

Повышение адекватности моделей электромеханотронных систем**А. Г. Воронцов^{1,5✉}, М. В. Пронин^{1,4}, В. В. Глушаков⁴, А. П. Соловьев^{2,4}, Г. Г. Розбицкий^{3,4}**¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия³ Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия⁴ АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия⁵ АО НПЦ СЭС, Санкт-Петербург, Россия✉ ag.voroncov@gmail.com

Аннотация. Разработка электромеханотронных систем связана с моделированием и расчетом процессов различного рода. Анализируются электромагнитные, механические и тепловые процессы, решаются задачи управления, регулирования, защиты, контроля и диагностики. Системы могут содержать большое количество силовых полупроводниковых элементов. Рассчитываются кратковременные и многочасовые процессы. Учет взаимных связей процессов различного рода при расчетах сложных систем требует больших затрат машинного времени. Поэтому задачи решаются при более или менее значительных допущениях, что приводит к снижению адекватности результатов. Предложены методы расчета, позволяющие на порядки сократить затраты машинного времени и использовать более подробное описание установок и более точные компьютерные модели. Рассматриваются возможности расчета процессов по «гладким составляющим» переменных, а также применение сдвоенных моделей, в которых сочетаются быстродействие и точность. Для примера анализируется система с активным каскадным преобразователем частоты, содержащим 780 транзисторов и диодов, паразитные индуктивности, снабберные цепи и асинхронный двигатель с векторным управлением, в котором лестничными схемами учтено вытеснение токов. В модели учтены потери энергии в преобразователе и в двигателе, а также распределение потерь по составляющим. Учтены аварийные режимы работы, связанные с отключением части низковольтных блоков каскадного преобразователя и с поддержанием качества электроэнергии на его входе и выходе посредством симметрирования основных и подавления паразитных составляющих токов.

Ключевые слова: моделирование, расчет, каскадный преобразователь частоты, паразитные параметры, снабберные цепи, асинхронный двигатель, вытеснение токов, лестничные схемы, шаг интегрирования, затраты машинного времени, адекватность

Для цитирования: Повышение адекватности моделей электромеханотронных систем / А. Г. Воронцов, М. В. Пронин, В. В. Глушаков, А. П. Соловьев, Г. Г. Розбицкий // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 3. С. 56–66. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-56-66.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Improving the Adequacy of Models of Electromechanotronic Systems

A. G. Vorontsov^{1,5✉}, M. V. Pronin^{1,4}, V. V. Glushakov⁴, A. P. Soloviev^{2,4}, G. G. Rozbitskiy^{3,4}

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

³ ITMO University, Saint Petersburg, Russia

⁴ JSC «Power Machines», Saint Petersburg, Russia

⁵ JSC «NPC SES», Saint Petersburg, Russia

✉ ag.vorontsov@gmail.com

Abstract. Development of electromechanotronic systems is connected with modeling and calculation of processes of various kinds. Electromagnetic, mechanical and thermal processes are analyzed, control, regulation, protection, monitoring and diagnostics problems are solved. Systems may contain a large number of power semiconductor elements. Short-term and multi-hour processes are calculated. Taking into account mutual connections of processes of various kinds in calculations of complex systems requires inadmissibly large expenditures of machine time. The problems are solved under more or less significant assumptions, which leads to a decrease in the adequacy of the results. The methods of systems calculation are proposed, which allow to reduce machine time consumption and to use more detailed description of installations and more accurate computer models. Possibilities of calculation of processes by «smooth components» of variables, and also application of dual models, in which speed and accuracy are combined, are considered. As an example, a system with an active cascade frequency converter containing 780 transistors and diodes, parasitic inductances and snubber circuits, and a vector-controlled induction motor with ladder circuits accounting for current displacement is analyzed. The model takes into account energy losses in the converter and in the motor, as well as the distribution of losses by components. It also takes into account emergency operation modes associated with disconnection of a part of low-voltage units of the cascade converter and maintenance of power quality at its input and output by symmetrization of the main current components and suppression of parasitic components.

Keywords: modeling, calculation, cascade frequency converter, parasitic parameters, snubber circuits, induction motor, current displacement, ladder circuits, integration step, machine time, adequacy

For citation: Improving the Adequacy of Models of Electromechanotronic Systems / A. G. Vorontsov, M. V. Pronin, V. V. Glushakov, A. P. Soloviev, G. G. Rozbitskiy // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 3. P. 56–66. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-56-66.

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

Введение. Электромеханотронные системы (ЭМТС), содержащие электрические машины (ЭМ), полупроводниковые преобразователи (ПП) и системы управления (СУ), применяются во многих областях техники. Мощные ЭМТС наиболее интенсивно внедряются в последние несколько десятилетий в связи с появлением и совершенствованием силовых полупроводниковых элементов (ПЭ), например транзисторных модулей IGBT. ЭМТС для энергетики [1]–[3], для горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности, для железнодорожного транспорта [4], для систем электродвижения ледоколов [5], а также для других назначений описаны во многих публикациях.

В различных режимах работы в ЭМТС возникают процессы разного рода – электромагнитные, механические, тепловые. Одновременно в ЭМТС решаются задачи регулирования, управления, защиты, диагностики, контроля. Все указанные процессы и решения задач взаимосвязаны. Адекватность анализа систем обеспечивается при всестороннем анализе энергетических и информационных процессов, однако одни процессы кратковременные, другие – длительные.

Например, процессы переключения модулей IGBT в мощных ПП могут иметь длительность от сотен наносекунд до единиц микросекунд [6]. Эти процессы обусловлены параметрами силовых элементов, а также паразитными параметрами силовых цепей – индуктивностями конденсато-

ров, модулей IGBT, кабелей, резисторов и т. д. Процессы переключения модулей IGBT связаны с перенапряжениями в силовых цепях, с дополнительными потерями энергии, с перегревом не только ПЭ, но также дросселей, шин, конструкций шкафов. Из имеющегося опыта следует, что анализ указанных высокочастотных процессов должен выполняться при расчетах с шагами интегрирования переменных менее 0.1 мкс.

