

# ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОСЬЮМЕРАМИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

В статье описаны конструкция, назначение и алгоритм работы опытного образца электросетевого контроллера (ЭСК), который представляет собой распределенную измерительную и вычислительную систему с комплексом телемеханики, работающую в режиме реального времени. ЭСК призван обеспечивать надежное функционирование сегмента распределительной электрической сети, насыщенной объектами микрогенерации и так называемыми «просьюмерами», в качестве которых уже сегодня выступают системы накопления электрической энергии, интеллектуальная зарядная инфраструктура и т. п.

## АВТОРЫ:

В.О. Акуличев,  
ПАО «Россети Центр»

В.Ю. Кононенко, к. т. н.,  
«Россети Научно-технический центр»  
(АО «ФИЦ»)

М.Е. Коржавин,  
«Россети Научно-технический центр»  
(АО «ФИЦ»)

П.А. Косов,  
филиал ПАО «Россети Центр» —  
«Белгородэнерго»

Наметившаяся в последнее десятилетие тенденция развития электроэнергетической отрасли, так называемый энергопереход приводит к появлению в энергосистемах новых видов активно-адаптивных устройств — просьюмеров [1, 2]. В первую очередь это устройства на основе нетрадиционных возобновляемых источников электрической энергии (СЭС, ВЭС, микроГЭС), системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). При этом важно от-

метить, что насыщение распределительных электрических сетей (РЭС) подобными устройствами (явление «просьюмеризации») приводит к увеличению вероятности быстрых (сотые доли и единицы миллисекунд) изменений электрических параметров РЭС (величин токов и напряжений в электрических сетях). В основе быстротекущих изменений параметров РЭС лежит безынерционный характер работы просьюмеров, отличительной особенностью которых

является наличие полупроводникового инверторного подключения к РЭС.

С другой стороны, быстроизменяющиеся электрические параметры РЭС влияют на режимы работы инверторов просьюмеров, большинство из которых являются источниками тока или, другими словами, являются «ведомыми» сетью. Логика работы такого инвертора основывается на измерениях величин напряжений в точках подключения просьюмеров к электрическим сетям. При этом важно отметить, что фактическое измерение напряжения большинство просьюмеров ведет на выходных шинах своих инверторов. Использование инвертором для определения электрических параметров режима работы всей РЭС параметров напряжения только в одной точке РЭС (совместно со значениями своих выходных токов), в большинстве случаев быстропеременных (безынерционных) режимов работы просьюмеризированных РЭС, приводит к ложному выводу о текущем режиме работы последних и, как следствие, к «принятию» инвертором неверных решений по значениям амплитуды, фазы и частоты, выдаваемых им в РЭС напряжений и токов. В мировой практике произошло несколько крупных аварий по вине инверторных устройств [3–6]. Во всех случаях причиной аварии были неверные настройки инверторов. Сбой и отключение одного инвертора приводили к быстрому изменению электрических параметров сети и последующему веерному отключению других инверторов этой сети.

Таким образом, по аналогии с магистральными электрическими сетями можно говорить, что РЭС, насыщенная активно-адаптивными устройствами (просьюмерами), может потерять устойчивость функционирования при отклонениях параметров работы просьюмеров, что, безусловно, приводит к снижению надежности электропитания потребителей [7–9].

ВНЕШНИЙ ВИД ЦЕНТРАЛЬНОГО ШКАФА ЭСК НА ОБЪЕКТЕ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ — ТП-815 ПС «БОРИСОВКА» (ФИЛИАЛ ПАО «РОССЕТИ ЦЕНТР» — «БЕЛГОРОДЭНЕРГО»)

Рис. 1



На основе алгоритмов, полученных в результате лабораторного макетирования, по техническому заданию филиала ПАО «Россети Центр» — «Белгородэнерго» компанией «Россети Научно-технический центр» (АО «ФИЦ») был разработан, а затем изготовлен ООО «ЦУП ЧЭАЗ» опытный образец ЭСК. По функциональной принадлежности ЭСК относится к оборудованию управления активно-адаптивными РЭС, включающими просьюмеры. Опытный образец ЭСК представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для управления в режиме реального времени работой просьюмеров, инверторы которых имеют интерфейс связи с ЭСК (так называемые управляемые просьюмеры). Также опытный образец ЭСК позволяет решать задачи РЗА контролируемого им сегмента РЭС.

