

УДК 621.311.001.57

ПРОБЛЕМА АДЕКВАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВСТАВОК ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И СРЕДСТВА ЕЕ РЕШЕНИЯ (ЧАСТЬ 2)

© 2020 г. Р. А. Уфа¹, *, Н. Ю. Рубан¹, А. Б. Аскаров¹, В. Е. Рудник¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Национальный исследовательский Томский политехнический университет”, Томск, Россия

*e-mail: hecn@tpu.ru

Поступила в редакцию 24.03.2020 г.

После доработки 05.06.2020 г.

Принята к публикации 11.06.2020 г.

Результаты анализа применения гибридных комплексов для моделирования электроэнергетических систем представлены в рамках данной работы. Можно отметить общую тенденцию в применении и комбинировании разных подходов моделирования в целом направленную на увеличение полноты и достоверности воспроизведения единого спектра квазиустановившихся и переходных процессов в электроэнергетической системе. В частности, совместное использование двух методов расчета: во временной и векторной областях в одном моделирующем комплексе для воспроизведения электромагнитных и электромеханических переходных процессов. Представлены результаты применения еще одного вида гибридизации систем моделирования и разработанных на его основе программно-технических средств всережимного моделирования вставок постоянного тока. Проведен комплекс исследований, включающий воспроизведение процессов объединения несинхронно работающих частей электроэнергетических систем посредством вставки постоянного тока, регулирования, включая реверс, мощности и функционирования вставки постоянного тока при различных аварийных процессах в электроэнергетической системе. Полученные результаты моделирования показывают адекватность разработанных средств всережимного моделирования вставки постоянного тока в электроэнергетической системе и возможность их использования для решения широкого спектра задач, в том числе анализа, проектирования и эксплуатации вставок постоянного тока в электроэнергетических системах.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, комплексный подход, моделирование, вставка постоянного тока, исследования, объединение несинхронно работающих частей электроэнергетических систем, регулирование мощности, аварийные процессы

DOI: 10.31857/S000233102004007X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время увеличивается количество работ, посвященных разработке систем моделирования электроэнергетических систем (ЭЭС), обеспечивающих такие ключевые характеристики как [1–4]:

- 1) трехфазное моделирование;
- 2) воспроизведение единого спектра процессов в ЭЭС, без выделения и разделения электромагнитной и электромеханической стадии переходных процессов;

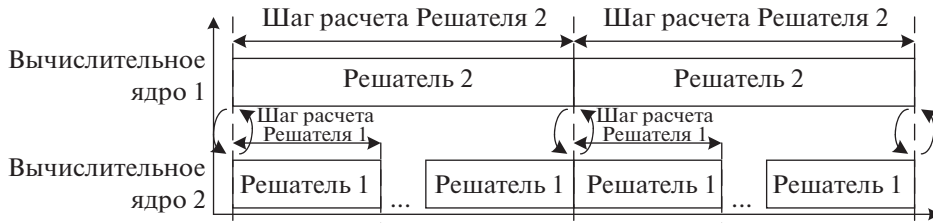


Рис. 1. Способ решения математической модели ЭЭС с помощью многопроцессорных вычислительных систем.

- 3) неограниченная масштабируемость модели ЭЭС;
- 4) возможность воспроизведения современных устройств на базе силовой полупроводниковой техники – устройств FACTS и HVDC технологий;
- 5) реальное время моделирования для обеспечения возможности взаимодействия с внешними устройствами (проведения тестирования в замкнутом цикле).

Для соответствия указанным характеристикам разрабатываются и применяются гибридные моделирующие комплексы (или co-simulation), основанные на использовании разных подходов моделирования [3, 5–7], и в которых предлагается разделить расчет математической модели ЭЭС между несколькими процессорами – Решатель_1 и Решатель_2 (рис. 1). При этом, исходными данными для Решателя_2 являются результаты моделирования, полученные от Решателя_1 на предыдущем шаге расчета [6].

Одним из требований для применения данного подхода является выбор места раздела модели, которым обычно является линия электропередачи. Однако, при этом необходимо учитывать ограничение по длине моделируемой линии связи, так как время распространения волны по линии связи должно быть больше или равно шагу интегрирования, что не всегда достижимо при малых длинах линии или использовании эквивалентов нескольких параллельных линий [6–9]. Кроме этого, согласно [6], обозначенный метод может быть применен для небольшой ЭЭС, иначе расчет требует значительного вычислительного и временного ресурса и может привести к накоплению ошибки интегрирования, что определяется использованием численного метода решения математической модели.

Такой подход предлагается в [3] при совместном использовании двух методов расчета ElectroMagnetic Transients (EMT) и Phasor-Domain в одном моделирующем комплексе. Для воспроизведения электромагнитных переходных процессов (например, при исследовании переходных процессов при коротких замыканиях (КЗ), коммутациях, грозовых перенапряжениях и моделировать устройства на базе силовой полупроводниковой техники) применяется EMT метод, который позволяет использовать полные трехфазные математические модели и малый шаг расчета (менее 10 мкс), но только для небольшого, наиболее интересующего участка ЭЭС ввиду ограниченности вычислительного ресурса процессора. Расчет доаварийного режима, характеризующийся наличием только основной гармоники 50 Гц, может быть реализован с шагом дискретизации 50 мкс, что позволяет использовать для расчета процессов ЭЭС простые алгебраические уравнения с комплексными коэффициентами в векторной области (Phasor-Domain) вместо решения дифференциальных уравнений во временной области. Таким образом, предполагается, что электромагнитная стадия переходных процессов (с момента появления и устранения КЗ) затухает в течении короткого периода времени, поэтому данный процесс может быть воспроизведен детально; а также, что оставшаяся часть ЭЭС не оказывает существенного влияния на рассматриваемый участок. Далее осуществляется обратное “переключение”, и модель ЭЭС решается с шагом 50 мкс.

