

Система автоматического восстановления электроснабжения сетей 6–10 кВ на базе ПТК «Цифровой РЭС»

Система автоматического восстановления электроснабжения (САВС) сетей 6–10 кВ представляет собой программно-аппаратный комплекс для автоматизации диспетчерского управления распределительными сетями 6–10 кВ в нормальных и послеаварийных режимах, а также в режиме однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью. САВС обеспечивает определение аварийных участков, анализ топологии и выполнение процедуры автоматического восстановления питания потребителей.

Внедрение САВС позволяет достигнуть ряда целей по оптимизации функционирования электрических сетей.

Цели САВС

- Автоматизация – автоматическое определение поврежденного участка сети 6-10 кВ в любых режимах работы нейтрали и автоматическое восстановление питания потребителей.
- Надежность – сокращение времени восстановления электроснабжения после аварийного отключения, предотвращение ошибочных действий персонала (алгоритмы оперативной блокировки).
- Эффективность – снижение коммерческих потерь за счет контроля баланса электроэнергии, снижение технических потерь за счет перераспределения нагрузок, уменьшение недоотпуска электроэнергии, контроль пропускной способности линий.
- Снижение операционных затрат (ОРЕХ) при ликвидации аварий и переключениях за счет внедрения инновационных решений.
- Снижение капитальных вложений (CAPEX) за счет продления срока службы оборудования.

Задачи САВС

- Определение повреждений (вид аварии, участок) в сети 6-10 кВ.
- Автоматическая изоляция аварийного участка.
- Автоматическое восстановление питания неповрежденных участков сети.
- Измерение параметров электрической сети, контроль за состоянием коммутационных аппаратов и передача информации на сервер сбора данных

SCADA (ОИК) с целью определения режимов, состояния электрической сети и повышения наблюдаемости.

- Измерение и регистрация параметров качества электроэнергии на стороне 6-10 кВ и 0,4 кВ и передачей информации на сервер сбора данных SCADA (ОИК).
- Автоматизация учета электроэнергии на отходящих линиях 6-10 кВ РП и вводах 0,4 кВ ТП с целью контроля баланса распределения электроэнергии, выявления районов с завышенными техническими и коммерческими потерями.
- Использование в качестве каналов передачи данных сети провайдеров сотовой связи с возможностью резервирования и защиты информации.

Особенности САВС на базе ПТК «Цифровой РЭС»

Решение Инженерного центра «Энергосервис» отличают следующие особенности:

- гибкость, позволяющая адаптировать систему к сети любой топологии;
- простота расширения системы, отсутствие необходимости перенастройки контроллеров ТМ на действующих объектах при добавлении новых узлов;
- интеграция с ПО уровня SCADA любого производителя;
- быстрое определение поврежденного участка сети, его изоляция и восстановление электроснабжения потребителей;
- комплексная оценка состояния системы – верификация данных, исключение ложных срабатываний.

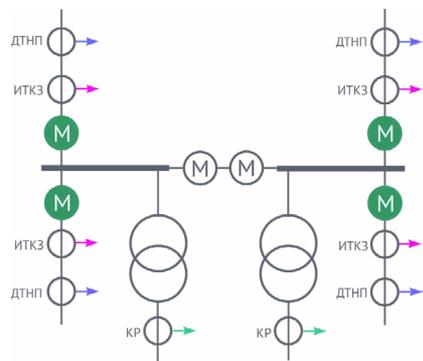
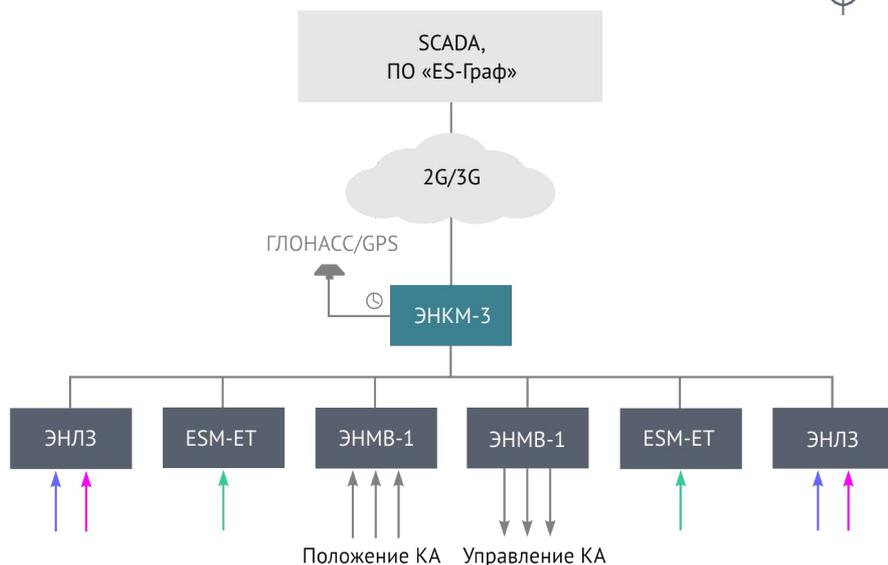


Рис. 1. САВС трансформаторной подстанции: упрощенная однолинейная схема (сверху) и структурная схема (снизу).

Обозначения:

- датчик тока нулевой последовательности
- индикатор тока короткого замыкания
- катушка Роговского



Описание структуры САВС

Структурная схема САВС на примере трансформаторной подстанции представлена на рисунке 1. САВС состоит из трех уровней.

