

# Требования к параметрам RC-цепей на напряжение 6 — 110 кВ

ЦИВИЛЁВ И. Ю., инженер, ООО «Болид»  
nio\_bolid@ngs.ru

Изложены основные требования, предъявляемые к параметрам резисторов и конденсаторов в составе RC-цепей, а также подходы к выбору этих параметров. Кроме того, отмечена возможность применения частотно-зависимых резисторов для RC-цепей с обратнoзависимой частотной характеристикой в целях оптимизации параметров защитного аппарата, приведены примеры конструкций RC-цепей, предлагаемых компанией ООО «Болид».

Ключевые слова: RC-цепь, перенапряжения, резистор, конденсатор, высшие гармоники, двигатель, трансформатор.

**В** связи с широким внедрением в сетях 6 — 35 кВ выключателей с вакуумной дугогасительной средой всё более актуальной становится задача ограничения перенапряжений на изоляции коммутируемого оборудования. Особенность гашения дуги в вакууме заключается в том, что обрыв тока в вакуумной дугогасительной камере (ВДК) может происходить при переходе через нулевое значение тока, в котором превалирует высокая частота.

В этом случае при определённых условиях возможна эскалация перенапряжений, достигающих опасных уровней как для основной, так и витковой изоляции коммутируемого оборудования (например, электродвигателя или трансформатора). Это явление возникает, как правило, с началом переходного процесса в сети после появления тока «среза» в ВДК при приближении мгновенного значения тока к нулю.

Преимущество RC-цепи как ограничителя коммутационных перенапряжений заключается в её «подключении» с самого начала переходного процесса, тогда как защитное действие ограничителя перенапряжения (ОПН) начинает проявляться лишь при достаточном для его «срабатывания» уровне напряжения. Кроме того, наличие конденсатора в составе RC-цепи уменьшает частоту восстанавливающегося напряжения на контактах ВДК и, следовательно, снижает вероятность повторных зажиганий дуги в ВДК.

## Основные требования к конденсаторам и резисторам RC-цепей

Для обеспечения надёжной работы самих RC-цепей, а также оборудования сети, где они устанавливаются, следует выделить ряд требований, которым должны удовлетворять параметры конденсаторов и резисторов RC-цепей.

1. Конденсаторы должны быть практически безындукционными. Это свойство обеспечивается за счёт бифилярной намотки секций конденсаторов. В эксплуатации неоднократно наблюдались повреждения оборудования в результате неправильной комплектации RC-цепей — обычными косинусными конденсаторами вместо малоиндукционных, рекомендуемых проектировщиками. При этом из-за наличия некоторой индуктивности сопротивление конденсаторов на высоких

частотах становится значительным, в результате RC-цепь теряет свойство ограничителя, что может привести к ещё большему перенапряжению при коммутациях присоединений. К сожалению, производители указывают значение индуктивности только для импульсных конденсаторов. Данный параметр конденсаторов, предназначенных для длительной работы под напряжением, следует уточнять (запрашивать) у производителя.

2. Резисторы должны обладать малой индуктивностью и рассеивать в переходном процессе поглощаемую энергию коммутационных импульсов. Получить данный параметр от производителя довольно сложно. Однако известно, что резисторы, изготовленные из материалов со свойством объёмной проводимости (например, композиционные электропроводные), имеют меньшую индуктивность по сравнению с металлическими резисторами.

3. Предпочтительное место размещения RC-цепи — непосредственно на зажимах защищаемого оборудования. Если это невозможно, защитный аппарат можно установить за выключателем на стороне коммутируемого присоединения. Однако эффективность RC-цепи будет снижаться с увеличением длины кабеля до защищаемого оборудования. В этом случае необходимо выполнять расчёт коммутационных перенапряжений.