Недостатком данного подхода является [10]:

1) относительно небольшой размер решаемой с помощью ЕМТ метода подсистемы (части ЭЭС);

2) обмен данными между Решателями осуществляется с большим из используемых шагов расчета, что препятствует распространению возмущений с малой постоянной времени между подсистемами и приводит к их искаженному влиянию на ЭЭС в целом.

Данный вывод подтверждается приведенными в [11] результатами сравнения моделирования процессов с помощью обозначенного выше совместного использования нескольких моделирующих комплексов в различных их сочетаниях, в частности, потеря информации при обмене между подсистемами и задержка при обмене информацией (ввиду использования разных шагов расчета) приводит к соответствующей значительной погрешности в случае быстрых переходных процессов;

3) предположение, что в подсистеме, рассчитываемой в Phasor-Domain, отсутствуют колебания вплоть до 200 Гц (обычно это низковольтные сети без длинных линий и средств компенсации реактивной мощности). Соответственно для ЭЭС с длинными линиями и средствами компенсации реактивной мощности такой подход не применим;

4) учитывая предыдущий пункт, настройка систем автоматического управления устройствами FACTS, HVDC и др. не может быть выполнена с учетом влияния низкочастотных колебаний, что приведет к несоответствующей действительности их реакции. Также не могут быть разработаны мероприятия, алгоритмы по демпфированию низкочастотных колебаний.

Применение вычислительных процессорных модулей с программируемой пользователем вентильной матрицей (Field Programmable Gate Array (FPGA)) [12] позволяет путем распределения подсистем математических моделей ЭЭС между соответствующим количеством FPGA увеличить размерность моделируемой детально ЭЭС и осуществлять решения с малым шагом. Однако, при этом возникает необходимость вводить упрощения математических моделей (сетевые элементы описываются линейными алгебраическими уравнениями, модели первичного двигателя генератора и системы возбуждения предельно упрощаются), что вновь приводит к потере полноты и достоверности результатов таких расчетов.

В рамках данной работы представлены результаты применения еще одного вида гибридизации систем моделирования, которые заключается в применении и объединении сразу трех подходов моделирования: физического, аналогового и цифрового. Детальное описание данного подхода изложено в [13, 14]. Результатом реализации данного подхода моделирования является разработанный Всережимный моделирующий комплекс реального времени (ВМК РВ) ЭЭС.

Стоит отметить, что представленные в данной статье результаты являются продолжением работы, изложенной в [15, 16], по применению обозначенного гибридного подхода для создания средств всережимного моделирования ВПТ, в частности результаты моделирования процессов объединения несинхронно работающих частей ЭЭС, регулирования, включая реверс, мощности и влияния ВПТ на различные аварийные процессы в ЭЭС.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА

На рисунке 2 представлены основные принципы построения специализированного гибридного процессора (СГП) для моделирования ВПТ, отражающие основные принципы гибридного моделирования.

Весь спектр значимых процессов в оборудовании ЭЭС, не содержащего коммутационных элементов, полно и достоверно описывается теоретически строго обоснованными и надежно проверенными системами дифференциальных уравнений на аналоговом уровне. Для обеспечения методически точного, параллельного, непрерывно-

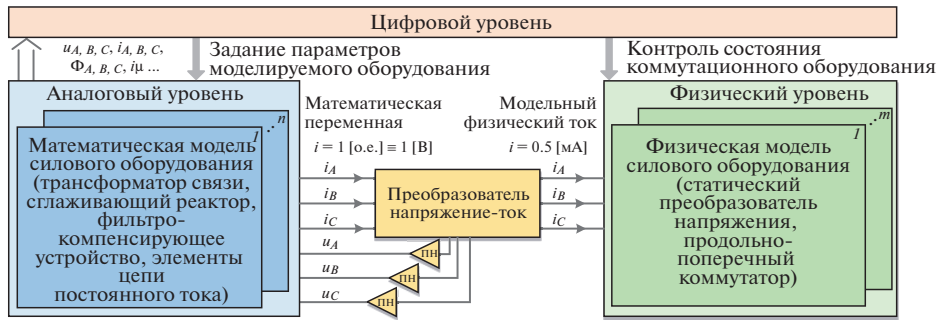


Рис. 2. Основные принципы построения модели ВПТ.

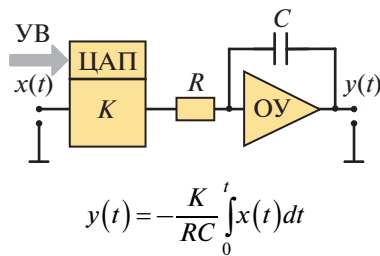


Рис. 3. Реализация неявного интегрирования.

го решения в реальном времени и на неограниченном интервале времени жестких, нелинейных систем дифференциальных уравнений высокой размерности, образуемых полными математическими моделями, используется метод непрерывного неявного интегрирования (рис. 3).

Физический уровень моделирования используется для обеспечения связи моделируемого оборудования, возможности практически неограниченного увеличения размера моделируемых ЭЭС, правильного воспроизведения спектра всевозможных трехфазных продольных и поперечных коммутаций, включая пофазные, а также для взаимодействия аналоговых структур с физически моделируемым оборудованием путем преобразования непрерывных математических переменных фазных токов моделируемых элементов ЭЭС в соответствующие им модельные физические токи и напряжения. Воспроизведение оборудования, содержащего коммутационные элементы, осуществляется с помощью цифроуправляемых аналоговых ключей [15, 16].

Так как особенности построения физических и математических моделей ВПТ в полной мере представлены в [15], далее обозначим более детально цифровой уровень.

