

роботизированных сервисных платформ в свою очередь выполняет движение к базису наземному центру управления.

Таким образом, в ходе выполнения работы были проанализированы основные этапы обслуживания и пополнения энергетических ресурсов беспилотных летательных аппаратов при проведении целевой задачи по аэрофотосъемке нефтегазового месторождения. Алгоритмические модели управления гетерогенным роботизированным комплексом позволяют осуществить достижение целевой задачи по выполнению аэрофотосъемки на нефтегазовых месторождениях с учетом максимальной автономности БПЛА [6].

#### Литература

1. Кремлёв И.А. Применение гетерогенных роботов при проведении инженерных изысканий на нефтегазовых месторождениях // Проблемы геологии и освоения недр. Труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета – Томск, 2021. – Том № 2. – С. 176 – 177.
2. Попова Л.Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в условиях Крайнего Севера//Молодой ученый. – Казань, 2016. – № 24. – С. 105 – 108.
3. Прокопьев И.В., Бецов А.В. Структура системы управления беспилотных летательных аппаратов специального назначения//Надежность и качество. – Пенза, 2012. – № 1. – С. 15 – 20.
4. Саяпова В.В., Уразбахтин Р.Р. Мониторинг химических объектов с помощью беспилотных летательных аппаратов//Современные научные исследования и разработки. – Астрахань, 2017. – № 4. – С. 260 – 262.
5. Хан В.Д., Кугаевский В.И. Сравнительный анализ точности геодезических работ при их выполнении с помощью БПЛА "Gatewing X100" и наземной сканирующей установки "Riegl VZ-1000"/Интерэкспо Гео-Сибирь. – Новосибирск, 2013. – № 3. – С. 111 – 115.
6. Шихмагомедова С.М. Использование беспилотных летательных аппаратов в нефтегазовой отрасли//Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург, 2017. – № 6-2. – С. 48 – 50.

## РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

**Кренева А.Р., Стружина В.Д., Разживин И.А.**

Научный руководитель доцент И.А. Разживин

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

Согласно статистическим данным потребление электроэнергии в мире стремительно увеличивается и за последние 15 лет прирост составил примерно 35-40%. В нашей стране, в соответствии с данными Росстата, годовой прирост в среднем составляет 1,5 %, а общий прирост за последние 10 лет – 18 %. Одной из основных причин, сдерживающих интеграцию ВИЭ, является изменение при этом режимов работы электроэнергетической системы, что в свою очередь оказывает существенное влияние на функционирование устройств релейной защиты и автоматики. В данной работе рассмотрим основные проблемы обеспечения корректного функционирования защиты при интеграции ВИЭ в электрическую сеть.

### **Функционирование релейной защиты при наличии ВИЭ в электрической сети**

Рассмотрим варианты конфигурации распределительных сетей, а также основные проблемы обеспечения корректного функционирования защиты при внедрении ВИЭ [1, 2]:

#### **1. Нечувствительность защиты.**

Для синхронных ВИЭ ток КЗ может превышать расчетный номинальный ток в 5-6 раз. Для инверторные ВИЭ на основе фотоэлектрических элементов небольшой ток КЗ находится в диапазоне от 1.1 до 2 раз от номинального тока. Данные значения могут оказаться недостаточными для срабатывания МТЗ для схем, как показано на рисунке 1.

2. **Ложное срабатывание или взаимное срабатывание.** Крупномасштабное внедрение ВИЭ в распределительные сети приводит к тому, что они создают двунаправленный ток КЗ на большинстве питающих линий. Ненаправленная МТЗ не может обеспечить селективную защиту для таких сетей. Как показано на рисунке 2, при КЗ, реле R2 может сработать раньше реле R1.

В больших взаимосвязанных распределительных сетях некоторые реле могут чувствовать уровень тока, превышающий уставку, и срабатывать до того, как сработает предыдущее реле, что приводит к отключению большей части сети.

3. **Проблемы секционирования.** В том случае, если уровень тока КЗ выше уставки R2, то R2 работает и изолирует ВИЭ с ее нагрузкой. Небаланс мощности в изолированной сети может привести к её неустойчивой работе.

4. **Проблемы с автоматикой повторного включения.** В тот момент, когда повреждение частично отключено со стороны установки АПВ, как показано на рисунке 4, оно все еще питается от ВИЭ. Создаваемый ВИЭ ток короткого замыкания может стать причиной возникновения электрической дуги через выключатель АПВ.

5. **Неселективность действий.** Неправильные действия защит вблизи нагрузки ведут к ложному срабатыванию защит по направлению к источникам питания.