В общем случае ЭСК состоит из центрального шкафа, который устанавливается в ТП-10 (6)/0,4 кВ на входе контролируемого им сегмента РЭС, и выносных щитов управления (ВЩУ), которые располагаются на границе балансовой принадлежности с просьюмером. В соответствии с техническим заданием на работу в состав опытного образца ЭСК входит пять ВЩУ. Внешний вид и чертеж центрального шкафа ЭСК приведены на рисунках 1 и 2 соответственно. Внешний вид ВЩУ ЭСК представлены на рисунках 3 и 4 соответственно. Структурно-функциональная схема ЭСК (на примере центрального шкафа и одного ВЩУ ЭСК) представлена на рисунке 5.

Ранее авторами [10, 11] в лабораторных условиях была продемонстрирована возможность обеспечения надежности работы сегмента РЭС 0,4 кВ за счет использования электросетевого контроллера (ЭСК), который в данных экспериментах был реализован в виде лабораторного макета. При этом сегмент РЭС представлял собой тупиковый фидер с подключенными к нему активно-адаптивными устройствами в виде объектов микрогенерации с инверторным подключением к РЭС.

Центральный шкаф ЭСК имеет исполнение УХЛ1 и включает в себя следующие основные конструктивные элементы (рисунок 2):

- микропроцессорный контроллер (1) для выполнения алгоритма работы ЭСК;
- источник бесперебойного питания (3);
- вычислительный модуль релейной защиты РЗА (2);



Фото: user6702303 на Freepik

Ключевые слова:  
#электросетевой контроллер; #распределительная электрическая сеть; #микрогенерация; #просьюмер; #активно-адаптивное устройство; #активно-адаптивная электрическая сеть.

