

## Глава 3

### *Аварии в энергосистемах – на опыте автора*

Нам электричество сделать все сумеет,  
Нам электричество мрак и тьму развеет,  
Нам электричество заменит всякий труд –  
Нажал на кнопку, чик-чирик, и свет потух!

*Студенческая песня*

Нету света, нету света,  
Нету электричества.  
Нету качества у нас,  
На чёрта нам количество!

*Частушка*

#### **§3.1. Авария одним пальцем**

##### **3.1.1. Энергосистема и усовершенствование в ней стандартного устройства**

Авария произошла в энергообъединении Сибири. Один из служащих энергосистемы сунул палец куда не надо, нажал там что не надо, и вот – тяжелая авария. Казалось бы, всё тут ясно, однако дело не только в этой ошибке: для возникновения тяжелой аварии одной ошибки мало. В данном случае видно, что многое, совершённое до того, как была сделана эта простая ошибка, так предвосхитило дальнейшее, что произошли события, развившиеся в серьезную аварию.

Но прежде, чем излагать и анализировать факты, позволим себе небольшое вступление об энергосистемах вообще и затем конкретно об энергосистемах, входящих в энергообъединение Сибири.

*Отступление о назначении энергосистемы*

Потребителю электроэнергии нужен какой-то уровень *надежности* питания этой электроэнергией, т.е. нужно, чтобы, когда требуется, питание обеспечивалось с достаточно высокой вероятностью. Разные потребители требуют разного уровня надежности, поскольку терпят не одинаковый ущерб от исчезновения питания, будь то его отключение после предупреждения, т.е. отключение, о котором потребителя известили заблаговременно, или внезапное, *аварийное отключение* (этот тип отключения уже охарактеризован в разделе 1.4.4).

Совокупность нескольких совместно питаемых потребителей обобщенно называют *нагрузкой*, подчеркивая этим термином, что те, кто потребляют электроэнергию, нагружают собой источник питания, являются для него неким бременем. Бременем, конечно, только в смысле электротехники, а в коммерческом смысле – источником дохода.

Индивидуальное питание генератор-нагрузка не надежно: всякий раз, когда единственный генератор не работает, потребители остались бы без электроэнергии. Причин же для этого много: *профилактический ремонт* генератора, о котором потребитель может быть предупрежден, или *аварийный ремонт*, внезапный перебой в получении энергоносителя: топлива или воды, ослабление ветра и т.д. Выход давно найден в совместном питании большого количества потребителей сразу от нескольких генераторов и позднее от многих электростанций.

Некоторые подробности о резервировании источников мощности можно увидеть в дополнении, раздел 6.1.1.

В результате, повсеместно создаются энергосистемы, имеющие электрическую сеть высокого напряжения (от 110 до 750 кВ), которая связывает несколько или даже много разного рода источников электроэнергии (чаще всего – электростанций) с подстанциями, где высокое напряжение сети трансформируется в более низкое, на котором электроэнергия и поставляется ближе к потребителям. После нескольких трансформаций, выполненных на подстанциях и просто в трансформаторных киосках, будках или на столбах, она поставляется промышленным потребителям

на уровне напряжения от 110 кВ до 380 В, а бытовым потребителям на уровне 220 В или иногда 110 В.

Электрическая сеть почти везде работает на переменном токе. Это означает, что осуществляется *параллельная работа* всех совместно работающих генераторов энергосистемы, или иначе *синхронная работа*, при которой *электродвижущие силы* (ЭДС) всех этих генераторов должны иметь согласованные друг с другом величины и строго одинаковую частоту синусоидального изменения этих величин во времени.

### *Энергообъединение Сибири*

Теперь перейдем к месту, в котором разыгралась авария. Так, чтобы электрифицировать транссибирскую железнодорожную магистраль и для этого дать электроэнергию не только электровозам, но и всей необходимой инфраструктуре, а также чтобы улучшить электроснабжение окрестных районов с их населенными пунктами и предприятиями, была создана длинная цепь двух параллельно идущих в широтном направлении линий электропередачи напряжением 110 кВ. Она проходила через подстанции, питающие железную дорогу, и – для питания в свою очередь этих подстанций – через тепловые электростанции городов и некоторых больших промышленных предприятий. Вдобавок, эти линии, пропускной способностью всего до 100÷150 МВт, создавали электрические связи между энергосистемами, каждая из которых генерировала мощность по несколько тысяч мегаватт и имела потребителей электроэнергии приблизительно такой же мощности. Поддерживать параллельную работу этих энергосистем, так слабо связанных между собой, было не просто, и этим научно-техническим достижением гордились. Получилась очень многоцелевая система, в этом было ее изящество, и в этом же таилась ее слабость.

В связи с сооружением в 1960-х годах мощных сибирских гидростанций рядом с этими линиями 110 кВ вводили в работу линии электропередачи напряжением 500 кВ, имеющие гораздо большую пропускную способность. Они проходили через свои подстанции, расположенные реже, чем существовавшие до этого

подстанции 110 кВ, и были связаны с некоторыми из них, а также с электростанциями.

На рисунке 3.1 упрощенно показан относящийся к рассматриваемой аварии участок электрической сети. На схеме две линии 110 кВ соединяют сборные шины подстанций В3, В4, В5 и В6, к которым присоединены различные элементы энергосистемы: генераторы, трансформаторы, линии электропередачи и нагрузка потребителей (она обозначается стрелкой, отходящей от сборной шины). Одна из шин, В4, имеет не только нагрузку L4, но и генераторы G4 собственной электростанции, предназначенной питать эту нагрузку, довольно большую и при этом ответственную, т.е. требующую электроснабжения высокой надежности.

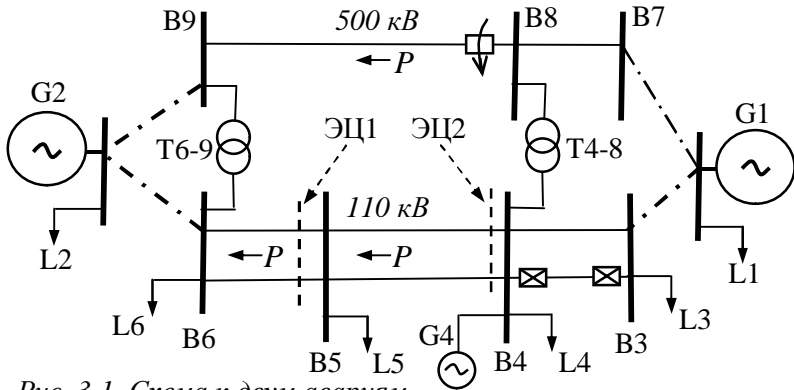


Рис. 3.1. Схема к двум авариям, начатым отключением линии В8-В9; показаны два положения электрического центра асинхронного вращения отправного G1 и приемного G2 генераторов: ЭЦ1 – при полном составе линий, ЭЦ2 – при отключенной для ремонта одной из линий В3-В4

Параллельно этим участкам линий построена линия В7-В8-В9, которая работает на напряжении 500 кВ, и поэтому подстанции В8 и В9 связаны с подстанциями В4 и В6 автотрансформаторами Т4-8 и Т6-9.

К самым правым подстанциям В3 и В7 примыкает восточная часть сибирского энергообъединения, имеющая свои генераторы,

изображенные одним генератором G1, и нагрузку своих потребителей, показанную как одна нагрузка L1. Поскольку до возникновения аварии мощность  $P$  по линиям 110 и 500 кВ, как указывают стрелки на рисунке, передавалась справа налево, правую часть энергообъединения можно назвать *отправной частью*, а аналогичную часть слева с ее общим генератором G2 и ее общей нагрузкой L2 – *приемной частью*. Примыкание этих двух частей к актуальному для нас участку сети показано не в виде реальных элементов сети, а совершенно обобщенно штрихпунктирными линиями.

*Устройства АПВ и неприятность  
при их усовершенствовании*

Каждая линия электропередачи была оснащена устройством *автоматического повторного включения* – сокращенно устройством АПВ. При возникновении на линии КЗ релейная защита подает выключателю команду снять напряжение с линии, и после паузы в несколько секунд, которая достаточна для того, чтобы дуга в месте КЗ уже успела погаснуть, устройство АПВ командует выключателю снова подать напряжение на линию. Если КЗ не восстановится, то линия счастливо останется в работе, если же нет, – под действием релейной защиты она снова отключится.

На линиях 110 кВ были установлены, как обычно, наиболее простые устройство АПВ, позволяющие релейной защите подать выключателю команду, чтобы он снял напряжение сразу со всех трех проводов поврежденной линии. Это делается независимо от вида КЗ, возникшего на линии. Затем устройство АПВ командует выключателю снова подать напряжение опять-таки на все три провода.

Немного о трех проводах. По каждому из них протекает ток, изменение которого во времени запаздывает по отношению к токам в двух других проводах на одну треть периода синусоидального изменения этих токов. При нормальной частоте изменения переменного тока, составляющей 50 Гц, каждый ток изменяется по синусоиде с периодом повторения 0,02 с. Получается, что в любой момент времени три синусоиды проходят разные фазы, и

они отличаются друг от друга на треть этого периода. Отсюда трехпроводные установки переменного тока называются *трех-фазными*, и их провода именуются латинскими буквами: фаза А, фаза В и фаза С.

