

УДК 621.311.001.57

## РАЗРАБОТКА ГИБРИДНЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ЗАДАЧ ВСЕРЕЖИМНОГО АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

**Прохоров Антон Викторович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетических систем  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: antonprokhorov@tpu.ru

**Васильев Алексей Сергеевич,**

канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры электроэнергетических систем  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: vasilevas@tpu.ru

**Рубан Николай Юрьевич,**

ассистент кафедры электроэнергетических систем  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: rubanny@tpu.ru

**Уфа Руслан Александрович,**

ассистент кафедры электроэнергетических систем  
Энергетического института ТПУ, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.  
E-mail: hecn@tpu.ru

*Актуальность работы обусловлена необходимостью поиска новых методов и средств получения информации, требуемой для оценки взаимного влияния высоковольтных систем постоянного и переменного тока.*

**Цель работы:** разработка и исследование гибридной модели высоковольтной передачи постоянного тока на базе преобразователя напряжения, обеспечивающей совместное моделирование в реальном времени силового оборудования, а также систем управления, защиты и автоматики преобразовательного комплекса.

**Методы исследования:** аналитические методы исследования; теория методов дискретизации; методы теории автоматического регулирования и управления; методы теории точности и чувствительности вычислительных устройств; концепция гибридного моделирования; использование программных и программно-технических средств моделирования Multisim 11, Matlab Simulink и Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем.

**Результаты:** согласно сформированным требованиям к математическим моделям силового оборудования преобразовательного комплекса, а также средствам их решения, была разработана гибридная модель высоковольтного преобразовательного комплекса на базе преобразователя напряжения, а также выполнены ее экспериментальные исследования, результаты которых подтверждают реализацию требуемых свойств модели и эффективность предложенного решения.

**Ключевые слова:**

*Высоковольтные передачи постоянного тока, моделирование, релейная защита и автоматика, системы реального времени, силовая электроника.*

В настоящее время все больше перспективных схем развития электроэнергетических систем предусматривают использование высоковольтных передач постоянного тока (ВППТ) [1]. Это связано как с достигнутым уровнем прогресса в области силовой полупроводниковой техники, позволившим уменьшить стоимость силовых преобразователей и повысить экономическую эффективность строительства новых ВППТ, так и с усложнением структуры и механизмов управления современных энергосистем. Среди многочисленных достижений в области высоковольтной силовой электроники особые ожидания связаны с применением преобразователей напряжения (ПН) на управляемых силовых ключах (тиристорах и транзисторах), обладающих высоким быстродействием и

предоставляющих возможность независимого регулирования активной и реактивной мощности в квазиустановившихся и переходных режимах, что обеспечивает не только более комплексные решения задач несинхронного объединения энергосистем, например, за счет использования много-терминальных ВППТ [2], но и улучшение устойчивости и повышение управляемости передач переменного тока посредством включения на параллельную работу с ними вставок и линий постоянного тока.

Однако вместе с появлением сложных гибридных систем постоянного и переменного тока повышается трудоемкость разработки и настройки их систем управления, релейной защиты и автоматики (СУРЗА), а также оценки их взаимного влияния.

### Вопросы настройки и функционирования систем управления, релейной защиты и автоматики высоковольтных систем постоянного тока

Защита преобразовательной подстанции ВППТ представляет собой сложную многоуровневую синхронизированную систему. Кроме того, для защиты ВППТ необходимо обеспечить выполнение повышенных требований к надежности и быстродействию. Для удовлетворения первого требования защита имеет строгую иерархию, причем функционирование каждого элемента резервируется. Что касается быстродействия, то данное требование является критическим, поскольку преобразователи обладают низкой перегрузочной способностью [3, 4]. В случае возникновения короткого замыкания или перенапряжения на стороне постоянного тока срабатывание защиты должно происходить в течение нескольких микросекунд. Поэтому для обеспечения высокой скорости блокирования силовых вентилях преобразователя используются аппаратные схемы защиты. В то же время, наряду с аппаратной защитой ВППТ существует ряд программных защит, имеющих более сложные алгоритмы. Однако их скорость функционирования зависит от синхронизирующего импульса (такта) работы СУРЗА ВППТ и потому ограничена в пределах сотен микросекунд. При наличии высоковольтной линии передачи постоянного тока наряду с упомянутыми выше способами применяется метод бегущей волны, основанный на контроле волн тока и напряжения, появляющихся на линии при возникновении КЗ. Недостатком такого метода является низкая чувствительность к высокоомным замыканиям, поэтому в случае использования защиты на этом принципе действия необходимо ее резервирование, например, с помощью дифференциальной защиты [5]. Данный принцип применим для сравнения токов по концам ВППТ как на стороне постоянного, так и на стороне переменного тока. Недостатком дифференциальной защиты является сравнительно малое быстродействие по сравнению с защитами преобразователя и невозможность ее использования в многотерминальных системах [6, 7]. Реализация защиты многотерминальной системы постоянного тока возможна двумя путями:

- 1) с использованием силовых выключателей постоянного тока [8];
- 2) методом «квитирования» с совместным использованием выключателей переменного тока и быстрых механических ключей, установленных на ВППТ с каждой стороны [9].

Первый способ более дорогой и находит применение в сетях низкого напряжения, поскольку выключатели постоянного тока обладают низкой перегрузочной способностью.

Во втором случае алгоритм работы защиты предполагает достаточно сложную последовательность операций: блокировку всех преобразователей, выявление поврежденного элемента, неселективное отключение системы от сети переменного тока, отделение поврежденного элемента с помо-

щью быстрых механических ключей при отсутствии рабочего напряжения, и последующее восстановление питания. Поэтому время действия защиты многотерминальной ВППТ составляет порядка 0,7 секунд от момента возникновения замыкания до полного восстановления питания неповрежденной части системы. При этом существует проблема полного отключения сети постоянного тока на указанное время действия защиты [10], что может привести к нарушению устойчивой работы сетей переменного тока. Это требует разработки сложных быстродействующих алгоритмов централизованного управления многотерминальной системой в нормальных, аварийных и послеварийных режимах работы.

Наличие ВППТ в энергосистеме требует пересмотра традиционных подходов к построению и настройке релейной защиты силового оборудования переменного тока. Так, например, согласно [10] при возникновении ошибок коммутации вентилях ВППТ наблюдаются неправильные действия дистанционной защиты линий электропередачи переменного тока прилегающей сети. Возможным решением проблемы является оптимизация существующих алгоритмов функционирования релейных защит сетей переменного тока, подверженных воздействиям со стороны ВППТ, либо использование защит с другим принципом действия. В [11] авторы предлагают использовать вместо дистанционного дифференциальный принцип защиты прилегающих к ВППТ линий. Однако применение дифференциальной защиты ограничено длиной защищаемой линии и необходимостью наличия волоконно-оптических каналов связи. Поэтому в некоторых случаях в качестве основной защиты линии может потребоваться установка либо дифференциально-фазной, либо направленной высокочастотной защиты. В то же время примеры результатов анализа работы данных типов защит вблизи ВППТ неизвестны.

