

## АНАЛИЗ АВАРИИ НА РЕФТИНСКОЙ ГРЭС, ПРОИЗОШЕДШЕЙ 22.08.2016 ГОДА

Аветисян А.С.<sup>1</sup>, Ефимов Д.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия  
avetisyan\_geven@mail.ru

**Резюме:** ЦЕЛЬ. В работе исследуется авария, произошедшая 22 августа 2016 года в ЕЭС России. Начальные аварийные события случились в энергосистеме Свердловской области на Рефтинской ГРЭС – одной из самых мощных тепловых электростанций России. Затем последовали срабатывания технологических защит и, как следствие, каскадные отключения с нарушением целостности ЕЭС России. МЕТОДЫ. В рамках поставленной задачи авторами был проведен ряд исследований, направленных на выявление причинно-следственных связей на основе актов расследования аварии. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследованы основания возникновения и развития аварии и выделены главные причины происшествия. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Составлена единая причинно-следственная диаграмма возникновения и развития аварии с указанием событий, времени их возникновения и связей между ними.

**Ключевые слова:** Рефтинская ГРЭС; авария; конденсатор связи; энергосистема Свердловской области; отходящие линии; анализ; короткое замыкание.

**Для цитирования:** Аветисян А.С., Ефимов Д.Н. Анализ аварии на Рефтинской ГРЭС, произошедшей 22.08.2016 года // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 37-46. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-37-46.

## ANALYSIS OF THE ACCIDENT AT REFTINSKAYA GRES, WHICH OCCURRED ON 08/22/2016

AS. Avetisyan<sup>1</sup>, DN. Efimov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia  
avetisyan\_geven@mail.ru

**Abstract:** THE PURPOSE. The work is devoted to the study and analysis of the accident on August 22, 2016 at the Reftinskaya GRES, which resulted in the operation of technological protection and, as a result, cascade shutdowns with a violation of the integrity of the UES of Russia. It should be noted that Reftinskaya GRES is one of the largest thermal power plants in Russia, with an installed capacity of 3800 MW. METHODS. Within the framework of the task set, the authors carried out a number of studies aimed at identifying cause-and-effect relationships on the basis of accident investigation acts. RESULTS. The grounds for the occurrence and development of the accident are investigated and the main causes of the accident are identified. CONCLUSION. A unified cause-and-effect diagram of the occurrence and development of an accident was compiled, indicating the events, the time of their occurrence and the links between them.

**Keywords:** Reftinskaya GRES; accident; communication capacitor; power system of the Sverdlovsk region; outgoing lines; analysis; short circuit.

**For citation:** Avetisyan AS, Efimov DN. Analysis of the accident at Reftinskaya GRES, which occurred on 22.08.2016. Power engineering: research, equipment, technology. 2022; 24(6):37-46. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-37-46.

### **Введение**

Энергетика каждого государства функционирует в рамках национальной энергосистемы. В свою очередь, энергосистема представляет собой совокупность звеньев цепочки получения, преобразования, распределения и использования всех видов энергии. При этом вся энергосистема обладает единым режимом и постоянством процесса производства и распределения электроэнергии.

Непредвиденные или аварийные ситуации случаются на объектах электроэнергетики довольно часто. В результате отдельные элементы выводятся из работы, нередко – с повреждениями. К таким ситуациям относятся короткие замыкания, обрывы проводов, взрывы и повреждения в результате резких скачков напряжения в трансформаторных узлах, отказы функционирования систем управления и многие другие.

Целью представляемой научно-исследовательской работы является изучение и анализ аварии, случившейся 22 августа 2016 года на Рефтинской ГРЭС, в ходе которой происходили срабатывания технологических защит, и как следствие, каскадные отключения с нарушением целостности ЕЭС России.

Значимость исследования энергетических аварий очевидна. Аварии в электроэнергетических системах могут привести к длительным перерывам электроснабжения потребителей, обширных территорий, нарушению графиков движения общественного электротранспорта, поражению людей электрическим током. И для того, чтобы предотвратить катастрофические последствия, необходимо знать причины их возникновения.

Несмотря на большое количество исследований в этой и смежных областях такими учеными как Булыгина А.А., Егоров А.О., Савосина А.А. [1] по анализу структуры балансов мощности и электроэнергии региональной энергосистемы Свердловской области, Саенко Е.П., Младова Т.А. [2] по исследованиям и прогнозам чрезвычайных ситуаций на объектах ГРЭС, Решетов Е.В., Кальсин Н.В., Неплюев С.А. [3] по системе контроля состояния конденсаторов связи, Савченко Р.И. [4] по повышению безопасности и надёжности оборудования присоединения ВЧ-связи, тема анализа аварий остаётся актуальной и неисчерпаемой. В представляемой работе производится анализ и отслеживается причинно-следственная связь между событиями, приведшими к возникновению и развитию аварии в энергосистеме.