На линиях напряжением 500 кВ, в том числе на линии В8-В9, под стать их важности были установлены гораздо более сложные устройства – устройства *однофазного АПВ* (сокращенно ОАПВ), которые обращаются с линией более щадяще. Если, как часто бывает, замыкание на землю возникло только на одной фазе линии, то такое устройство позволяет отключить выключатели только одной этой фазы и затем их же включает снова; благодаря однофазным операциям мощность продолжает во время паузы передаваться по двум другим фазам, и в этом состоит большое преимущество ОАПВ. Естественно, команды от устройства ОАПВ на отключение и на включение выключателей идут отдельно к каждой из фаз каждого из выключателей линии, а их обычно по два с каждой из сторон линии 500 кВ, и поэтому устройство имеет гораздо больше выходных проводов, идущих к выключателям, чем обычное устройство АПВ.

Вокруг этого обстоятельства и разыгралась драма аварии.

В отличие от релейной защиты, без которой линию никто не решается держать под напряжением, довольно сложные устройства ОАПВ редко успевали ввести в действие уже при вводе линии в работу. Их вводили несколько позже, по мере окончания их наладки – как немаловажное дополнительное средство повышения надежности работы.

Хотя устройства ОАПВ были официально приняты к использованию, выпускались заводом, хотя к тому времени в стране работало несколько десятков таких устройств, и проблем с ними не возникало, персонал данной энергосистемы решил до ввода устройств ОАПВ в действие усовершенствовать их выходные цепи, чтобы оператор подстанции мог более удобно и наглядно вводить устройство в действие и выводить его из действия путем операций непосредственно в каждой выходной цепи устройства (целесообразность этого не очевидна, но об этом – несколько дальше).

Предстояло в двенадцати выходных цепях устройства ОАПВ установить ручные переключатели, Их нужно было установить на лицевой стороне той же железной панели, на которой крепились и другие аппараты устройства.

Переключатель устроен просто. К каждому из его двух контактов сзади панели закреплялся провод, а соединение между этими контактами оператор осуществлял поворотом приблизительно пятисантиметровой металлической пластины, которая жестко связана с одним из контактов и закрепляется оператором на другом контакте закручиванием пластмассовой гайки. По положению пластины хорошо видно, разъединена или соединена цепь, в которой установлен переключатель.

Для установки дополнительных переключателей и подвода к ним проводов потребовалось в лицевой панели устройства высверлить дрелью множество довольно крупных отверстий.

Когда для линии 500 кВ В8-В9 выполняли усовершенствование устройства ОАПВ со стороны подстанции В8, работа мощной дрели вызвала вибрацию панели, а вибрация привела к дрожанию подвижной системы и к замыканию контакта в одном из реле устройства. Поскольку провода, идущие к высоковольтным выключателям, уже были присоединены к устройству, – этот контакт создал команду на отключение всех трех фаз упомянутой линии.

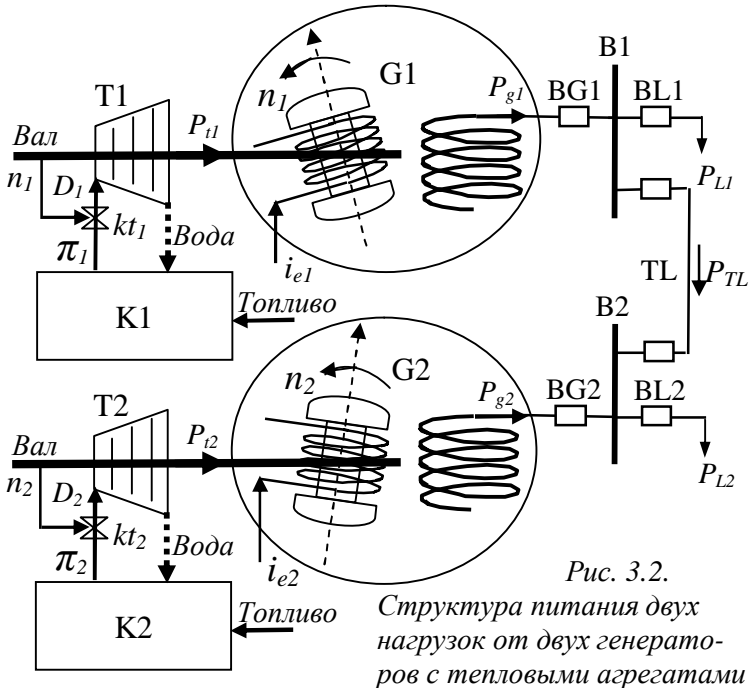
В это время по линии, а она была единственной линией 500 кВ на этом участке, передавалось несколько сотен мегаватт, и параллельно идущие линии 110 кВ, естественно, не могли пропустить столь большую мощность. Поэтому мощность, передаваемая от отправной части к приемной, сильно уменьшилась.

Прежде чем описывать, к чему это привело, отвлечемся от последовательного изложения, чтобы напомнить сущность параллельной работы генераторов на общую нагрузку.

### **3.1.2. Отступление о параллельной работе генераторов**

На рисунке 3.2 следующей страницы показана простая энергосистема с двумя тепловыми *агрегатами*, *генераторы* которых G1 и G2 подают мощность каждый на свою *шину* В1 и В2. От шин

питаются их нагрузки L1 и L2 мощностью  $P_{L1}$  и  $P_{L2}$ , и обе шины соединены друг с другом линией электропередачи TL. Все названные элементы присоединены к шинам через свои выключатели, изображенные прямоугольниками и обозначенные буквой В с добавлением названия элемента.



Ротор каждого из двух генераторов G вращается своей тепловой турбиной T, которая получает пар от своего котла K. Котел создает давление пара  $\pi$  и дает в турбину количество пара D, пропорциональное этому давлению и степени открытия клапанов турбины  $kt$ . Последнее определяется, как показано на рисунке, регулятором скорости  $n$  вращения ее вала, а также не показанными действиями оператора (и, возможно, еще какими-то регуляторами). Проходя через турбину, пар создает давление на ее лопатки, и они вращают вал агрегата, общий для турбины и ро-



тора генератора, на который таким образом передается мощность турбины  $P_t$ . Она пропорциональна количеству  $D$  поступающего в турбину пара.

Как уже упомянуто в предыдущем разделе, переменный ток является трехфазным, поэтому, в отличие от показанного на рисунке 3.2, статор имеет не одну обмотку, а три. Вращением магнитного поля, которое создается постоянным *током возбуждения*  $i_e$ , подаваемым в *обмотку ротора*, в этих трех обмотках возбуждается трехфазная система переменного тока с *электродвижущими силами* (ЭДС). От обмоток статора мощность генератора  $P_g$  отдается к шине.

В стабильном состоянии описываемой системы мощность, развиваемая турбиной, равна мощности, отдаваемой генератором в сеть  $P_t = P_g$  (некоторые потери мощности в агрегате турбина-генератор, конечно, имеются, но мы их будем игнорировать), и поэтому скорость вращения вала неизменна:  $n = \text{const}$ . Более того, одинаковы скорости вращения валов обоих (если их больше, то и всех) генераторов энергосистемы. Последнее обстоятельство настолько непреложно и настолько важно, что требует некоторого уточнения.

В стабильном состоянии энергосистемы роторы всех ее генераторов с их магнитными полюсами, вращаясь синхронно, с одинаковой скоростью, сохраняют неизменное взаимное расположение, и поэтому в обмотках, размещенных на статорах, наводятся ЭДС, синусоиды которых тоже неизменно сдвинуты друг относительно друга во времени.

Это напоминает движение автомобилей по автостраде: скорость велика, но одинакова у всех, и поэтому их взаимное расположение на дороге не изменяется, один впереди, другой сзади едут как будто нанизанные на стержень. Чтобы расстояние увеличить, передний должен временно увеличить подачу топлива или задний уменьшить.

Соотношение отдаваемых генераторам мощностей зависит, в основном, от того, на какой угол сдвинуты относительно друг друга эти вращающиеся полюсы (этот угол определяет взаимное расположение роторов, полюсов и ЭДС и поэтому называется *взаимным углом*; он обозначается греческой буквой  $\delta$  – дельта).

Например, на рисунке 3.2 ротор генератора G1 вращается несколько впереди ротора генератора G2 (принято показывать опережение против часовой стрелки). Поэтому G1 отдает на шины большую мощность, чем G2, и, поскольку нагрузки предполагаются одинаковыми ( $P_{L1} = P_{L2}$ ), мощность  $P_{TL}$  по линии TL течет сверху вниз, от первой шины В1 ко второй В2. Чтобы увеличить мощность, отдаваемую генератором в сеть, нужно несколько подвинуть его ротор с его полюсами вперед по направлению вращения, а для этого – увеличить мощность, с которой турбина вращает ее генератор.

Некоторые подробности о поддержании частоты с помощью регуляторов скорости турбин и о параллельной работе удаленных друг от друга частей энергосистемы даны в §6.1.