Цифровой уровень используется для следующих функций:

- 1) обеспечение управления и информационного обмена;
- 2) автоматическое управление параметрами и настройками моделируемого оборудования, коммутационных элементов и моделированием в целом;
- 3) отображение результатов моделирования, в том числе графическое.

Обозначенные функции осуществляются посредством цифроаналогового и аналого-цифрового преобразования информации через необходимое программное и аппаратное обеспечение.

На рисунке 4 представлена структурная схема микропроцессорного узла (МПУ), в котором реализована система автоматического управления ВПТ.

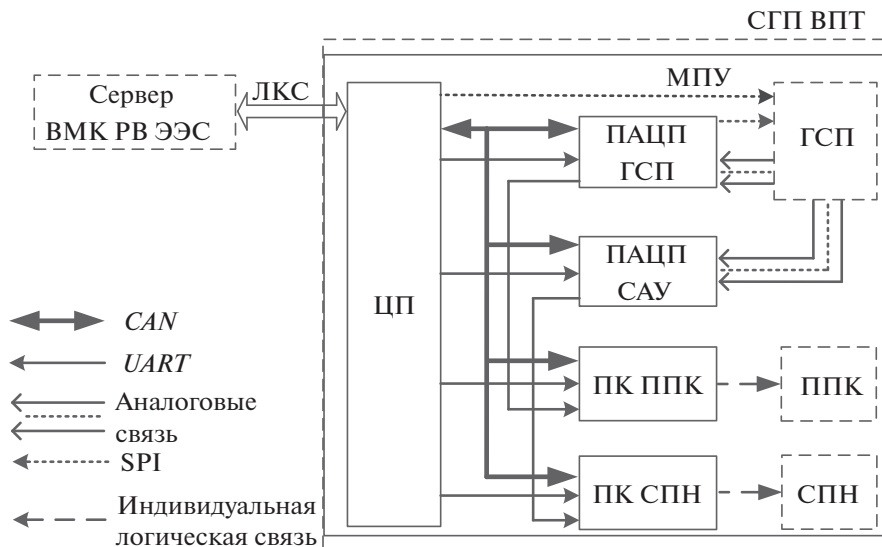


Рис. 4. Структурная схема МПУ СГП ВПТ, где шина CAN (Controller Area Network) предназначена для широковещательных взаимодействий между процессорами МПУ; по шине UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) осуществляются индивидуальные взаимодействия между процессорами МПУ; шина SPI (Serial Peripheral Interface) используется для организации управления параметрами моделируемого оборудования, задаваемыми в ГСП; посредством ЛКС (локальная компьютерная сеть) обеспечиваются информационно-управляющие взаимодействия ЦП с Сервером ВМК РВ ЭЭС.

Все функции взаимодействия серверной машины ВМК РВ ЭЭС (Сервер ВМК РВ ЭЭС) с периферийными процессорами (процессорами аналого-цифрового преобразования (ПАЦП), процессорами коммутации (ПК)) осуществляются центральным процессором. В частности, прием от Сервера ВМК РВ ЭЭС значений параметров моделируемого оборудования ВПТ (трансформаторов связи, сглаживающих реакторов, фильтро-компенсирующих устройств, элементов цепи постоянного тока), которые решаются на математическом уровне с помощью гибридных сопроцессоров (ГСП), передачу данных моделирования на Сервер ВМК РВ ЭЭС, синхронизации и перепрограммирование всех процессоров.

Функции аналого-цифрового преобразования (АЦП), чтения и обработки данных моделирования ГСП, а также функциональной обработки данных моделирования, необходимых для реализации алгоритмов САУ ВПТ (преобразование координат, формирование управляющих воздействий для широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и др.) осуществляются с помощью процессора аналого-цифрового преобразования (ПАЦП).

Процессор коммутации (ПК) реализует управление цифруправляемыми аналоговыми ключами физических моделей статических преобразователей напряжения (СПН) и продольно-поперечных коммутаторов (ППК).

В соответствии с обозначенной структурой МПУ и структурной схемой современных САУ ВПТ [17, 18] были разработаны и реализованы соответствующие программы ПАЦП САУ и ПК, выполненные на базе микроконтроллера at91sam7x256.

Отметим, что основной цикл программы ПАЦП САУ включает операции проверки и чтения АЦП, записи массива данных, обслуживания UART (передача данных в ПК, запись данных в буфер, чтение уставок регуляторов от ЦП) и CAN (синхронизации времени ЦП и ПАЦП) и оставляет 200 мкс (четыре кванта по 50 мкс). Тогда как ос-