### **Состояние энергосистемы до аварии**

#### **Рефтинская ГРЭС**

ВЛ 220 кВ Рефтинская ГРЭС – Сирень подключена через ОВ-220 на Рефтинской ГРЭС. Связь шин 500 кВ и 220 кВ на Рефтинской ГРЭС реализуется благодаря автотрансформатору 4 АТГ. Автотрансформатор 3 АТГ находился в отключенном состоянии со стороны 500 кВ [1, 5].

Состояние энергоблоков:

- в нормальной работе: №№2, 4, 6, 7;
- в работе с ограничением максимальной нагрузки (по условиям низкого вакуума и высокой температуры охлаждающей воды): №№ 9, 10;
- в холодном резерве - №1 с 00:26 20.08.2016 до 02:00 24.08.2016;
- в холодном резерве - №3 с 12:05 18.08.2016 до 02:00 24.08.2016;
- в аварийном ремонте - №5 с 12:01 21.08.2016 до 00:01 05.09.2016;
- в капитальном ремонте - №8 с 00:01 01.08.2016 до 00:01 01.09.2016.

Нагрузка электростанции на момент возникновения аварии составляла 2202 МВт.

#### **ОЭС Урала**

В энергосистеме Свердловской области в ремонте по заявкам:

- ВЛ 220 кВ Окунёво-Рефтинская ГРЭС (2-я цепь) - с 04:13 22.08.2016 до 18:00 26.08.2016 с аварийной готовностью 4 часа.
- ВЛ 220 кВ Белоярская АЭС Ново-Свердловская ТЭЦ - с 07:42 22.08.2016 до 21:00 31.08.2016 с аварийной готовностью 2 часа.

В энергосистеме Тюменской области, ХМАО и ЯНАО ВЛ 500 кВ Иртыш–Беркут находилась в ремонте по заявке с 04:40 02.08.2016 до 17:28 23.08.2016 с аварийной готовностью 24 часа.

Состав контролируемого сечения «ОЭС Урала - Тюменская энергосистема»:

- ВЛ 500 кВ Тюмень – Нелым;
- ВЛ 500 кВ Тюмень – Луговая;
- ВЛ 500 кВ Беркут – Иртыш.

Переток в контролируемом сечении «ОЭС Урала - Тюменская энергосистема» составлял 1248 МВт (выдача из Тюменской энергосистемы) при максимально

допустимом перетоке, равном 1850 МВт. Потребление в ОЭС Урала составляло 10136 МВт при фактической нагрузке электростанций 11443 МВт.

*Гидроэлектростанции ОЭС Сибири*

Нагрузки ГЭС на момент возникновения аварии составляли (МВт): Саяно-Шушенская – 4316, Братская – 3179, Усть-Илимская – 2674, Красноярская – 2428, Богучанская – 1734.

Карта-схема электрической сети Свердловской области и условные обозначения к ней приведены на рис. 1 и 2.

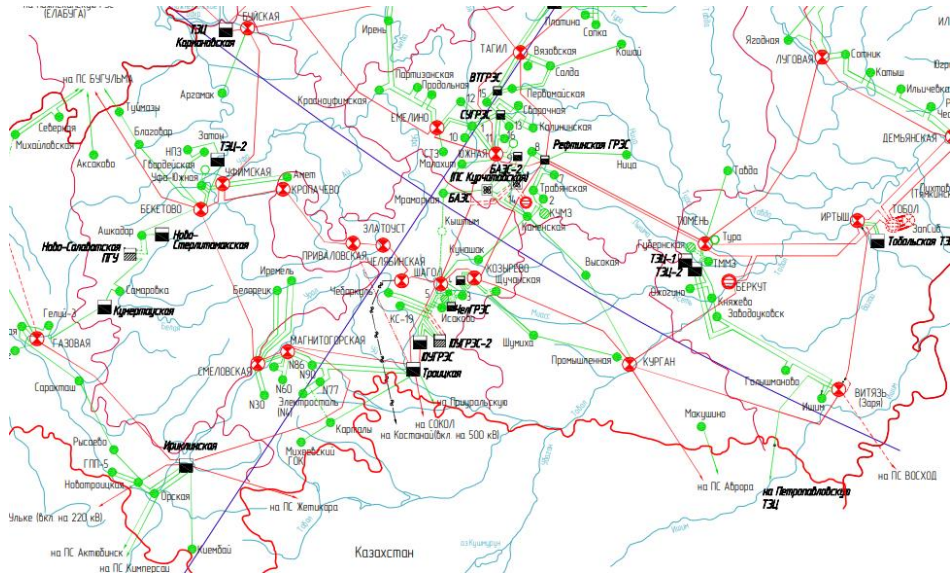


Рис. 1. Энергосистема Свердловской области.

Fig. 1. The power system of the Sverdlovsk region.