4. Длительное протекание тока через RC-цепь не должно приводить к потере тепловой устойчивости защитного аппарата. Это относится к режимам эксплуатации сети как нормальному, так и устойчивого однофазного замыкания на землю (ОЗЗ), когда на неповреждённых фазах возникает линейное напряжение. При расчёте мощности резистора и выборе ёмкости конденсатора необходимо учитывать максимально допустимое время существования режима ОЗЗ для конкретной рассматриваемой сети. Кроме того, следует рассчитывать возможную перегрузку конденсатора по току вследствие увеличения напряжения сети и протекания токов высших гармоник (ВГ). Коэффициент перегрузки не должен превышать нормируемое (в паспорте аппарата) значение, иначе срок службы конденсатора будет весьма ограничен. Вместе с тем конденсатор должен выдерживать им-

пульсные токи при воздействии коммутационных импульсов.

Выбор допустимой мощности рассеяния осуществляется, как правило, по длительному режиму. Особенно это касается сетей, кривые фазных напряжений которых искажены высшими гармоническими составляющими. Например, мощность резистора для RC-цепи в сети 35 кВ, питающей мощную сталеплавильную печь, может достигать нескольких киловатт.

В общем случае в виду разнообразия схем, в которых применяются RC-цепи, довольно сложно определить приемлемые значения индуктивностей резисторов и конденсаторов, поэтому эффективность RC-цепи с конкретными параметрами должна проверяться расчётным путём.

Особое внимание следует уделять схемам предприятий с нагрузкой, генерирующей ВГ в напряжениях фаз и токи питающей сети, с вентиляльными преобразователями, дугowymi и руднотермическими печами, частотно-регулируемыми приводами и пр.

Известно, что ВГ в системах электроснабжения отрицательно воздействуют на оборудование сетей: возникают дополнительные потери электроэнергии в электрических машинах, трансформаторах и сетях; сокращается срок службы изоляции электрических машин и аппаратов; ухудшается работа устройств автоматики, телемеханики и связи; затрудняется компенсация реактивной мощности с помощью батарей конденсаторов [1].

Например, потери активной мощности на частотах ВГ в трансформаторах можно определить по следующей формуле [1]:

$$\Delta P_{T.V} = 3 \sum_{v=2}^n I_{T.V}^2 R_{K3V},$$

где  $I_{T.V}$  — ток  $v$ -й гармоники, протекающий через трансформатор;  $R_{K3V}$  — сопротивление короткого замыкания (КЗ) трансформатора на частоте  $v$ -й гармоники.

Если известны напряжения ВГ на выводах трансформатора  $U_v$  (в относительных единицах), тогда указанную формулу представим в другом виде:

$$\Delta P_{T.V} = 0,6 \frac{\Delta P_{K3T}}{u_{K3}^2} \sum_{v=2}^n \frac{K_{U(v)}^2}{v\sqrt{v}},$$

где  $P_{K3T}$  — номинальные потери в трансформаторе;  $u_{K3}$  — напряжение КЗ трансформатора;  $K_{U(v)}$  — коэффициент  $v$ -й гармонической составляющей в напряжении.

Суммарные полные потери в общем случае составляют

$$\Delta P_{\Sigma V} = \sum_{v=2}^n \Delta P_{T.V} (1 + 0,05v^2).$$

Следовательно, необходимо поддерживать качество электроэнергии по ГОСТ 13109–97 [2], например, устанавливая в сети питания нагрузки различные фильтры. Однако на практике это не всегда выполняется из-за высокой стоимости необходимых для этого проектных работ.

Ситуация может усугубиться, если на питающем нелинейную нагрузку присо-

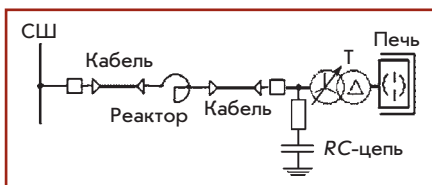


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема питания сталеплавильной печи

единении установлен токоограничивающий реактор (рис. 1). В такой схеме RC-цепь размещается перед трансформатором печи, а фильтры, как правило, — на питающих шинах. Так как индуктивное сопротивление реактора пропорционально частоте колебаний, генерируемых нагрузкой, он будет ограничивать проникновение этих колебаний на шины, где находятся фильтры. При этом последние могут обеспечивать качество электроэнергии на шинах, тогда как за реактором присоединяется уровень гармоник нередко превышает норму.