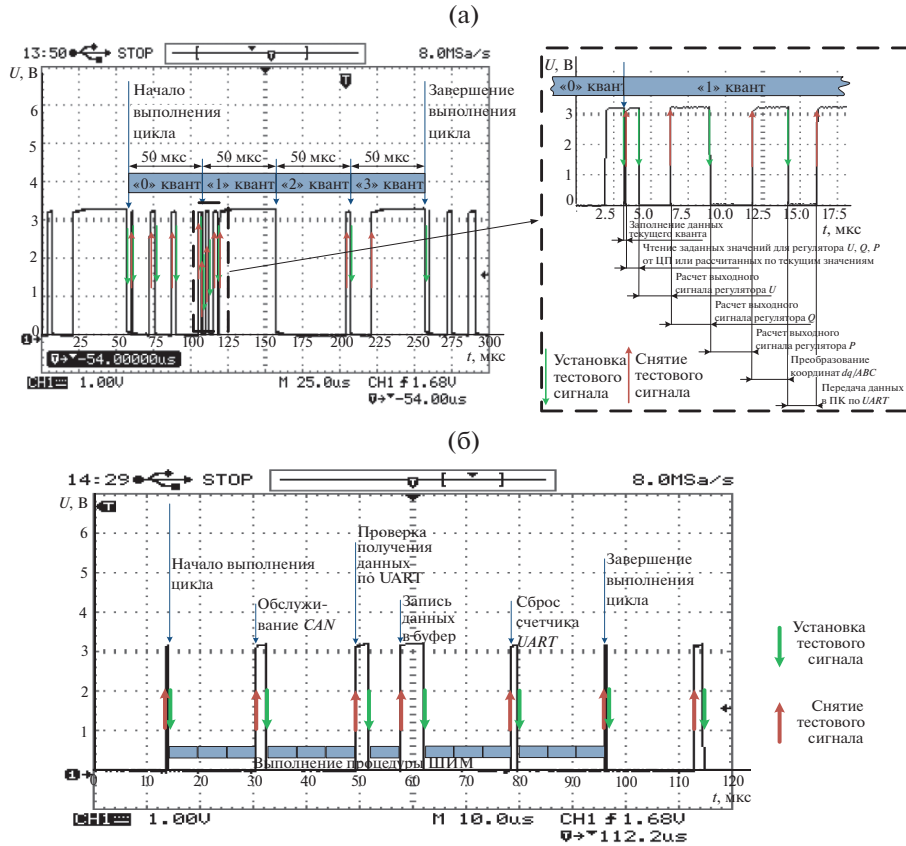


Рис. 5. Диаграмма распределения времени выполнения операций программы ПАЦП САУ (а) и ПК (б).

новной цикл программы ПК — обслуживание UART (прием данных от ПАЦП САУ или ЦП, проверка целостности пакета данных, запись данных в буфер, сброс счетчика UART) и CAN (опрос состояния ЦУАК, проверка функционирования/изменения состояния ЦУАК).

Для подтверждения адекватности функционирования модели САУ ВПТ теоретическим данным на рис. 5 приведены диаграмма распределения времени выполнения разработанных программ, в частности, совокупные затраты на реализацию ШИМ составляют 5.75 мкс, что гарантированно позволяет осуществлять ее моделирование в реальном времени.

В результате реализации обозначенного подхода были созданы программно-технические средства (ПТС) моделирования ЭЭС, и в частности ВПТ, которые позволяют использовать полные трехфазные математические и физические модели оборудования в едином (без разделения на установившийся режим и электромагнитные и электромеханические стадии переходных процессов) непрерывном спектре процессов при этом в реальном времени и на неограниченном интервале.

Представленные в [19] результаты сопоставления воспроизведения процессов в модели ВПТ на примере двухмашинной ЭЭС, полученных с помощью разработанной СГП ВПТ и программного комплекса Matlab Simulink, показывают качественное и количественное совпадение результатов. Однако, разрабатываемые ПТС на основе гибридного

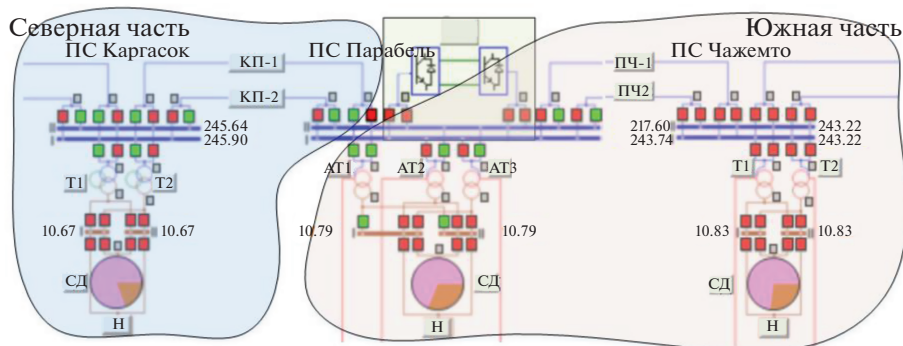


Рис. 6. Фрагмент схемы всережимного моделирования Томской ЭЭС.

подхода моделирования предназначены для моделирования больших ЭЭС, поэтому в следующем разделе представлены результаты исследований функционирования ВПТ, в том числе в составе модели Томской ЭЭС, реализованной в ВМК РВ ЭЭС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В СОСТАВЕ ТОМСКОЙ ЭЭС

Для подтверждения вышеобозначенных свойств и возможностей собственно разработанного ПТС в состав ВМК РВ ЭЭС, в котором реализована модель Томской ЭЭС, интегрирована модель ВПТ и проведен комплекс экспериментальных исследований воспроизведения процессов в реальной ЭЭС с ВПТ: объединения несинхронно работающих частей ЭЭС, регулирования, включая реверс, мощности через вставку постоянного тока между объединяемыми частями ЭЭС, влияния ВПТ на различные аварийные процессы в ЭЭС.

Данные исследования проведены на примере Томской ЭЭС, особенностью которой является то, что в настоящее время данная ЭЭС состоит из двух несинхронно работающих частей — Северной, осуществляющей в основном электроснабжение предприятий нефте- и газодобычи, и Южной, разделенных на ПС Парабель (рис. 6) [20]. В связи с этим актуальным является решение задачи включения на параллельную работу данных частей для увеличения уровня эксплуатационной надежности и эффективности энергоснабжения потребителей, особенно предприятий нефте- и газодобычи, в том числе в период проведения оперативных переключений.

А) Моделирование процессов объединения несинхронно работающих частей Томской ЭЭС

Согласно анализу отчетов о технико-экономическом обосновании выбора эффективного решения проблемы объединения частей Томской ЭЭС [21, 22] можно отметить, что рассматривалось применение фазосдвигающих устройств (фазоповоротного трансформатора) с диапазоном регулировки угла $\delta = \pm 40^\circ$. Однако, как отмечается в [23–25], это не решит проблему в целом, “особенно в условиях растущих нагрузок этого региона в будущем”, при этом “включение параллельной работы Северной и Южной частей Томской энергосистемы возможно, но в ограниченном диапазоне угла между напряжениями”. При этом, в результате проведенных исследований с помощью ВМК РВ ЭЭС было выявлено, что величина угла, при котором возможно объединение, не приводящее к существенному набросу мощности и нарушению устойчивости, не должна превышать $\delta_{пр} = 36^\circ$ (рис. 7).