1. Уровень сбора данных

На данном уровне осуществляется сбор информации о состоянии сети с помощью комплекса измерительного оборудования и контроль состояния коммутационных аппаратов. К функциям измерительного оборудования данного уровня относится контроль протекания токов междуфазных коротких замыканий (КЗ), токов нулевой последовательности (НП) в сети с изолированной, резистивно-заземленной и компенсированной нейтралью. В состав оборудования входят (рисунок 2):

- электромагнитный разборный трансформатор тока нулевой последовательности (ДТНП);
- однофазный электромагнитный индикатор тока короткого замыкания (ИТКЗ) с оптическим выходом;
- катушка Роговского, однофазный измерительный датчик тока (КР);
- лазерный датчик бесконтактного определения положения выключателя нагрузки 6-10 кВ.

Рис. 2. Оборудование уровня сбора данных



2. Уровень передачи и обработки данных

На данном уровне осуществляется обработка и передача на верхний уровень данных о состоянии сети и положении коммутационных аппаратов, получаемых от нижнего уровня. В состав оборудования данного уровня входит (рисунок 3):

- ЭНЛЗ – устройство фиксации КЗ посредством ИТКЗ с функцией измерения синхронизированных векторов токов НП посредством ДТНП;
- VMT – трансформатор напряжения для подключения ЭНЛЗ (модификаций ЭНЛЗ-1-U2 или ЭНЛЗ-1-U11) к обмотке 3U0 ИТН;
- ESM-ET – многофункциональное измерительное устройство, объединяющее в себе трехфазный многотарифный счетчик учета электроэнергии, прибор контроля качества электроэнергии и многофункциональный измерительный преобразователь. В качестве первичных преобразователей применяются размыкаемые катушки Роговского и емкостные (резистивные) делители напряжения или существующие трансформаторы напряжения 6-10 кВ;
- ЭНМВ-1 – модуль ввода-вывода дискретных сигналов для сбора телесигнализации, контроля положения коммутационной техники и выполнения телеуправления выключателями;
- ЭНКМ-3 – устройство сбора и передачи данных (УСД) для передачи информации по двум резервируемым каналам связи (3G/2G, Ethernet) со встроенными ГЛОНАСС/GPS приемником и 3G/2G модемом.

3. Уровень диспетчерского управления

К функциям данного уровня относятся сбор, визуализация и долгосрочное хранение информации на АРМ диспетчеров, формирование команд удаленного управления.

На данном уровне функционирует специализированный программный комплекс (ПК) «ЕС-Граф», осуществляющий выявление и локализацию ОЗЗ и КЗ. Для выполнения алгоритма анализа используются векторы тока и напряжения НП в виде пар измерений амплитуды и угла, а также дискретные значения состояния ИТКЗ. Протокол МЭК 60870-5-104 используется как в случае передачи данных для анализа от оборудования, так и для выдачи результатов анализа в программное обеспечение (ПО) уровня SCADA.

Рис. 3. Оборудование уровня передачи и обработки данных

ЭНЛЗ



VMT



ESM



ЭНМВ-1



ЭНКМ-3



Описание работы САВС на базе ПТК «Цифровой РЭС»

САВС применяется в сетях со сложной и разветвленной топологией.

САВС реализует различные сценарии восстановления электроснабжения: восстановления питания отключенной нагрузки к одному источнику, деление нагрузки между источниками питания, восстановление питания наиболее приоритетной нагрузки.

Система позволяет учитывать различные критерии выбора оптимального сценария: пропускную способность линии, ограничение мощности питающих центров, количество необходимых переключений, уменьшение потерь ЭЭ в режиме восстановления, категорию надежности электроснабжения потребителя.

Примеры работы САВС в сети с разветвлённой топологией (рисунок 4) приведены на рисунках 5-7.

САВС осуществляет:

- измерение и вычисление основных параметров сети: U_{ϕ} , U_L , I_{ϕ} , P , Q , S , $\cos\phi$, $\text{tg}\phi$;
- фиксацию КЗ и ОЗЗ в сети 6-10 кВ, включая сети с компенсированной нейтралью;
- определение поврежденных участков 6-10 кВ;
- определение положения коммутационных аппаратов ТП;
- расчет и контроль показателей качества электроэнергии: U_0 , U_1 , U_2 , K_U , K_{2U} , I_0 , I_1 , I_2 , K_I , K_{2I} , THD ;
- определение активной и реактивной мощности на присоединениях РП, ТП и на выводах 0,4 кВ трансформаторов ТП;
- учет активной и реактивной электроэнергии.