Другой пример – большая длительность переходных процессов в ЭМТС. К таким объектам можно отнести гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) [7], [8]. В них энергия накапливается посредством многочасовой закачки воды из нижнего водоема в верхний. В процессе закачки воды растет давление воды на лопасти турбины, увеличивается момент сопротивления на валу ЭМ, изменяется частота вращения ротора ЭМ и режим работы ПП. Указанные процессы рассчитываются с шагами интегрирования, на порядки большими, чем при расчетах быстрых процессов.

При разработке ЭМТС расчеты быстрых и медленных процессов, как правило, разделяются (выполняются по различным моделям систем). При этом анализ процессов выполняется при принятии более или менее значительных допущений. Снижается адекватность результатов анализа систем.

В [4], [6], [9] предложен метод расчета процессов в ЭМТС, содержащих большое количество ПЭ, по «гладким составляющим» переменных. За счет исключения из процесса расчета операций с ПЭ метод позволяет многократно увеличить шаг интегрирования переменных (без значительной потери точности) и за счет этого на порядки сократить затраты машинного времени при расчетах на ЭВМ средней производительности (расчеты выполняются быстрее реального времени). В этих алгоритмах расчета быстрые процессы переключения ПЭ не учитываются. Однако в указанных публикациях предложено также использовать сдвоенные модели, в которых после расчета длительного процесса по «гладким составляющим» переменных происходит переход на более полные модели систем при использовании малых шагов интегрирования. Эта часть расчета выполняется медленнее, но с достаточно высокой точностью. В целом затраты машинного времени на анализ систем значительно уменьшаются, и это позволяет в полной модели максимально учесть особенности ЭМТС, быстрые и медленные процессы. Адекватность результатов анализа систем и процессов в них повышается.

В данной статье на основе создания сдвоенных моделей рассматриваются возможности повышения адекватности расчетов на примере моделирования, расчета и анализа процессов в системе с активным каскадным преобразователем частоты (КПЧ) и асинхронной машиной (АМ). Эффективность моделей обеспечивается использованием методов моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам [4] в среде собственной разработки ComSim [10], а также применением новых алгоритмов управления. Некоторые решения рассмотрены в предыдущих публикациях авторов [11], [12]. В данной статье описана модель системы повышенной адекватности, в которой в КПЧ учтены «паразитные параметры» конструкции, RC -цепи выпрямителей и инверторов, особенности переключения модулей IGBT, потери энергии и тепловые процессы модулей IGBT, а в АМ учтен ряд особенностей электрических машин, в том числе лестничными схемами учтено вытеснение токов в роторе, учтены потери в меди, в стали статора и ротора, их зависимость от частоты вращения, механические потери.

ЭМТС с КПЧ и АМ и особенности моделирования КПЧ. Рассматриваемая структура ЭМТС с активным КПЧ и АМ представлена на рис. 1. Питание КПЧ осуществляется от трехфазной электросети ограниченной мощности, содержащей в фазах регулируемые синусоидальные ЭДС e_{sn} ($n = 1, 2, 3$) и индуктивности L_{sn} . Сеть имеет в фазах напряжения u_{sn} и токи i_{sn} . К сети подключен многообмоточный трансформатор Тр, имеющий в данном случае 30 вторичных трехфазных обмоток. Поскольку КПЧ выполняется с активными выпрямителями, которые могут работать в многотактном режиме, то вторичные обмотки трансформатора синфазны.

КПЧ имеет 30 трехфазно-однофазных блоков преобразования частоты со звеньями постоянного напряжения (БПЧ₁–БПЧ₃₀). В БПЧ активные выпрямители подключены ко вторичным обмоткам Тр. Однофазные автономные инверторы напряжения БПЧ (АИН₁–АИН₃₀) в каждой фазе нагрузки включены по 10 последовательно и образуют высоковольтный трехфазный источник напряжения. Нагрузкой КПЧ служит трехфазная АМ (обычно двигатель, но в некоторых случаях генератор).

При описании установки по методологии расчета систем по взаимосвязанным подсистемам использованы два варианта схем БПЧ. В левой части рис. 1 представлены подсхемы БПЧ,

используемые при расчетах по гладким составляющим переменных. В этих подсхемах учтены напряжениями вторичной обмотки трансформатора u_{inm} ($m = 1, 2, \dots, 30$), напряжения фаз АВ u_{vnm} , емкость звена постоянного напряжения C_f , ток i_{cnm} и напряжение u_{cnm} емкости, напряжение на выходе АИН u_{inm} . В правой части рис. 1 представлены подсхемы БПЧ, используемые при расчетах по более полной и точной модели. В этих подсхемах дополнительно учтены «паразитные» индуктивности шин АВ L_{hv} и АИ L_{hi} , емкости и активные сопротивления RC -цепей АВ C_{sv} , R_{sv} и АИ C_{si} , R_{si} , активные сопротивления R_t и функции состояния чопперов K_{tnm} в цепях защиты от повышения напряжений БПЧ.

Используемые математические описания элементов системы представлены в ряде публикаций авторов [4]–[7], [10], [12], [13]. Вместе с тем, некоторые аспекты расчета целесообразно пояснить.

