th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society 2020. Singapore, 2020. P. 1–5.

8. Свид. регистрации 2019661058. Программа для ЭВМ ComSim1_5 / Воронцов А. Г. Дата регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ 19.08.2019. (In Russ.).

9. Pronin M. V., Grigoryan A. S., Glushakov V. V., Vorontsov A. G. High-speed models of systems with AC generators and modular multilevel converters / 43rd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China. P. 2534–2539.

10. Freytes J., Rault P., Gruson F., Colas F., Guillaud X. Dynamic impact of MMC controllers on DC voltage droop controlled MTDC grids / 18th European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'16 ECCE Europe). IEEE, 2016 P. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2016.7695423/

11. Hassanpoor A., Norrga S., Lindgren M. Switching pattern optimisation algorithm for modular multilevel converters // 40th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. Dallas, USA, 2014. P. 4722–4728. doi: 10.1109/IECON.2014.7049214.

12. Himmelmann P., Hiller M., Krug D., Beuermann M. A new modular multilevel converter for medium voltage high power oil & gas motor drive applications // 18th European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'16 ECCE Europe). IEEE, 2016. P. 1–11. doi: 10.1109/EPE.2016.7695692.

converters // 40th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society. Dallas, USA, 2014. P. 4722–4728. doi: 10.1109/IECON.2014.7049214.

12. Himmelmann P., Hiller M., Krug D., Beuermann M. A new modular multilevel converter for medium voltage

high power oil & gas motor drive applications // 18th European Conf. on Power Electronics and Appl. (EPE'16 ECCE Europe). IEEE, 2016. P. 1–11. doi:

10.1109/EPE.2016.7695692.

Information about the author

Aleksey G. Vorontsov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: ag.vorontsov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 08.02.2022; принята к публикации после рецензирования 03.03.2022; опубликована онлайн 30.03.2022.

Submitted 08.02.2022; accepted 03.03.2022; published online 30.03.2022.