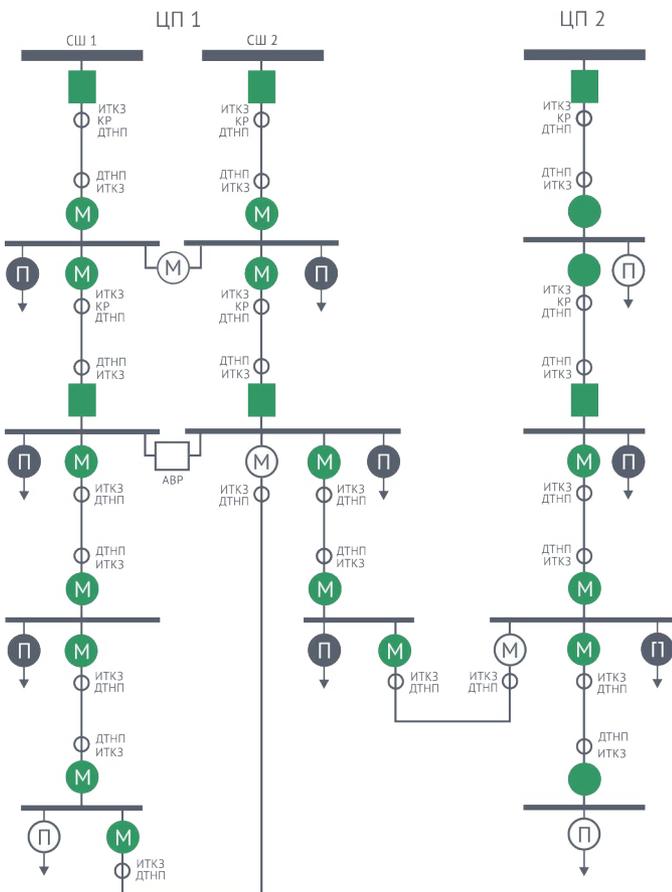


Рис. 4. Однолинейная схема электрических соединений сети в нормальном режиме

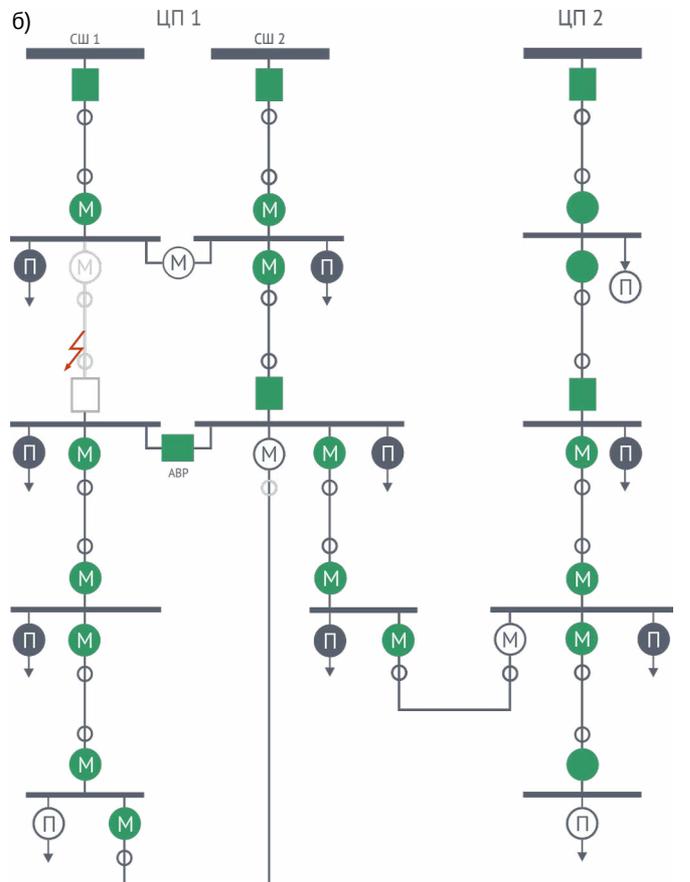
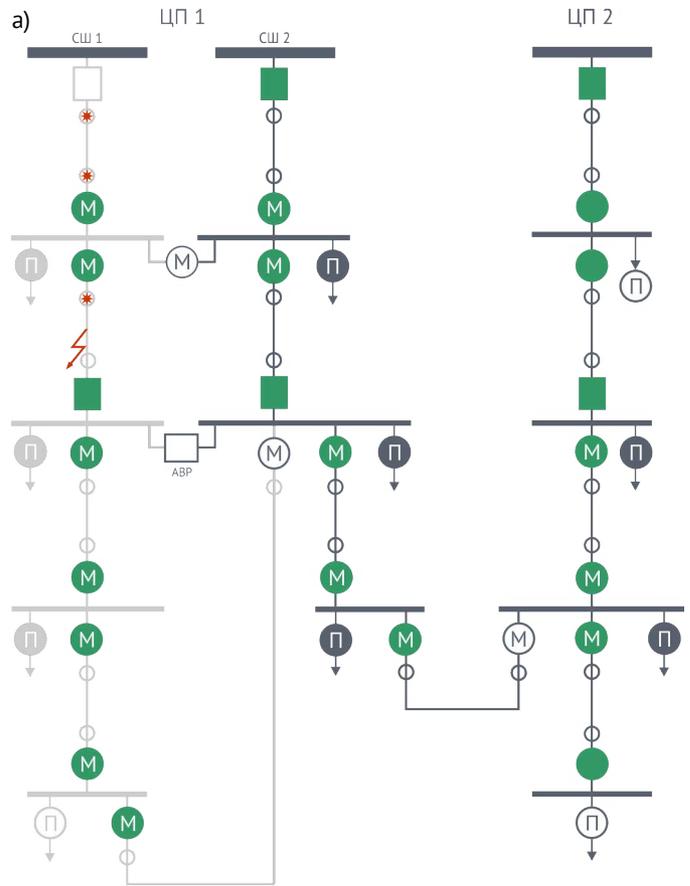
Обозначения:

-  /  выключатель нагрузки с моторизированным приводом включен/выключен
-  /  выключатель включен/выключен действием РЗА
-  выключатель нагрузки без управления
-  /  выключатель включен действием АВР/выключен

Рис. 5. Пример 1. Однолинейная схема электрических соединений сети:
 а) в режиме КЗ; б) после работы САВС.

