

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Госзадание «Наука» № FSWW-2020-0017.

Литература

1. Аскарлов А. Б., Суворов А. А., Андреев М. В. Применение всережимного моделирующего комплекса для энергосистем с распределенной генерацией //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23. – №. 1 (144). – С. 75-89.
2. Ашинянц С. А. Некоторые тенденции развития мировой электроэнергетики //Электрические станции. – 2021. – №. 12. – С. 53-57.
3. Бердин А. С. и др. Обзор методов определения параметров моделей синхронных генераторов //Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20. – №. 4. – С. 103-111.
4. Климова, Т. Г. Исследование автоматических регуляторов возбуждения синхронного генератора с различными сигналами каналов стабилизации по частоте [Текст] / Т. Г. Климова, О. О. Николаева // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2021. – № 2 (65). – С. 110–115.
5. Фролов М. Ю., Фишов А. Г., Эрдэнэбат Э. Совместимость динамических характеристик традиционной и электронной генерации в электроэнергетических системах //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23. – №. 6 (149). – С. 1175-1186.

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭНЕРГОРАЙОНАХ С ОБЪЕКТАМИ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Аскарлов А.Б., Суворов А.А., Андреев М.В.**

Научный руководитель профессор Гусев А.С.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

В настоящий момент для обеспечения электроснабжения объектов нефтегазовой промышленности, многие из которых зачастую являются значительно удаленными от сетей централизованного электроснабжения, рассматриваются или уже применяются различные генерирующие установки (ГУ) на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), преимущественно основанные на использовании кинетической энергии ветра [2]. Причем также может подразумеваться применение гибридных систем электроснабжения [1]. Одной из особенностей современных ГУ на базе ВИЭ является применение в их составе силовых преобразователей (СП) на основе силовой полупроводниковой техники, с помощью которых осуществляется подключение ГУ к электрической сети. При этом помимо типа и технических характеристик СП важным аспектом является его система автоматического управления (САУ), которая определяет динамику его функционирования в целом. За счет системы управления определяются режим работы ГУ на базе ВИЭ, возможности ее участия в регулировании режима электрической сети (напряжения и частоты), характер динамического отклика при возмущениях, возможности работы как в изолированном (островном) режиме, так и параллельно с внешней сетью. Однако классический подход к формированию структуры САУ СП не всегда позволяет добиться желаемого результата [5]. Классическая САУ подразумевает, что объекты ВИЭ, как правило, работают в режиме выдачи максимально возможной активной мощности, при этом синхронизация с сетью осуществляется с помощью замкнутого контура регулирования фазы (ЗКРФ). Первое приводит к тому, что отсутствует какой-либо резерв активной мощности, следовательно, исключается возможность участия в регулировании частоты, а также, что подобные объекты генерации не используются при регулировании напряжения в электрической сети. Второе свойство классической САУ определяет, что СП работает в режиме ведомого сетью, поскольку входным сигналом для ЗКРФ является трехфазное напряжение в точке подключения ГУ к сети, на основе которого формируется опорное значение угла напряжения, необходимое для синхронизации. При этом существует проблематика обеспечения работы ГУ в изолированном режиме при использовании ЗКРФ, а также устойчивое функционирование ЗКРФ в условиях слабых сетей и при больших возмущениях. Последнее связано со значительной чувствительностью ЗКРФ к резким изменениям величины и фазы напряжения или их колебаниям.

В то же время при рассмотрении задачи осуществления надежного и бесперебойного электроснабжения объектов нефтегазовой промышленности необходимо обеспечивать устойчивую работу ГУ как при параллельной работе с внешней сетью, так и в изолированном режиме, а также возможность регулирования данными установками напряжения и частоты в электрической сети. Одним из наиболее перспективных решений в данном направлении является применение альтернативного подхода к формированию структуры САУ СП. Обозначенный подход заключается в переходе режима работы СП из ведомого в ведущий. При этом для реализации САУ с таким свойством может использоваться стратегия управления на основе виртуального синхронного генератора (ВСГ). С помощью СП, работающего в режиме ведущего, становится возможным значительно расширить перечень сетевых функций, которые он способен выполнять. Также в подобной САУ возможно управление ГУ как при параллельной работе с внешней энергосистемой, так и в изолированном или островном режиме без каких-либо значительных изменений в структуре или параметрах САУ СП. В настоящий момент предлагаются различные структуры САУ на основе ВСГ [4], однако для данных решений общим является использование жесткой последовательной структуры и направленности сигналов, которая копирует традиционные синхронные генераторы (СГ). В результате последовательной структуры воспроизводимая виртуальная машина становится ответственной за

формирование результирующих значений по активной и реактивной мощности ГУ. Данный факт приводит к снижению как запасов устойчивости ГУ, так и ее возможностей при регулировании напряжения и частоты сети.