Это обстоятельство следует учитывать при выборе параметров RC-цепи. Если на присоединении не установлен токоограничивающий реактор, напряжение на фазах трансформатора печи практически не будет отличаться по гармоническому составу от напряжения на питающих шинах. Таким образом, при выборе параметров RC-цепей необходимо рассчитывать тепловую устойчивость элементов с учётом высших гармонических составляющих, присутствующих в напряжении фаз в точке присоединения защитного аппарата.

При этом желательно иметь информацию о возможных уровнях гармоник в различных режимах эксплуатации нагрузки (например, с помощью экспериментальных измерений напряжений фаз). Следует отметить, что в режиме устойчивого ОЗЗ в сети питания нелинейной нагрузки также возможно резонансное усиление ряда гармоник в фазных напряжениях.

### Основные способы выбора параметров RC-цепей

Один из наиболее простых и не связанных с непосредственным расчётом коммутационных перенапряжений способов — использование методики, изложенной в руководстве [3]. Однако этот документ предназначен для сетей собственных нужд 6 кВ энергообъектов. Причём пример расчёта параметров защитного аппарата приведён только для присоединения с двигателем.

В отличие от указанной методики, на основе многочисленных экспериментальных данных, подтверждённых расчётами, в диссертационной работе [4] показано, что значение ёмкости RC-цепи можно принять вдвое меньшим (но не менее 0,1 мкФ), а сопротивление должно соответствовать волновому сопротивлению кабеля.

Следует отметить, что электродвигатели эксплуатируются и в сетях 10 кВ, а трансформаторы применяются на все рассматриваемые классы напряжения. К сожалению, в настоящее время в Рос-

сии нет других документов по выбору RC-цепей. Поэтому в ряде случаев необходимо составлять соответствующую математическую модель сети и процесса коммутации вакуумными выключателями (ВВ) и на основе расчётов модели выбирать указанные параметры [5 – 7].

На расчёте коммутационных перенапряжений, генерируемых ВВ, основаны следующие этапы выбора параметров RC-цепей.

1. Для наиболее опасной коммутации выключателем с точки зрения возникновения максимальных перенапряжений (например, отключение первой фазы ВВ при отключении неразвернувшегося двигателя), как правило, выполняются расчёты переходных процессов. В этом случае параметры RC-цепи выбирают такими, чтобы исключить возникновение повторных зажиганий во время отключения выключателя.

При определённых сочетаниях параметров расчётной схемы замещения в целях полного исключения повторных зажиганий в ВДК выключателя необходима установка конденсатора с относительно большой ёмкостью (до нескольких микрофарад), что приводит к значительному возрастанию тока ОЗЗ в сети. Вместе с тем, как показывают расчёты, можно подобрать такую ёмкость конденсатора, которая, с одной стороны, не приведёт к значительному увеличению тока ОЗЗ, а с другой, обеспечит возникновение только одного повторного зажигания дуги в ВДК, не вызывающего опасных перенапряжений для изоляции коммутируемого оборудования.

Кроме того, существует также альтернативный способ определения параметров RC-цепей на основе расчёта перенапряжений, когда составляется математическая модель для определения воздействия на защитный аппарат нормируемого коммутационного импульса. С помощью RC-цепи амплитуда импульса должна быть ограничена до необходимого значения.