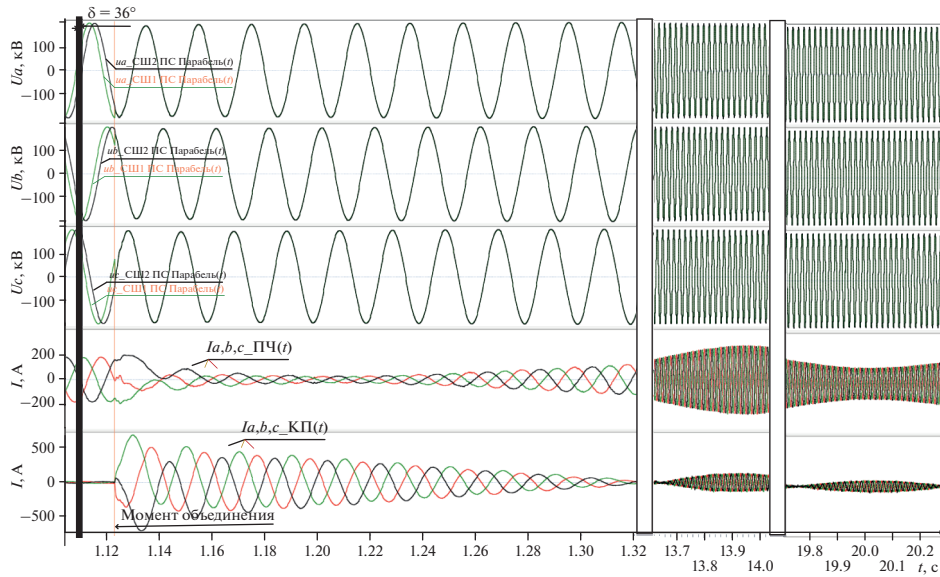


Рис. 7. Осциллограммы токов и напряжений при включении несинхронно работающих частей Томской ЭЭС на параллельную работу при угле $\delta \approx 36^\circ$.

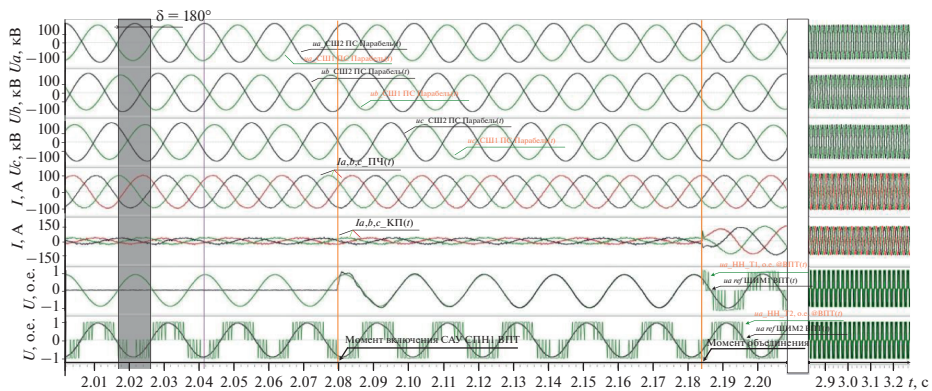


Рис. 8. Осциллограммы токов и напряжений при включении несинхронно работающих частей Томской ЭЭС на параллельную работу при угле $\delta = 180^\circ$ с помощью ВПТ.

Согласно представленным осциллограммам видно, что включение на параллельную работу несинхронно работающих частей Томской ЭЭС приводит к существенному набросу мощности (около 122 МВт), то есть ориентировочная величина уравнительного перетока составляет 4 МВт/град. Данная величина совпадает с измеренной величиной уравнительного перетока мощности, полученного в ходе натурного эксперимента по включению на параллельную работу частей ЭЭС – “ориентировочная величина уравнительного перетока составляет 4–5 МВт/град” [25].

Альтернативным путем решения данной проблемы является применение ВПТ, которое позволяет осуществить включение даже при наихудшем режиме $\delta \approx 180^\circ$, что не

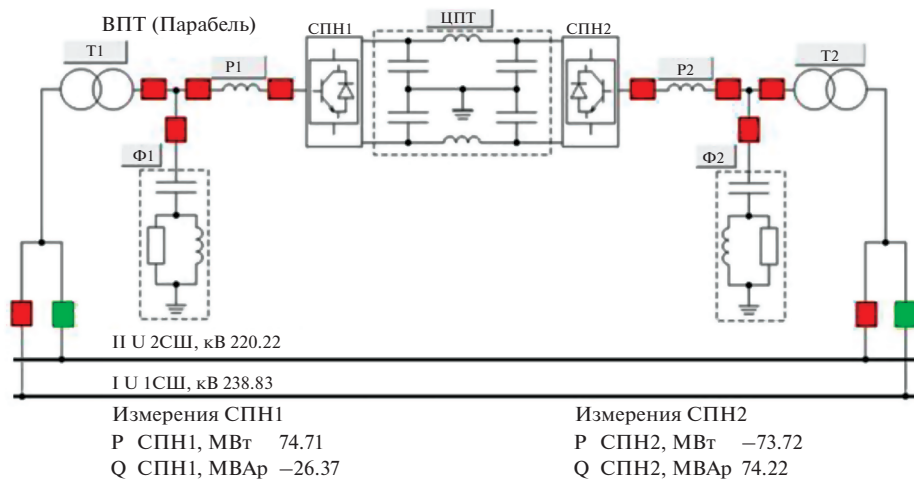


Рис. 9. ДПНУ ВПТ, отражающая текущее схемно-режимное состояние и величину перетока мощности через ВПТ между объединенными частями Томской ЭЭС.