- 1 – ПС 220 кВ Первоуральская
- 2 – ПС 220 кВ Электрелизная
- 3 – ПС 220 кВ НМеталлургическая
- 4 – ПС 220 кВ Цинковая
- 5 – ПС 220 кВ Таминский ГОК
- 6 – ПС 220 кВ Металлург
- 7 – ПС 220 кВ Анна
- 8 – ПС 220 кВ Окунево
- 9 – ПС Свердловская ТЭС
- 10 – ПС 220 кВ Метиз
- 11 – ПС 220 кВ Рядина
- 12 – ПС 220 кВ Трудовая
- 13 – ПС 220 кВ Искра
- 14 – ПП 500 кВ Исеть
- 15 – ПС 220 кВ Песчаная
- 16 – ПС 220 кВ Надежда
- 17 – ПС 220 кВ Барсобо
- 18 – ПС 220 кВ Эмтор
- 19 – ПС 220 кВ Межуан
- 20 – ПС 220 кВ ГПП-2
- 21 – ПС 220 кВ Кирьяновская
- 22 – ПС 220 кВ Каркатеевы
- 23 – ПС 220 кВ Прадинская
- 24 – ПС 220 кВ Вектор
- 25 – ПС 220 кВ Полоцкая

	Существующие на 01.01.2014 г.	Вводимые в 2014 г.	Вводимые в 2015-2017 гг.	Вводимые в 2018 - 2020 гг.
Электростанции				
АЗС				
ГЭС				
ТЭС				
Подстанции				
500 кВ				
220 кВ				
Переключательный пункт				
Линии электропередачи				
500 кВ				
220 кВ				
Границы Государственной Энергосистемы ОЭС				

Рис. 2. Условные обозначения.

Fig. 2. Legend.

*Аварийные события*

Отходящие от Рефтинской ГРЭС линии электропередачи показаны на рис. 3. На рис. 4 представлена диаграмма событий, произошедших перед началом и в ходе развития аварии. События распределены по классам: слева – случайные события и управляющие воздействия, справа – естественные события как реакции энергосистемы и энергетического оборудования на изменение условий функционирования. На диаграмме представлены также причинно-следственные связи между событиями. Нумерация групп событий на рис. 4 соответствует цифровым обозначениям мест их локализации на рис. 3.

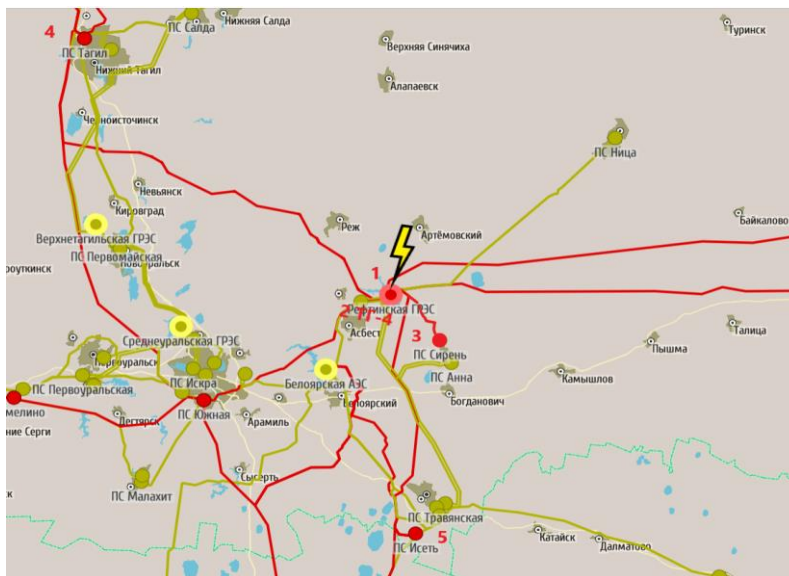


Рис. 3. Рефтинская ГРЭС и отходящие линии.

Fig. 3. Reftinskaya GRES and outgoing lines.

### **Последовательность событий (время – московское)**

В 14:12:03 на ОРУ 220 кВ Рефтинской ГРЭС произошло разрушение конденсатора связи воздушной линии «Анна – Рефтинская ГРЭС». Это сопровождалось выбросом и возгоранием масла. Продукты взрыва вызвали дуговое двухфазное короткое замыкание на ОРУ. В результате замыкания произошло снижение напряжения – в том числе и в сети собственных нужд электростанции [6-8].

В 14:12:04 проявился отказ срабатывания релейной защиты поврежденного присоединения 220 кВ, и короткое замыкание ликвидировано не было. Одновременно началось последовательное отключение энергоблоков Рефтинской ГРЭС технологическими защитами от понижения напряжения. В течение нескольких секунд были отключены все находившиеся в работе генераторы станции суммарной нагрузкой 2,3 ГВт [2, 9].