ЧЕРТЕЖ ЦЕНТРАЛЬНОГО ШКАФА ЭСК

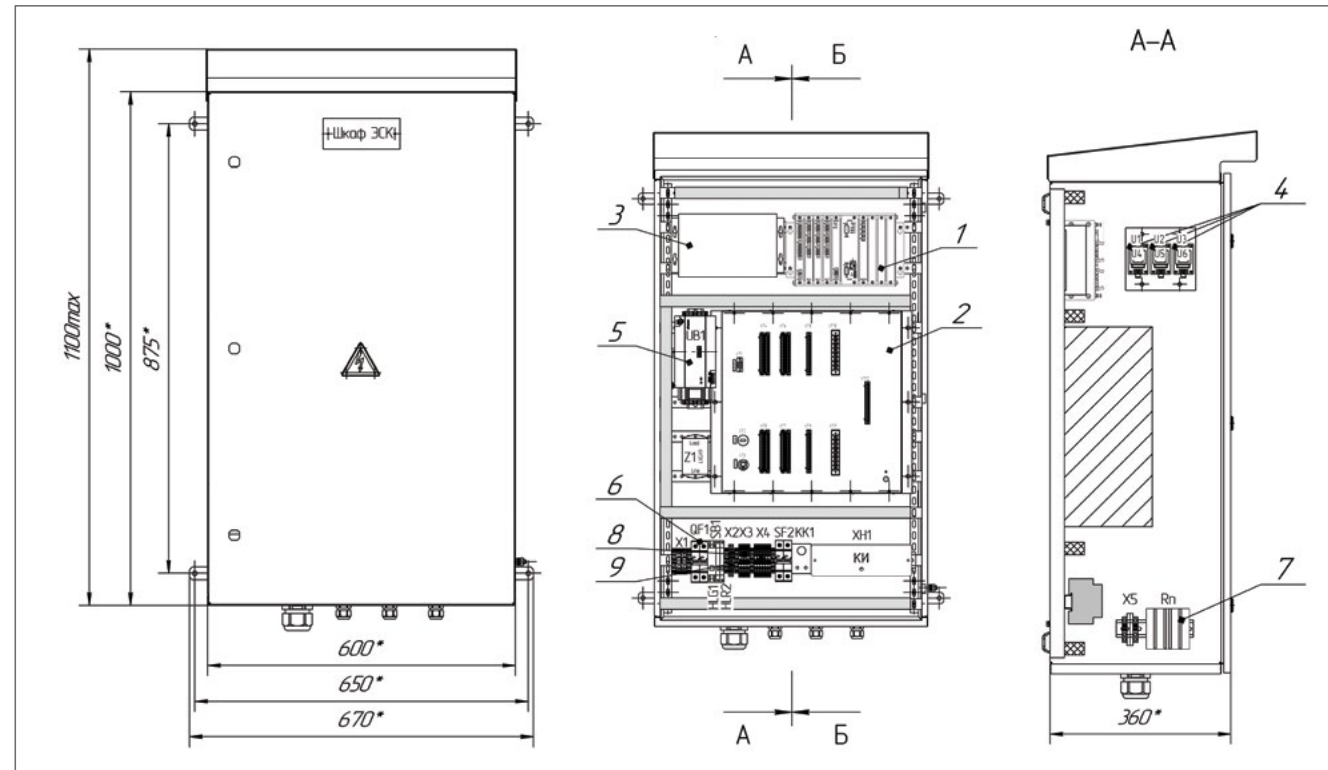


Рис. 2

- входные измерительные трансформаторы напряжения (4), подключаемые к аналоговым измерительным входам напряжения контроллера (1) и модуля РЗА (2);
- источник питания 24 В (5) для контроллера (1) и модуля РЗА (2);
- автоматические выключатели собственных нужд 220 В (6);
- нагревательный элемент с термостатом (7) для противоконденсатного подогрева;
- клеммные колодки (8) для подключения измерительных кабелей входного напряжения L1, L2, L3, N;
- клеммные колодки (9) для подключения измерительных кабелей внешних трансформаторов тока L1, L2, L3 и подключаемых к аналоговым измерительным токовым входам контроллера (1) и модуля РЗА (3).

На вводе контролируемого сегмента РЭС устанавливается силовой управляемый контактор К1 (рисунок 5), который так же, как центральный шкаф ЭСК, устанавливается на трансформаторной подстанции ТП-10 (6)/0,4 кВ.

Также необходимо отметить, что ЭСК оборудован каналом телемеханики для обмена информацией с внешними автоматизированными и/или технологическими системами мониторинга и контроля.

ВЩУ ЭСК представляет собой шкаф уличного исполнения УХЛ1 и включает следующие основные конструктивные компоненты (рисунок 4):

- микропроцессорный контроллер (1) для расчета узла и отпайки просьюмера;

- входные измерительные трансформаторы напряжения (2), подключаемые к аналоговым измерительным входам напряжения контроллера (1);
- входные измерительные трансформаторы тока (3), подключаемые к аналоговым измерительным токовым входам контроллера (1);
- источник питания 24 В (4) для контроллера (1);
- нагревательный элемент с термостатом (5) для противоконденсатного подогрева;
- силовой входной автоматический выключатель (6) для подключения к распределительной сети 0,4 кВ;
- силовой выходной автоматический выключатель (7) для подключения к просьюмеру;
- силовой управляемый контактор К1 (8) (i — количество ВЩУ в составе ЭСК) для дистанционного под-

ключения/отключения просьюмера.

Программно-аппаратный комплекс ЭСК представляет собой расчетно-измерительную систему, в качестве исходных данных для которой выступают измеренные мгновенные значения токов и напряжений на входе контролируемого сегмента РЭС и в узлах присоединения к фидеру просьюмеров. Функционально-логическая схема (алгоритм) работы ЭСК приведена на рисунке 6. На схеме используются следующие обозначения:

- состояния контакторов К1 и К2: «1» — включено, «0» — выключено;
- U — амплитудные значения фазных напряжений;
- I — амплитудные значения фазных токов;
- Id, Iq — значения активной и реактивной составляющих фазных