Вместе с появлением ПН все большее внимание стало уделяться применению ВППТ для регулирования напряжения и демпфирования низкочастотных колебаний мощности в сети переменного тока [12]. В связи с этим повышенную актуальность приобрели задачи разработки оптимальных алгоритмов управления быстродействующими ПН и согласования настроек их систем управления с настройками автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов.

Из сказанного выше следует, что для анализа взаимного влияния высоковольтных систем постоянного и переменного тока и решения задач настройки их СУРЗА требуется наличие детальной и комплексной информации об условиях протекания всего спектра быстрых (от нескольких микросекунд) и медленных (до десятков секунд и даже минут) процессов в электроэнергетических системах (ЭЭС). Таким образом, именно наличие достоверных методов и средств получения такого рода информации является необходимым условием надежного развития ВППТ и ЭЭС в целом.

### Методы и средства анализа взаимного влияния систем постоянного и переменного тока

Основными источниками информации, необходимой для анализа условий работы ЭЭС, являются информационно-измерительные комплексы (ИИК) и системы моделирования. Изучение опыта применения их в практике проектирования и эксплуатации ЭЭС позволяет определить достоинства и недостатки обоих и выявить перспективные направления развития методов и средств анализа работы ЭЭС.

В качестве одного из наиболее ярких примеров применения ИИК для анализа работы ЭЭС, содержащих ВППТ, может быть рассмотрен опыт Южной ЭЭС Китая [13]. Накопленные за несколько лет данные об аварийных отключениях ВППТ, заканчивающихся каскадными авариями и делением ЭЭС, позволили китайским инженерам скорректировать работу СУРЗА гибридной передачи постоянного и переменного тока и предотвратить развитие аварий при аналогичных возмущениях в будущем.

Следует отметить недостатки используемого подхода, свойственные всем случаям применения ИИК: высокая трудоемкость, связанная с анализом осциллограмм аварийных процессов в условиях низкой наблюдаемости ЭЭС, ограниченная применимость результатов измерений для настройки СУРЗА ВППТ в случаях реконфигурации данной ЭЭС или в других ЭЭС, возникновение ранее не наблюдавшихся возмущений, существования широкого диапазона возможных предаварийных режимов, а также большие временные затраты ввиду невозможности проведения масштабных экспериментов в ЭЭС.

В связи с указанными недостатками, ИИК не могут рассматриваться в качестве основного источника информации для анализа взаимного влияния ВППТ и ЭЭС переменного тока. Данные, получаемые от ИИК, могут быть в большей степени полезны для верификации результатов моделирования ЭЭС.

При этом достоверность и полнота результатов моделирования будет зависеть от выбранных методов и средств моделирования.

В настоящее время для анализа работы ЭЭС в основном применяются цифровые моделирующие комплексы. Вместе с тем их общим недостатком, ограничивающим спектр задач, решаемых с помощью отдельного комплекса, является использование численных методов интегрирования, основанных на представлении от природы непрерывных процессов в дискретном виде. Указанная особенность цифровых систем моделирования в конечном итоге приводит к необходимости различных форм декомпозиции моделируемых процессов, поиску компромиссов между дифференциальным порядком моделируемой ЭЭС, временем моделирования и возможностями применяемых методов и средств.

Так, для того чтобы проанализировать протекание процесса, возникающего в результате пропуска управляющего сигнала полупроводникового вентиля, приводящего к несимметричному режиму работы ПН и появлению осцилляций мощности в ЭСС, с последующим демпфированием возникших колебаний, необходимо обеспечить расчет с малым шагом интегрирования (1–5 мкс), что соответствует времени изменения состояния полупроводникового ключа, и на длительном интервале времени – порядка нескольких минут, необходимых для демпфирования колебаний [13]. Подобный расчет требует значительных вычислительных ресурсов в случае моделирования ЭЭС большой размерности и/или в реальном времени, например, для задач тестирования и настройки СУРЗА ВППТ.

Поэтому для решения подобного рода задач применяются многопроцессорные моделирующие системы реального времени, такие как RTDS, HYPERSIM [14, 15] и др.

Данные комплексы успешно зарекомендовали себя при моделировании электромагнитных переходных процессов и тестирования СУРЗА в замкнутом цикле.

Однако их использование для моделирования больших ЭЭС связано с рядом особенностей, возникающих ввиду имеющихся ограничений на дифференциальный порядок уравнений, решаемых одним процессором. Вследствие этого необходимым является разделение модели ЭЭС на участки и применение модели линии с распределенными параметрами для связи участков, закрепленных за отдельными процессорами. При этом ограничением на применение данного решения является требование к длине моделируемой линии, так как время распространения волны по линии должно быть больше или равно шагу интегрирования, что не всегда достижимо при малых длинах линии или использовании эквивалентов нескольких параллельных линий [16].

Кроме того, необходимость распределения моделей между отдельными процессорами ограничивает количество элементов, которые могут быть подключены к одному узлу и приводит к вынужденному эквивалентированию.

Указанные ограничения цифровых систем моделирования особенно явно проявляются при необходимости моделирования многотерминальных ВППТ и многоуровневых схем преобразователей, например 48-ми импульсных или каскадных схем [17], содержащих большое количество узлов и элементов, а также короткие связи в пределах подстанции.

Таким образом, несмотря на достоинства применения цифровых средств моделирования для решения отдельных задач анализа ЭЭС, существует необходимость поиска альтернативных подходов к моделированию, обеспечивающих комплексное решение задач, с учетом современных тенденций развития ВППТ.



**Концепция и средства гибридного моделирования энергосистем**

Для выполнения комплекса современных требований к системам моделирования и моделям ЭЭС в Томском политехническом университете были разработаны концепция и средства гибридного моделирования, основанные на использовании трех подходов к построению моделей: аналогового, цифрового и физического, каждый из которых обеспечивает достижение максимальных свойств в решении отдельных подзадач. В результате объединения указанных подходов был создан всережимный моделирующий комплекс реального времени (ВМК РВ) ЭЭС, отвечающий следующей совокупности требований: отсутствие декомпозиции процессов, ограничение на размер моделируемой ЭЭС и дифференциальный порядок моделей оборудования, на длительность моделируемых процессов, а также обеспечение реального времени моделирования. Универсальность концепции и модульность структуры средств гибридного моделирования, подробно описанных в [18], позволяет выполнить разработку модели любого элемента ЭЭС, в том числе ВППТ, и интегрировать ее в ВМК РВ ЭЭС.