При расчете процессов в системе по «гладким составляющим» переменных из математических операций исключаются операции с транзисторами и диодами. Это позволяет на порядки увеличить шаг интегрирования, минимизировать количество математических операций и значительно сократить затраты машинного времени на расчеты. Указанный алгоритм расчета для одного БПЧ поясняется подсхемами, изображенными на рис. 1 слева. На каждом крупном шаге интегрирования переменных в каждом БПЧ используются напряжения фильтровых конденсаторов, определенные на предыдущем крупном шаге расчета. Используются также напряжения управления фаз АВ и

АИН, которые определяются СУ. Это позволяет вычислить напряжения КПЧ в фазах АВ и АИН. Найденные напряжения и сигналы по токам фаз АВ и АИН позволяют определить мгновенные мощности, которые направлены в сторону фильтровых конденсаторов в каждом БПЧ. При известных напряжениях фильтровых конденсаторов определяются выпрямленные токи АВ и АИН. Указанные токи позволяют уточнить токи и напряжения фильтровых конденсаторов и перейти к следующему крупному шагу расчета по времени.

В заданный момент времени осуществляется переход к расчету с малым шагом интегрирования по более полной модели КПЧ. Используемая в этом случае расчетная схема БПЧ изображена на рис. 1 справа. В схеме учтены «паразитные индуктивности» шин (между фильтровыми конденсаторами и модулями IGBT), а также эквивалентные RC -цепи АВ и АИН. Учтены особенности переключения модулей IGBT (бестоковые паузы, токи в обратных диодах, сопротивления в цепях управления и др.). В процессе расчета основных переменных вычисляются также потери энергии и температуры элементов.

В модели предусмотрены возможности расчета процессов при отключении части БПЧ и нарушении вследствие этого симметрии токов на входе и выходе КПЧ. В используемой СУ реализованы алгоритмы симметрирования основных составляющих токов на входе и выходе КПЧ, а также подавления «паразитных» составляющих [4], [11]. Алгоритмы улучшения качества электроэнергии КПЧ подтверждены экспериментами на установке с КПЧ и асинхронизированной машиной мощностью около 2.5 МВт.

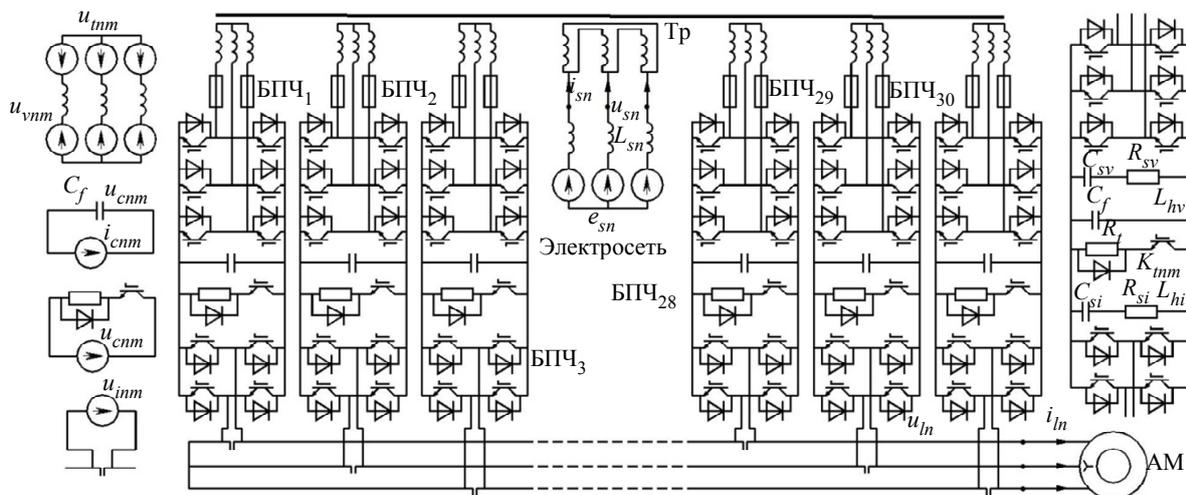


Рис. 1. Схема ЭМТС с КПЧ и АМ для двоякой модели повышенной адекватности

Fig. 1. Schematic diagram of electromechanotronic system with CFC and IM for coupled model of increased adequacy

Особенности моделирования АМ. В модели ЭМТС с КПЧ подробно учтены особенности конструкции АМ. Во многих случаях ротор АМ выполняется с глубокими пазами. В таких машинах вследствие вытеснения токов в проводниках обеспечиваются большие моменты на валу при пуске (при больших скольжениях), а также малые потери энергии при завершении пуска (при малых скольжениях). Некоторое влияние на экономичность АМ оказывают высшие гармоники токов статора, которые создаются ПП [12]. Для учета этой особенности АМ используются модели, в которых процессы вытеснения токов описываются с помощью лестничных схем [13]. Схема замещения трехфазной АМ с лестничными схемами замещения контуров ротора по взаимно перпендикулярным осям d и q представлена на рис. 2 [4]. В указанной публикации представлено также математическое описание и расчеты процессов в АМ.

В подсхеме обмотки статора в фазах учитываются напряжения u_n , токи i_n , ЭДС e_n , ЭДС по путям рассеяния e_{sn} , индуктивности L_{s1} и активные сопротивления R_1 . В зависимости от структуры схем ЭМТС в некоторых случаях учитываются составляющие токов нулевой последовательности. В подсхемах замещения контуров ротора по взаимно перпендикулярным осям учитываются проекции токов фаз на соответствующие оси i_d и i_q , индуктивности намагничивания L_m и активные сопротивления этих ветвей R_m с токами i_{ad} и i_{aq} , индуктивности рассеяния L_{s2i} с токами i_{d2i} и i_{q2i} и активные сопротивления R_{2i} с токами i_{dr2i} и i_{qr2i} ($i = 1, 2, \dots$). Индуктивности L_{s2i} задаются возрастающими в геометрической прогрессии, а активные сопротивления R_{2i} – убывающими в геометрической прогрессии при

увеличении номера i . Индуктивности намагничивания на каждом шаге расчета уточняются в зависимости от насыщения стали. Учитываются потери энергии в стали статора и ротора с помощью подсьем замещения по осям d и q (для ротора) и по осям α и β (для статора). В этих подсхемах поточосцепление в зазоре при вращении создает ЭДС, проекции которых $e_\alpha, e_\beta, e_d, e_q$ используются для вычисления токов $i_{\mu\alpha}, i_{\mu\beta}, i_{\mu d}, i_{\mu q}$ в сопротивлениях $R_{\mu 2}$ и $R_{\mu 1}$ для последующего учета потерь [0].