ЧЕРТЕЖ ВЩУ ЭСК

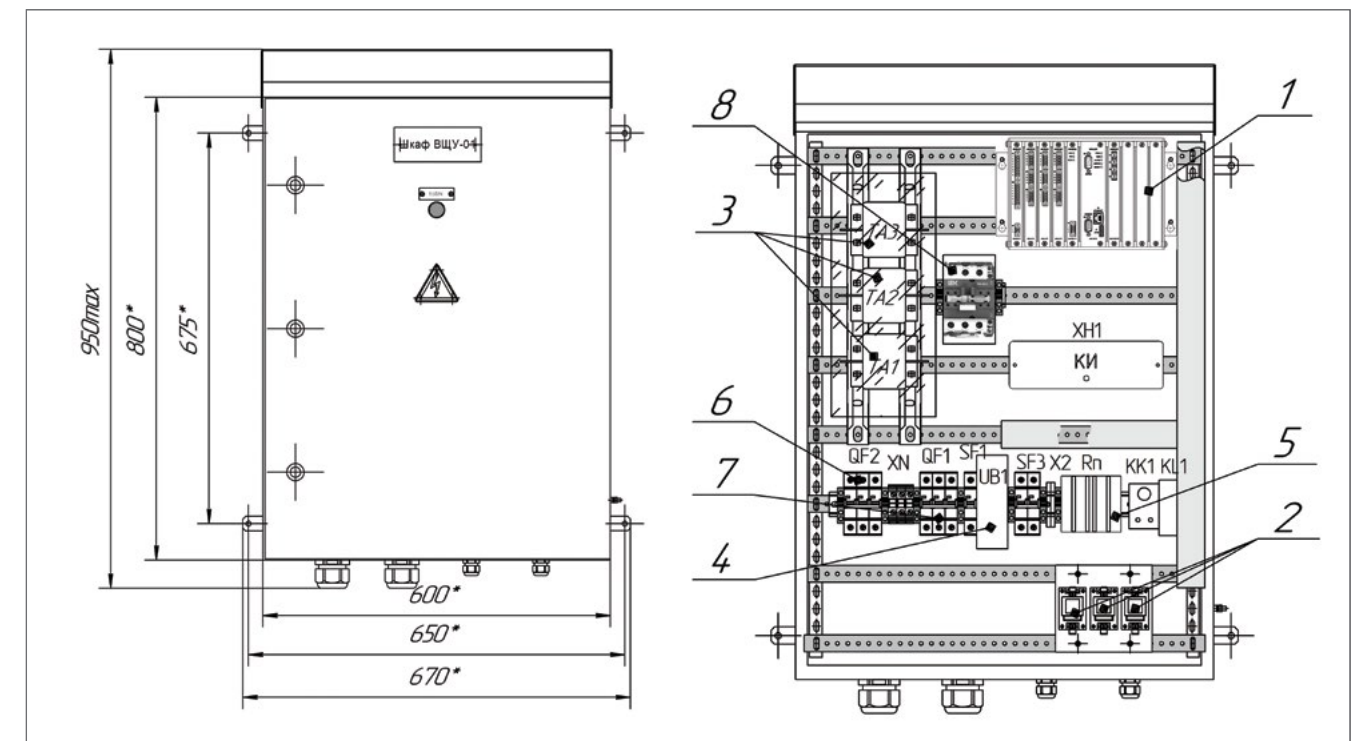


Рис. 4

ВНЕШНИЙ ВИД ВЩУ ЭСК НА ОБЪЕКТЕ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ: ДОМОХОЗЯЙСТВО, ПОСЕЛОК БОРИСОВКА, БЕЛГОРОДСКАЯ ОБЛАСТЬ



Рис. 3

токов во вращающейся системе координат.

Работа ЭСК начинается с инициализации внутренних переменных и таймеров. Следующим шагом ЭСК проверяет наличие напряжения в питающей электрической сети и при его наличии выполняет синхронизацию напряжения в узлах расчетной модели контролируемого сегмента РЭС с напряжением питающей электрической сети. Одновременно с этим проводится сбор информации в ВЩУ о параметрах в узлах подключения активно-адаптивных устройств (просьюмеров).

В зависимости от наличия или отсутствия напряжения в питающей электрической сети, ЭСК переводит контролируемый сегмент РЭС в состояние «нормального» (РЭС с центром питания) или изолированного («островного») режима работы (на рисунке 6 — блоки «Нормальный» и «Островной»).