2. Длительно допустимую рассеиваемую мощность резистора (в зависимости от конструкции) RC-цепи следует выбирать по току промышленной частоты, протекающему через резистор и конденсатор в длительном режиме. Если допускается длительная (несколько часов) работа сети в режиме устойчивого ОЗЗ, при выборе параметров RC-цепи следует исходить из этого режима. Нормальный режим будет основным в случае действия защиты от ОЗЗ на отключение повреждённого присоединения. Кроме того, как уже отмечалось, следует учитывать наличие и уровень гармоник напряжения в предпологаемой точке присоединения RC-цепи.

3. Размещение RC-цепей в электрических сетях 6 – 35 кВ приводит к возрастанию уровня ёмкостного тока при ОЗЗ. Согласно [3] использование RC-цепей не должно приводить к необходимости установки дополнительных дугогасящих реакторов. Однако рассматриваемый случай следует оценивать также с экономиче-

ской точки зрения, учитывая категорию важности потребителя.

Следует отметить, что в электрических сетях, питающих оборудование шахт, также применяются RC-цепи для ограничения перенапряжений на изоляции коммутируемых трансформаторов. Однако стандартный способ их установки между фазой и «землёй», который обуславливает возрастание ёмкостного тока ОЗЗ в сети, зачастую недопустим. В таком случае возможен вариант размещения RC-цепей между фазами (соединение по схеме треугольник) [8], однако эффективность этой меры необходимо дополнительно проверять расчётным путём. Кроме того, следует учитывать возникновение междуфазного КЗ в сети в случае пробоя конденсатора(ов) RC-цепи.

В схеме (см. рис. 1), а также на идентичной схеме питания мощных электродвигателей (через токоограничивающий реактор вместо трансформатора печи) выключатель присоединяется и реактор, как правило, связаны шинами или коротким кабелем. Здесь при коммутациях на первые витки реактора воздействуют высокие градиентные перенапряжения.

В сетях с электродвигателями СТД мощностью до 12,5 МВт неоднократно наблюдались повреждения токоограничивающих бетонных реакторов после замены электромагнитных выключателей на вакуумные. Ситуация усугубляется ещё и тем, что через реактор протекают значительные токи (особенно при пуске двигателя). В этом случае изоляция реактора, например, при повторном пуске двигателя (если первый пуск по какой-либо причине оказался неудачным), испытывает не только электрические воздействия в виде перенапряжений, но и повышенную тепловую нагрузку.

В результате во время пробоя между витками за счёт динамических воздействий, возникающих при пусковом токе, происходил выброс расплавленного металла обмотки реактора с последующим перекрытием изоляции оборудования. Поэтому на реактированных присоединениях с вакуумными выключателями RC-цепи целесообразно размещать перед токоограничивающим реактором.

4. На следующем этапе выбора RC-цепей определяются производители, которые выпускают резисторы и конденсаторы в соответствии с указанными ранее требованиями, а затем — необходимые номинальные значения сопротивления резистора и ёмкости конденсатора (R и C). Согласно руководящему документу [3] рекомендуется полученные расчётные значения R и C округлять до ближайших стандартных не более чем на 15%. В случае невыполнения этого условия следует провести повторный расчёт коммутационных перенапряжений с новыми (стандартными) значениями R и C.

В настоящее время для ограничения генерируемых ВВ перенапряжений, которые воздействуют на изоляцию силовых трансформаторов в сетях 110 кВ, также применяются RC цепи. Так, например, в паспорте выключателя ВВЭЛ-110 производства ООО «ЭЛВЕСТ» указано, что в