### 3.1.3. Первая неприятность

Итак, из-за отключения линии 500 кВ суммарная электрическая мощность, принимаемая сетью от генераторов G1 отправной части энергообъединения (рисунок 3.1), стала меньше суммарной мощности, создаваемой, как и прежде, ее турбинами. Под действием избытка мощности турбин скорость вращения валов всех отправных агрегатов турбина-генератор стала нарастать, и частота переменного тока в этой части стала повышаться. А в приемной части возникло противоположное явление – ее потребителям L2 недоставало мощности, получаемой до этого по линии 500 кВ, им потребовалась от ее генераторов G2 большая мощность, чем создавали турбины, возник дефицит мощности турбин, и это привело к затормаживанию валов всех агрегатов приемной части и к понижению частоты в ней.

Таким образом, частоты в двух частях энергообъединения, связываемые этим участком сети, стали расходиться, произошло *нарушение параллельной работы* этих частей, возникло асинхронное вращение ротора G1 относительно ротора G2 – явление, называемое *асинхронным ходом* генераторов. Асинхронно вращающиеся роторы генераторов периодически проворачиваются друг относительно друга. Вместе с каждым из роторов поворачивается

и его трехфазная система ЭДС. Полный проворот отправной ЭДС относительно приемной совершался в данном случае за одну – две секунды.

Такой оборот событий не был неожиданным, и поэтому на каждой из двух линий одного из участков электропередачи 110 кВ были установлены простейшие устройства автоматики, относящиеся к так называемой противоаварийной автоматике и, еще точнее, – к ее подсистеме автоматической ликвидации асинхронного хода или проще – к защите от асинхронного хода. Они выявили необычно большие не прекращающиеся колебания тока в линиях и через несколько десятков секунд дали команды выключателям на отключение этих линий. Тем самым асинхронный ход был успешно прекращен.

Хотя упомянутые устройства защиты действовали очень медленно, данный случай не привел к особо неприятным последствиям сверх того, что отключение связи между частям энергообъединения вызвало понижение частоты в приемной части, и из-за этого автоматика отключила там небольшую часть потребителей L2. Это не считалось особым грехом, объем отключенных потребителей не учитывали, их ущерб не считали, тем более штраф потребителям не платили. Однако этот случай все-таки рассматривался дисциплинарно – он квалифицировался как «брак в работе» и требовал составления акта служебного расследования.

Расследовать, собственно, было нечего. Во-первых, панель уже налаженного устройства, к которому присоединены внешние цепи, нельзя сверлить, так как аппаратура, расположенная на ней (и на жестко скрепленных с ней других, действующих панелях – тоже!), не рассчитана на такую большую вибрацию.

Во-вторых, хорошая практика эксплуатации автоматики запрещает выполнять какую-либо работу на устройстве без полного отсоединения его от ранее подсоединенных внешних цепей (даже если само устройство и не введено в действие); перед работой нужно отсоединить внешние цепи, управляющие высоковольтными выключателями или идущие к другим действующим устройствами.

Этого не было сделано.

### **3.1.4. Рукотворная авария**

Итак, ясность этого дела не избавляла от расследования, и через пару дней ввиду особой ответственности подстанции, на которой произошло отключение, на неё приехал руководитель службы релейной защиты и автоматики всей энергосистемы, специалист в своем деле, уже не первой молодости, имевший, по видимому, отношение к замыслу производившегося усовершенствования. Он собрал персонал подстанции возле устройства ОАПВ и стал объяснять, что нельзя столь грубо работать на устройстве, в то время как его быстрые реле, подающие команды выключателям, имеют легкую подвижную систему, которая отзывчива на вибрацию...

Для наглядности он снял кожух с одного из этих реле, и легко нажал пальцем на его подвижную систему. В ответ послышался грохот отключаемых выключателей, вой аварийной сирены, звон сигнализации, замигали ключи управления выключателей – словом, эта же линия 500 кВ В8-В9 снова послушно отключилась!

Почему этот специалист не начал свою демонстрацию реле с осторожного осмотра панели сзади, где он увидел бы, что внешние цепи все еще не отсоединены от устройства? Ведь он не мог доверять в этом отношении местному персоналу, который уже продемонстрировал свою беспечность. Возможно психологическое объяснение: случилась временная потеря контроля над собой. Не исключено и иное. Он, конечно, понимал, что нельзя проводить работу с устройством, не отключив перед этим его выходные цепи к выключателям, но одно дело – понимать, а другое – сделать осторожность привычкой, а ее могло не возникнуть, если он не прошел в молодости школу работы в электрических цепях.

Автор видел таких инженеров во время работы в Московской энергосистеме. За руководящие столы в ее центральных службах они пересаживались прямо со студенческой скамьи, минуя «низовую» работу на станциях и подстанциях. При всех способностях этих парней, откуда у них мог выработаться автоматизм безошибочной работы?

В связи с этим любопытно отметить некоторую односторонность подготовки персонала. Существуют подробные инструкции по настройке и проверке отдельных сложных устройств автоматики, и знание соответствующей инструк-

ции является неременным условием допуска к обслуживанию устройства. Однако, не приходилось видеть инструкции относительно того, как следует вести работу в цепях, соединяющих разнообразные устройства. Хотя эти работы кажутся слишком элементарными, такую инструкцию создать нелегко, и в результате в ответственной области своей каждодневной работы персонал руководствуется лишь собственным разумением и опытом. Если они есть.

С другой стороны, в каком очаровании авторитетом начальства, в каком ступоре был персонал подстанции, который не решился воспрепятствовать начальнику из центра лезть в действующее устройство, хотя о недопустимости этого уже знал.

А на этот раз события развивались гораздо хуже, чем в предыдущем случае. В этот день на участке В3-В4 оказалась выведенной в ремонт одна из линий 110 кВ (на рисунке 3.1 выключатели этой линии крестиками показаны отключенными), и из-за этого точка, в которой во время асинхронного хода периодически возникает самое низкое, практически нулевое, напряжение, приблизилась непосредственно к подстанции В4, связанной с электростанцией (генераторы G4) важного предприятия. Эта точка, называется *электрический центр (ЭЦ)* асинхронного вращения генераторов. Она была в прошлый раз в положении ЭЦ1 (рисунок 3.1), удаленном от подстанции В4, а теперь оказалась около неё – в положении ЭЦ2.

В данном случае связь 110 кВ со временем, как и в прошлый раз, отключилась, но, пока это происходило, из-за многократных глубоких понижений напряжения, вызванных асинхронным ходом, отключились перегруженные током генераторы крупной собственной тепловой электростанции предприятия, и оно вместе с его городом осталось совсем без электроснабжения. Произошла очень неприятная авария.

Но здесь пора пояснить, чем опасен асинхронный ход.

### **3.1.5. Отступление о грозной опасности – асинхронном ходе**

Если положение упомянутых выше трехфазных систем ЭДС изобразить в виде векторов, то получится, что в состоянии перед аварией они располагались, как показано на рис. 3.3а. На этом ри-

сунке вектор ЭДС отправной части  $E_1$  опережает вектор ЭДС приемной части  $E_2$ . Ток, протекающий по сети, связывающей эти ЭДС, пропорционален длине штриховой линии, соединяющей концы векторов ЭДС, а передаваемая по этой сети мощность пропорциональна синусу взаимного угла  $\delta$  между векторами ЭДС (подробнее – в разделе 6.1.4).

Векторы  $U$  изображают напряжения в трех промежуточных точках электропередачи, они упираются в упомянутую линию, связывающую концы двух ЭДС. Видно, что все три напряжения меньше, чем ЭДС.

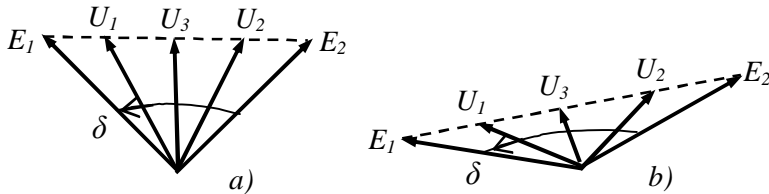


Рис. 3.3. Напряжения  $U$  в трех промежуточных точках электропередачи при расхождении соединяемых ею ЭДС  $E$  из положения на рис. а) в положение на рис. б)

На рис. 3.3б ЭДС  $E_1$  в результате ускорения ротора первого агрегата переместилась вперед, против часовой стрелки, а ЭДС  $E_2$  в результате замедления своего ротора переместилась назад по сравнению с предаварийным состоянием. Теперь угол  $\delta$  между ЭДС значительно увеличился, и из-за этого все три промежуточные напряжения значительно уменьшились, особенно напряжение  $U_3$  в середине электропередачи. Нетрудно вообразить, что в состоянии противофазы роторов и ЭДС, когда угол  $\delta$  достигнет  $180^\circ$ , эти напряжения еще уменьшатся, а среднее из них  $U_3$  станет равно нулю.