В 14:12:06 проявился отказ срабатывания резервной защиты на автотрансформаторе 500/220 кВ, и в итоге короткое замыкание было отключено через несколько секунд защитами дальнего резервирования (на ВЛ 500 кВ, отходящих от Рефтинской ГРЭС).

В 14:12:15 вследствие задержки (более 5 с) ликвидации короткого замыкания возник асинхронный режим и сработала автоматика его ликвидации (АЛАР) на отключение ВЛ 500 кВ. В результате отключения ВЛ 500 кВ, связывающих энергосистемы Урала и Тюмени (Рефтинская ГРЭС – Тагил), Тюменская энергосистема оказалась изолированной от ЕЭС России с избытком мощности 1,4 ГВт. При этом частота в ЕЭС России снизилась до 49,74 Гц.

Далее, в 14:20 в ОЭС Сибири действием АЛАР было произведено отключение транзитных ВЛ 500 кВ и шунтирующих их ВЛ 110–220 кВ. Тем самым восточная часть ОЭС Сибири выделилась на изолированную от ЕЭС России работу с избытком мощности 2,1 ГВт [4, 10].

В результате срабатывания устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики с действием на отключение линий электропередачи ЕЭС России разделилась на несколько несинхронно работающих частей. В азиатских регионах России, а также в Монголии и Казахстане были произведены отключения потребителей [11, 12] действием автоматики предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) и автоматической частотной разгрузки (АЧР). В ходе аварии в период с 14:00 до 15:00 московского времени в ОЭС Урала и ОЭС Сибири генерация снизилась примерно на 2,5 ГВт по каждой из ОЭС, а в ЕЭС России – примерно на 3 ГВт.

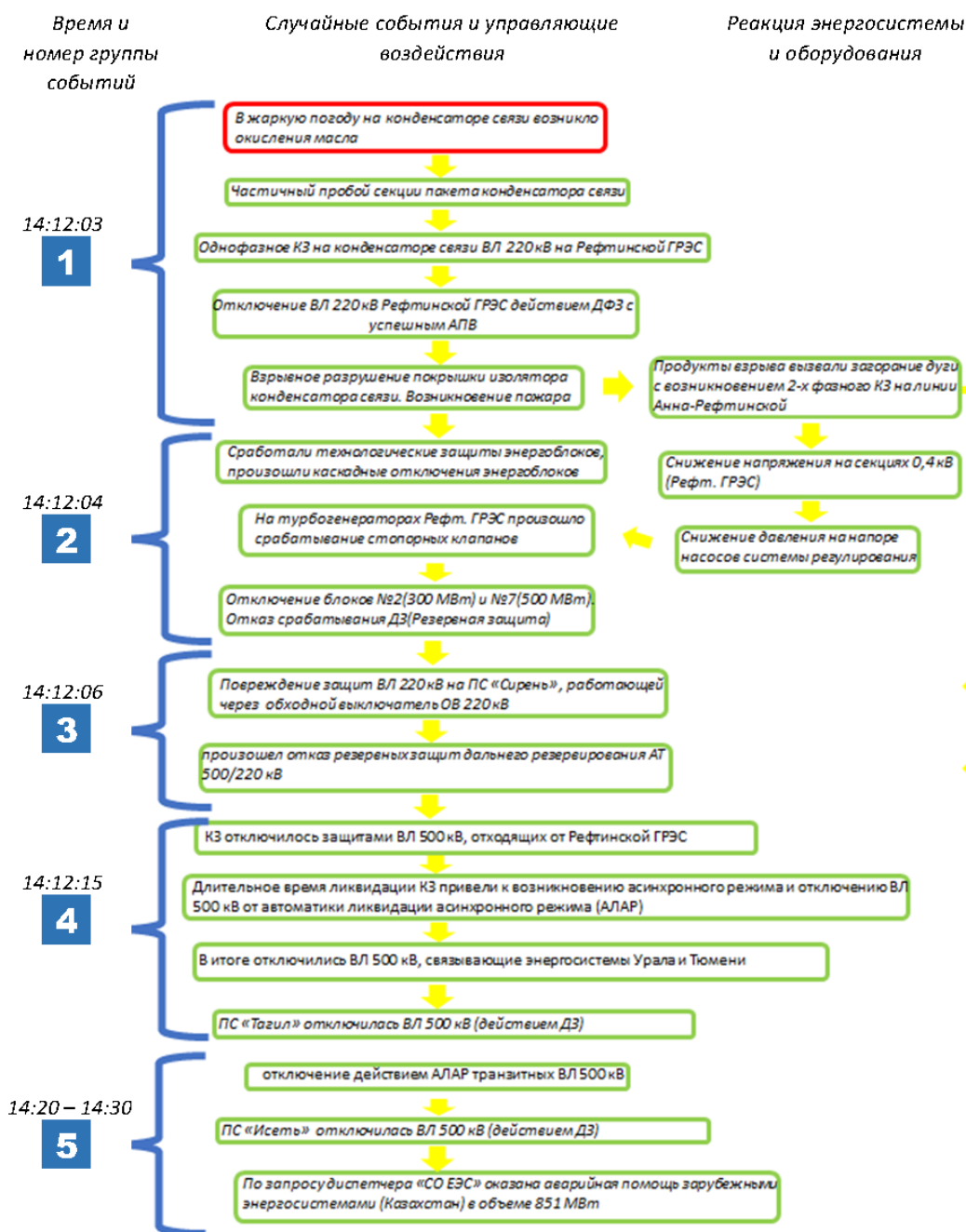


Рис. 4. Диаграмма причинно-следственных связей (время – московское).