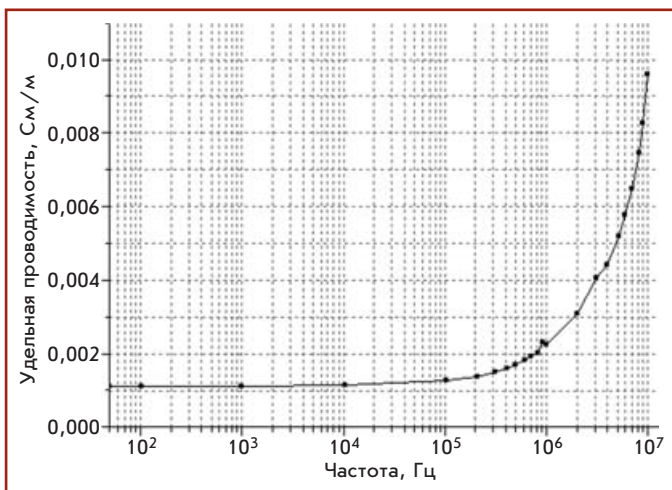


Рис. 2. Зависимость удельной проводимости композиционного материала от частоты

схеме с выключателем обязательно применение RC-цепей в качестве средств ограничения перенапряжений.

**О возможности применения частотно-зависимых резисторов в RC-цепях с обратнозависимой частотной характеристикой**

Исследования показали, что производимые компанией ООО «Болид» композиционные материалы на основе материала ЭКОМ при определенном способе изготовления и сочетании исходных ингредиентов обладают зависимостью сопротивления от частоты, весьма отличной от аналогичной зависимости для металлов. При увеличении частоты протекаемого в металлическом проводнике тока наблюдается скин-эффект, который приводит к вытеснению тока ближе к поверхности проводника. Для композиционных материалов указанная зависимость обратная: при увеличении частоты тока сопротивление материала уменьшается (рис. 2).

Такой материал для изготовления резистора, входящего в состав RC-цепи, позволяет оптимизировать её характеристики. Поскольку существует обратная зависимость материала резистора от частоты, появляется возможность увеличения сопротивления RC-цепи, чтобы в длительном режиме через резистор протекал меньший ток, чем через аналогичную RC-цепь с обычным резистором. Это позволяет снизить мощность резистора и ограничить воздействие на конденсаторы RC-цепи напряжений и токов 50 Гц, а также ВГ в нормальном режиме работы сети и в режиме ОЗЗ.

В связи с этим возникла необходимость разработать требования к частотной зависимости материала резистора, чтобы иметь приемлемые значения сопротивлений на частоте 50 Гц (при длительном воздействии напряжения на RC-цепь), а на ожидаемой частоте переходного процесса при коммутационных перенапряжениях — сопротивление, позволяющее эффективно ограничивать эти перенапряжения. На частоте 50 Гц резистор должен обладать сопротивлением порядка нескольких килоом, а на высокой частоте — десятков или сотен ом.

**Примеры конструкций RC-цепей, предлагаемых ООО «Болид»**

Компанией налажен выпуск резисторов для RC-цепей, устанавливаемых в сетях 6 – 110 кВ. Они состоят из нескольких резистивных элементов, соединённых параллельно и закреплённых в изоляционном каркасе из стеклотекстолита. Число элементов зависит от класса напряжения, номинальных значений сопротивления резистора и рассеиваемой им мощности. Каждый элемент состоит из последовательно соединённых электропроводных частей в форме дисков, изготовленных из композиционного материала ЭКОМ.

**Технические характеристики RC-цепи на напряжении 6 – 110 кВ**

- Номинальное сопротивление, Ом . . . . . 5 – 200 ± 10 %
- Номинальное напряжение сети, кВ . . . 6 – 110
- Климатическое исполнение . . . . . УХЛЗ
- Группа механического исполнения по стойкости к вибрациям . . . . . М39
- Срок службы, лет . . . . . Не менее 10

На рис. 3 изображена конструкция фазы RC-цепи на напряжение 35 кВ, состоящая из двух параллельных элементов резистора и двух последовательно соединённых конденсаторов. Аналогичную конструкцию можно применить и на напряжения 6 – 10 кВ. На рис. 4 показана RC-цепь на 110 кВ другой конструкции, которая установлена в сети ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат». Четыре конденсатора ёмкостью 0,1 мкФ на фазу соединены последовательно, резистор состоит из трёх параллельных элементов (50 Ом).