Состояние противофазы с нулевым напряжением в средней точке ЭЦ практически, с точки зрения уровней напряжений и токов, равнозначно тому, как если бы в середине электропередачи 110 кВ возникло замыкание всех трех фаз между собой и на землю, т.е. полное КЗ. Это состояние наступает на каждом провороте ЭДС и вызывает три грозные опасности:

- возникает такое же большое повышение тока в сети между ЭДС, как при КЗ в точке ЭЦ, и это может вести к неприемлемым механическим усилиям в электрооборудовании и к его термической перегрузке;
- в промежуточных точках электропередачи напряжения сильно уменьшаются, вплоть до нулевого значения, как это происходит с напряжением  $U_3$  и имело место у подстанции В4; а так как обычно вблизи этих точек имеются генераторы и питаются потребители, то это ведет к резкому ускорению роторов этих генераторов (и поэтому, возможно, даже к их выходу из синхронной работы), а также к затормаживанию роторов двигателей – вплоть до уже упомянутой лавины напряжения;
- прекращается передача мощности по сети, так как, изменяясь по синусоиде, одну половину длительности асинхронного проворота мощность течет в одну сторону, другую половину – в другую, и в результате, пока существует асинхронный ход, мощность вообще не передается по сети (в среднем за период), как если бы связь между генераторами была совсем разорвана.

Период асинхронного хода может составить от 0,5 до 5,0 с. Следовательно, если он продолжится хотя бы 10 с, то состояние противофазы, т.е. практически состояние КЗ между всеми тремя фазами, наступит от 2 до 20 раз. Очевидно, что асинхронный ход должен быть ликвидирован как можно скорее.

Более того, желательно вообще не допустить процесс до асинхронного хода. Для этого применяется прогнозирование процесса: в случае неблагоприятного прогноза осуществляются те действия, которые необходимы для предупреждения асинхронного хода или для быстрой ликвидации, если он уже неминуем.

Обычно применяется наиболее радикальный метод ликвидации асинхронного хода – разделение частей энергосистемы, имеющих асинхронно вращающиеся роторы, путем отключения всех элементов сети, через которые проходит воображаемое сечение асинхронного хода (и только этих элементов!).

Разделение энергосистемы на две части прекращает и тот знакопеременный обмен мощностью, который был во время асин-

хронного хода. В результате, в отправной части образуется избыток мощности, а в приемной – ее дефицит. Эти аварийные небалансы могут недопустимо изменить частоту и напряжение в одной из частей энергосистемы или в обеих и потребовать дальнейших противоаварийных мероприятий.

Для цели ликвидации асинхронного хода безразлично, с какой стороны от подстанции В5 отключить две примыкающих линии электропередачи (рис.3.1). Однако, этот вопрос важен для состояния энергосистемы после аварии. Если, например, в сечении ЭЦ1 мощность направлена в ту же сторону, как в сечении ЭЦ2, то в нем она меньше, чем в ЭЦ2, а это означает, что разделение по ЭЦ1 меньше нарушит послеаварийный баланс мощности энергосистемы, чем по ЭЦ2.

Функцию ликвидации асинхронного хода нельзя возложить на операторов энергосистемы. Их действия, если и последуют, могут оказаться недопустимо медленными, безуспешными или даже ошибочными. Ведь во время этого процесса происходят столь быстрые изменения электрических величин в столь больших диапазонах, что оператор по своим приборам не может понять, что происходит и где именно. Для этой цели требуются упомянутые защиты от асинхронного хода.

### **3.1.6. Расследование аварии**

Расследованием данной серьезной аварии занималась комиссия министерства энергетики в присутствии вневедомственных следователей. Она установила изложенное выше, а также то, что на случай понижения напряжения в сети 110 кВ не были предусмотрены никакие средства сохранения в работе станции и ее ответственных потребителей путем их автоматического отделения от внешней сети.

Итак, авария имела несколько причин. Непосредственная причина – грубые ошибки персонала. Далее, устройство защиты от асинхронного хода действовало соответственно настройке, но с точки зрения назначения защиты слишком медленно, т.е. у данного ответственного узла сети нужно было установить более быструю защиту. А система аварийного отделения местной станции от сети, система сохранения ее собственных двигателей, вообще отсутствовала.



Такого рода мероприятия достойны чуть более подробного освещения, и этому посвящен далее отдельный параграф 3.3.

Показательно то, что члены комиссии, и автор в их числе, не поставили под сомнение, что после ввода в работу линии 500 кВ оставлена замкнутой и несопоставимо более слабая шунтирующая ее связь по линиям 110 кВ, обреченная практически каждый раз после отключения по любой причине главной линии претерпевать асинхронный ход со всеми вытекающими опасными последствиями. Персонал энергосистемы не заметил, что ввод в работу линии 500 кВ существенно усложнил ситуацию, он не только улучшил ее, но и создал новую проблему в уже имевшейся сети.

Видимо, стремление держать все связи замкнутыми казалось естественным (часто и сейчас так кажется). Это стремление можно объяснить и центристской склонностью собрать всё вместе, как бы усилить тем самым сеть, и гордостью преодоления ученых трудностей, и просто недомыслием, и, вероятно, неосознанным до конца желанием избежать заботы о поддержании напряжения в разомкнутой сети.

Кстати сказать, в гораздо более плотных сетях, чем данная электропередача 110 кВ, не всегда удается все связи держать замкнутыми хотя бы потому, что это может увеличить ток КЗ до величин, с которыми не справляются имеющиеся выключатели.

Во время работы комиссии выдвигались и бурно рассматривались различные версии виновности. Обладавший несчастным пальцем специалист, по натуре – человек сдержанный, застегнутый на все пуговицы, как теперь бы сказали, перфекционист, искренне не мог принять, видимо, совершенно непривычную для него мысль о своей виновности. Он и другие работники энергосистемы, а также и работники энергообъединения упорно называли основными виновниками разработчиков и изготовителей устройства ОАПВ, которые установили переключатели не так, как считали правильным в данной энергосистеме. Не забыли и проектную организацию, которую представлял автор, – мол, именно по ее вине энергосистема получила устройства ОАПВ, требующие усовершенствования на месте, что и привело к аварии.

Удар по безупречности повредил здоровью непосредственного виновника, и он через пару лет сменил эксплуатационную работу на службу в московском министерстве энергетики, где выглядел вполне ответственным исполнителем.

Здесь снова возникает вопрос, так ли уж виноват в аварии стрелочник. Ведь линия 500 кВ могла отключиться вовсе не пальцем, а просто из-за неисправности, например из-за КЗ на ней, ведь не даром она оборудована несколькими устройствами релейной защиты, которые постоянно готовы отреагировать на неисправность и подействовать на ее отключение. Следовательно, энергосистему необходимо было подготовить к отключению этой линии, причем принять во внимание и неблагоприятные в этом смысле состояния энергосистемы, а именно, как в данном случае, состояние с выведенной в ремонт линией 110 кВ, которое делает асинхронный ход особенно опасным. На этот случай требовались те средства противоаварийной автоматики, которыми энергосистема не обзавелась, и именно это должно было стать главным предметом внимания, а не палец и не усовершенствование устройства ОАПВ.

### **3.1.7. Нужно ли было усовершенствовать?**

Хотя усовершенствование ОАПВ – как сказано, не главное в данной аварии, связанные с ним обстоятельства любопытны.

Прежде всего, нужно вспомнить, что вольное обращение с заводской продукцией было в то время обычным. В энергосистемах она рассматривалась не как законченное изделие, которое можно сразу доверчиво использовать и за правильное функционирование которого несет ответственность изготовитель, а скорее как в некотором смысле полуфабрикат. Действительно, ее требовалось не только настраивать под местные условия предусмотренным изготовителем образом, но и внимательнейшим образом проверять, поправлять и иногда даже дорабатывать. Средства на производство аппаратуры выделялись столь скупо, что повсеместно возникла потребность в большом количестве персонала, который должен был осуществлять ее наладку и ремонт. Вместе с тем, это породило пренебрежительное отношение к заводской продукции как к некоторому конструктору для творчества рационализаторов. Тем более что рационализаторские предложения поощрялись морально и даже немного материально.

Не нужно думать, что в устройстве ОАПВ отсутствовал переключатель, которым оператор подстанции мог бы ввести его в действие и вывести из действия.

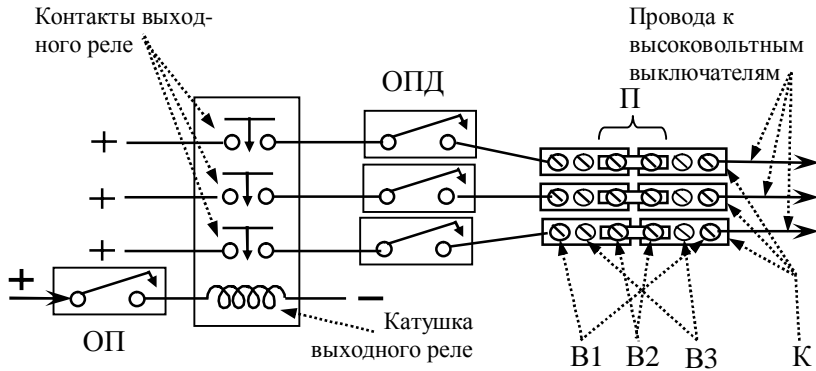


Рис. 3.4. Выходные цепи устройства автоматики от реле, на катушку которого подается напряжение (+) как команда на отключение выключателей;

ОП – оперативный переключатель для ввода устройства в действие и вывода из действия; ОПД – дополнительные оперативные переключатели, устанавливаемые персоналом;

К – клемма для присоединения к устройству внешних проводов, идущих к выключателям:

П – перемычка, сдвигаемая для разрыва цепи; винты на клемме:

В1 – для присоединения проводов основной цепи,

В2 – для крепления сдвигаемой перемычки,

В3 – для присоединения проводов от измерительных приборов

Завод, конечно, его установил, но подобно переключателю ОП на рисунке 3.4, на непривычном месте – в цепи катушки выходного реле, а не в цепях его контактов, где он мог бы чуть более полно отделять устройство от внешних цепей. Такое расположение переключателя казалось персоналу совершенно неприемлемым. Не было принято во внимание, что операции по вводу – выводу устройства с помощью аж двенадцати дополнительных переключателей чреваты ошибками оператора, да и удобно установить их было негде: лицевая панель устройства и без того была переполнена всякой аппаратурой.