На рис. 2 также указаны направления токов и напряжений, направления осей dq и промежуточных осей $\alpha\beta$, направление вращения ротора с частотой ω , угол поворота τ оси d ротора относительно оси α . Подсхемы взаимосвязаны зависимыми источниками напряжения ($e_n, e_{sn}, n = 1, 2, 3$) и тока (i_n, i_d, i_q). На каждом шаге расчета по времени в итерационном цикле определяются параметры зависимых источников. Это позволяет в том же цикле рассчитывать процессы в подсистемах (как в независимых устройствах). После выполнения заданного количества итераций происходит интегрирование переменных и переход к следующему моменту времени. Начальные значения индуктивностей и активных сопротивлений и коэффициенты прогрессии определяются на тестовой модели с учетом заданного пускового момента АМ и заданного скольжения в номинальном режиме работы машины.

Учитываются также механические потери в зависимости от частоты и добавочные потери.

Расчет пуска АМ и установившегося режима на сведенной модели. Расчеты выполнены применительно к оборудованию мусоросжигательного завода. Питание оборудования осуществляется от автономного источника напряже-

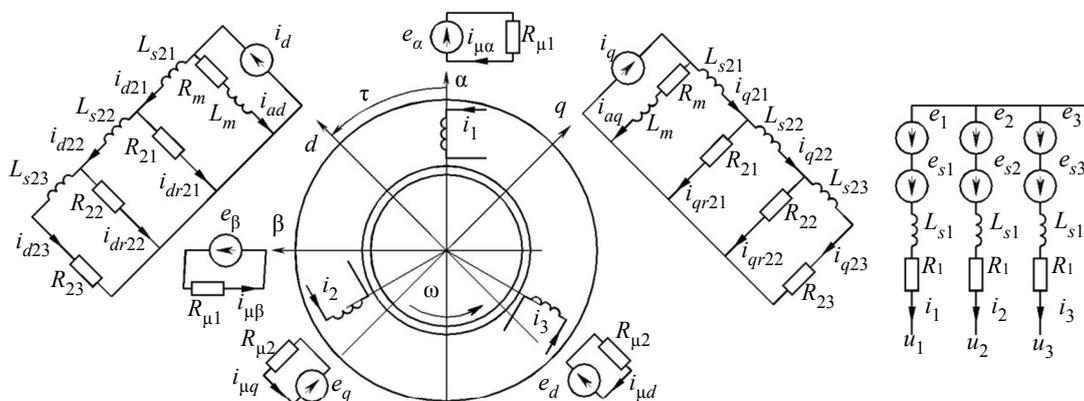


Рис. 2. Взаимосвязанные подсистемы АМ при учете вытеснения токов лестничными схемами
Fig. 2. Interconnected subsystems of AM with account the displacement of currents by ladder circuits

ния, имеющего частоту 90.7 Гц. На входе КПЧ использован трансформатор T_r , имеющий 30 вторичных синфазных обмоток. Коэффициент трансформации T_r равен 22, напряжение короткого замыкания 10 %. Ко вторичным обмоткам T_r подключены 30 трехфазно-однофазных БПЧ, которые по цепям трехфазной нагрузки соединены по 10 в каждой фазе. На выходе КПЧ формируется трехфазное напряжение. Выходное напряжение КПЧ регулируется в пределах от 0 до 10.5 кВ, частота – в пределах 0...50 Гц. В каждом БПЧ емкость фильтрового конденсатора равна 0.04 Ф, заданное выпрямленное напряжение – 860 В, частота ШИМ в АВ и АИН – 4 кГц. Нагрузкой КПЧ служит АМ. Номинальные параметры АМ: мощность 28 МВт; напряжение 10.5 кВ; коэффициент мощности 0.88; синхронная частота вращения 50 Гц; скольжение 0.00535; КПД 0.97; индуктивность обмотки статора 0.0802 о. е.; обмотки ротора 0.0896 о. е.; индуктивность намагничивания 2.19 о. е.; активное сопротивление фазы статора 0.00324 о. е.; фазы ротора 0.0037 о. е.; механические потери и добавочные 18.5 кВт; момент инерции уменьшен до 20.9 кг · м² (для уменьшения размера файла результатов). В модели АМ индуктивности рассеяния и активные сопротивления обмоток учитываются лестничными схемами с коэффициентом прогрессии параметров, равным 1.8. Учитываются также потери энергии в стали статора и ротора.

Результат расчета процесса пуска АМ с выходом на номинальный режим работы представлен на рис. 3. При расчете заданная частота вращения АМ изменялась линейно от нулевого значения до номинального, момент сопротивления на валу изменялся пропорционально квадрату частоты.

Длительность процесса – 7.5 с. Один расчет выполнен на персональной ЭВМ средней производительности с шагом интегрирования 100 мкс. Затраты машинного времени составили 3.78 с (в 2 раза быстрее реального времени). При таком анализе теряется информация о высокочастотных процессах (выше частоты ШИМ). Другой расчет процесса (рис. 3) выполнен на сдвоенной модели при переходе на полную модель в момент 6.9 с. При шаге расчета по полной модели 20 нс расчет длится 1200 с. Эти затраты можно уменьшить при некотором увеличении шага расчета и погрешностей.