Основными элементами ВМК РВ ЭЭС, отвечающими за воспроизведение в реальном времени моделей силового оборудования и его СУРЗА, являются специализированные гибридные процессоры (СГП). Все СГП имеют унифицированную многоуровневую структуру, представленную на рис. 1, б.

При этом индивидуальные особенности отдельного вида оборудования учитываются на этапе проектирования СГП, посредством синтеза аналоговой схемы решения его системы дифференциальных уравнений. В свою очередь модели СУРЗА реализуются на уровне центрального и периферий-

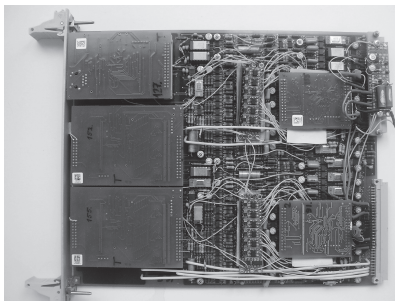
ных процессоров или сервера в зависимости от требуемого состава входных сигналов и скорости исполнения алгоритмов.

Описанная архитектура ВМК РВ ЭЭС определяет следующие требования к разработке моделей энергетического оборудования:

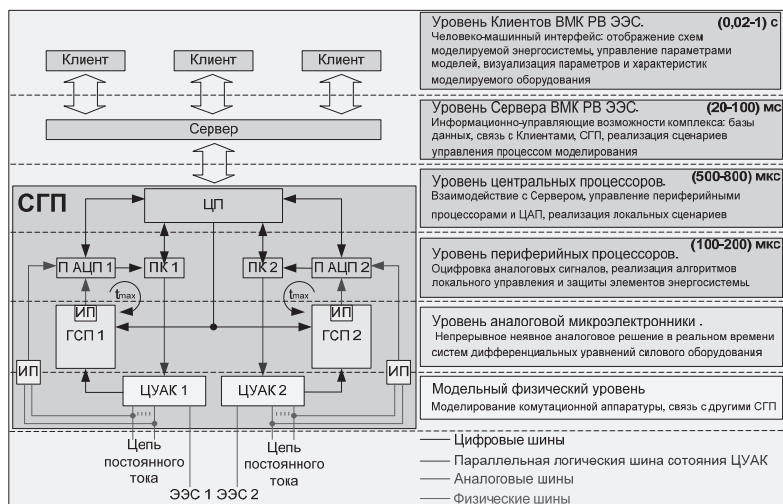
- универсальность модели. Один СГП должен воспроизводить различные модификации и типы одного вида силового оборудования. Например, модель электрической машины может использоваться для моделирования турбо-, гидро-, ветрогенераторов, синхронных и асинхронных двигателей.
- структурность модели. Оптимальное распределение моделей подсистем силового оборудования по различным уровням ВМК РВ ЭЭС в соответствии со свойствами реального оборудования. Например, реализация моделей силового оборудования осуществляется на аналоговом микроэлектронном уровне, а систем измерения, защиты и управления – в цифровой форме на уровне микропроцессоров.

Применение данного подхода для разработки гибридной модели ВППТ позволяет получить следующие ключевые преимущества:

- моделирование в реальном времени без ограничения на длительность воспроизведения процессов;
- моделирование ВППТ на базе любых типов преобразователей и при любой конфигурации преобразовательной подстанции, в том числе, имеющих многоуровневые и многотерминальные схемы;
- возможность взаимодействия модели с внешними устройствами и системами в замкнутом цикле и в режиме реального времени для задач тестирования СУРЗА;



а



б

**Рис. 1.** а) опытный образец СГП ВППТ; б) структурная схема гибридных программно-технических средств моделирования: ЦП – центральный процессор; ПАЦП 1 и ПАЦП 2 – процессоры аналого-цифровых преобразователей; ПК 1 и ПК 2 – процессоры коммутации; ГСП 1 и ГСП 2 – гибридные сопроцессоры; ЦУАК 1 и ЦУАК 2 – цифруправляемые аналоговые ключи; МУ – измерительный преобразователь;  $t_{\max}$  – время задержки в цифровом канале

- воспроизведение единого спектра электромагнитных и электромеханических процессов в ЭЭС для задач анализа взаимного влияния ВППТ и систем переменного тока.

**Результаты разработки и тестирования гибридной модели высоковольтных передач постоянного тока**

В соответствии с унифицированной структурой СГП модели силового оборудования преобразовательной подстанции: преобразовательного трансформатора, фильтро-компенсирующих устройств, реакторов и конденсаторных батарей, реализуются на базе аналоговых микросэлектронных схем. Модель СУРЗА верхнего уровня преобразовательной подстанции выполняется на уровне центрального процессора или сервера, а алгоритмы СУРЗА преобразователя и отдельных вентилях на уровне периферийных процессоров. В свою очередь модель силового преобразователя выполняется на физическом уровне. При этом адекватность модели полупроводникового вентиля и преобразователя в целом будет определяться погрешностями модели на физическом и цифровом уровнях. Физическая модель вентиля представляет собой цифруправляемый аналоговый ключ (ЦУАК). Для того чтобы обеспечить подобие физической модели реальному устройству, на цифровом уровне реализуются алгоритмы коммутации ключа в зависимости от значений тока и напряжения на его входе и выходе, а также сигнала управления на управляющем электроде. Таким образом, в зависимости от выбранного алгоритма управления цифруправляемый ключ может имитировать работу любого типа силового ключа (диода, полностью управляемого тиристора, биполярного транзистора с изолированным затвором), а также пары встречно-параллельных ключей разных типов, рис. 2. Кроме

того, на цифровом уровне реализуются алгоритмы формирования управляющих импульсов.

Погрешности модели на физическом уровне определяются различием физических характеристик силовых вентилях и ЦУАК, которые могут рассматриваться как идеальные ключи. Погрешность модели ключа на цифровом уровне в основном определяется временными задержками в информационно-измерительном канале (рис. 1, б):

$$t_{\max} = t_{\text{АЦП}} + t_{\text{АЛГОР}} + t_{\text{ПЕР}} \approx 50 \text{ мкс},$$

где  $t_{\text{АЦП}}$  – время аналого-цифрового преобразования данных в периферийном процессоре, с;  $t_{\text{ПЕР}}$  – время передачи данных от ПАЦЦ до ПК, с;  $t_{\text{АЛГОР}}$  – время выполнения алгоритмов управления и решения математической модели, с.

Для моделей современных высоковольтных преобразователей, частота коммутации которых не превышает 1000 Гц, указанной задержкой можно пренебречь.