Для упрощения рисунка 3.4 на нем показаны только три выходные цепи из требуемых двенадцати, а переключатели, устанавливаемые в них дополнительно, обозначены ОПД.

Рационализаторы как будто забыли, что все эти переключатели, включенные как до катушки выходного реле, так и после его контактов, предназначены только для действий оператора, но не для безопасности работы в устройстве. А для такой работы завод предусмотрел в каждой из клемм К (рисунок 3.4), через которые к устройству подсоединены провода, идущие к выключателям и к другим устройствам автоматики, по две пластины со съёмной перемычкой П между ними. Однако, этими перемычками пользуется не оператор подстанции, а специалист по устройствам автоматики, так как клеммы не имеют понятных оператору надписей (на концах подводимых к ним проводов наносится лишь условная маркировка, которую оператор не обязан знать) и так как перемычки закрепляются винтам, т.е. с помощью не просто руки, а инструмента – в данном случае отвертки. Хорошая практика диктует следующее: перед тем, как допустить ремонтный персонал к работе в устройстве, оператор должен не только отключить его переключателем или несколькими переключателями, но и проследить, что ремонтник снял все клеммные перемычки (и более того, что от попадания на клеммы случайных предметов он закрыл их изолирующим материалом).

Перед началом работы перемычки на клеммах сняты не были, и устройство ОАПВ не было изолировано от управляемых им выключателей (да и от других устройств автоматики – тоже).

В допущенном нарушении проявилась ироничность ситуации. Дополнительные переключатели должны были, по замыслу, избавить от операций с перемычками, но, если бы эти переключатели даже уже были установлены и повернуты в положение «отключено», то для работы в устройстве, тем более для такой силовой работы, отключения посредством только переключателей недостаточно, а все равно необходимо было разомкнуть перемычки на выходных клеммах. Неужели персонал подстанции и обладатель злосчастного пальца не знали этого? Или знали, но на практике лихо пренебрегали этим?

### **§3.2. Авария из-за отсутствия двух слов**

Противоаварийные меры часто оказываются настолько полезными, что не могут не вызвать восхищения, но существует и обратная сторона дела, которая тоже не должна оставаться в тени. Особенно мало известны аварии, возникшие из-за неправильно осуществленного вмешательства в аварийный процесс. А эти случаи исключительно важны, так как есть опасение, что увеличение количества противоаварийных функций, а также такое повышение надежности аппаратуры, которое достигается за счет ее контроля и резервирования, усложняют технические средства и программное обеспечение, затрудняют тем самым работу специалистов и ведут в связи с этим к увеличению их ошибок. Говоря об этом, приходится учитывать мнение, что прямые ошибки и сейчас создают основную долю потерь, связанных с противоаварийными мерами.

В данном параграфе рассказана история ошибки, вызванной непониманием сути противоаварийного мероприятия и рассогласованностью работы специалистов. Эта ошибка проявилась на Красноярской гидроэлектростанции и сказалась в двух энергосистемах: Красноярской и Кузбасской.

#### **3.2.1. Прекращение параллельной работы для ее сохранения**

Красноярская гидроэлектростанция мощностью 4500 МВт участвовала в снабжении электроэнергией местных потребителей и, кроме того, передавала избыток мощности по линиям электропередачи напряжением 500 кВ в двух направлениях: в основном, – на Запад в сторону Кузбасса, а также – на Восток в сторону Братской ГЭС и Иркутска. Это ориентировочно изображено на рисунке 3.5, где ГЭС имеет две связанные между собой секции: восточную В7.О и западную В7.В, каждая со своими генераторами. Восточная часть энергообъединения имеет генератор G1 и свою нагрузку L1, а западная аналогично – G2 и L2. Связь между частями энергообъединения и выдача мощности от ГЭС осуществлялась почти на всех участках двумя параллельными линиям

электропередачи напряжением 500 кВ и на одном участке В8-В9 – одиночной линией того же напряжения.

Для района этой ГЭС потребовался обширный комплекс противоаварийной автоматики, и под руководством автора он был разработан в наиболее совершенном для 1960-х годов виде.

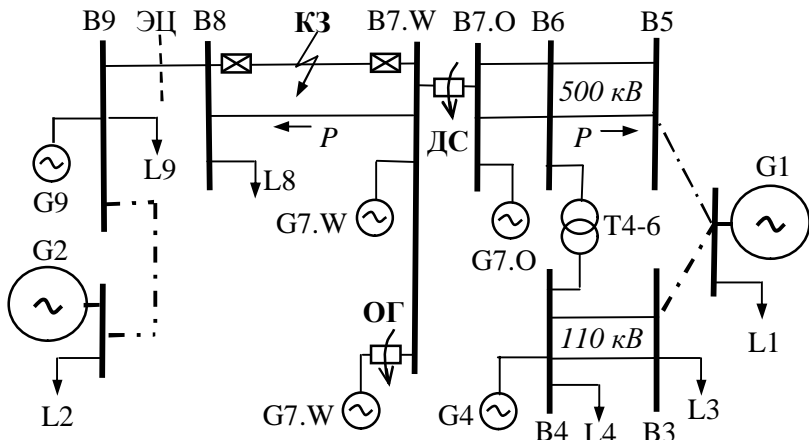


Рис. 3.5. Схема к аварии, начатой КЗ на линии В7.В - В8 и несостоявшимся разделением ДС на ГЭС В7

Как обычно, документация была доведена до принципиальных схем устройств, спецификаций промышленной аппаратуры, использованной в этих устройствах, обоснований и расчетов рекомендуемых настроек этого комплекса. Эта документация прошла через много рук. Прежде всего, чертежи согласовали специалисты энергосистемы. Затем подключился генеральный проектировщик гидростанции, конкретно – его специалисты по так называемой «вторичной коммутации» (так называют всё, что не является «первичной коммутацией», т.е. высоковольтными и силовыми установками). Они выполнили заказ заводам-изготовителям автоматики, и заказанное оборудование пришло на электростанции и подстанции района Красноярской ГЭС, было там смонтировано, налажено и, наконец, эксплуатационными службами включено в работу. Казалось бы, всё, что требовалось, было выполнено вполне удачно.

Однако, в проект была внесена некоторая новация, о которую и споткнулись. Он предусматривал разгрузку линий электропередачи не только путем *отключения генераторов – ОГ*, т.е. части гидрогенераторов станции, что было вполне привычно, но еще и с помощью *деления энергосистемы* на несинхронно работающие части – *ДС*. Это ДС было добавлено к отключению генераторов для того, чтобы понижение частоты, вызванное отключением генераторов, не могло привести к набору генераторами резервной мощности в той части энергообъединения, которая является *отправной* по отношению к разгружаемому сечению сети, и тем самым *нейтрализовать* выполненное ОГ. Это ДС было особенно нужно для разгрузки линий на Запад.

Например (и это имеет прямое отношение к рассматриваемой аварии), отключение одной из параллельных линий 500 кВ на участке В7.В–В8 при большой передаваемой в этом направлении мощности ведет к перегрузке оставшейся в работе линии и к асинхронному ходу генераторов (об опасности этого явления уже рассказано в разделе 3.1.5). Чтобы этого избежать, автоматика должна быстро уменьшить мощность, подлежащую передаче на Запад, и с этой целью отключить часть генераторов на ГЭС. Однако совместная работа энергосистем, организованная во имя надежности электроснабжения, в данном случае оказала бы «медвежью услугу»: отключение генератора ведет к понижению частоты в энергообъединении и, следовательно, к реализации его электростанциями резервной мощности под действием их регуляторов скорости вращения, а также к автоматическому пуску резервных гидроагрегатов. Особенно ярко это проявилось бы там, где не надо, – на оставшихся в работе генераторах этой ГЭС и еще восточнее – на гидростанциях Иркутской энергосистемы (более всего, – на Братской ГЭС, а Усть-Илимская ГЭС тогда еще не была построена). Тем самым эти вполне правильные действия нейтрализовали бы большую часть эффективности отключения генераторов.

Разделение же гидростанции на две части должно было выделить в направлении Запада лишь небольшую ее часть; и поэтому отключение генератора в этой части способно гораздо успешнее

разгрузить поврежденную электропередачу, чем было бы без применения ДС.