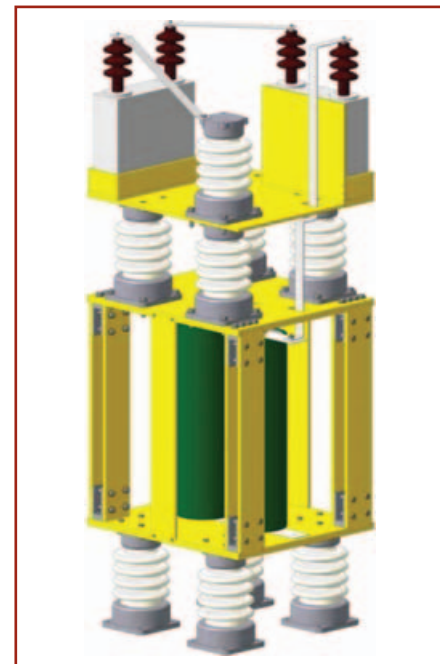


Рис. 3. Конструкция RC-цепи на напряжение 35 кВ



Рис. 4. Общий вид RC-цепи в сети 110 кВ

## Выводы

1. RC-цепь — защитный аппарат, обеспечивающий при соответствующем выборе его параметров и места установки в сети глубокое ограничение перенапряжений при коммутациях присоединений вакуумными выключателями.

2. Выбор параметров RC-цепей определяется различными факторами, в том числе типом защищаемого оборудования. Применение RC-цепей позволяет реализовать защиту от перенапряжений корпусной и витковой изоляции электродвигателей, силовых трансформаторов и токоограничивающих реакторов.

3. На основе композиционного материала, изготавливаемого компанией ООО «Болдид», возможно создание частотно-зависимых маломощных резисторов для комплектации RC-цепей (в целях снижения токов в нормальном режиме и режиме ОЗЗ через резистор и конденсаторы самого ограничителя).

4. Резисторы для RC-цепей ООО «Болдид» выпускает на различные номинальные значения (на базе конденсаторов сторонних производителей) для установки в сетях напряжением 6 – 110 кВ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 160 с.

2. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: ИПК изд-во стандартов, 1999.

3. РД 153-34.3-35.125–99. Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. 2-е изд. / Под научн. ред. Н. Н. Тиходеева. — Изд-во ПИЭПК, 1999.

4. Дегтярев И. Л. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих коммутации вакуумными выключателями: Дисс. ... канд. техн. наук. — Новосибирск: НГТУ, 2006.

5. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Рейхердт А. А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник для вузов. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. — 368 с.

6. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Лаптев О. И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: Монография. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. — 343 с.

7. Защита сетей 6 – 35 кВ от перенапряжений / Ф. Х. Халилов, Г. А. Евдокунин, В. С. Поляков и др. // Под ред. Ф. Х. Халилова, Г. А. Евдокунина, А. И. Таджибаева. — СПб.: Энергоатомиздат, 2002. — 272 с.

8. Качесов В. Е. Эскалация перенапряжений в вакуумных выключателях при отключении электродвигателей и их предотвращение с помощью RC-цепей // Электричество. 2008. № 6. С. 24 – 35.

## Ограничение перенапряжений в электрической сети 10 кВ

ДМИТРИЕВ И. Н., канд. техн. наук, начальник департамента эксплуатации и мониторинга основных средств ОАО «МРСК Урала»  
620026, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 140  
IDmitriev@MRSK-URAL.RU

Изложены проблемы аварийности оборудования напряжением 10 кВ на подстанции Ферросплав ОАО «Свердловэнерго». Показано, что внедрение резистивного заземления нейтрали позволило ограничить перенапряжения при замыканиях на землю. Опыт эксплуатации подтверждает результаты экспериментальных исследований, проведённых в системе электроснабжения ОАО «Серовский завод ферросплавов» (далее ОАО СЗФ).