В данной работе предлагается САУ СП на основе ВСГ с параллельной структурой (рис. 1), которая является свободно конфигурируемой с точки зрения добавления необходимых регуляторов на разные уровни управления, а также потенциально возможных изменений в уравнения виртуальной синхронной машины для улучшения описания ее электромеханических и электромагнитных характеристик. Предлагаемая параллельная структура САУ реализуется на основе подхода, предложенного в [3], и схожа с классическим представлением структуры ВСГ, управляемой по току, но с более детальным учетом электромеханических и электромагнитных характеристик СГ. Подобная детализация позволяет: 1) учесть уравнение движения ротора в структуре ВСГ, что исключает необходимость использования ЗКРФ для синхронизации ГУ с сетью; 2) ввести виртуальную демпферную обмотку в модель СГ для осуществления эффективного демпфирования возникающих колебаний по аналогии с традиционной СГ; 3) осуществить объединение инерционного и регуляторного отклика на нижнем уровне управления, что в итоге улучшает динамические характеристики ГУ при участии в регулировании частоты; 4) ввести регулятор напряжения с каналами стабилизации на внешний уровень управления, что дополнительно позволяет разделить управление активной и реактивной мощностью, а также улучшить демпфирующие свойства ГУ. В качестве примера на рисунке 2 приведены результаты функционирования ГУ с предлагаемой структурой САУ СП. Исследования проводились на имитационной модели в программно-аппаратном комплексе моделирования в эквивалентной двухмашинной схеме. Для оценки динамического отклика ГУ осуществлялось скачкообразное снижение частоты (рис. 2а) и напряжения (рис. 2б) сети. При изменении частоты также осуществлялась оценка инерционного отклика ГУ за счет изменения постоянной инерции виртуального ротора  $T_J$  в уравнении движения. В результате с увеличением  $T_J$  значительно уменьшалась скорость снижения частоты, что говорит о возможности гибкой настройки САУ в рамках обеспечения необходимого профиля изменения частоты при возмущениях. Также с помощью изменения коэффициента статизма  $s$  регулятора частоты просадка частоты в случае больших значений  $T_J$  может быть уменьшена.



Рис. 1. САУ СП на основе ВСГ с параллельной структурой

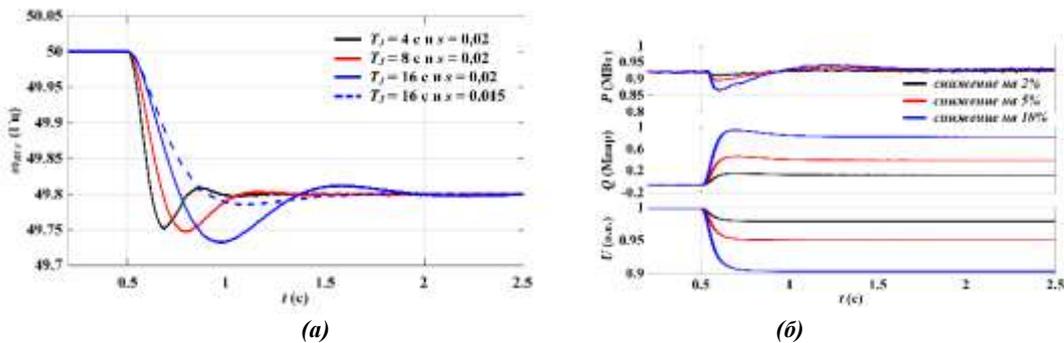


Рис. 2. Осциллограммы процессов в случае снижения: а – частоты, б – напряжения

При изменении напряжения сети видно, что с помощью предлагаемой структуры САУ осуществляется быстрая выдача реактивной мощности ГУ без каких-либо колебаний и с незначительным

перерегулированием, которое в свою очередь позволяет несколько уменьшить скорость снижения напряжения. Также на рис. 2б отражен характер изменения активной мощности, из которого можно сделать вывод, что в данной САУ присутствует достаточно слабая взаимозависимость в управлении активной и реактивной мощностью.