Для оценки адекватности воспроизведения максимально полного спектра процессов при моделировании ВППТ на этапе разработки СГП была проведена оценка частотных характеристик его отдельных элементов при различных задаваемых параметрах моделей по схемам замещения (СГП предусматривает возможность гибкого изменения в реальном времени параметров модели за счет использования цифро-аналоговых преобразователей [18]). Так, для моделей фильтра и реактора, смоделированных в специализированном программном комплексе Multisim согласно их функциональным схемам (рис. 3) и с учетом используемой микросэлектронной компонентной базы с помощью встроенных программных средств анализа принципиальных схем были получены экспериментальные частотные характеристики (рис. 4–6).

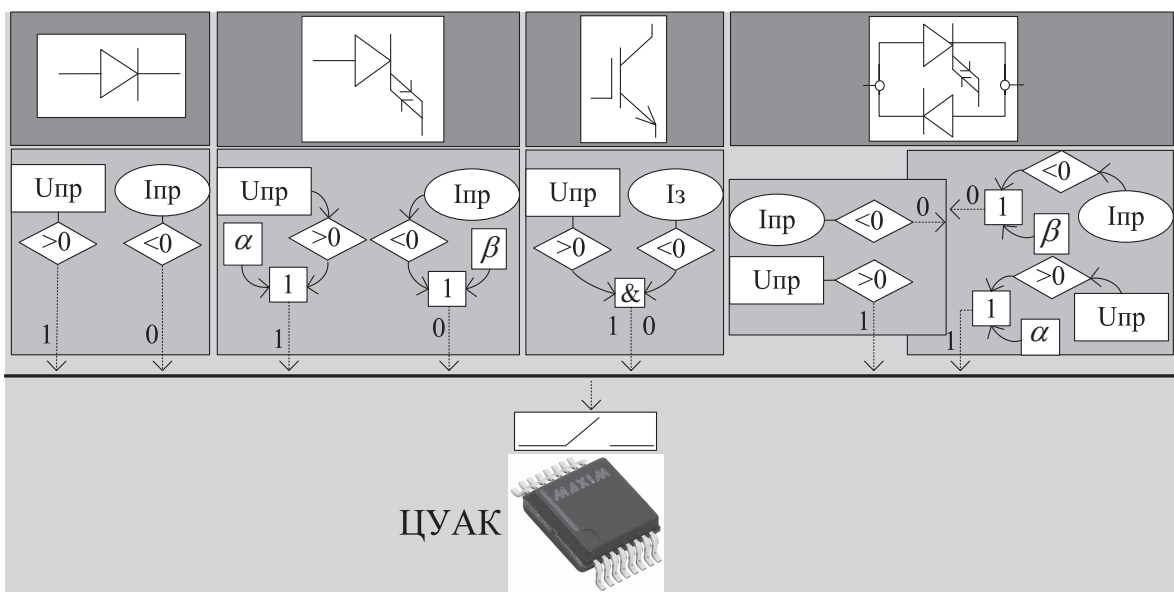


Рис. 2. Схема реализации алгоритмов управления силовых ключей в ЦУАК

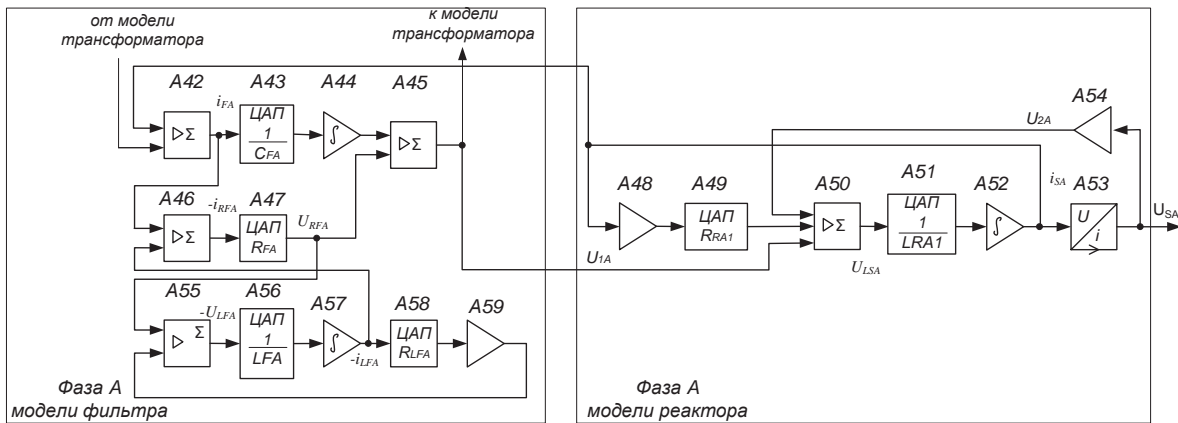


Рис. 3. Функциональная схема модели фильтра и реактора фазы А преобразовательного блока

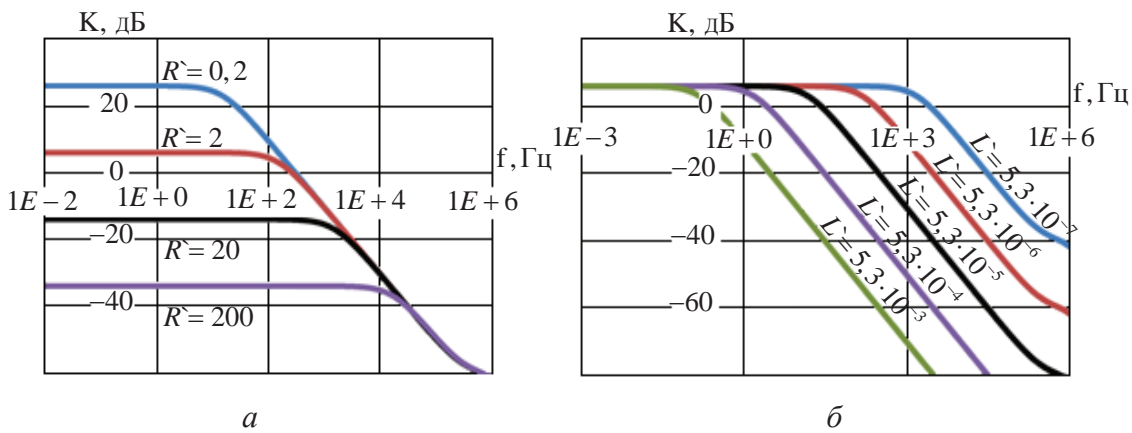


Рис. 4. АЧХ реактора: а) при неизменном значении  $L=3,123$  мГн; б) при неизменном значении  $R=11,8$  Ом