На рис. 3 в момент перехода на полную модель (6.9 с) наблюдается резкое увеличение электромагнитного момента АМ, а также некоторые изменения других кривых. Причина таких изменений заключается в том, что в модели происходит переход от расчета процессов в одной схеме (см. рис. 1 в центре и слева) к расчету процессов в другой схеме (см. рис. 1 в центре и справа). В процесс расчета включается учет параметров «паразитных» и RC -цепей (при нулевых начальных напряжениях конденсаторов).

Процесс перехода от расчета с крупным шагом к расчету с малым шагом представлен на рис. 4.

Расчет выполнен при «паразитных» индуктивностях в цепях выпрямленных токов АВ и АИН в каждом БПЧ, равных 100 нГн. Емкости конденсаторов в эквивалентных снабберных цепях АВ равны 6.6 мкФ, в эквивалентных снабберных цепях АИН – 4.4 мкФ, активные сопротивления снабберных цепей – 0.008 Ом. «Мертвая зона» при переключениях модулей IGBT равна 4 мкс. На рис. 4 указаны названия рассчитанных кривых, а также момент перехода на расчет по полной модели.

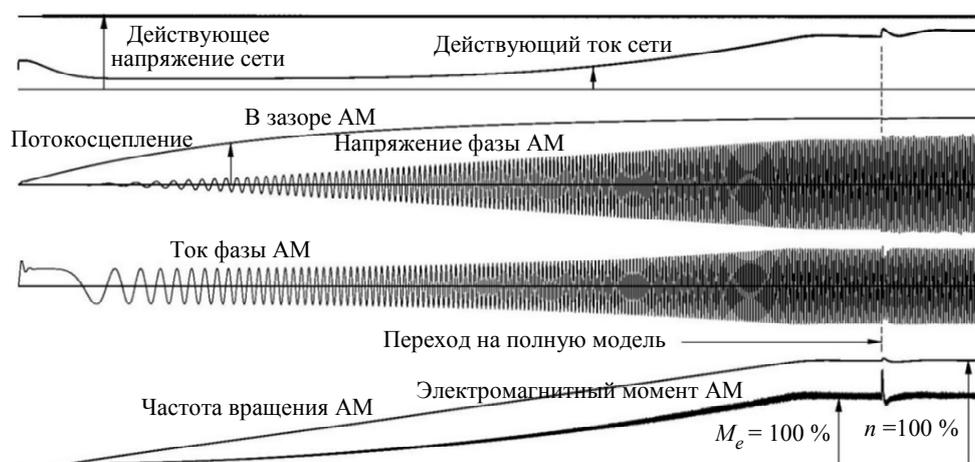


Рис. 3. Пуск АМ с выходом на номинальный режим

Fig. 3. IM start-up with nominal output

В КПЧ опорные напряжения АИН для 30 БПЧ формируются в виде 10 пилообразных кривых, взаимно сдвинутых по уровню, каждая из которых соответствует трем АИН, находящимся в разных фазах нагрузки. При работе КПЧ осуществляется круговая перестановка указанных десяти опорных напряжений. На рис. 4 выведено одно из этих напряжений и одно напряжение управления АИН. Круговая перестановка выполняется с целью выравнивания нагрузки БПЧ при пониженных напряжениях АМ.

До перехода на расчет по полной модели ток фазы питающей сети незначительно опережает напряжение фазы, что определяется уставками СУ АВ. Ток фазы АИ отстает от напряжения фазы, что определяется параметрами АМ. Токи в транзисторах и диодах КПЧ и процессы в снабберных цепях не рассчитываются и эти параметры на рис. 4 равны нулю.

После перехода на расчет по полной модели в числе прочих вычислений рассчитываются про-

цессы в снабберных цепях, определяются токи в транзисторах и диодах АВ и АИН. Некоторые из этих кривых представлены на рис. 4. При передаче энергии из сети к нагрузке в АВ токами нагружены преимущественно диоды, поэтому на рис. 4 выведен ток одного диода АВ₁. При этом в АИН токами нагружены преимущественно транзисторы, поэтому на рис. 4 выведен ток одного транзистора АИН₁.

Переход на полную модель сопровождается всплеском электромагнитного момента АМ. Этот всплеск затухает приблизительно в течение 1–2 периодов основной частоты АМ.

Следует обратить внимание на форму напряжений RC-цепей АВ и АИН. Напряжения RC-цепей АВ практически непрерывно колеблются, что обусловлено частыми переключениями модулей IGBT. В RC-цепях АИН аналогичные колебания возникают эпизодически, что обусловлено круговой перестановкой опорных напряжений и эпизодическим участием в работе БПЧ. Большая