Действием релейной защиты произведено отключение высоковольтным выключателем линии, поврежденной возникновением КЗ.

В результате работы САВС обнаружен и с помощью управляемого выключателя нагрузки локализован поврежденный участок линии, что позволило АВР восстановить питание неповрежденных секций РУ.



Обозначения:

-  выключатель нагрузки выключен действием САВС
-  /  ответственный потребитель запитан/отключен
-  /  неответственный потребитель запитан/отключен
-  срабатывание ИТКЗ
-  место КЗ

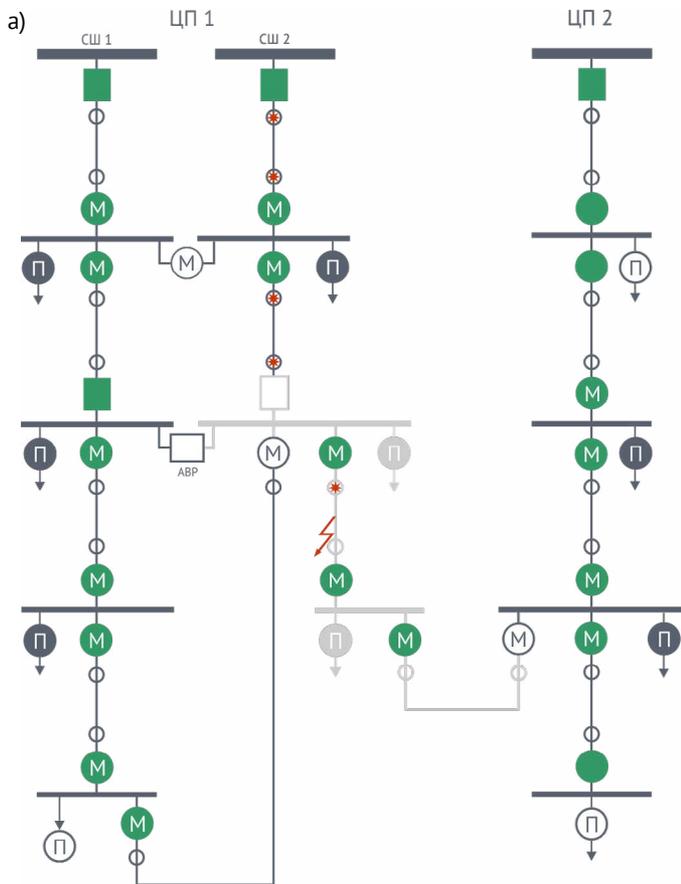


Рис. 6. Пример 2. Однолинейная схема электрических соединений сети:
а) в режиме КЗ; б) после работы САВС.

Действием релейной защиты произведено отключение поврежденного участка сети высковольтным выключателем на вводах ТП.

САВС произвела обнаружение и локализацию поврежденного участка сети путем отключения управляемых выключателей нагрузки в начале и конце линии.

Последующее восстановление питания ответственного потребителя, ввод линии которого расположен на ТП с отходящей поврежденной линией, осуществлен посредством включения высоковольтного выключателя. Питание ответственного потребителя, ввод линии которого расположен на нижестоящей ТП, восстановлено САВС посредством управления выключателями нагрузки.