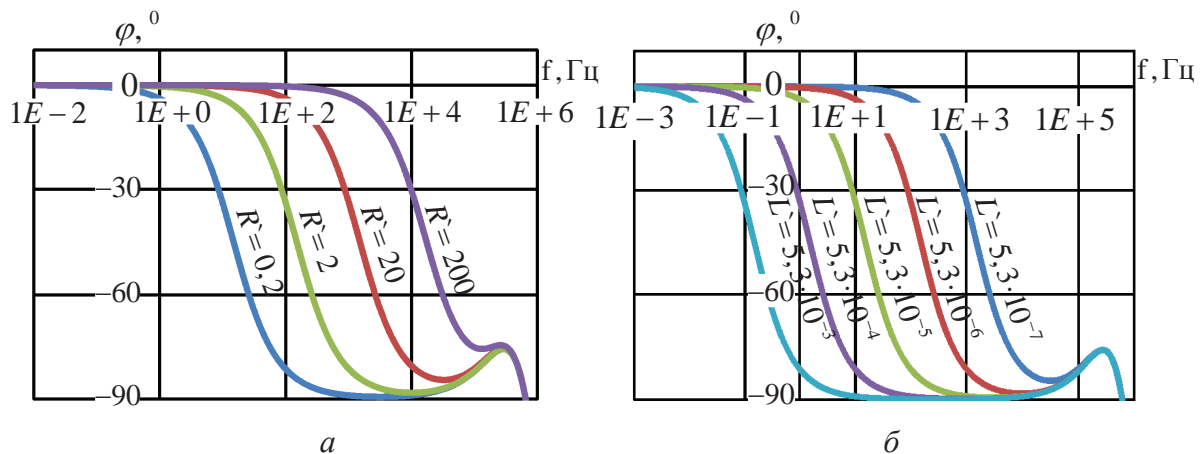


Рис. 5. ФЧХ реактора: а) при неизменном значении  $L=3,123$  мГн; б) при неизменном значении  $R=11,8$  Ом

Характеристики модели реактора получены для условий: входным сигналом является напряжение  $U_{1A}$  на одном конце реактора, выходным сигналом – ток реактора  $i_{SA}$  (рис. 3). На рис. 4, 5, а приведены результаты моделирования при фиксированном значении индуктивности  $3,123$  мГн и различных значениях сопротивления, а на рис. 4, 5, б – при фиксированном значении сопротивления  $11,8$  Ом и различных значениях индуктивности.

Формы полученных характеристик, совпадают с теоретически ожидаемыми для реактора в диапазоне частот от 0 до 10 кГц. В характерных точках значения коэффициентов усиления на нулевой частоте и частот среза совпадают с аналитически рассчитанными для силового реактора по передаточной функции, с учетом масштабных коэффициентов по току  $k_i=509,12$  А/В и по напряжению  $k_u=3000$  В/В.

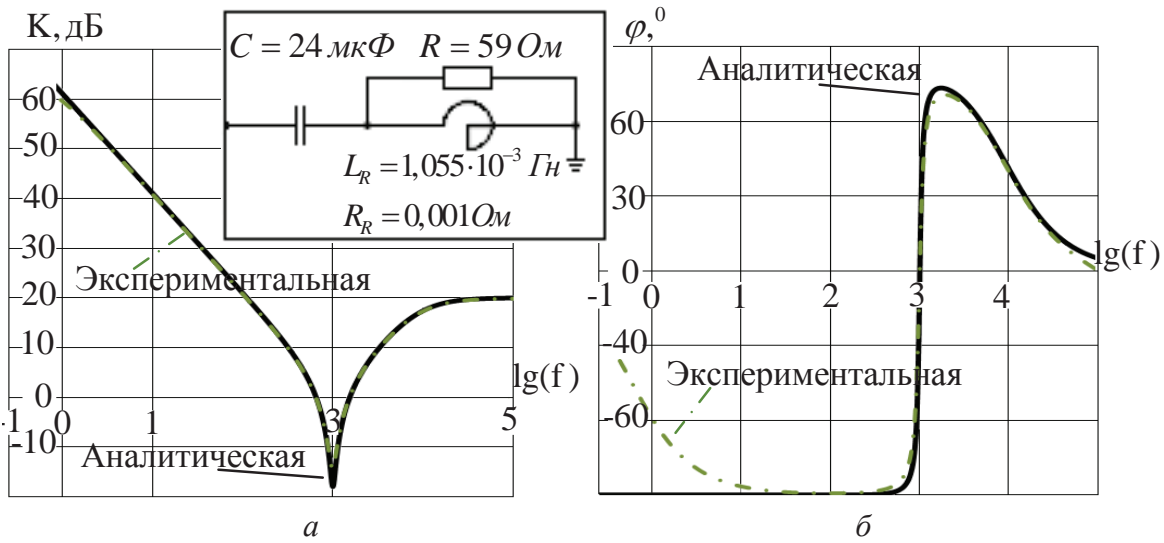


Рис. 6. ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) фильтра

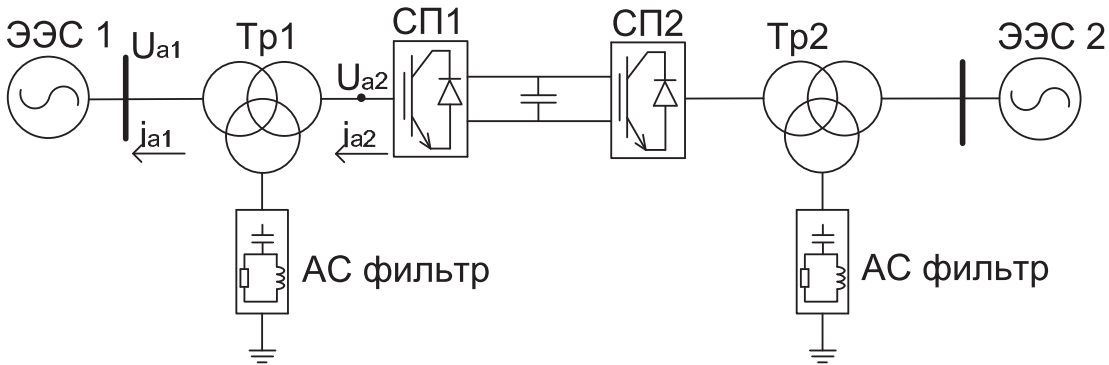


Рис. 7. Разработанная в ВМК РВ ЭЭС схема ВППТ: СП1 и СП2 – статические преобразователи, Тр1 и Тр2 – преобразовательные трансформаторы, ФКУ1 и ФКУ2 – фильтро-компенсирующие устройства

Частотные характеристики фильтра (рис. 6) получены при входном сигнале – ток фильтра  $i_{FA}$ , выходном сигнале – напряжение  $U_{1A}$  (рис. 3) и при структуре и параметрах модели, соответствующих приведенным на рис. 6. Формы полученных характеристик, совпадают с аналитическими в диапазоне до 10 кГц с учетом ранее указанных масштабных коэффициентов по току и напряжению. Небольшие расхождения на рис. 6, б обусловлены свойствами интегральной микроселектронной элементной базы.