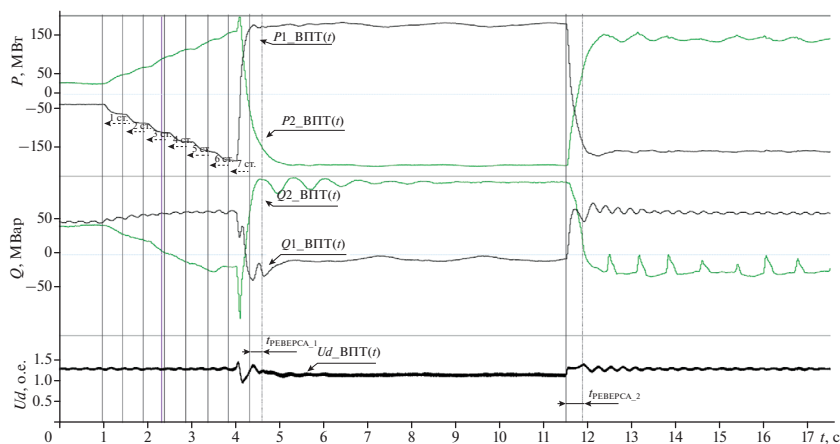


Рис. 10. Оциллограммы мощности и напряжения постоянного тока при регулировании перетока мощности через ВПТ.

приведет к набросу мощности, появлению незатухающих колебаний и нарушению нормальной работы ЭЭС (рис. 8).

Б) Моделирование процессов регулирования и реверса мощности с помощью ВПТ

На рисунке 9 представлен фрагмент разработанной динамической панели наблюдения и управления (ДПНУ) программного обеспечения ВМК РВ ЭЭС, которая отображает контролируемые параметры (величину перетока мощности, уровни напряжения) при моделировании процессов регулирования и реверса мощности с помощью ВПТ.

Согласно представленным на рис. 10 результатам моделирования процессов регулирования (7 ступеней) и реверса перетока мощности через ВПТ видно, что измене-

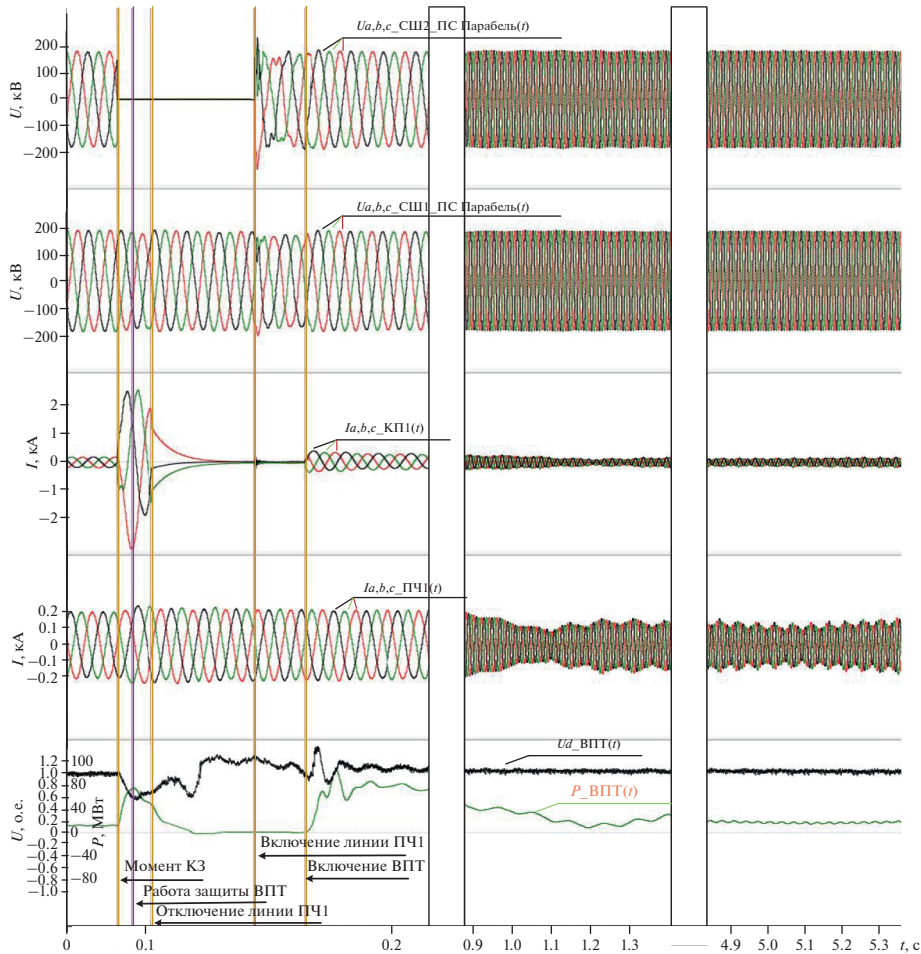


Рис. 11. Осциллограммы токов, напряжений, мощности и напряжения цепи постоянного тока при трехфазном КЗ на линии ПЧ-1.

ние перетока мощности сопровождается изменениями уровня напряжения на конденсаторной батарее цепи постоянного тока и реактивной мощности и осуществляется за время $t_{\text{РЕВЕРСА}} = (0.1 \div 0.4)$ с, что соответствует приводимым в опубликованной информации натурным данным времени изменения перетока мощности ВПТ [26, 27].

В) Моделирование аварийных процессов в ЭЭС с ВПТ

В рамках данных исследований рассматривается влияние ВПТ на аварийные процессы в ЭЭС, при этом при наиболее тяжелом виде аварийного возмущения — трехфазном коротком замыкании (КЗ) [17, 18, 28].