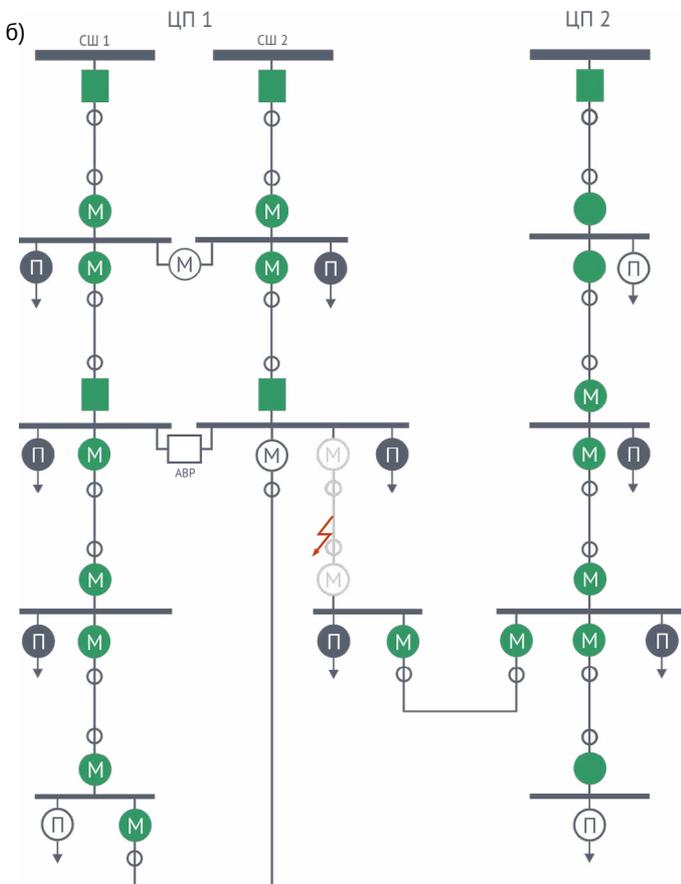
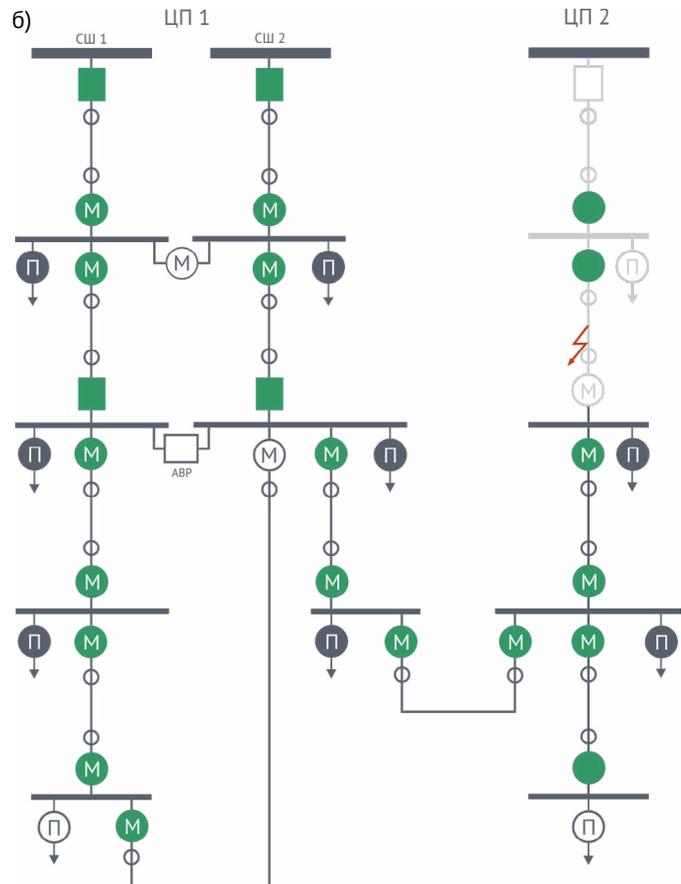
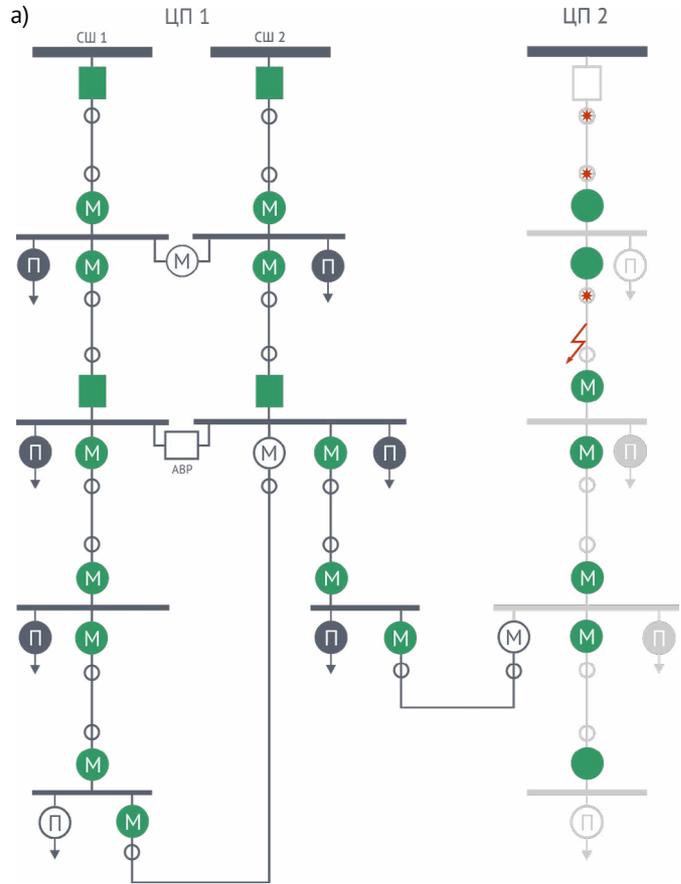


Рис. 7. Пример 3. Однолинейная схема электрических соединений сети:
 а) в режиме КЗ; б) после работы САВС.

Действием релейной защиты произведено отключение высоковольтным выключателем линии, поврежденной возникновением короткого замыкания. САВС произвела обнаружение и локализацию поврежденного участка сети путем отключения управляемого выключателя нагрузки со стороны ЦП 2.

Восстановление питания неповрежденных участков сети с ответственными потребителями осуществлено САВС посредством включения управляемого выключателя нагрузки со стороны СШ2 ЦП 1.

Питание потребителей 3-й категории электроснабжения может быть восстановлено действиями эксплуатирующего персонала после устранения последствий аварийного режима.



При возникновении КЗ на одном из контролируемых присоединений устройства ЭНЛЗ фиксируют сигналы срабатывания ИТКЗ. События с присвоенной меткой времени передаются от ЭНЛЗ в устройство сбора данных ЭНКМ-3 и далее по протоколу МЭК 60870-5-104 на сервер сбора данных SCADA (ОИК), установленный в диспетчерском пункте распределительных сетей.

Программный комплекс «ES-Граф» производит анализ состояния всех ИТКЗ на момент возникновения аварийной сигнализации в контролируемой сети методом перебора всех связанных пар датчиков начала и конца линии. Линия, на которой только в начале зафиксировано срабатывание ИТКЗ, выявляется как поврежденная с указанием поврежденных фаз (А, В, С). Аналогично путем анализа состояний ИТКЗ, установленных на всех отходящих от шин линиях, выявляются междуфазные КЗ на шинах РП и ТП.