Для исследования экспериментального образца СГП ВППТ на базе ВМК РВ ЭЭС была реализована схема двухмашинной сети (рис. 7) и протестирована работа модели ВППТ на базе двухуровневого ПН.

На рис. 8 представлены RQ характеристика двухуровневого ПН (частота коммутации 1050 Гц) и осциллограммы напряжений и токов, полученные в результате испытаний СГП ВППТ. Диаграмма мощности (рис. 8, а) иллюстрирует работу преобразовательного блока в четырех квадрантах для нормальных режимов и режимов перегрузки. Ре-

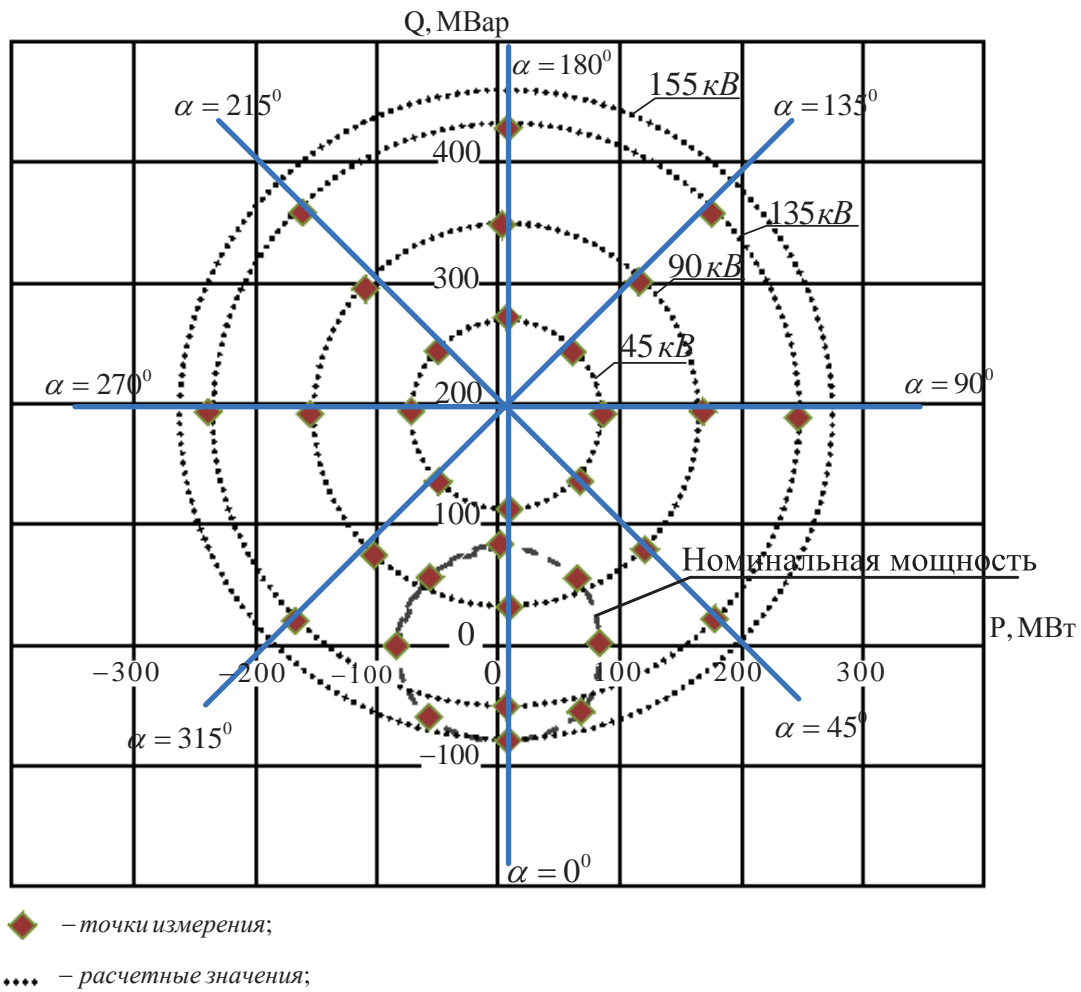
жимы генерации, потребления активной и реактивной мощности получены при различных напряжениях, формируемых на трехфазной стороне ПН. Центр окружности смещен по активной мощности, что определяется потерями в преобразовательном блоке [19].

Измеренные значения составляющих мощности соответствуют значениям для данных уровней напряжений, рассчитанным по выражению [20]:

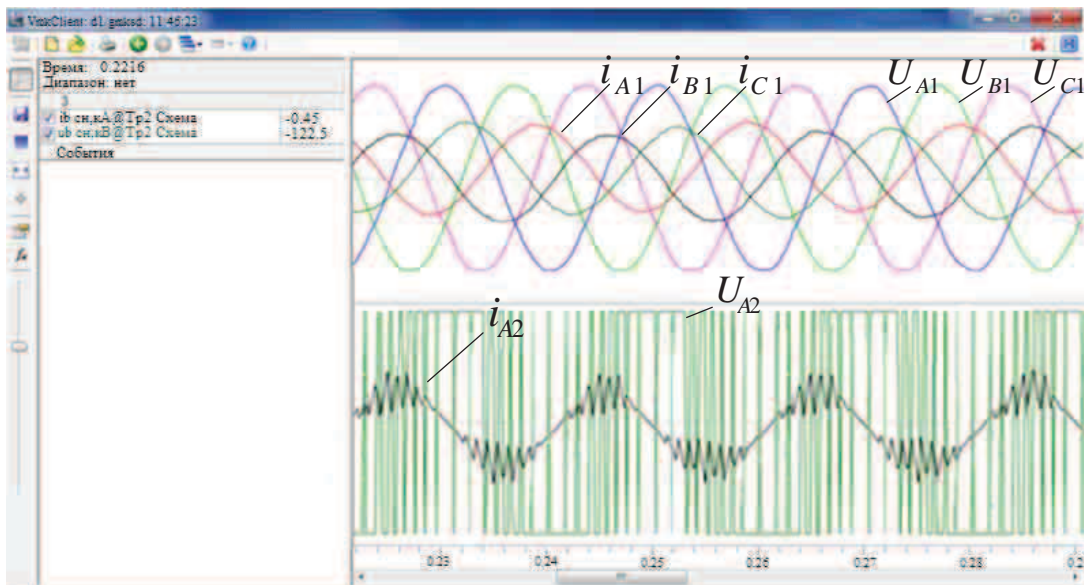
$$S = 3 \frac{U_c U_{сп}}{X} \sin(\alpha) - j3 \left( \frac{U_c U_{сп}}{X} \cos(\alpha) - \frac{U_c^2}{X} \right) = P - jQ,$$

где  $P$  и  $Q$  – активная и реактивная составляющие мощности,  $\alpha$  – угол между векторами напряжения сети  $U_c$  и статического преобразователя  $U_{сп}$ ,  $X$  – сопротивление между точками с напряжениями  $U_c$  и  $U_{сп}$ .