Fig. 4. Diagram of causal relationships (Moscow time)

### Использование конденсаторов связи

Конденсаторы связи используются во многих типах цепей, где необходимы выходные сигналы переменного тока, в то время как сигналы постоянного тока используются только для питания отдельных элементов и не должны появляться на выходе [3, 13].

Конденсаторы связи комплексируются с высокочастотными заградителями. Такой фильтр пропускает высокочастотный ток и ограничивает ток промышленной частоты. Кроме того, он отделяет высокое напряжение ЛЭП от низковольтной высокочастотной аппаратуры (рис. 5).

Ёмкостное сопротивление конденсатора связи обратно пропорционально электрической ёмкости (она постоянна для конкретного конденсатора) и электрической частоте сети. Для тока промышленной частоты сопротивление конденсатора будет высоким, а при повышении частоты сопротивление снижается.

Из рис. 6 видно, что ток высокой частоты идёт по пути наименьшего сопротивления через конденсатор связи, затем поступает на фильтр присоединения (ФП). ФП вместе с конденсатором связи образуют так называемый полосовой фильтр.



Его задача принять посланный сигнал только определённой заданной частоты и не пропустить (отфильтровать) помехи. Затем нужный сигнал поступает на соответствующую ВЧ-аппаратуру.

Конденсаторы связи состоят из фарфоровой покрывки, внутри которой находятся три соединённых параллельно пакета, в каждом из которых размещены по 90 секций рулонного типа, соединённых последовательно. Выход из строя конденсатора связан с окислением масла и повреждением проводника, соединяющего фланец с пакетами. В случае на Рефтинской ГРЭС это привело к частичному пробоем секции пакета, локальному нагреву и полному пробоем одной или нескольких секций пакета. Последнее вызвало увеличение ёмкости пакета, снижение его сопротивления и, соответственно, значительное увеличение протекающего по нему тока (рис. 7, [14]).

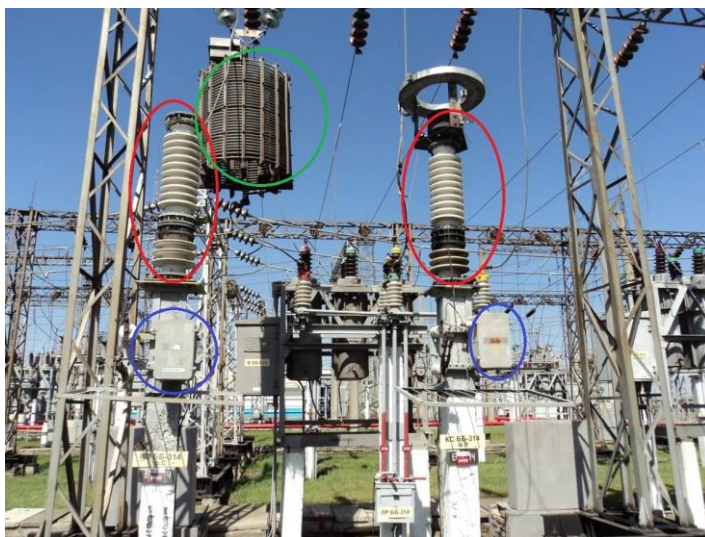


Рис. 5. Конденсаторы связи. Красным выделены конденсаторы связи; зелёным – высокочастотный заградитель; синим – фильтры присоединения.

Fig. 5. Coupling capacitors. The coupling capacitors are highlighted in red; the high-frequency barrier is highlighted in green; the connection filters are highlighted in blue.