Все работающие в системе устройства ЭНЛЗ непрерывно производят измерения токов нулевой последовательности ($3I_0$) в векторном виде (амплитуда и фазовый угол). Измерение производится посредством ДТНП. Измерение фазовых углов векторов токов $3I_0$ производится с точностью 100 мкс относительно «базового» вектора, который имеет постоянную частоту 50 Гц и нулевой сдвиг фазы относительно начала астрономической секунды. Полученные таким образом измерения передаются двумя значениями (амплитуда и фазовый угол) в виде

телеизмерений (ТИ) с присвоенной меткой времени на УСД ЭНКМ-3. Далее УСД ЭНКМ-3 передает полученные данные на сервер сбора данных SCADA (ОИК) по протоколу МЭК 60870-5-104.

Для функционирования системы определения аварийного участка сети при ОЗЗ дополнительно необходимо производить измерение напряжения $3U_0$ в векторном виде аналогично токам $3I_0$. Количество измерений напряжения $3U_0$ равняется количеству секций шин всех центров питания распределительной сети. Измерение $3U_0$ можно производить как на ПС, так и на РП, оборудованных измерительными трансформаторами напряжения (ИТН) с обмоткой $3U_0$ (разомкнутый треугольник).

Вся собираемая на объектах информация передается на сервер сбора данных диспетчерского пункта центра управления сетями (ЦУС), включая данные по учету электроэнергии (АИИС КУЭ) и параметры качества электроэнергии. Собранная с объектов информация подлежит хранению и предоставляется для текущего просмотра и ретроспективного анализа.

АРМ диспетчера ЦУС позволяет отображать на электрической схеме объектов текущие измерения и состояния сети. Поясняющая схема приведена на рисунке 8. При возникновении однофазного замыкания на землю и/или короткого замыкания в электрической сети АРМ выдает диспетчеру соответствующую сигнализацию с указанием конкретного поврежденного участка сети.

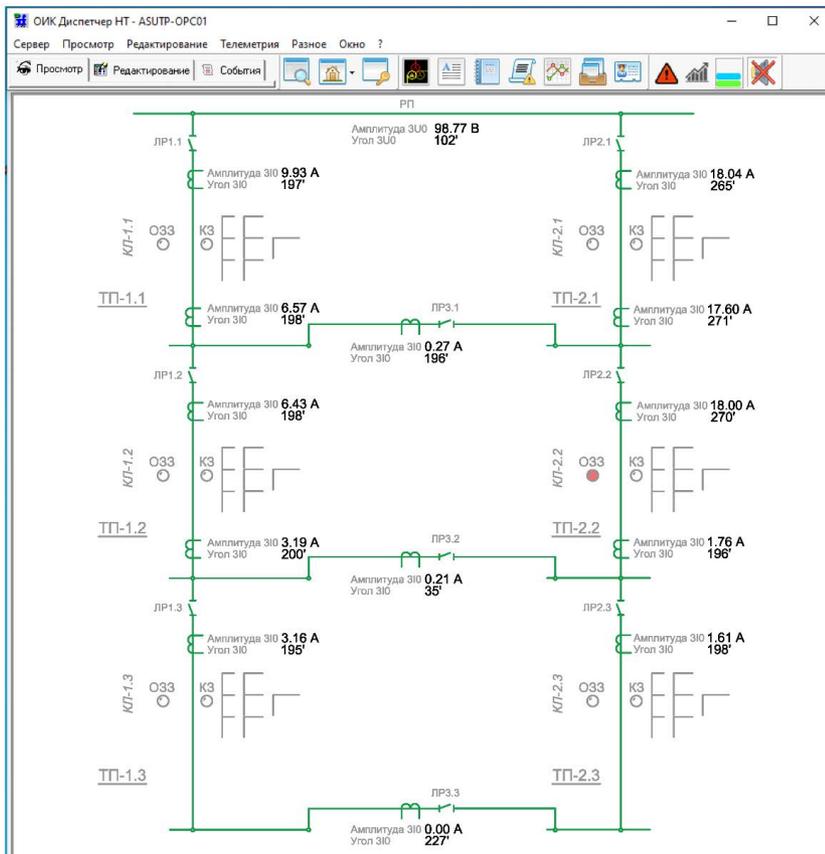


Рис. 8. Интеграция в SCADA

Описание ПК «ES Граф»

ПК «ES-Граф» выполняет функции локализации замыкания и определения его типа в электрической сети. «ES-Граф» принимает исходные данные, выполняет анализ и сообщает о выявленных авариях. Результаты анализа фиксируются в собственном журнале событий и отображаются в веб-интерфейсе, а также могут быть переданы по стандартным протоколам обмена данными. Такой подход позволяет использовать «ES-Граф» и как самостоятельное приложение, и как программный модуль к SCADA-системам.

Получение данных и подготовка для анализа

Получение данных для выполнения анализа осуществляется по промышленному протоколу МЭК 60870-5-104. Измерения могут быть приняты как непосредственно от устройств сбора данных в составе программно-технического комплекса «Цифровой РЭС», так и от SCADA-систем. Параметры поступают от одного или нескольких измерительных устройств и датчиков, установленных в определенных точках сети. Они условно объединяются в логические узлы – объекты, которые описываются в конфигурации. На уровне объектов параметры преобразуются для дальнейшего анализа, например, пара величин амплитуда и угол объединяются в вектор. Также каждому параметру задаются атрибуты, такие как тип данных, физическая величина, имя и т.д.