Кстати, схема гидростанции позволяла выполнить ДС путем отключения всего двух выключателей 500 кВ, включенных между западной В7.В и восточной В7.О секциями шин 500 кВ ГЭС (на рисунке 3.5 упрощенно показан только один из этих выключателей).

### **3.2.2. Начало аварии**

На следующий же день после включения автоматики в действие, повредилась и отключилась одна из двух параллельных линий 500 кВ, идущих от ГЭС на Запад. Автоматика выявила этот факт, определила, что при передаваемой до этого момента на Запад мощности требуется отключить гидрогенератор и разделить две секции 500 кВ станции, и подала соответствующие команды на выключатели. Они исправно отключились. На рисунке 3.5 это показано как отключение (ОГ) части генераторов G7.В и деление (ДС) станции на секции. Цель была достигнута – должное количество генераторов ГЭС отделено от восточной части энергообъединения и выделено на западное направление для продолжения параллельной работы с приемной Кузбасской частью, и эта параллельная работа сохранилась.

Однако, через несколько секунд секционные выключатели снова включились! Тем самым части энергообъединения опять объединились, и произошло именно то, от чего должно было ее предохранить разделение: гидрогенераторы Красноярской ГЭС и Братской ГЭС под действием своих регуляторов скорости и частоты постепенно, за пару десятков секунд, увеличили свою мощность, чем нейтрализовали эффект отключения генератора ГЭС. Из-за этого линии 500 кВ, идущие на Запад, догрузились до своего предела. Следом агрегаты восточной части, утратив возможность передать должную мощность на Запад, под действием избытка мощности ускорили вращение. Агрегаты западной части, наоборот, принуждены были отдавать в сеть слишком большую мощность, не подкрепленную турбинами, и замедлили вращение. Оба эти изменения скоростей вращения действовали в одну сторону: они вызвали расхождение частот, с которыми вращались



роторы и генерировались ЭДС в отправной и приемной частях энергообъединения, и начался их асинхронный ход.

Авторам проекта сообщили, что на секционных выключателях действовали устройства автоматического повторного включения (АПВ). Это их крайне удивило, ведь АПВ этих выключателей вовсе не требуется. Оно целесообразно только на том элементе электрической сети, большинство КЗ на котором вызывается ударами молнии и с большой вероятностью самоустраняется за несколько секунд после отключения элемента (раздел 3.1.1). Такого рода элемент – воздушная линия, а не короткие и хорошо защищенные молниеотводами шины станции. Сверх того, автоматическое разделение энергосистемы выполняется совсем не для того, чтобы только что разделившие ее выключатели снова включились!

Оказалось же следующее. На принципиальных схемах автоматики рядом с каждым контактом выходного реле, подающим команду на деление, было указано: «На отключение выключателя В7.В–В7.О». Специалисты, проектировавшие гидростанцию, не поняв, зачем введено воздействие на ДС, вопреки его назначению, инициативно решили это воздействие на межсекционные выключатели дополнить их автоматическим повторным включением и даже специально ради этого заказали для них устройства АПВ. Затем ни наладчики комплекса автоматики, ни персонал энергосистемы не вникли в смысл выполнения ДС, не поняли, что ДС и АПВ несовместимы, и не устранили это АПВ.

А дальнейшее развитие аварийного процесса произошло из-за того, что к отказу выполнить ДС добавился еще один случай – на этот раз случай неправильного бездействия автоматики.

### **3.2.3. Второй этап аварии**

Возникший, как уже упомянуто, асинхронный ход должно было выявить устройство защиты от него, установленное на линии В8–В9 со стороны подстанции В8. Предусматривалось его действие на отключение этой линии после двух – трех проворотов роторов и ЭДС восточной части энергообъединения относительно роторов и ЭДС западной части. Однако этого не произошло: как

показал послеаварийный осмотр устройства, в нем перегорел гофрированный гибкий токопровод, подводящий напряжение к подвижному контакту реле, реагирующего на изменение направления протекающей по линии мощности.

Персонал станций и подстанций увидел чудовищные броски стрелок на приборах и услышал периодические завывания, которые на каждом провороте ЭДС создавались частичными разрядами из-за повышения напряжения в сети (свечение проводов от этих разрядов называют короной). Но понять, в чем дело, он не мог. Операторы диспетчерских пунктов тоже видели колебания стрелок (в смягченном виде), но они тоже ничего не могли понять и не знали, что им делать. Все это продолжалось несколько минут и привело к остановке части генераторов на тепловых станциях в Кузбассе, к поломке некоторых их деталей.

Наконец, не выдержал напряжения дежурный оператор на той тепловой станции Кузбасса, на которую приходила линия 500кВ со стороны Красноярской ГЭС. Как было автоматически зарегистрировано аудиозаписью, он громко вспомнил мать, бросился к щиту управления и – повернул ключ управления выключателя линии на его отключение. Этим он отключил линию В8–В9 и прекратил аварийный процесс.

#### **3.2.4. Расследование аварии**

Комиссия, расследовавшая эту аварию, возложила вину за нее на проектный институт, т.е., практически, на автора как на главного инженера этого проекта. Сочли, что следовало предвидеть возможность недопонимания и сопроводить выходную цепь более полным указанием: «На отключение выключателя В7.W–В7.О без АПВ». Отсутствие последних двух слов и сочли первопричиной аварии.

Думается, дело не в этих двух словах: всего, что требуется или не требуется делать для реализации изображенного на чертеже, все равно не напишешь, а смысл выполнения ДС был подробно изложен в пояснительной записке к проекту. Недоставало другого: автору проекта следовало провести семинары со всеми главными участниками реализации проекта, проектировщиками, на-

ладчиками и персоналом энергосистемы, и разъяснить им основные новации, которые нес с собой проект; как оказалось, они их не понимали.

Однако, как ни кажется это теперь странным, в то время такая форма работы не практиковалась, она, скорее всего, была бы воспринята как нескромность проектанта, особенно по отношению к инженерам энергосистемы, часть которых под грузом ответственности за конечный результат дела была склонна абсолютизировать свои знания.

В связи с этим как не вспомнить историю Вавилонской башни.

Во время работы комиссии автор легкомысленно предложил как-то выразить благодарность дежурному оператору, который, не имея на то ни инструкций, ни команды оператора энергосистемы, взял на себя ответственность и удивительно уместно отключил линию. Но председатель комиссии, в отличие от автора человек многоопытный, руководивший в министерстве энергетики техническим надзором, решительно не допустил этого: такой, мол, прецедент поощренной самостоятельности может создать искушение для других почём зря поотключать выключатели, причем невпопад.

Думается, если бы Наполеон воспринимал самостоятельность так же, то не сумел бы создать тот корпус блестящих генералов и маршалов, которые, пока не устали, выигрывали сражение за сражением.

Столь же неуместным оказалось любопытство автора о главной неприятности, доставленной аварией, – о нагрузке потребителей, потерявших электроснабжение. Какова мощность потребителей, отключенных автоматикой в приемной, западной части энергообъединения, чтобы ограничить понижение частоты? Какова мощность потребителей, потерянных хаотически во время асинхронного хода из-за глубокого понижения напряжения вблизи от его электрического центра? И сколько времени потребовалось для того, чтобы снова подать им напряжение? Председатель комиссии ответил, что данных об этом нет, они не собираются и ничего, кроме вреда, дать не могут. Видимо, он имел в виду, что такие данные могли бы вызвать соблазн предъявить претензии руководству министерства.

Наверное, жалобы наверх все-таки поступали: по линии государственных органов власти, через иерархию партийных организаций и со стороны пострадавших предприятий и их министерств, но весомы ли жалобы без цифр?

Итак, непосредственной причиной аварии явилось неправильное функционирование автоматики из-за того, что слишком лаконичная надпись на ее принципиальном чертеже была неправильно понята разработчиками задания заводу на устройство автоматики и затем наладчиками и персоналом энергосистемы. А развитие аварии произошло из-за отказа имевшейся защиты от асинхронного хода функционировать надлежащим образом.

В последнем проявился недостаток как технического совершенства этой защиты, так и ее надежности (раздел 1.3.1). Первое, как понял автор много позже, выразилось в том, что контакт реле, следившего за направлением протекающей по линии мощности, слишком часто вынужден был замыкать свою цепь, и это могло вызвать перегрев гибкого токоподвода к нему. Надежности тоже не доставало, так как действие отказавшей защиты от асинхронного хода в то время еще ничем не догадались резервировалось. Вскоре после этого была разработана значительно более надежная (и, к сожалению, более сложная) система защиты.

Она состоит из основных устройств, наиболее быстро выявляющих возникновение асинхронного хода, из более простых резервных устройств, действующих зато медленнее - по признаку длительного и глубокого колебания тока в сети, и, сверх того, из тоже простых дополнительных устройств, помогающих, если асинхронный ход осложнен чем-то таким, из-за чего основное и резервное устройство могут отказать в действии. Много позже автор предложил в дополнение к выявлению уже состоявшегося асинхронного хода еще и прогнозировать его на значительно более ранней стадии переходного процесса, и опубликованные в [2] исследования открыли заманчивые и довольно реальные перспективы. Суть этого прогнозирования аналогична выявлению траектории запущенной неприятелем баллистической ракеты: чем раньше удастся определить ее траекторию, тем раньше и надежнее осуществится перехват.