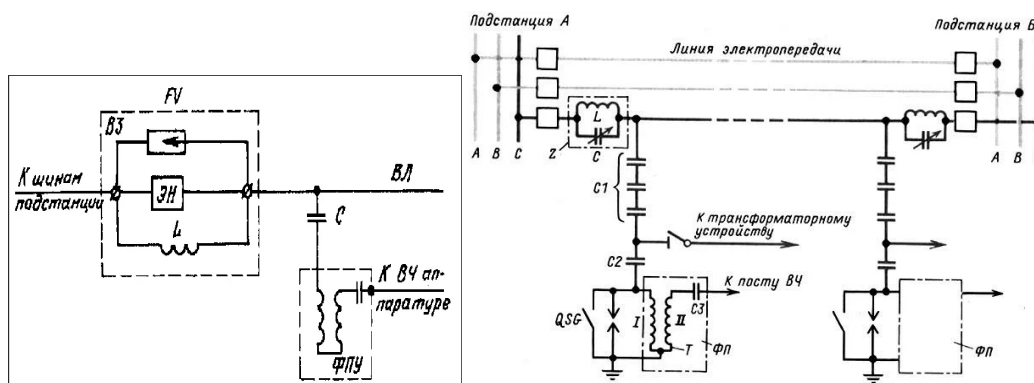


Рис. 6. Схемы организации высокочастотного канала на ЛЭП.

Fig. 6. Schemes of the organization of the high-frequency channel on the power line.

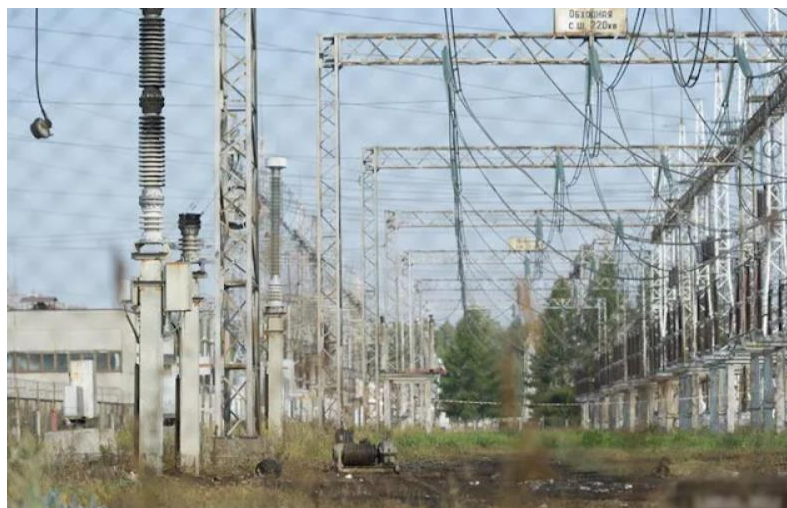


Рис. 7. Конденсатор связи ВЛ 220 кВ и ОРУ 220 кВ Рефтинской ГРЭС после пожара.

Fig. 7. Coupling capacitor of 220 kV overhead line and 220 kV outdoor switchgear at Reftinskaya GRES after a fire.

### Результаты и их обсуждение

В результате выполнения представляемой работы был исследована доступная информация и проведен анализ аварии, начавшейся в Свердловской энергосистеме и распространившейся на объединенные энергосистемы Урала и Сибири.

Первопричиной аварии явилось разрушение конденсатора связи на ОРУ 220 кВ Рефтинской ГРЭС, приведшее к короткому замыканию. Вследствие отказов срабатывания двух устройств релейной защиты (при штатном срабатывании остальных устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики) возникли каскадные отключения энергоблоков и линий электропередачи.

В процессе аварии на изолированную от ЕЭС работу выделились Тюменская ЭЭС, восточная часть ОЭС Сибири, а также (совместно) энергосистемы Бурятии и Забайкалья (рис. 8, [6]).

Согласно «Акту №13-01-16/02-16 Расследования причин аварии, произошедшей 22.08.2016 года» [15] ошибочных действий оперативного персонала Рефтинской ГРЭС выявлено не было, и рабочая мощность электростанции после аварии была восстановлена в кратчайшие сроки.