Определение места замыкания (локализация замыканий)

Конфигурация анализа начинается с задания набора сегментов: в анализируемой сети сегменту соответствует линия или группа смежных линий. Все предлагаемые методы локализации замыканий основаны на сравнении показаний на концах сегмента, поэтому для полноценного анализа с высокой степенью достоверности необходимо наличие данных с обоих концов каждого анализируемого сегмента. При неполном выполнении данного условия допускается снижение степени достоверности выявления аварийного участка электрической сети.

А) ОЗЗ в сетях с компенсированной нейтралью.

Анализ основан на обработке данных синхронизированных векторных измерений, получаемых с устройств типа ЭНЛЗ. Входными величинами являются I_0 на ТП и РП, а также U_0 на шинах РП.

Решение о факте наличия ОЗЗ принимается по величине U_0 .

В случае, когда измерение U_0 не предусмотрено, либо соответствующие данные по каким-то причинам недоступны, решение принимается по величине I_0 . Далее сравниваются углы между векторами I_0 на концах линий, умноженные на амплитуды соответствующих токов. Выявляется пара, для которой это произведение максимально.

В ситуациях, когда в сегменте имеется только один датчик или на одном из датчиков I_0 близок к нулю (признак тупика), для построения пары используется вектор U_0 на РП или I_0 на РП. Для этого в конфигурации системы описываются специальные правила для достраивания пар. Каждое правило включает указание на источник альтернативного вектора. Существует возможность генерации правил при наличии описания топологии сети. В перечне вспомогательных инструментов «ES-Граф» имеется соответствующая утилита.

Для сегментов, на одном из концов которых величина I_0 превышает заданную в настройках уставку, принимается решение о наличии режима «Ток ОЗЗ».

Одной из настроек анализатора ОЗЗ задается время ожидания установившегося режима. Если в течение этого времени признак того или иного режима не меняется, то анализатор принимает окончательное решение и формирует соответствующее событие.

Б) ОЗЗ в сетях с резистивным заземлением нейтрали.

Для анализа ОЗЗ при резистивном заземлении нейтрали используются дискретные (бинарные) сигналы, формируемые устройством ЭНЛЗ при сравнении величины I_0 и заданной уставки. Если анализатор получает значение «1», то по прошествии заданного времени ожидания данных принимается соответствующее решение. Местом ОЗЗ считается сегмент, для двух концов которого получены различные значения сигнала. Если хотя бы на одном конце сегмента имеется значение «1», то для этого сегмента принимается решение о наличии режима «Ток ОЗЗ».

В) Короткое замыкание.

В данном случае используется аналогичный порядок работы с данными. Анализ основан на сравнении дискретных сигналов от индикаторов тока КЗ, расположенных на концах линий и контролируемых устройством ЭНЛЗ. При отсутствии датчиков на одном из концов соответствующего сегмента определяется только «ток КЗ». При этом допускается отсутствие датчика на фазе В. Для борьбы с ложными срабатываниями предусмотрен учет просадки фазного напряжения на РП, который может быть включен в настройках анализатора.

Агрегация и запись архивов данных

Данные в анализирующую часть «ES-Граф» в общем случае поступают спорадически. При этом существует необходимость получения информации о состоянии анализируемой системы в определенный момент времени. Эту задачу решает модуль агрегации данных, который организывает входные данные в памяти компьютера, устанавливая соответствие между меткой времени, источником данных, физической величиной и ее значением. На выходе агрегатора для каждой уникальной метки времени формируется так называемый фрейм данных. Основными настройками агрегации являются время ожидания данных и время устаревания значений. Для каждой новой метки времени данные обновляются в течение времени ожидания, после чего фиксируется фрейм. Если в течение времени устаревания значение некоторой величины не обновилось новыми данными, то имеющееся значение становится «невалидным».

Имеется функция записи агрегированных данных в CSV файлы. Запись может осуществляться постоянно или только при наличии аварийного режима. В последнем случае также записываются данные в предаварийном и послеаварийном режимах. Архивы могут использоваться как для более детального разбора ситуации, так и для дальнейшего совершенствования алгоритмов анализа.

Ведение журнала событий

Выявленные события фиксируются в журнале событий, который представлен реляционной базой данных SQLite. К основным атрибутам событий относятся тип анализируемой проблемы (ОЗЗ, ток ОЗЗ, КЗ, ток КЗ), тип события (наступление или прекращение режима), время наступления события (из входящих меток времени), время принятия решения о событии (из часов компьютера, на котором запущен сервис).

Обмен с ПО SCADA

Текущее состояние системы и сообщения о выявленных авариях могут быть переданы по протоколу МЭК 60870-5-104. Сигналы передаются дискретным значением, форматом кадра данных с типом 30 (M_SP_TB_1). Каждый сигнал соответствует сегменту, на котором выявлена авария, и её типу. Команда общего опроса 100 (C_IC_NA_1) позволяет получить текущее состояние сети по всем настроенным сигналам.

Выдача команд управления в ПО SCADA

Результирующим действием ПК «ES-Граф» является выдача команд управления по протоколу МЭК 60870-5-104 в ПО SCADA для автоматического восстановления сети. По правилам, заданным в конфигурации, выполняется последовательность

переключений, которая реализует сценарий изоляции аварийных участков и восстановления электроснабжения на неповрежденных участках сети.

Отправка тестовой последовательности

Для проверки правильности произведенных настроек и доставки результатов анализа от «ES-Граф» к принимающей системе по протоколу МЭК 60870-5-104 предусмотрена функция отправки последовательности тестовых дискретных сигналов обо всех анализируемых режимах на всех сегментах. Этот функционал позволяет верифицировать привязку параметров ТС к сигналам в SCADA и упростить наладку.