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЭСК  
(НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО ШКАФА И ОДНОГО ВЦУ ЭСК)

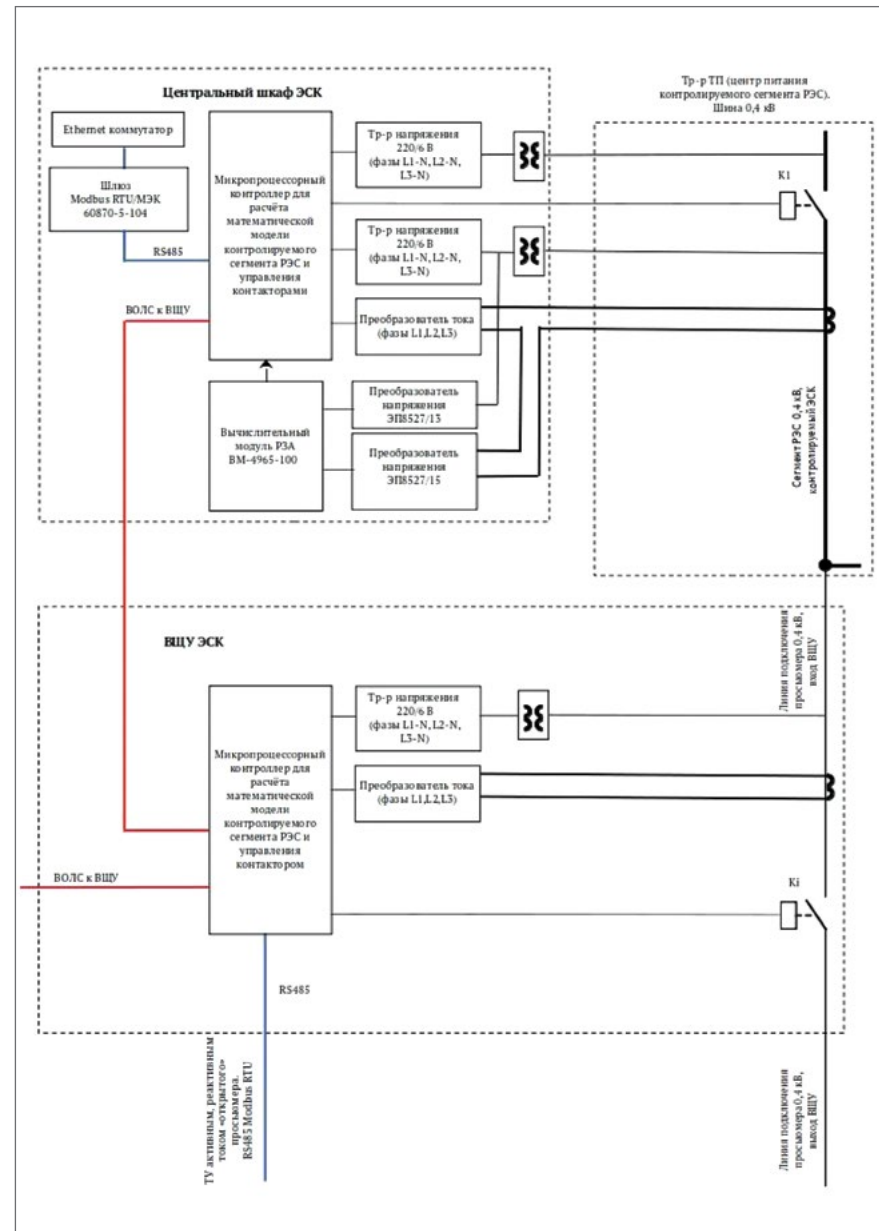


Рис. 5

режим) путем соответствующих переключений силовых управляемых контакторов  $K_i$ .