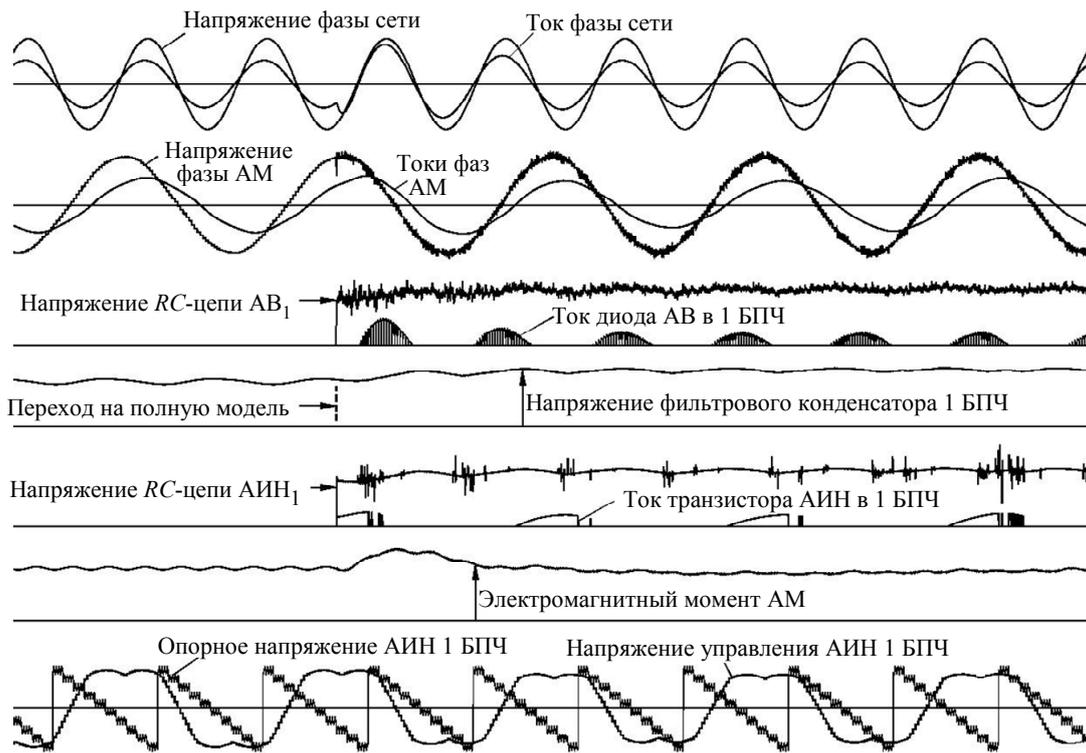


Рис. 4. Фрагмент процесса пуска АМ – переход к расчету с малым шагом по полной модели
Fig. 4. Fragment of IM start-up process – transition to small step calculation by full model

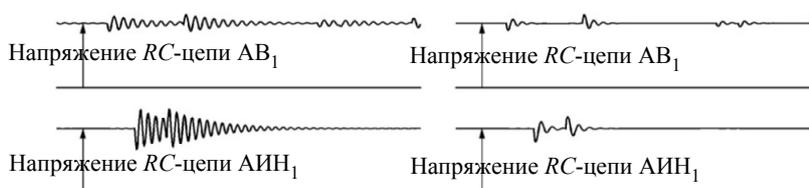


Рис. 5. Напряжения RC-цепей АВ и АИН
Fig. 5. Voltages of RC circuits AF and AIV

амплитуда напряжений опасна для модулей IGBT, эта особенность процесса нуждается в дополнительном анализе.

На рис. 5 слева представлены напряжения RC -цепей АВ и АИН, соответствующие расчету рис. 4.

Рассматриваемый процесс характеризуется слабо затухающими колебаниями напряжений RC -цепей, которым очевидно соответствуют колебания токов и повышенные потери энергии в элементах КПЧ. Другая особенность процесса – значительные перенапряжения на RC -цепях и модулях IGBT в АИН. Перенапряжения можно уменьшить, увеличивая емкости RC -цепей, а колебания погасить, увеличивая их активные сопротивления. На рис. 5 справа представлен результат расчета процессов в системе при увеличении емкостей в RC -цепях АИН до 8.8 мкФ и увеличении активных сопротивлений в RC -цепях АВ и АИН до 0.04 Ом. При дальнейшем увеличении активных сопротивлений обеспечивается апериодический характер процесса.

Решения по силовой схеме КПЧ. Некоторая часть решений по силовым схемам оборудования заключается в выборе элементной базы систем, например модулей IGBT в КПЧ, в оценке запасов по напряжению, нагрузок элементов по току, запасов по температурам при использовании одних или других способов охлаждения. При расчетах на моделях систем должны также учитываться возможности параллельного соединения модулей IGBT, последовательного соединения одного или другого количества БПЧ.

В рассмотренной установке с КПЧ напряжением 10.5 кВ, содержащей 30 БПЧ, предполагается использовать полумостовые модули IGBT фирмы «Semikron» SKM1400GB17R8, рассчитанные на ток 1400 А и напряжение 1700 В. Охлаждение предполагается жидкостное при температуре воды 38 °С. При расчетах потерь энергии в транзисторах и диодах АВ и АИН, а также температур используются данные каталогов указанной фирмы (вольт-амперные характеристики прибо-

ров, потери энергии при переключениях, зависимости характеристик от температур, сопротивления в цепях управления, тепловые сопротивления элементов и др.). При расчетах предполагается параллельное соединение модулей IGBT, в каждом АВ параллельно 2 модуля в каждом плече моста, в каждом АИН параллельно 4 модуля в каждом плече моста. Управление каждой сборкой модулей осуществляется общим импульсом.

В таблице представлены результаты расчета токов и температур транзисторов и диодов одиночных модулей IGBT в АВ и АИН. Расчеты соответствуют установившемуся режиму работы системы в режиме, близком к номинальному (конец процесса на рис. 3).

Из результатов расчета следует, что указанные модули в номинальном режиме работы системы имеют необходимый запас по напряжению, току и температуре.

Аварийные режимы работы установок с КПЧ. Установки с активными КПЧ содержат большое количество транзисторов, диодов, конденсаторов, датчиков и других элементов. Поэтому вероятность выхода из строя отдельных БПЧ высока. Разработчики КПЧ во многих случаях предусматривают отключение неисправных БПЧ, устанавливая в фазах АВ предохранители, а на выходе АИН контакт аппарата, шунтирующего неисправный блок, как указано на рис. 1. При отключении одного или нескольких БПЧ, если алгоритм работы СУ не изменяется, на выходе КПЧ нарушается симметрия напряжений и токов. В питающей сети активного КПЧ также усиливаются искажения токов и напряжений вследствие исключения из работы части выпрямительных мостов в многотактной системе АВ. При указанных авариях изменяется также допустимая мощность нагрузки КПЧ. В публикации [4] в активном КПЧ с шестью БПЧ предложено для симметрирования токов фаз АМ использовать в напряжениях управления АИН составляющие нулевой последовательности. Эффективность данного