Ключевые слова: перенапряжения, резонансные явления, резистивное заземление нейтрали.

Повышение надёжности работы подстанции 110/10 кВ Ферросплав, введённой в эксплуатацию в 1956 г. в ОАО «Свердловэнерго», всегда было актуальной проблемой. Подстанция сложная: две системы шин с обходной по 110 кВ, шесть силовых трансформаторов установленной мощностью 429 МВ · А, одиннадцать секций 10 кВ. Она обеспечивает питанием крупного потребителя — ОАО СЗФ с разрешённой мощностью потребления 196 МВ · А. Несмотря на эксплуатацию оборудования с выполнением высоких современных требований, повреждение силовых трансформаторов и токоограничивающих реакторов, установленных на отходящих фидерах 10 кВ, было довольно привычным событием.

В 2006 г. проблемы начались с повреждения одного из трансформаторов — Т4 мощностью 63 МВ · А. В то время на подстанции было установлено пять трансформаторов суммарной мощностью 346 МВ · А, и выход любого из них существенно влиял на работу предприятия-потребителя, хотя загрузка трансформаторов не превышала 70 %, была ограничена характером нагрузки (резко меняющаяся ударная), обусловленным работой дуговых печей. Руднотермические печи цеха № 1 предприятия работают в непрерывном режиме с закрытой дугой при периодических загрузках шихты, а также выпуске сплава и шлака. Аналогичные печи цеха № 2 работают с открытой электрической дугой при периодическом возобновлении технологического процесса.

Следующее повреждение с возгоранием случилось через месяц на другом трансформаторе Т1 мощностью 80 МВ · А. Для выяснения причины ООО «Болдид» провело экспериментальное обследование и анализ режимов работы электрооборудования электрической сети 10 кВ подстанции Ферросплав, а также разработало мероприятия по обеспечению его надёжного и безаварийного функционирования. При этом в сети 10 кВ подстанции Ферросплав были выполнены: измерение ёмкостных токов однофазного замыкания на землю

(ОЗЗ), измерение гармонического состава напряжения, мониторинг перенапряжений и токов.

Сеть 10 кВ подстанции Ферросплав работает в режиме изолированной нейтрали. Ёмкостные токи секций 10 кВ изменяются в пределах 2,2 – 12,5 А и зависят от схемы соединения подстанций ОАО СЗФ. Из-за малых ёмкостных токов на секциях шин 10 кВ подстанции дугогасящие реакторы (ДГР) не используются. Известно, что работа электрической сети в режиме изолированной нейтрали позволяет при длительных ОЗЗ не отключать присоединения, определять повреждённый фидер и локализовать место повреждения. Однако такой режим сопровождается возникновением специфических перенапряжений, основные из которых — дуговые. Их доля относительно всех видов аварий значительна (до 80 %).

Такие перенапряжения часто существуют в виде переходных процессов при переключении дуге и опасны для электроустановок высокими кратностями  $U_{пер} = (3 \div 3,5)U_{ф}$ , продолжительностью и широким распространением в сети, электрически связанной с местом повреждения. Они приводят к перекрытию либо пробоем дефектной или ослабленной (загрязненной и увлажненной) изоляции оборудования, а также способствуют накоплению и развитию дефектов. Последние снижают уровень изоляции и повышают вероятность её повреждения при последующих воздействиях перенапряжений.

Перенапряжения при ОЗЗ приводят к пробоем изоляции неповреждённых фаз и переходу ОЗЗ в «двухместное» или двойное замыкание на землю, близкое по своим характеристикам к двухфазным КЗ. Риск возникновения таких двойных замыканий заметно вырос в последнее время в связи со старением изоляции трансформаторов и аппаратов подстанции. Длительное присутствие в сети ОЗЗ снижает ресурс изоляции установленного оборудования, способствует старению изоляции и росту аварийности трансформаторов, токоограничивающих