### **§3.3. Отступление об отношении к противоаварийной автоматике**

#### **3.3.1. Мнения**

Аварийные процессы, грубо прерывающие электроснабжение от современных энергосистем, а также основные противодействия этому со стороны автоматики мы уже попытались охарактер-

ризовать в разделе 1.3.3. К этому нужно только добавить, что она не только противодействует развитию аварии, но и, как подтвердила, например, американская практика [2, том I, стр. 31], создает возможность отказаться в некоторых случаях от невозможного или слишком дорогого увеличения запаса пропускной способности сети. Этим преследуется цель экономить суммарные затраты и при этом сохранить, конечно, на приемлемом уровне и качество электроэнергии, и надежность электроснабжения, и живучесть энергосистемы во время аварии.

Однако, понятно и недоверие к эффективности систем автоматического управления применительно к столь сложному и ответственному объекту управления, каким являются многие современные энергосистемы. Возникает опасение, что система управления окажется недостаточно совершенной, не справится с большой аварией, и экономически оптимальное, казалось бы, решение на деле окажется неудовлетворительным.

Уже обсуждалось, что авария может создавать очень существенные экономические потери даже в том случае, если удалось ограничиться только сознательно управляемым отключением потребителей. А хаотическое, неуправляемое отключение потребителей оказывается для населения, привыкшего к бесперебойному электроснабжению, совершенно неприемлемым – ситуации такого рода должны быть принципиально исключены.

В противоположность недоверчивому опасению, встречается вера в столь широкие возможности систем управления (и среди них, прежде всего, противоаварийной автоматики), что они, эти возможности, не зависят ни от чего: ни от наличия у энергосистемы *управляемости*, т.е. элементов, способных воспринять команды управления, ни от реальных свойств самих систем управления – мол, для современной техники достижимо всё. А ведь совсем не всякая энергосистема обладает должной управляемостью и возможностью обеспечить нужный уровень технического совершенства и надежности систем управления. Не исключено, что эта вера связана и с недооценкой последствий низкого качества электроэнергии и возможных аварий и, в конечном итоге, – с пренебрежением интересами потребителей электроэнергии.

Колеблясь между двумя крайними мнениями, роль противоаварийной автоматики в обеспечении надежности и живучести

понимается специалистами разных профилей, работающими в разных странах и в разных энергосистемах, далеко не однозначно. Но представляется, что хотя бы с одним общим утверждением могли бы согласиться все: *недооценка возможностей противоаварийной автоматики ведет, как правило, или к большой аварийности или к необходимости значительных дополнительных затрат на основные сооружения энергосистемы, а переоценка – к излишней аварийности из-за ее отказов.*

Обе крайние точки зрения вызывают излишние затраты. *Кибернетический скепсис – это излишние вложения сегодня, а кибернетические иллюзии – излишние издержки завтра.*

*Но наиболее опасно – в недостаточно хорошо оборудованной энергосистеме не вкладывать ресурсы ни в усовершенствование ее основных сооружений, ни в создание должной системы управления.* Думается, что это опасно не только для энергосистемы, но и для любого технического объекта.

### 3.3.2. Ограниченная применимость

Функции противоаварийной автоматики обычно нормируются на основе компромисса между двумя указанными точками зрения. Принцип, который кладется в основу нормирования, представлен в виде диаграммы на рисунке 3.6. Здесь по горизонтальной оси отложена некая величина, характеризующая тяжесть исходного, т.е. доаварийного, состояния энергосистемы. Она зависит от *состояния ее исходной схемы  $S_x$*  и от того, насколько велики те мощности  $P$ , которые передаются в сечениях этой схемы непосредственно перед началом аварии. По вертикальной оси отложена некая величина, характеризующая интенсивность *аварийного возмущения  $AB$* .

Обычно принимается, что энергосистема должна располагать такой электрической схемой и такими устройствами автоматики отдельных своих элементов (регуляторы скорости турбин, регуляторы возбуждения генераторов, релейная защита и т.п.), чтобы не требовалось вмешательства противоаварийной автоматики с целью сохранения параллельной работы при обусловленных со-

четаниях тяжести исходного состояния с интенсивностью возмущения. Чем менее тяжелым является исходное состояние, тем большая интенсивность возмущения  $AB$  должна выдерживаться энергосистемой, и наоборот. Взаимозависимость этих двух обстоятельств выражается на диаграмме наклонной линией, ограничивающей область, обозначенную цифрой 1.

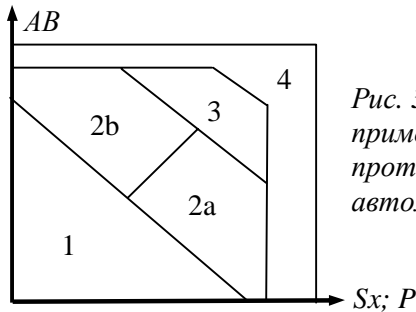


Рис. 3.6. Диаграмма применимости противоаварийной автоматики

Эту область определяют по-разному. Так, во многих энергосистемах действует очень простое правило, лаконично обозначаемое  $n-1$  или  $n-2$ . Оно означает, что текущее состояние энергосистемы должно поддерживаться таким, чтобы параллельная работа не нарушалась в случае отключения любой одной линии электропередачи или одновременно любых двух линий из всего имеющегося количества  $n$  линий. Обычно имеется в виду обеспечить это без применения противоаварийной автоматики, причем под этой автоматикой понимается, скорее всего, наиболее известная из ее подсистем, цель которой – сохранение параллельной работы.

Нередки деятели электроэнергетики, которые считают, что соблюдением даже наиболее мягкого из этих правил, правила  $n-1$ , безаварийность уже гарантируется. Однако, соблюдение и более жесткого правила  $n-2$  не может дать такой гарантии, а следовательно, для повышения безаварийности те или иные средства противоаварийного управления и в этом случае необходимы.

Несколько лет назад в газете можно было увидеть заявление руководителя энергокомпании одного из городов Германии, который уверял, что его энергосистема не в пример другим очень надежна, так как соблюдает правило  $n-1$ .

Между тем, любому видно, что в этом городе на целый ряд опор подвешены сразу по четыре линии электропередачи напряжением 380 кВ.

Универсальность такого рода правил не кажется абсолютной. Вряд ли нужно одинаково подходить к устройству двух разных энергосистем: одна обслуживает территорию с малой плотностью населения и с потребителями, не привыкшими к роскоши непрерывного электроснабжения, а другая – компактный экономически сильно развитый район.

Для межгосударственного сечения бывает организационно затруднительно реализовать критерий  $n-1$  и тем более  $n-2$  или  $n-3$ . Для сечения, содержащего линии наиболее высокого напряжения, большого количества которых может не требоваться для передачи должной мощности, то же самое выполнить слишком дорого.

Коль скоро область 1 на рис. 3.6 обходится без противоаварийной автоматики, для нее остаются три области:

- область 2а – наложение обычного небольшого повреждения на состояние энергосистемы, более напряженное, чем обычное, наиболее вероятное;

Такова, например, *ремонтная схема*, т.е. схема, в которой выведен в ремонт какой-либо важный ее элемент и которая поэтому обладает существенно пониженной пропускной способностью по сравнению с *полной схемой*; такова повышенная нагрузка сети, возникшая, например, из-за стремления максимально использовать мощность гидростанции во время паводка, чтобы не сливать зря воду в нижний бьеф и т.п.;

- область 2б – сочетание повреждения, более тяжелого, чем обычные повреждения, с довольно вероятным состоянием энергосистемы (таково, например, КЗ, сопровождаемое отказом защиты или выключателя и, возможно, в дополнение к этому отключением еще одного и притом важного элемента сети);
- область 3 – сочетание тяжелого повреждения с тяжелым же состоянием энергосистемы, сочетание, при котором эффективности первого эшелона противоаварийной автоматики (сохранение параллельной работы) не всегда удастся добиться.

Наконец, имеется и область 4, на действие в которой этот вид противоаварийной автоматики совсем не рассчитан.



Всё это нуждается в неременном соблюдении того, что во всех случаях, когда действие данного вида противоаварийной автоматики окажется не эффективным, развитие аварии должны остановиться следующими, еще более грубыми эшелонами.

И еще раз подчеркнем: вряд ли полезно вводить для всех районов одинаковое нормирование противоаварийных мероприятий – скорее, оно должно быть увязано с традициями того района, в котором функционирует энергосистема, и с имеющихся у нее ресурсами. Исключения составляют атомные установки, что, впрочем, уже замечено в разделе 1.5.3.

### **§3.4. Без нужного разделения энергосистемы и с выдуманным разделением**

#### **3.4.1. Ресинхронизация, возведенная в принцип**

В 1950-х и 60-х годах было выполнено много интереснейших исследований возможностей восстановления синхронной работы тех частей энергосистемы, которые ее потеряли в результате аварийного события (так называемая *ресинхронизация*). Этот метод соблазнителен своей естественностью: восстановление синхронного вращения роторов происходит за счет электротехнических свойств энергосистемы без видимой необходимости в проведении каких-либо мероприятий, тем более стоящих дорого, трудоемких и налагающих ответственность на персонал.