Полученные результаты исследования экспериментального образца СГП ВППТ подтверждают его работоспособность. Благодаря возможности объединения любого количества СГП на физическом уровне и их централизованного управления



а



б

Рис. 8. PQ характеристика (а) и осциллограммы мгновенных значений фазных токов и напряжений ПН (б), где  $i_{A1}$ ,  $U_{A1}$ ,  $i_{A2}$ ,  $U_{A2}$  – токи и напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора (рис. 7)



на уровне сервера дальнейшая задача разработки и тестирования многоуровневых преобразователей и многотерминальных ВППТ будет заключаться лишь в реализации соответствующих цифровых моделей СУРЗА.

### Выводы

Разработанная гибридная модель ВППТ обладает функциональными возможностями, необходимыми для исследования взаимного влияния ВППТ и больших систем переменного тока на базе ВМК РВ ЭЭС. Благодаря обеспечению реального времени моделирования и возможности взаимодействия модели с внешними устройствами и системами на физическом и информационном уров-

нях она может использоваться не только для задач анализа работы энергосистем, но и для разработки, настройки и тестирования СУРЗА ВППТ, а также новых типов защит и систем управления ЭЭС переменного тока, в том числе распределенных. Дальнейшее развитие работы предусматривает реализацию модели СУРЗА и проверку экспериментальных исследований модели ВППТ в составе сложной ЭЭС, а также анализ работы модели при подключении к ней микропроцессорных устройств СУРЗА.

*Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы. Соглашение № 14.В37.21.1506, от 20 сентября 2012 года.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 февраля 2008 г. № 215-р «О Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2020 года» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2008. – № 11. – 260 с.
2. Mitra P., Vinothkumar K., Lidong Z. Dynamic Performance Study of a HVDC Grid Using Real-Time Digital Simulator // IEEE Workshop on Complexity in Engineering. – 2012. – P. 1–6.
3. Baran M., Mahajan N. Overcurrent protection on voltage sourced converter based multiterminal DC distribution systems // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – V. 22. – № 1. – P. 406–412.
4. Anderson P.M. Power System Protection. – New York: IEEE Press, 1999. – 1331 p.
5. Study on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line fault / A. Li, Z. Cai, Q. Sun, X. Li, D. Ren, Z. Yang // Power & Energy Society General Meeting. – Calgary, Canada, 26–30 July 2009. – P. 1–5.
6. Candelaria J., Park J.D. VSC-HVDC system protection: A review of current methods // Proc. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE). – Phoenix, Arizona, 20–23 March 2011. – P. 1–7.
7. Jovcic D. Interconnecting offshore wind farms using multiterminal VSC-based HVDC // Power Engineering Society General Meeting, IEEE. – Montreal, Que., 18–22 June 2006. – P. 1–7.
8. Franck C.M. HVDC circuit breakers: A review identifying future research needs // IEEE Trans. Power Del. – 2011. – V. 26. – № 2. – P. 998–1007.
9. Tang L., Ooi B.-T. Locating and isolating DC faults in multiterminal DC systems // IEEE Trans. Power Del. – 2007. – V. 22. – № 3. – P. 1877–1884.
10. Ahmed W., Manohar P. DC Line Protection for VSC-HVDC System // Proc. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems. – Bangalore, Indian, 16–19 December 2012. – P. 1–6.
11. Problems and Solutions for AC Transmission Line Protection under Extreme Conditions caused by Very Long HVDC Cables / S. Hoist, I. Brncic, D. Shearer, R. Mangelred, K. Korjeman // Study Committee B5 Colloquium. – 2007. – P. 1–8.
12. Wide-Area Robust Coordination Approach of HVDC and FACTS Controllers for Damping Multiple Interarea Oscillations / Y. Li, Ch. Rehtanz, S. Rüberg, L. Luo, Y. Cao // IEEE Transactions On Power Delivery. – 2012. – V. 27. – № 3. – P. 1096–1105.
13. Dacai Qi. Defense schema against large disturbances in China Southern Power Grid // Electra. – 2011. – № 257. – P. 4–16.
14. Li W., Xiao X. Electromagnetic and Electromechanical Transient Hybrid Real-time Simulation Technology Based on RTDS Used in Subsynchronous Resonance Research // International Conference on Power System Technology (POWERCON). – Hangzhou, China, 24–28 October 2010. – P. 1–6.
15. Yun L., Yonghu Y., Nanchao Z. Establishment of the HVDC digital-analogical hybrid simulation system // International conference on Electrical Engineering (ICEE). – YongPyong Resort, Korea, 9–13 July 2006. – P. 1–8.
16. Testing Firing Pulse Controls for a VSC Based HVDC Scheme with a Real Time Timestep < 3  $\mu$ s / P.A. Forsyth, T.L. Maguire, D. Shearer, D. Rydmell // International Conference on Power Systems Transients. – Kyoto, Japan, 2–6 June 2009. – P. 1–5.
17. RTDS® Simulation of small signal stability controller of STATCOM / D. Sreenivasarao, S.P. Gupta, G.N. Pillai, P.V. Balasubramanyam // XXXII National Systems conference. – Roorkee, India, 17–19 December 2008. – P. 241–244.
18. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем / А.С. Гусев, Ю.В. Хрущев, С.В. Гурин, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый // Электричество. – 2009. – № 12. – P. 5–8.
19. The steady state characteristics of a StatCom with energy storage / Zh. Yang, Ch. Shen, L. Zhang, M.L. Crow // Power Engineering Society Summer Meeting. – Seattle, USA, 16–20 July 2000. – P. 669–674.
20. Static synchronous compensators (STATCOM): a review / B. Singh, R. Saha, A. Chandra, K. Al-Haddad // IET Power Electronics. – 2009. – № 4. – V. 2. – P. 297–324.

*Поступила 23.09.2013 г.*

UDC 621.311.001.57

## DEVELOPMENT OF HYBRID MODELS OF HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT SYSTEMS FOR COMPREHENSIVE ANALYSIS OF LARGE POWER SYSTEMS

**Anton V. Prokhorov,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: antonprokhorov@tpu.ru

**Aleksey S. Vasilev,**

Cand. Sc., Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: vasilevas@tpu.ru

**Nikolay Yu. Ruban,**

Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: rubanny@tpu.ru

**Ruslan A. Ufa,**

Tomsk Polytechnic University,  
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 30. E-mail: hecn@tpu.ru

*The relevance of the research is based on the need to develop new methods and tools for obtaining information required to evaluate mutual influence between high voltage direct and alternating current systems.*

**The research object:** the development of hybrid model of high-voltage direct current system based on voltage-source converter allowing real time co-simulation of its power equipment, control and relay protection systems.