Параметры транзисторов и диодов в номинальном режиме работы КПЧ
Parameters of transistors and diodes in the nominal operation mode of the CFC

Параметры	Действующее значение, А	Амплитуда, А	Максимальная температура, °С
Ток транзистора АВ ₁	107.420	1083.5	73.590
Ток диода АВ ₁	382.890	1131.766	77.490
Ток транзистора АИН ₁	301.650	669.286	117.026
Ток диода АИН ₁	107.289	665.170	104.082

решения подтверждена экспериментально на макете ГАЭС мощностью около 2.5 МВт. В [11] показано, что работоспособность КПЧ при снижении допустимой мощности может обеспечиваться при отключении значительной части БПЧ, даже если в работе остаются только два БПЧ в разных фазах нагрузки. Предложено также при отключении неисправных БПЧ осуществлять симметрирование токов на выходе и входе КПЧ, а также подавление нежелательных составляющих корректорами токов. Этот вариант СУ реализован в рассмотренной ранее модели ЭМТС.

Из числа многих других аварийных режимов работы системы можно выделить витковые короткие замыкания в электрических машинах. В рассмотренной модели ЭМТС эти аварии не учтены, однако их математическое описание, выполненное применительно к синхронным генераторам, представлено в публикации авторов [4] и при необходимости может быть использовано в других моделях, в том числе ЭМТС с КПЧ и АМ.

Выводы.

1. Методология моделирования электромеханотронных систем по взаимосвязанным подсистемам, дополненная методом расчета процессов по «гладким составляющим» переменных, а также методикой создания сведенных моделей, позволяет на порядки сократить машинное время, затрачиваемое на расчеты. В моделях удается совместить анализ медленных и быстрых процессов, выполнять расчеты длительных процессов в системах с большим количеством переключаемых элементов, работающих на повышенных частотах.

2. Быстродействие моделей, созданных по П.1, позволяет учесть «паразитные» параметры конструкций и элементов, особенности переключений IGBT, снабберные цепи, вытеснение токов в электрических машинах, использовать подробное и точное математическое описание процессов различного рода (электромагнитных, механических, тепловых, информационных). При более точном описании систем повышается адекватность анализа процессов и решений, принимаемых на основе расчетов.

Список литературы

1. Повышение энергоэффективности гидроаккумулирующих электростанций / С. Ф. Артюх, В. В. Галат, В. В. Кузьмин, И. И. Червоненко, Ю. Г. Шакарян, П. В. Сокур // Электрические станции. 2014. № 8. С. 33–37.
2. The electromechanical power system link for backup power supply of consumers / A. Vorontsov, V. Shelyukh, V. Glushakov, D. Kukushkin, M. Pronin, V. Tretyakov // 46th Ann. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2020). IEEE Computer Society, 2020. P.1–5. doi: 10.1109/IECON43393.2020.9255241.
3. Анализ систем возбуждения гидрогенераторов ГАЭС, работающих с переменной частотой вращения / И. Я. Довганюк, Р. Д. Мнев, Т. В. Плотникова, П. В. Сокур, П. Ю. Тузов. 2012. № 6. С. 50а–55.
4. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование на ЭВМ по взаимосвязанным подсистемам. СПб., изд-во «Ладоса», 2020 г. 336 с.
5. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Модели систем электродвижения ледоколов с асинхронными двигателями и трехуровневыми преобразователями // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. № 9. С. 80–90. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-80-90.
6. Воронцов А. Г., Пронин М. В. Расчет систем с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями на быстродействующих сведенных моделях // Электротехник. 2021. № 1. С. 20–25.
7. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications // Power Electronics and Appl., 2005 European Conf. Germ, Dresden, 2005. P. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2005.219434.
8. Bocquel A., Janning J. 4*300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications // Power Electronics and Appl., 2003 European Conf. France, Toulouse, 2003. P. 1–10.
9. Воронцов А. Г. Развитие методологии моделирования ЭМТС по взаимосвязанным подсистемам и комплекс моделей в ComSim // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. № 3. С. 57–65. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-3-57-65.
10. Воронцов А. Г. Программа для ЭВМ ComSim1_5 / Номер свидетельства 2019661058. Дата регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ 19.08.2019.
11. Особенности управления каскадными ПЧ / А. Г. Воронцов, В. В. Глушаков, М. В. Пронин, Ю. А. Сычев // Зап. Горного ин-та. 2020. Т. 241. С. 37. doi: 10.31897/PMI.2020.1.37.
12. Computer model-based evaluation of energy losses components in the systems with asynchronous machines and transistor converters / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, V. Tereschenkov // IECON. Taipei, Taiwan. Nov. 5–8, 2007. С. 1256–1261. doi: 10.1109/IECON.2007.4459986.
13. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токкарев; под ред. И. П. Копылова. М.: Изд-во Юрайт, 2023. 828 с.
14. A model of a synchronous machine with a transistor exciter for analysis of normal operations, external and turn-to-turn faults / M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, I. A. Pimenova, A. S. Grigoryan // IECON Firenze/Italy. 2016. № 10. С. 23–27. doi: 10.1109/IECON.2016.7793931.

Информация об авторах

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

E-mail: ag.voroncov@gmail.com

Пронин Михаил Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: mvproninn@gmail.com

Глушаков Василий Васильевич – начальник сектора базового проектирования общепромышленного высоковольтного электропривода АО «Силовые машины», ул. Ватунина, д. 3, Санкт-Петербург, 195009, Россия.

E-mail: glushakov_vv@power-m.ru

Соловьев Андрей Павлович – магистрант Санкт-Петербургского горного университета, 21-я линия, д. 2, В. О., Санкт-Петербург, 199106, Россия.

E-mail: mrsoloviev01@gmail.com

Розбицкий Глеб Геннадьевич – магистрант Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. Кронверкский пр., д. 49, Санкт-Петербург, 197101, Россия.