Исходя из вышесказанного, разработанная структура САУ с параллельной структурой для ГУ на базе ВИЭ обладает рядом преимуществ в сравнении с классическими САУ на основе ВСГ. При этом становится возможным выполнение широкого спектра необходимых сетевых функций при работе ГУ как параллельно с внешней энергосистемой, так и в изолированном режиме. Применение подобной САУ в перспективе позволяет реализовывать схемы надежного и бесперебойного электроснабжения объектов нефтегазовой промышленности, что является актуальным по мере перехода к безуглеродным или низкоуглеродным источникам энергии и системам накопления электрической энергии.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00129.*

#### Литература

1. Обухов С. Г., Ахмед И. Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20. – №. 2. – С. 64-76.
2. Разживин И. А. и др. Оценка влияния ветроэлектростанций на изменение суммарной инерции электроэнергетической системы // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2021. – Т. 25. – №. 2 (157). – С. 220-234.
3. Mandrile F., Carpaneto E., Bojoi R. Grid-feeding inverter with simplified virtual synchronous compensator providing grid services and grid support // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Т. 57. – №. 1. – С. 559-569.
4. Rathnayake D. B. et al. Grid Forming Inverter Modeling, Control, and Applications // IEEE Access. – 2021.
5. Zuo Y. et al. Performance assessment of grid-forming and grid-following converter-interfaced battery energy storage systems on frequency regulation in low-inertia power grids // Sustainable Energy, Grids and Networks. – 2021. – Т. 27. – С. 100496.

### ТЕПЛОБМЕН ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ КАПЛИ ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ В ПРОЦЕССЕ СОУДАРЕНИЯ С ТВЕРДОЙ СТЕНКОЙ

**Ашихмин А.Е., Семёнова А.Е., Фёдоров В.С.**

Научный руководитель М.В. Пискунов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

Взаимодействие капли с нагретой поверхностью является широко исследованным направлением, однако, многие вопросы до сих пор остаются неизученными, например, теплообмен при пузырьковом кипении гетерогенных капель. При изотермическом взаимодействии капля чистых жидкостей результат взаимодействия определяют несколько основных параметров: скорость капли в момент соударения с поверхностью, структура и смачиваемость поверхности, а также физические свойства жидкости (плотность, вязкость, поверхностное натяжение) [3]. При неизотермическом соударении капли с поверхностью, помимо параметров взаимодействия и свойств поверхности, градиент температуры между жидкостью и поверхностью взаимодействия играет важную роль, влияя как на динамику соударения, так и на характеристики теплообмена. Режим пузырькового кипения начинается от начала (точки) кипения жидкости  $T_{sat}$ , которое происходит при температуре стенки ( $T_w$ ) немного большей, чем  $T_{sat}$ , до точки критического теплового потока, которая соответствует самому непродолжительному времени испарения капли.

В большинстве известных работ рассматриваются однородные чистые жидкости. Однако многие современные технологии основаны на применении многокомпонентных жидкостей, например, такие как: покрытие функциональных поверхностей, закаливание металлов, впрыск топлива в камеру сгорания, окрашивание поверхностей, биопечать [1]. Поэтому актуальными задачами являются исследования с использованием многокомпонентных жидкостей с разветвленной межфазной границей. Ярким примером такой жидкости можно назвать эмульсию с большим количеством диспергированных капель.

Анализ литературы показывает, что кипение и испарение капель многокомпонентных жидкостей остается малоисследованным [2]. Поэтому целью данной работы является оценка влияния динамики взаимодействия капли топливной эмульсии с твердой нагретой поверхностью на теплообмен при пузырьковом кипении.

В качестве исследуемых жидкостей выбраны н-декан, дистиллированная вода и эмульсии на их основе. Вода является низкокипящим компонентом топливных эмульсий, типично используемым в качестве дисперсной фазы при проведении экспериментальных исследований с рассматриваемым типом жидкостей. Создание обратной эмульсии из несмешивающихся жидкостей осуществлялось с помощью эмульгатора Спан 80. Выбор данного ПАВ обуславливался тем, что Спан 80 является маслорастворимым амфифильным соединением, способным стабилизировать эмульсии типа: «вода-в-масле», т.е. обратные эмульсии. Компонентный состав эмульсий представлен в таблице 1. Для определения кинетической стабильности эмульсии термостатировались в течение суток при комнатной температуре. Образцы, представленные в таблице 1, являются устойчивыми к фазовому разделению в течение заявленного периода.