В соответствии со сценарием, на линии ПЧ-1 происходит КЗ, вследствие чего токи в фазах увеличиваются до примерно 3 кА, это приводит к срабатыванию защиты ВПТ, блокировке коммутации ключей и передача мощности через ВПТ прекращается, а уровень напряжения конденсаторных батарей в цепи постоянного тока ограничивается и контролируется системой автоматического управления. При этом видно, приме-

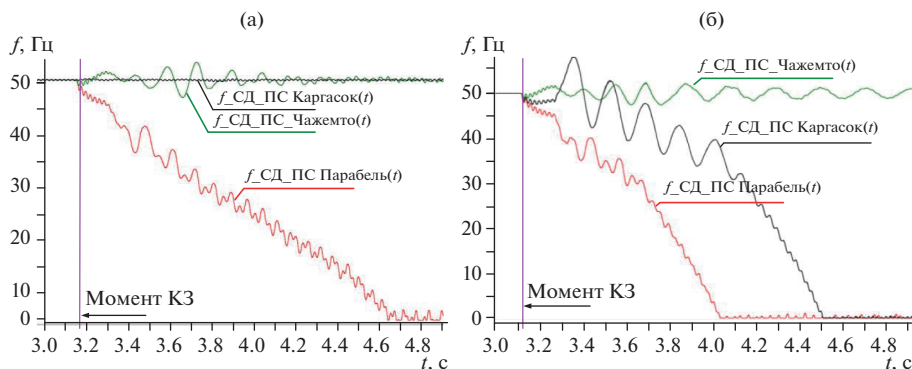


Рис. 12. Осциллограммы изменения частот вращений синхронных двигателей при трехфазном КЗ на ВЛ ПЧ-1 при схемно-режимных условиях с ВПТ (а) и без ВПТ (б).

нение ВПТ позволяет снизить уровень токов и колебаний в ЭЭС при КЗ, а также, уменьшить взаимовлияние КЗ в объединяемых частях ЭЭС (рис. 11).

Кроме того, ВПТ позволяет демпфировать колебания в переходном процессе, в результате чего повышается устойчивость функционирования узлов нагрузки, особенно двигательной, в частности синхронной на ПС Каргасок, что отражают приведенные на рис. 12 осциллограммы изменения частот вращения двигателей на близрасположенных подстанциях при трехфазном КЗ на линии ПЧ-1 (ПС Парабель).

ВЫВОДЫ

В рамках данной работы представлены результаты разработки средств всережимного моделирования ВПТ в ЭЭС на основе гибридного подхода моделирования.

Представленные в [15, 16, 19] результаты сопоставления воспроизводимых процессов каждым отдельным элементом СГП ВПТ с результатами моделирования в программных комплексах, а также проведенный комплекс исследований в рамках данной статьи, в частности сопоставление с натурными данными, показывает их качественное и количественное совпадение, а следовательно адекватность разработанного средства всережимного моделирования ВПТ в ЭЭС поставленным задачам и возможность его использования для решения широкого спектра проблем энергетической отрасли, в том числе анализа, проектирования и эксплуатации ЭЭС с ВПТ.

Представленные результаты моделирования показывают эффективность использования ВПТ на базе статического преобразователя напряжения для объединения несинхронно работающих частей ЭЭС, обеспечивая возможность независимого регулирования частоты и напряжения в каждой из них и передачу энергии на постоянном токе. При этом ВПТ позволяет снизить уровень токов и колебаний в объединенной ЭЭС при различных КЗ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00862.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Milton M., Benigni A., Monti A. Real-Time Multi-FPGA Simulation of Energy Conversion Systems // IEEE Trans on Energy Conversion. 2019. V. 34(4). P. 2198–2208.
2. Wang Z., Wang C., Li P., Fu X., Wu J. Extendable multirate real-time simulation of active distribution networks based on field programmable gate arrays // Applied Energy. 2018. V. 228. P. 2422–2436.