Резервирование ПК «ES-Граф»

ПК «ES-Граф» поддерживает работу в режиме резервирования, образуя систему из двух независимых экземпляров приложения, которые могут исполняться в том числе на физически разных машинах. Между приложениями должно быть организовано сетевое взаимодействие. Каждому процессу в конфигурации назначаются функциональные роли «основной» или «резервный».

Оба экземпляра приложения параллельно выполняют сбор и анализ данных, образуя схему «горячего» резервирования. Такой подход позволяет организовать поддержку работы двухмашинных SCADA-систем, по сути являясь двумя независимыми источниками данных. При этом резервный процесс «ES-Граф» не выполняет выдачу управляющих воздействий, пока доступен основной. Для установления статуса работы и доступности, процессы обмениваются служебными сообщениями.

Канал связи между двумя резервируемыми процессами необходим также для синхронизации журнала событий и буфера данных в случае перехода роли функционирования от одного процесса к другому.

Веб-интерфейс

Для наблюдения за работой системы в режиме онлайн разработан веб-интерфейс (рисунок 9). I_o и U_o визуализируются на векторной диаграмме. В таблицах отображаются значения измеряемых величин и записи из журнала событий.

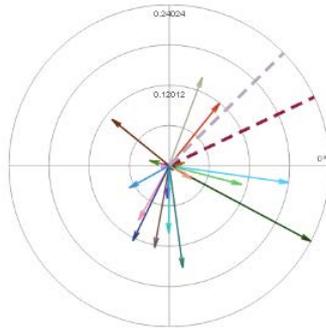
Системные требования ПК «ES-Граф»

«ES-Граф» не имеет программных ограничений в объеме принимаемой и анализируемой информации – они зависят от аппаратных возможностей платформы, на которой выполняется программа. ПК «ES-Граф» разработано с расчетом на эффективное использование многоядерных систем, и имеет хорошую масштабируемость.

Рис. 9. Веб-интерфейс ПК «ES-Граф»

Локализация ОЗЗ

Онлайн Архив событий Конфигурация Обслуживание



Локация	Время	Событие
		Зафиксирован ток ОЗЗ 0
		Зафиксирован ток ОЗЗ 0
		Зафиксирован ток ОЗЗ 1
		Зафиксирован ток ОЗЗ 1
		Зафиксирован ток ОЗЗ 0
		Зафиксирован ток ОЗЗ 0
		Зафиксирован ток ОЗЗ 1
		Зафиксирован ток ОЗЗ 1

Параметр	Статус	A	φ	Метка времени
	310	✓	0.124	259.849 18.09.20 22:25:09.500+0300
	310	✓	0.112	345.553 18.09.20 22:25:09.760+0300
	310	✓	0.049	266.309 18.09.20 22:25:12.529+0300
	310	✓	0.006	0.000 18.09.20 22:25:12.470+0300
	310	✓	0.001	0.000 18.09.20 22:25:12.440+0300
	310	✓	0.031	165.515 18.09.20 22:25:12.620+0300
	310	✓	0.002	0.000 18.09.20 22:25:12.540+0300
	310	✓	0.101	269.495 18.09.20 22:25:12.540+0300
	310	✓	0.120	51.004 18.09.20 22:25:12.500+0300
	310	✓	0.181	351.947 18.09.20 22:25:12.640+0300
	310	✓	0.023	10.574 18.09.20 22:25:12.600+0300
	310	✓	0.011	193.101 18.09.20 22:25:11.060+0300
	310	✓	0.240	332.029 18.09.20 22:25:10.860+0300
	310	✓	0.093	240.403 18.09.20 22:25:10.640+0300
	310	✓	0.006	150.276 18.09.20 22:25:12.660+0300
	310	✓	0.039	329.645 18.09.20 22:25:10.600+0300

Примерный перечень минимальных системных требований для обработки не более 50 присоединений (25 сегментов электрической сети):

- CPU: x86-64, с поддержкой инструкций SSE2. Рекомендуется не менее 4-х ядер;
- RAM: 4 Гб;
- Накопитель: не менее 4 Гб свободного пространства на диске. Рекомендуется не менее 16 Гб свободного пространства на диске для записи архива измерений и журнала событий;
- ОС: MS Windows Server 2008 R2 x64 и выше, или MS Windows 7 x64 и выше. Linux версии ядра 2.6.23 и выше;
- Дополнительно: Web-браузер Firefox или основанный на Chromium последних версий для web-интерфейса;
- Рекомендуется: запускать «ES-Граф» в «виртуальной машине» ОС сервера.

Объем телеизмерений

Объем передаваемой информации по протоколу МЭК 60870-5-104 на сегмент по одному событию составляет 70 байт при спонтанной причине передаче (по выявленному событию). При общем опросе информационные объекты агрегируются, уменьшая суммарный объем трафика. Например, при передаче всех событий по одному сегменту требуется 214 байт.

Данные для анализа поступают спорадически по заданным апертурам, достигая максимального темпа передачи данных (50 раз/с) во время переходного процесса: объем данных на сегмент из двух объектов – 42 КБ/с. В нормальном режиме сети объем трафика минимален: темп передачи данных – 1 раз/с, объем данных на сегмент из двух объектов – 860 Б/с.

При оценке объема передаваемых данных также необходимо учитывать накладные расходы на служебный и иной дополнительный трафик в сети.