**The research methods:** analytical methods; theory of discretization methods; control theory; theory of accuracy and sensitivity of computing devices; hybrid simulation approach; software and hardware simulation tools – Multisim 11, Matlab Simulink and Hybrid Real Time Power System Simulator.

**The results:** The authors have developed the hybrid model of high voltage direct current system based on voltage source converter in accordance with the formulated requirements for the mathematical models of high voltage direct current systems and computational tools; the obtained results of the model testing confirm the achievement of the required properties of the model and the effectiveness of the proposed solutions.

### Key words:

High voltage direct current systems, simulation, protective relaying and automation, real time systems, power electronics.

### REFERENCES

- Rasporyazhenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 22 fevralya 2008 g. № 215-r. o Generalnoy skheme razmeshcheniya obektov elektroenergetiki do 2020 goda [The order of the Government of the Russian Federation dated February 22, 2008, no. 215-p. Master Plan for electricity facilities allocation up to 2030]. *Sobranie zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of Laws of the Russian Federation], 2008, no. 11.
- Mitra P., Vinothkumar K., Lidong Z. Dynamic Performance Study of a HVDC Grid Using Real-Time Digital Simulator. *IEEE Workshop on Complexity in Engineering*, 2012. pp. 1–6.
- Baran M., Mahajan N. Overcurrent protection on voltage sourced converter based multiterminal DC distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 406–412.
- Anderson P.M. *Power System Protection*. New York, IEEE Press, 1999. 1331 p.
- Li A., Cai Z., Sun Q., Li X., Ren D., Yang Z. Study on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line fault. *Power & Energy Society General Meeting*. Calgary, Canada, 26–30 July 2009. pp. 1–5.
- Candelaria J., Park J.D. VSC-HVDC system protection: A review of current methods. *Proc. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE)*. Phoenix, Arizona, 20–23 March 2011. pp. 1–7.
- Jovcic D. Interconnecting offshore wind farms using multiterminal VSC-based HVDC. *Power Engineering Society General Meeting. IEEE*. Montreal, Que., 18–22 June 2006. pp. 1–7.
- Franck C.M. HVDC circuit breakers: A review identifying future research needs. *IEEE Trans. Power Del.*, 2011, vol. 26, no. 2, pp. 998–1007.
- Tang L., Ooi B.-T. Locating and isolating DC faults in multiterminal DC systems. *IEEE Trans. Power Del.*, 2007, vol. 22, no. 3, pp. 1877–1884.
- Ahmed W., Manohar P. DC Line Protection for VSC-HVDC System. *Proc. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*. Bangalore, Indian, 16–19 December 2012. pp. 1–6.
- Hoist S., Brncic I., Shearer D., Mangelred R., Korjeman K. Problems and Solutions for AC Transmission Line Protection under Extreme Conditions caused by Very Long HVDC Cables. *Study Committee B5 Colloquium*, 2007. pp. 1–8.
- Li Y., Rehtanz Ch., Rüberg S., Luo L., Cao Y. Wide-Area Robust Coordination Approach of HVDC and FACTS Controllers for Damping Multiple Interarea Oscillations. *IEEE Transactions On Power Delivery*, 2012, vol. 27, no. 3, pp. 1096–1105.
- Dacai Qi. Defense schema against large disturbances in china southern power grid. *Electra*, 2011, no. 257, pp. 4–16.
- Li W., Xiao X. Electromagnetic and Electromechanical Transient Hybrid Real-time Simulation Technology Based on RTDS Used in Subsynchronous Resonance Research. *International Conference*

- on *Power System Technology (POWERCON)*. Hangzhou, China, 24–28 October 2010. pp. 1–6.
15. Yun L., Yonghu Y., Nanchao Z. Establishment of the HVDC digital-analogical hybrid simulation system. *International conference on Electrical Engineering (ICEE)*. YongPyong Resort, Korea, 9–13 July 2006. pp. 1–8.
  16. 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, 2–6 June 2009. pp. 1–5.
  17. Sreenivasarao D., Gupta S.P., Pillai G.N., Balasubramanyam P.V. RTDS® Simulation of small signal stability controller of STATCOM. *XXXII National Systems conference*. Roorkee, India, 17–19 December 2008. pp. 241–244.
  18. Gusev A.S., Hrushchev Yu.V., Gurin S.V., Svechkarev S.V., Plodisty I.L. Vserezhimny modeliruyushchiy kompleks realnogo vremeni elektroenergeticheskikh sistem [Hybrid Real Time Simulation of Electrical Power Systems]. *Electrical Technology Russia*, 2009, no. 12, pp. 5–8.
  19. Yang Zh., Shen Ch., Zhang L., Crow M.L. The steady state characteristics of a StatCom with energy storage. *Power Engineering Society Summer Meeting*. Seattle, USA, 16–20 July 2000. pp. 669–674.
  20. Singh B., Saha R., Chandra A., Al-Haddad K. Static synchronous compensators (STATCOM): a review. *IET Power Electronics*, 2009, vol. 2, no. 4, pp. 297–324.

УДК 621.313

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

**Встовский Алексей Львович,**

канд. техн. наук, профессор кафедры электротехнических комплексов и систем факультета энергетики Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: val\_1942@mail.ru

**Федий Константин Сергеевич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и систем факультета энергетики Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: fediy\_k@mail.ru

**Архипцев Максим Геннадьевич,**

аспирант кафедры электротехнических комплексов и систем факультета энергетики Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: maximus\_09@mail.ru

**Спирин Евгений Анатольевич,**

ассистент кафедры конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств механико-технологического факультета Политехнического института Сибирского Федерального университета, Россия, 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26, ауд. Г2–33. E-mail: spirin-evgeniy@yandex.ru

*Показаны возможности использования асинхронной машины в качестве генератора автономной энергоустановки для энергообеспечения для северных регионов России. Представлены основные достоинства применения асинхронных машин в генераторном режиме для обеспечения питанием потребителей, как переменного трехфазного тока, так и постоянного тока через выпрямительные устройства. Представлена разработанная система управления асинхронным генератором для возобновляемых источников энергии. Такая система простая в эксплуатации, сравнительно недорогая, обладает высоким быстродействием и позволяет регулировать параметры напряжения в широком диапазоне нагрузки. С помощью эксперимента проведен анализ системы автоматического управления асинхронным генератором. Показана целесообразность использования автоматического регулятора напряжения с линейными конденсаторами в качестве регулирующего органа.*

**Ключевые слова:**

*Асинхронный генератор, автономный генератора, система управления, микроГЭС, конденсаторные батареи.*