E-mail: rozbitsky_gleb@mail.ru

Вклад авторов:

Воронцов А. Г. – разработка моделей в ComSim.

Пронин М. В. – подготовка текста статьи, математическое описание.

Глушаков В. В. – подготовка текста статьи, выводы.

Соловьев А. П. – подготовка текста статьи, исследование моделей.

Розбицкий Г. Г. – исследование моделей, подготовка текста статьи.

References

1. Povyshenie jenergojefektivnosti gidroakkumulirujushih jelektrostantsij / S. F. Artjuh, V. V. Galat, V. V. Kuz'min, I. I. Chervonenko, Ju. G. Shakarjan, P. V. Sokur // *Jelektricheskie stancii*. 2014. № 8. S. 33–37. (In Russ.).
2. The electromechanical power system link for backup power supply of consumers / A. Vorontsov, V. Shelyukh, V. Glushakov, D. Kukushkin, M. Pronin, V. Tretyakov // 46th Ann. Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2020). IEEE Computer Society, 2020. P.1–5. doi: 10.1109/IECON43393.2020.9255241.
3. Analiz sistem vobuzhdenija gidrogeneratorov GAJeS, rabotajushih s peremnoy chastotoj vrashhenija / I. Ja. Dovganjuk, R. D. Mnev, T. V. Plotnikova, P. V. Sokur, P. Ju. Tuzov. 2012. № 6. S. 50a–55. (In Russ.).
4. Pronin M. V., Voroncov A. G. Jelektromehatronnye komplekсы i ih modelirovanie na JeVM po vzaimosvjazannym podsistemam. SPb., izd-vo «Ladoga» 2020 g. 336 s. (In Russ.).
5. Voroncov A. G., Pronin M. V. Modeli sistem jelektrodvizenija ledokolov s asinhronnymi dvigate-ljami i trehurovnevymi preobrazovateljami // *Izv. SPbGjeTU «LJeTI»*. 2022. № 9. S. 80–90. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-9-80-90. (In Russ.).
6. Voroncov A. G., Pronin M. V. Raschet sistem s jelektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovateljami na bystrodejstvujushih sdvoennyh modeljah // *Jelektrotehnik*. 2021. № 1. S. 20–25. (In Russ.).
7. Bocquel A., Janning J. Analysis of a 300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications // *Power Electronics and Appl.*, 2005 European Conf. Germ, Dresden, 2005. P. 1–10. doi: 10.1109/EPE.2005.219434.
8. Bocquel A., Janning J. 4*300 MW variable speed drive for pump-storage plant applications // *Power Electronics and Appl.*, 2003 European Conf. France, Toulouse, 2003. P. 1–10.
9. Voroncov A. G. Razvitie metodologii modelirovanija JeMTS po vzaimosvjazannym podsistemam i kompleks modelej v ComSim // *Izv. SPbGjeTU «LJeTI»*. 2022. № 3. S. 57–65. doi: 10.32603/2071-8985-2022-15-3-57-65. (In Russ.).
10. Voroncov A. G. Programma dlja JeVM ComSim1_5 / Nomer svidetel'stva 2019661058. Data registracii v Federal'noj sluzhbe po intellektual'noj sobstvennosti RF 19.08.2019. (In Russ.).
11. Osobnosti upravlenija kaskadnymi PCh / A. G. Voroncov, V. V. Glushakov, M. V. Pronin, Ju. A. Sychev // *Zap. Gornogo in-ta*. 2020. T. 241. S. 37. doi: 10.31897/PMI.2020.1.37. (In Russ.).
12. Computer model-based evaluation of energy losses components in the systems with asynchronous machines and transistor converters / M. Pronin, O. Shonin, A. Vorontsov, V. Tereschenkov // *IECON*. Taipei, Taiwan. Nov. 5–8, 2007. C. 1256–1261. doi: 10.1109/IECON.2007.4459986. (In Russ.).

13. Proektirovanie jelektricheskikh mashin / I. P. Kopylov, B. K. Klokov, V. P. Morozkin, B. F. Tokarev; pod red. I. P. Kopylova. M.: Izd-vo Jurajt, 2023. 828 s. (In Russ.).

and turn-to-turn faults / M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, I. A. Pimenova, A. S. Grigoryan // IECON Firenze/Italy. 2016. № 10. S. 23–27. doi: 10.1109/IECON.2016.7793931.

14. A model of a synchronous machine with a transistor exciter for analysis of normal operations, external

Information about the authors

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

E-mail: ag.vorontsov@gmail.com

Mikhail V. Pronin – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Robotics and Automation of Production Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: mvpronin@gmail.com

Vasiliy V. Glushakov – Head of the Basic design sector of the general industrial high-voltage electric drive of JSC «Power Machines». 3 Vatutina St., Saint Petersburg, 195009, Russia.

E-mail: glushakov_vv@power-m.ru

Andrey P. Soloviev – master student of Saint Petersburg Mining University, 21st line, 2, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199106, Russia.

E-mail: mrsoloviev01@gmail.com

Gleb G. Rozbitskiy – master student of ITMO University, Kronverksky Av. 49, Saint Petersburg, 197101, Russia.

E-mail: rozbitskiy_gleb@mail.ru

Contribution of the authors:

Vorontsov A. G. – model development at ComSim.

Pronin M. V. – preparation of the text of the article, mathematical description.

Glushakov V. V. – preparation of the text of the article, conclusions.

Solovyov A. P. – preparation of the text of the article, research of models.

Rozbitskiy G. G. – research of models, preparation of the text of the article.

Статья поступила в редакцию 30.10.2023; принята к публикации после рецензирования 22.01.2024; опубликована онлайн 25.03.2024.

Submitted 30.10.2023; accepted 22.01.2024; published online 25.03.2024.