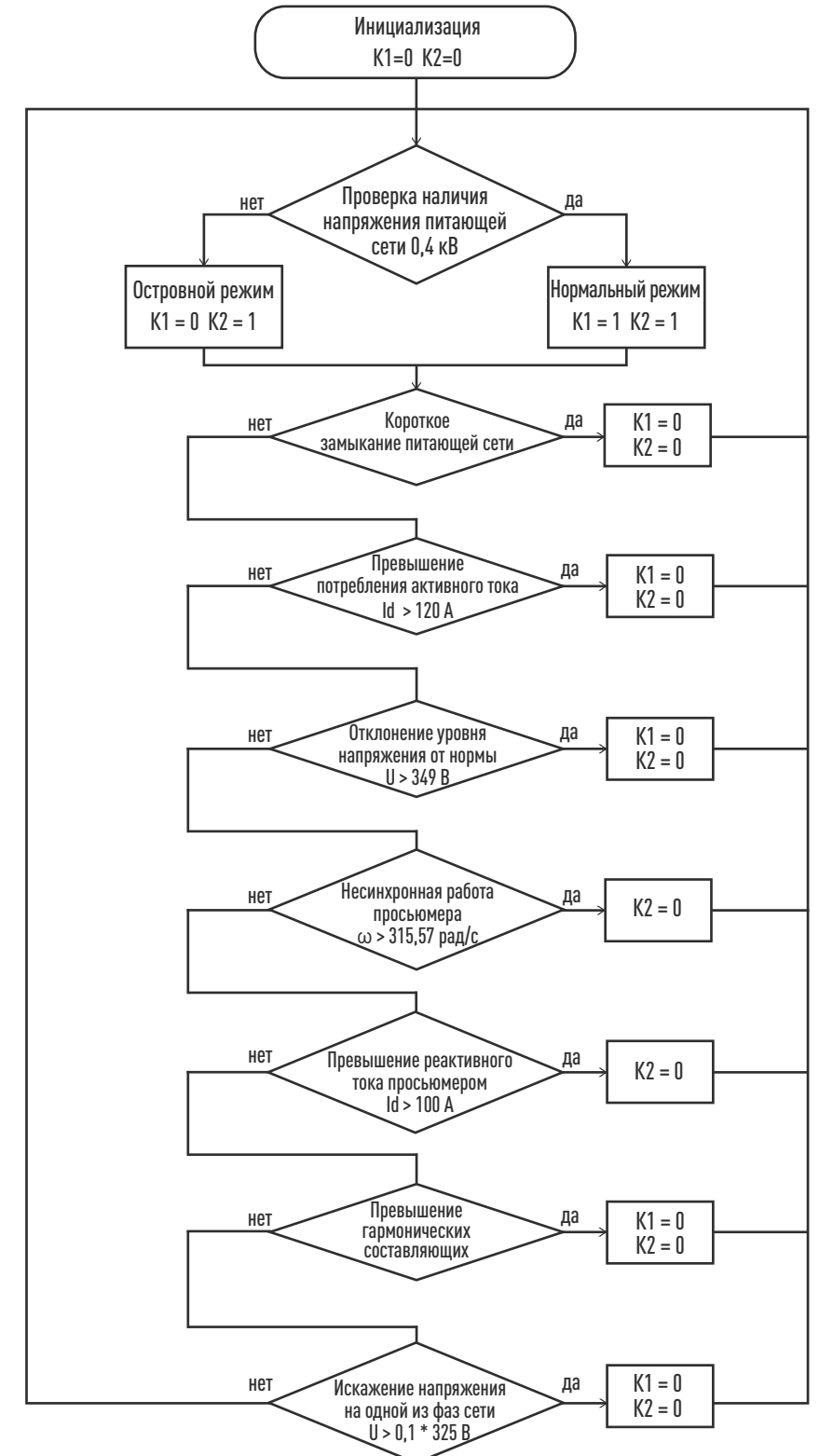
Состояния контакторов для разных режимов работы проиллюстрированы на рисунке 6 для случая опытно-промышленной эксплуатации ЭСК в составе центрального шкафа и одного ВЦУ. В каждом из режимов «Нормальный» и «Островной» ЭСК проводит проверку наличия аварийной ситуации или технологического нарушения («Ошибки»). В зависимости от вида «ошибки» ЭСК выполняет соответствующие переключения контакторами  $K_i$  (рисунок 6). ЭСК поддерживает в настоящее время следующие виды «ошибок»:

- короткое замыкание на контролируемом сегменте РЭС;
- короткое замыкание у просьюмера;
- короткое замыкание в питающей сети;
- перегрузка по активному и/или реактивному току контролируемого сегмента РЭС на вводе (в ТП);
- превышение просьюмером допустимой мощности выдачи или потребления;
- исчезновение или снижение ниже допустимого значения напряжения в питающей сети;
- отклонение уровня напряжения от нормы (но не ниже допустимого значения) на вводе контролируемого сегмента РЭС;
- отклонение от нормы уровня напряжения на входных шинах (контактах) просьюмера;
- несинхронная работа просьюмера с РЭС по частоте или сдвигу по фазе напряжения;
- превышение допустимого уровня потребления/генерации реактивной мощности просьюмером;
- превышение допустимого значения гармоническими составляющими на вводе контролируемого сегмента РЭС;
- обрыв провода линии электропередачи на контролируемом сегменте РЭС без короткого замыкания.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ЭСК ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ РАСЧЕТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ, В КАЧЕСТВЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ КОТОРОЙ ВЫСТУПАЮТ ИЗМЕРЕННЫЕ МГНОВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НА ВХОДЕ КОНТРОЛИРУЕМОГО СЕГМЕНТА РЭС И В УЗЛАХ ПРИСОЕДИНЕНИЯ К ФИДЕРУ ПРОСЬЮМЕРОВ

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА (АЛГОРИТМ) РАБОТЫ ЭСК

Рис. 6



При этом важно отметить, что в случае управляемого просьюмера (просьюмера, у которого установлена телекоммуникация с контроллером ВЦУ) при некоторых видах «Ошибок» вместо отключения просьюмера с помощью соответствующего силового управляемого контактора  $K_i$  предпринимается попытка регулировки выходных параметров инверторного устройства управляемого просьюмера за счет изменения значений активной и реактивной составляющей тока инвертора.

В случае отсутствия состояния «Ошибки» ЭСК повторяет цикл с проведением соответствующих расчетов состояния контролируемого сегмента РЭС и просьюмеров. При этом ЭСК обрабатывает задание на режим работы контролируемого сегмента РЭС путем регулировки выходных параметров инверторных устройств управляемых просьюмеров за счет изменения значений активной и реактивной составляющей тока. По умолчанию в ЭСК установлен режим минимизации потребления тока из питающей электрической сети, т.е. ЭСК стремится привести значение потребляемого тока на вводе контролируемого сегмента РЭС к нулю.

Длительность цикла расчета состояния контролируемого сегмента РЭС и просьюмеров, проводимых на постоянной основе в реальном времени в «Нормальном» и «Островном» режимах, не превышает 100 мкс. Необходимо отметить, что подобная длительность в лабораторном макете ЭСК составляла порядка одной миллисекунды и могла изменяться в диапазоне от 1,0 до 10,0 мс. При этом эмпирически было определено, что критическая граница данного диапазона не должна превышать ~ 15,0 мс.

Таким образом, созданный в ходе выполнения работы опытный образец электросетевого контроллера по сути своей является последовательным

шагом развития устройств управления «просьюмеризированными» РЭС. ЭСК в режиме реального времени ведет расчет и анализ электрических параметров контролируемого им сегмента РЭС, а также управляемых и неуправляемых просьюмеров, функционирующих в контролируемом ЭСК сегменте РЭС.

В результате анализа ЭСК отрабатывает алгоритм, в котором заложены: телеуправление активной и реактивной составляющими токов управляемых просьюмеров с целью обеспечения заданного режима работы контролируемого сегмента РЭС; реакция с помощью силовых управляемых контакторов на аварийные ситуации и технологические отклонения в сегменте РЭС и в точках подключения просьюмеров. Установка в РЭС системы из нескольких ЭСК, связанных между собой телекоммуникацией, позволит управлять потоками электрической энергии не только внутри контролируемых сегментов РЭС, но и между ними. Подобная система ЭСК приближает существующие РЭС к РЭС нового технологического уклада — гибкой и интеллектуальной системе распределения электрической энергии с высокой степенью надежности электроснабжения потребителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вороничкин В.Э. Тенденции и перспективы развития техники и технологий передачи и распределения электроэнергии // ЭНЕРГО-ЭКСПЕРТ. № 2. 2023. С. 28.
2. Холкин Д.В., Чаусов И.А., Бурдин И.А., Рыбушкина А. Архитектура Интернета энергии (IDEA). Версия 2.0. М.: Инфраструктурный центр «Энерджинет», 2021.
3. 1200 MW Fault Induced Solar Photovoltaic Resource Interruption Disturbance Report // NERC, 2017. URL: [https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/1200\\_MW\\_Fault\\_Induced\\_Solar\\_Photovoltaic\\_Resource\\_/1200\\_MW\\_Fault\\_Induced\\_Solar\\_Photovoltaic\\_Resource\\_](https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/1200_MW_Fault_Induced_Solar_Photovoltaic_Resource_/1200_MW_Fault_Induced_Solar_Photovoltaic_Resource_)