3. Huang Q., Vittal V. Advanced EMT and Phasor-Domain Hybrid Simulation With Simulation Mode Switching Capability for Transmission and Distribution Systems // IEEE Trans on Power Systems. 2018. V. 33(6). P. 6298–6308.
4. Chen Y., Dinavahi V. Multi-FPGA digital hardware design for detailed large-scale real-time electromagnetic transient simulation of power systems // IET Generation, Transmission & Distribution. 2013. V. 7(5). P. 551–563.
5. Zhang Y., Ding H., Kuffel R. Key Techniques in Real Time Digital Simulation for Closed-loop Testing of HVDC Systems // CSEE journal of power and energy systems. 2017. V. 3(2), P. 125–130.
6. Grégoire L., Blanchette H.F., Bélanger J., Al-Haddad K. Real-Time Simulation-Based Multisolver Decoupling Technique for Complex Power-Electronics Circuits // IEEE Trans. on Power Delivery. 2016. V. 31(5). P. 2313–2321.
7. Plumier F., Aristidou P., Geuzaine C., Cutsem T.V. Co-Simulation of Electromagnetic Transients and Phasor Models: A Relaxation Approach // IEEE Trans on Power Delivery. 2016. V. 31(5). P. 2360–2369.
8. Forsyth P.A., Maguire T.L., Shearer D., Rydmell D. Testing Firing Pulse Controls for a VSC Based HVDC Scheme with a Real Time Timestep $< 3 \mu\text{s}$ // International Conference on Power Systems Transients. Kyoto, Japan, 2009. P. 1–5.
9. Zhang Y., Gole A., Wu W., Zhang B., Sun H. Development and analysis of applicability of a hybrid transient simulation platform combining TSA and EMT elements // IEEE Trans. on Power Systems. 2013. V. 28(1). P. 357–366.
10. OPAL-RT's Solution for Hybrid EMT-TS Simulation. // [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://sites.ieee.org/pes-istt/files/2017/06/2017-Panel-4.pdf>.
11. Lin X., Gole A. M., Yu M. A Wide-Band Multi-Port System Equivalent for Real-Time Digital Power System Simulators // IEEE Trans. on Power Systems. 2009. V. 24(1). P. 237–249.
12. Yang C., Xue Y., Zhang X., Zhang Y., Chen Y. Real-Time FPGA-RTDS Co-Simulator for Power Systems // in IEEE Access. 2018. V. 6. P. 44917–44926.
13. Mikhail A., Gusev A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Askarov A., Bemš J., Králík T. Hybrid Real-Time Simulator of Large-Scale Power Systems // IEEE Trans. on Power Systems. 2019. V. 34(2). P. 1404–1415.
14. Mikhail A., Borovikov Yu., Gusev A., Sulaymanov A., Ruban N., Suvorov A., Ufa R., Bemš J., Králík T. Application of hybrid real-time power system simulator for research and setting a momentary and sustained fast turbine valving control // IET Generation, Transmission and Distribution. 2018. V. 12(1). P. 133–141.
15. Уфа Р.А., Гусев А.С., Васильев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А. Проблема адекватного моделирования функционирования вставок постоянного тока в электроэнергетических системах и средства ее решения (Часть 1) // Изв. РАН. Энергетика. 2017. № 5. С. 32–46.
16. Borovikov Yu., Gusev A., Sulaymanov A., Ufa R., Vasilev A., Mikhail A., Ruban N., Suvorov A. A Hybrid Simulation Model for VSC HVDC // IEEE Trans. on Smart Grid. 2016. V. 7(5). P. 2242–2249.
17. Khatir M., Zidi S. A., Hadjeri S., Fella M. K. Dynamic performance of a back-to-back HVDC station based on voltage source converters // J. Electrical Engineering. 2010. V. 61(1). P. 29–36.
18. Petersson A., Edris A. Dynamic performance of the Eagle Pass back-to-back HVDC Light tie // 17th International Conference on AC-DC Power Transmission. London, UK, 2001. P. 220–225.
19. Уфа Р.А., Сулайманова В.А., Гусев А.С., Ставицкий С.А. Принципы построения гибридной модели вставки постоянного тока на базе преобразователя напряжения // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки: научный журнал. 2018. № 3(59). С. 180–191.
20. Уфа Р.А., Гаврилов Е.Б., Суслова О.В., Рудник В.Е., Мальцев А.П. Включение на параллельную работу объединения северной и южной частей энергосистемы Томской области // Электричество. 2019. № 6. С. 33–41.
21. Техничко-экономическое обоснование установки фазосдвигающих устройств на подстанции 500 кВ Паравель Томская область // Отчет по исследованиям СибНИИЭВ инв. ДСП № 1114-09-т2, Новосибирск, 1990.
22. Исследовательский отчет “Сравнительный анализ различных схем фазосдвигающих устройств, разработка технических требований и предложений по созданию фазосдвигающих устройств для связи ОЭС Урала и ОЭС Сибири над напряжением 220 кВ”. Этап 1. М.: ОАО “Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского”, 2009.
23. Шакарян Ю., Тимашиова Л., Карева С., Постолатий В., Быкова Е., Суслов В. Технические аспекты создания компактных управляемых ВЛ 220 и 500 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2012. № 3(12). P. 106–111.
24. Маркман Г.З. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электрической энергии // Учебник. — Томск: Томский политехнический университет. 2008. 184 с.
25. Лебедев Н.В., Литвак В.В., Маркман Г.З. Измерение угла расхождения векторов напряжения Томской и Тюменской энергосистем // Сборник “Процессы и моды электрических систем”. Томск, 1990. С. 55–59.

26. Волошин М.В., Демидов А.А., Никишин К.А., Титаевская Н.А. Разработка алгоритмов управления ВПТ от централизованной системы автоматического регулирования частоты и потоков активной мощности // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2015. № 1(72). P. 95–108.
27. Drozdov A., Kiselev A., Suslova O. Current status and development VSC-based HVDC technologies in power system of Russian Federation // HVDC and Power Electronics International Colloquium. Agra, India, 2015. P. 1–9.
28. Fang X., Chow J.H. BTB DC link modeling, control, and application in the segmentation of AC interconnections // IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, Canada, 2009. P. 1–7.

Challenges for Adequate Simulation of Back-To-Back High Voltage Direct Current Link in Electric Power System (Part 2)

R. A. Ufa^{a,*}, N. Yu. Ruban^a, A. B. Askarov^a, and V. E. Rudnik^a

^a*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

^{*}*e-mail: hecn@tpu.ru*

The result of the analysis of the use of hybrid simulation tools of electric power systems are presented. One can note a general tendency in the application and combination of different modeling approaches as a whole, aimed at increasing the completeness and reliability of reproducing a single spectrum of quasi-steady-state and transient processes in the electric power system. In particular, the joint application of two simulation methods: in the time and vector fields in one modeling complex for reproducing electromagnetic and electromechanical transients. The results of applying another type of hybridization of modeling systems and the development of soft- and hardware comprehensive simulation tools of back-to-back HVDC link are presented. A complex of studies, including modeling of the processes of interconnection of non-synchronously operating parts of electric power systems by using back-to-back HVDC link, regulation, including reverse, power flow, and operation of the back-to-back HVDC link on various accident processes in the electric power system, has been carried out. The obtained simulation results shows the adequacy of the developed means of comprehensive simulation of back-to-back HVDC link in the electric power system and the possibility of its use for solving a wide range of problems in the analysis, design and operation of electric power systems.

Keywords: electric power system, hybrid approach, simulation, back-to-back HVDC link, research, interconnection of non-synchronously operating parts of electric power systems, power regulation, accident processes