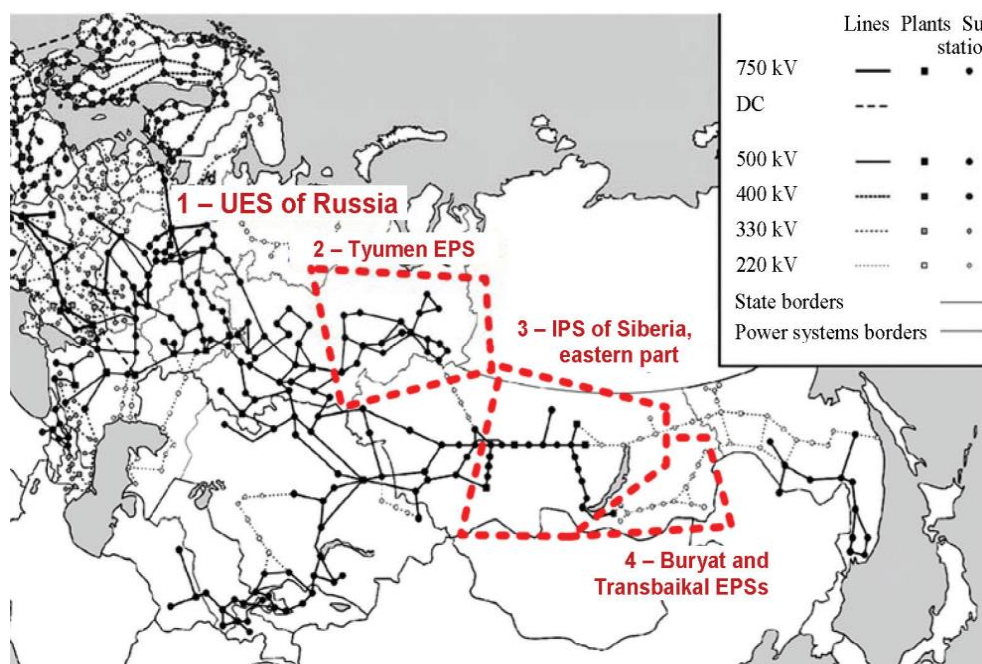


Рис. 8. Выделение трёх энергосистем на изолированную от ЕЭС России работу.

Fig. 8. Allocation of three power systems for operation isolated from the UES of Russia.

### Выводы

1. Аварии и катастрофы в РФ часто оказываются следствием ведомственно-технократической стратегии, которая приводит к сооружению объектов с недостаточным количеством средств по обеспечению безопасности. Одним из примеров является рассмотренная в статье авария, начавшаяся на Рефтинской ГРЭС Свердловской энергосистемы с разрушения конденсатора связи ВЛ 220 кВ, выброса и возгорания масла и последовавшего короткого замыкания на ОРУ 220 кВ. Далее последовали каскадные отключения энергоблоков и линий электропередачи в двух объединенных энергосистемах.

2. На основе источников, находящихся в открытом доступе авторами была составлена диаграмма причинно-следственных связей с указанием событий и времени их возникновения.

3. В результате аварии была нарушена целостность ЕЭС России – на изолированную работу выделились энергосистемы Тюмени, восточной части ОЭС Сибири, Бурятии и Забайкалья. Это, в свою очередь, привело к дисбалансу между генерацией и потреблением электрической мощности во всех названных энергосистемах. По причине такого дисбаланса произошло снижение частоты тока в сети и его напряжения, что и привело к каскадному срабатыванию автоматики на смежных подстанциях. Из последствий аварии для потребителей стоит отметить, что один из крупнейших в стране производителей полимеров «Томскнефтехим», подконтрольный «Сибуру», был вынужден приостановить свою деятельность на продолжительное время (около 24 часов). Перебои электроснабжения имели место также на шахтах Кузбасса (ЛУКОЙЛ).

### Литература

1. Булыгина А.А., Егоров А.О., Савосина А.А. Анализ структуры балансов мощности и электроэнергии региональной энергосистемы Свердловской области. В сборнике: Развивая энергетическую повестку будущего. Сборник докладов Международной научно-практической конференции для представителей сообщества молодых инженеров ТЭК. Санкт-Петербург, 2021. С. 99-104. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=47381798>].
2. Исследования и прогноз чрезвычайных ситуаций на объектах ГРЭС. Саенко Е.П., Младова Т.А. В сборнике: Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч. Комсомольск-на-Амуре, 2020. С. 67-69. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=43947535>].
3. Система контроля состояния конденсаторов связи. Решетов Е.В., Кальсин Н.В., Неплюев С.А. Патент на изобретение RU 2675250 C1, 18.12.2018. Заявка № 2018110229 от 22.03.2018. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=37364381>].
4. Повышение безопасности и надёжности оборудования присоединения ВЧ-связи. Савченко Р.И. Энергетик. 2019. № 11. С. 17-19. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=41432287>].
5. Анализ системной аварии 2016 г. в ЕЭС России, вызванной повреждением оборудования на Рефтинской ГРЭС. Воропай Н. И., Осак А. Б., Смирнов С. С. Электричество. 2018. № 3. С. 27-32. [<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32477464>].
6. Some Generalizations of an Analysis of 2016-2017 Blackouts in the Unified Power System of Russia. N.I. Voropai, D.N. Efimov, A.B. Osak, M.V. Chulyukova. Energy Systems Research. V. 3, No. 2, 2020.
7. B. Li, P. Gomes, R. Baumann. Lessons learned from recent emergencies and blackout incidents. Electra. no. 279, pp. 66–73, 2015.
8. Y. Besanger, M. Eremia, N. Voropai. Major grid blackouts: Analysis, classification, and prevention, in Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control, Hoboken, IEEE Press-Wiley. 2013, pp. 789–863.
9. B. Martins, P. Gomes, F. Alves. Lessons learned in restoration from recent blackout incidents in Brazilian power system. CIGRE 2012 Session, Paris, France, August 25–30, C2-214, 2012, 8 p.
10. P. Hines, J. Apt, S. Talukdar. Large blackouts in North America: Historical trends and policy implications. Energy Policy. V. 37. no. 12, pp. 5249–5259, 2009.
11. P. Pourbeik, P. S. Kundur, C. W. Taylor. The anatomy of a power grid blackout. IEEE Power and Energy Magazine. V. 4 no. 5, pp. 22–29, 2006.
12. W. Bialek. Blackouts in the US/Canada and continental Europe in 2003: is liberalization to blame? 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech, St. Petersburg, Russia, June 27–



30, 2005, 7 p.

13. Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2014-2020 годы. Приказ Минэнерго России от 1 августа 2014 №495.

14. PROenergo. Кто заплатит потребителям за убытки: итоги расследования масштабной аварии 22 августа 2016 г. на Рефтинской ГРЭС [Электронный ресурс] <https://proenergo.blogspot.com/2016/10/investigation-of-blackout-in-Siberia-2016.html>

15. АКТ № 13-01-16/02-16 Расследования причин аварии, произошедшей 22.08.2016 года.

#### Авторы публикации

**Аветисян Артур Сергеевич** – магистрант кафедры Электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ).

**Ефимов Дмитрий Николаевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры Электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского университета (ИРНИТУ); старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

#### References

1. Bulygina AA, Egorov AO, Savosina AA. *Analysis of the structure of power and electricity balances of the regional power system of the Sverdlovsk region. In the collection: Developing the energy agenda of the future.* Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference for representatives of the community of young fuel and energy engineers. St. Petersburg, 2021. pp. 99-104. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=47381798>].

2. Sayenko EP, Mladova TA. *Research and forecast of emergency situations at the GRES facilities. In the proceedings: Youth and Science: actual problems of fundamental and applied research.* Materials of the III All-Russian National Scientific Conference of Students, postgraduates and young scientists, in 3 parts. Komsomolsk-on-Amur, 2020. pp. 67-69. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=43947535>].

3. Reshetov EV, Kalsin NV, Neplyuev SA. *A system for monitoring the condition of communication capacitors.* Patent for invention RU 2675250 C1, 12/18/2018. Application No. 2018110229 dated 22.03.2018. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=37364381>].

4. Savchenko RI. *Improving the safety and reliability of RF connection equipment.* Power engineer. 2019. No. 11. pp. 17-19. [<https://elibrary.ru/item.asp?id=41432287>].

5. Voropai NI, Osak AB, Smirnov SS. Analysis of the 2016 system accident in the UES of Russia caused by equipment damage at Reftinskaya GRES. *Electricity.* 2018;3:27-32. [<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32477464>].

6. Voropai I, Efimov DN, Osak AB, et al. Some MV. Generalizations of an Analysis of 2016-2017 Blackouts in the Unified Power System of Russia. *Energy Systems Research.* 2020;3(2).

7. B. Li, P. Gomes, R. Baumann. Lessons learned from recent emergencies and blackout incidents. *Electra.* 2015;279:66–73, 2015.

8. Besanger Y, Eremia M, Voropai N. Major grid blackouts: Analysis, classification, and prevention, in *Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control*, Hoboken, IEEE Press-Wiley, 2013, pp. 789–863.

9. Martins B, Gomes P, Alves F. *Lessons learned in restoration from recent blackout incidents in Brazilian power system.* CIGRE 2012 Session, Paris, France, August 25–30, C2-214, 2012, 8 p.

10. Hines P., Apt J., Talukdar S. Large blackouts in North America: Historical trends and policy implications. *Energy Policy.* 2009;37(12):5249–5259, 2009.

11. Pourbeik P., Kundur PS, Taylor CW. The anatomy of a power grid blackout. *IEEE Power and Energy Magazine.* 2006;4(5):22–29, 2006.

12. Bialek W. *Blackouts in the US/Canada and continental Europe in 2003: is liberalization to blame?* 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech, St. Petersburg, Russia, June 27–30, 2005, 7 p.

13. *Scheme and program for the development of the Unified Energy System of Russia for 2014-2020.* Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation No. 495 dated August 1, 2014.

14. PROenergo. *Who will pay consumers for losses: the results of the investigation of a large-scale accident on August 22, 2016 at Refiinskaya GRES* [Electronic resource] <https://proenergo.blogspot.com/2016/10/investigation-of-blackout-in-Siberia-2016.html>.

15. ACT No. 13-01-16/02-16 Investigation of the causes of the accident that occurred on 22.08.2016.

#### **Authors of the publication**

**Arthur S. Avetisyan** – graduate student of the department «Power Supply and Electrical Engineering», Irkutsk National Technical Research University, Irkutsk, Russia.

**Dmitry N. Efimov** – PhD in technical sciences, associate professor of the department «Power Supply and Electrical Engineering», Irkutsk National Research University, Irkutsk, Russia; Senior researcher of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia.

**Получено** **14.11.2022г.**

**Отредактировано** **22.11.2022г.**

**Принято** **29.11.2022г.**