4. Interruption\_Final.pdf (дата обращения: 30.07.2020).
5. 900 MW Fault Induced Solar Photovoltaic Resource Interruption Disturbance Report // NERC, 2017. URL: <https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/October%202017%20Canyon%20Fire%20Disturbance%20Report/900%20MW%20Solar%20Photovoltaic%20Resource%20Interruption%20Disturbance%20Report.pdf> (дата обращения: 30.07.2020).
6. Update report — Black system event in South Australia on 28 September 2016 // AEMO, 19 October 2016.
7. Bialek J. What does the power outage on 9 August 2019 tell us about GB power system // Apollo — University of Cambridge Repository, 2020.
8. Шумский Н.В., Семенов И.И., Соснина Е.Н. Моделирование распределения потоков мощности при векторном регулировании напряжения // Руководящие материалы по проектированию и эксплуатации электрических сетей. № 2 (610). 2023. С. 22.
9. Опадчий Ф.Ю. Готовность энергосистем к энергопереходу: опыт CIGRE и G015 // Доклад на отчетной конференции по итогам 49-й Сессии СИГРЭ. 2023.
10. Кононенко В.Ю., Коржавин М.Е., Косов П.А. и др. Электросетевой контроллер — ключевой элемент управления работоспособностью активной просьюмеризированной электрической сети 0,4 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. № 3 (66) 2021. С.10.
11. Kononenko V., Korzhavin M., Idrisov I. etc. Development, Modeling, and Testing of a Unified Controller for Prosumers Connected to 0,4 kV Voltage Level Grids. Part I: Modeling and Test Bench Assembly // Energy Systems Research. Vol. 4. №. 4. 2021. P. 5.
12. Kononenko V., Korzhavin M., Idrisov I. etc. Development, Modeling, and Testing of a Unified Controller for Prosumers Connected to 0,4 kV Voltage Level Grids. Part II: Experimental Validation // Energy Systems Research. Vol. 4. №. 4. 2021. P.13.

Для цитирования: Акуличев В.О., Кононенко В.Ю., Коржавин М.Е., Косов П.А. Опытный образец электросетевого контроллера для управления просьюмерами в распределительной электрической сети // Энергия единой сети. 2024. № 1 (72). С. 66–72.

ИЗДАЕТСЯ С 1954 Г.



РУКОВОДЯЩИЕ  
МАТЕРИАЛЫ  
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ  
И ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СЕТЕЙ

Научно-технический журнал

Издатель: АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

РУМ — ЕДИНЫЙ ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ  
ОБ АКТУАЛЬНЫХ ТЕНДЕНЦИЯХ В ОБЛАСТИ  
ТЕХНИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
РОССИЙСКОГО ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА

*Приглашаем  
экспертов в области  
электроэнергетики  
стать постоянными  
авторами журнала  
«Руководящие материалы  
по проектированию  
и эксплуатации  
электрических сетей»*

ЧИТАЙТЕ «РУМ»

Сайт: [www.rum.cis-ees.ru](http://www.rum.cis-ees.ru)  
Телеграм-канал: <https://t.me/ntcfsk>



«Энергия единой сети» — информационный  
партнер выставки «Тепло и энергетика»

АА GEFERA MEDIA



ТЕПЛО И ЭНЕРГЕТИКА  
HEAT & ELECTRO

29–31.10.2024

Москва | ЦВК «Экспоцентр» | Павильон №71

Международная выставка  
энергетического оборудования для  
теплоснабжения и электрогенерации  
на промышленных предприятиях  
и муниципальных объектах



heatelectro.ru