### **Особенности релейной защиты сетей с ВУЭ**

В силу хаотичности выработки электроэнергии ВЭУ, важным фактом в сети является баланс активной мощности. При резких изменениях ветровой нагрузки, приводящих к изменению активной мощности, крупные

ВЭС (мощность которых соизмерима с мощностью энергосистемы) могут оказывать влияние на частоту в сети. Данную особенность необходимо учитывать при подключении ВЭС к шинам ЭЭС, с целью заблаговременных расчетов статической устойчивости ЭЭС при различных вариантах подключения.

Устройства и оборудование в составе ВЭС имеют собственные требования к защите в зависимости от типа генератора ВЭУ и наличия преобразователя, конфигурации коллекторной системы и т.д. Для ЭЭС с ВЭУ нет универсальной методики выбора устройств и уставок релейной защиты. Каждый случай должен быть детально проработан, смоделирован и проверен. Наиболее распространенными видами ВЭУ являются ветряки 3-го и 4-го типа: ВУЭ на основе асинхронного генератора с двойным питанием и ВЭУ с синхронным генератором с постоянными магнитами. Для режима работы ВЭУ 3 и 4 типа, а, следовательно, и для ЭЭС в целом опасными являются несимметричные (одно- и двухфазные) КЗ. В силу небольшого тока КЗ, относительно номинального тока ВЭУ, они могут быть нечувствительны органами релейной защиты и вызывать тяжелые последствия для генераторов ВЭУ. Так, к примеру, для ВЭУ 3 типа в связи с возникновением напряжения обратной последовательности (которое вращается в противоположенном направлении вращения ротора), возникает скольжения около 2 о.е. Из-за высокого значения напряжения даже небольшие значения напряжения обратной последовательности статора могут вызвать в роторе напряжение, превышающее напряжение шины постоянного тока. В отличие от затухающего переходного процесса, вызванного симметричным трехфазным КЗ, напряжение обратной последовательности будет продолжать существовать до тех пор, пока не будет устранено несимметричное КЗ. Таким образом, если дисбаланс достаточно высок, ток ротора будет продолжать увеличивать напряжение на шине постоянного тока преобразователя, что может привести к ложной коммутации силовых ключей. В ходе изучения материала был сделан вывод, о том, что существующие методы защиты сети либо ограничивают внедрение нового оборудования, либо сложно реализуемы, либо недостаточно гибкие. Как следствие, можно говорить о необходимости разработки новых методов и средств для настройки РЗ. Одно из главных условий решения проблемы, названной выше, - возможность анализа работы основных элементов схем устройств РЗ в конкретных режимах работы сети. Это позволит оценивать процессы изменения токов и напряжений в защищаемых объектах и применяемых устройствах релейной защиты. Уже после оценки процессов изменения, можно будет формировать параметры схожие с реальными условиями функционирования настройки РЗ. Обеспечить указанную возможность в совокупности с адекватным симулятором ЭЭС позволяют детализированные математические модели РЗ. После анализа данных моделей уже можно рассматривать дальнейшее внедрение изученных и пригодных методов защиты в сети с ВИЭ.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант МК-3249.2021.4*

#### Литература

1. Де Рензо Д. Ветроэнергетика. – Рипол Классик, 1982.
2. Венге К. и др. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика. – 2010.

### **ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ И МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ**

**Малькова Я.Ю., Уфа Р.А., Разживин И.А.**

Научный руководитель, доцент Р.А. Уфа

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

Особенности функционирования объектов генерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), например, солнечных и ветряных электростанций, такие как непостоянство выработки электроэнергии, обусловленное суточными и сезонными погодными изменениями, а также несоответствие периодов максимальной генерации и потребления электроэнергии, определяют необходимость иметь в горячем резерве предсказуемую маневренную генерацию (например, дизельный генератор) или же систему накопления энергии (СНЭ), в частности, водородный накопитель. Реализация совместной установки объекта возобновляемой генерации и СНЭ является более предпочтительной в контексте актуальной климатической повестки. Установке данных объектов в энергосистему (ЭС) предшествует осуществление выбора их оптимальных параметров, в том числе, мощности и места подключения, в соответствии с оказываемым влиянием на режим работы ЭС в целом.

Процедура определения оптимальных параметров объекта ВИЭ была представлена авторами ранее, например, в [4]. В рамках же данной статьи остановимся более подробно на методике выбора параметров совместно устанавливаемой с объектом ВИЭ СНЭ. Предположим, что при рассмотрении расчетного сценария, описанного в [7], объект ВИЭ мощностью 718 кВт был установлен в узел 3 исследуемой схемы (15-узловая схема IEEE [2]).

Далее необходимо составить суточный график суммарной нагрузки схемы и генерации данного объекта ВИЭ. Ввиду того, что исследуемая схема является типовой, и отсутствуют сведения о характере потребителей, размещенных в ее узлах, для всех узлов принят обобщенный характер нагрузки [6].