Как уже упоминалось в разделе 3.1.5, во время асинхронной работы двух частей энергосистемы мощность, протекающая по связи между ними, знакопеременна и в среднем не передается. Поэтому в приемной части происходит понижение частоты, а в отправной – повышение. Чтобы произошла ресинхронизация, нужно эти частоты сблизить, и чаще всего для этого требуется лишь отключить часть потребителей в приемной части, причем надеялись, что это выполнит обычно все равно там существующая автоматика, реагирующая на понижение частоты, – *автоматическая частотная разгрузка* (АЧР).

Заметим, что эта надежда не всегда может оправдаться, так как асинхронный ход уменьшает чувствительность этой автоматики к понижению частоты.

Ресинхронизация стала довольно успешно применяться на некоторых простых по конфигурации и слабых связях между частями энергосистем СССР, этот метод многим нравился, казался передовым и универсальным, и постепенно область его применения расширилась на не столь простые схемы и на не столь слабые связи.

Наряду с общенаучным термином *устойчивость параллельной работы* даже возник новый термин *результатирующая устойчивость*. Удачно получалось, что параллельную работу можно считать сохранившейся, если, хотя она и нарушилась, но довольно быстро восстановилась.

В расчете на ресинхронизацию на многих связях совсем не применялась не только автоматика, предотвращающая асинхронный ход, но даже и автоматика, его прекращающая, действующая на отключение связи между частями энергосистемы, имеющими отличающиеся частоты. В других случаях такая автоматика предусматривалась, но самая простая и очень медленная (как в §3.1), откладывающая свое действие на все время, отпускаемое для возможной успешной ресинхронизации.

Увлеченность ресинхронизацией наиболее ярко проявилась в украинских энергосистемах. Там параллельная работа Донецкой энергосистемы с Днепровской энергосистемой осуществлялась по двум линиям электропередачи 220 кВ, и на этой связи несколько раз подряд возникал длительный асинхронный ход, который сопровождалось многими неприятностями. Наиболее обычные из них уже были упомянуты в разделе 3.1.5, но здесь возникали и дополнительные. Например, при попытке ресинхронизации многократно выходили из параллельной работы генераторы Днепровской гидроэлектростанции, расположенной близко от электрического центра процесса. Не говоря уж о повреждении этих генераторов, такое осложнение процесса делало ресинхронизацию практически невозможной.

Причина выхода из синхронизма генераторов Днепровской гидроэлектростанции: их роторы имели такую частоту собственных колебаний относительно остальных генераторов этой энергосистемы, которая близка к разности частот, при которой происходит ресинхронизация – приблизительно 1 Гц.

Руководству энергетикой Украины и СССР надоели жалобы с мест, и в Украину была послана из Москвы комиссия, которой вместе с украинскими специалистами надлежало разобраться в этих авариях и предложить, как избавиться от их повторения. Хотя эта немногочисленная комиссия имела в своем составе двух исследователей – искренних поклонников ресинхронизации, одного московского и одного украинского, осциллограммы аварийных процессов представили столь вопиющие факты, что комиссия рекомендовала область применения ресинхронизации сузить и там, где вероятен асинхронный ход, установить автоматику, разделяющую энергосистему, если ресинхронизация затягивается.

Автор был единственным в комиссии новичком в деле ресинхронизации и, удивленный увиденным, представил записку в пользу еще более решительного отхода от ее опасного применения. Остальные члены комиссии, гораздо более влиятельные, восприняли это, по крайней мере, как следствие неделикатной молодости и неколлегиальности и практически проигнорировали. Но вскоре без особых дебатов приблизительно эта точка зрения была осторожно воспроизведена в первых руководящих указаниях по противоаварийной автоматике, в разработке которых автор принимал деятельное участие. Этим же руководствуются и поныне.

### **3.4.2. Автоматическое разделение энергосистемы как воспитательная мера**

Параллельная работа энергосистем СССР с энергосистемами других восточноевропейских стран (все эти страны до начала 1990-х годов входили в Совет экономической взаимопомощи – СЭВ) осуществлялась через объединение энергосистем Украины и Молдавии по линиям электропередачи 750, 400 и 220 кВ.

Ее целью была передача электроэнергии на Запад. Количество передаваемой энергии и пределы передаваемой мощности устанавливались договорами, которые определяли и зависимость стоимости передаваемой энергии от времени суток: в дневное время она ценилась дороже, чем в ночное. Вместе с тем многие существенные детали параллельной работы были не определены (например, возможный объем взаимопомощи в аварийных условиях),

и это открывало некоторую свободу действий, которая и использовалась с обеих сторон от электропередачи.

В СССР отношение к продаже энергии было различным. Насколько можно понять, руководство страны предпочитало не осложнять отношений с западными союзниками интересами экономики, мелочными с его точки зрения. В некотором противоречии с этим, лица, ответственные конкретно за электроснабжение в СССР, были озабочены значительным в то время дефицитом энергии и поэтому были склонны передавать на Запад по возможности меньше. Энергосистемы же, принимавшие энергию, были заинтересованы брать энергии побольше, особенно ночью. Это раздражало энергетиков СССР тем, что никаких технических способов ограничить эту практику не было.

Но такой способ был придуман. Использовали следующее. Чтобы исключить аварийную перегрузку связей на Запад и нарушение параллельной работы по ним, на этих связях применялась автоматика, выявляющая чрезмерное увеличение передаваемой мощности и в случае такого увеличения действующая на разделение энергосистем Украины. Оно выполнялось так, чтобы вместе с заграничными энергосистемами оставалась работать лишь небольшая западная часть украинских энергосистем с избыточной мощностью, соответствующей пропускной способности тех связей, которые оставались в работе после разделения. Иначе говоря, применялось управляющее воздействие противоаварийной автоматики в виде ДС (аналогично изложенному в §3.2). Выполнение этого ДС приводило к уменьшению передаваемой на Запад мощности, к некоторому аварийному понижению частоты в приемных энергосистемах соседней и, конечно, в выделенной на Запад части украинских систем.

А понижаться частоте было уже некуда, так как в то время и в нормальных условиях она поддерживалась в СССР (и у западных соседей) на уровне, сильно пониженном по сравнению с нормальным значением – чуть ли не на целый герц. Поэтому даже небольшое дополнительное аварийное понижение частоты было настолько опасным, что требовало автоматически отключать часть потребителей.

Поскольку приемные энергосистемы стремились принимать побольше мощности, это ДС и соответствующее отключение потребителей случались часто.

Вот эта автоматика была использована как устрашающая воспитательная мера. Для этого потребовалось настроить ее так, чтобы она была преувеличенно чувствительна к увеличению передаваемой мощности. Технически это выполнить легко, труднее было убедить руководителей приемных энергосистем в том, что такая настройка диктуется ограниченной пропускной способностью украинских связей. Вопреки законам электротехники, с этой задачей как-то справились, и покушение на мощность пресекалось разделением систем и дополнительным понижением частоты у соседей. Но, пока соседи еще не успели совсем перевоспитаться, электротехника все-таки взяла своё – случайно произошел конфуз.

При одном из действий этой столь удачно настроенной автоматики управляющая команда не дошла до части высоковольтных выключателей: отказала аппаратура телепередачи этой команды. В результате часть связей на Запад отключилась, а другая – нет, т.е. ДС не состоялось. Но, к удивлению всех заинтересованных лиц по обе стороны от связей, по сети, сильно ослабленной произведенными отключениями, параллельная работа не нарушилась. Все, кто попонятливей, сообразили, что столь чувствительная автоматика – плод воспитательного рвения.

Так не только выявилась недостаточная надежность автоматики, что, впрочем, вполне естественно в тех условиях, но и обнажилось ее несовершенство как воспитательного средства.

### **§3.5. Околоаварийные фантазии**

#### **3.5.1. Введение о фантазиях**

Не всякий раз то, что кажется фантазией, оказывается на поверку ею же.

Подтверждением может служить болезненная фантазия, вызвавшая удивительно большие последствия, в значительной степени уже проясненные наукой. Эту фантазию автор наблюдал во

время работы на одной из двух приемных подмосковных подстанций электропередачи напряжением сначала 400 и потом 500 кВ, протянутой от крупной ГЭС, что у Самары на Волге. Эта подстанция была расположена чуть севернее Москвы у поселка Бескудниково в паре километров восточнее Савёловской железной дороги.

Подстанция имеет три системы шин напряжением 400 (потом 500), 110 и 220 кВ, к которым через коммутационную аппаратуру присоединены воздушные линии электропередачи соответствующего напряжения. Эти шины связаны между собой автотрансформаторами. Шины, коммутационная аппаратура и автотрансформаторы расположены в так называемом открытом распределительном устройстве.

На подстанции осуществлялось круглосуточное дежурство инженера и техника, которые помимо многих прочих обязанностей должны минимум один раз за смену осматривать все оборудование подстанции, в том числе оборудование этого распределительного устройства.

Вскоре после ввода подстанции в работу, приблизительно в 1958 году, один из дежурных техников, человек уже немолодой, положительный, стал жаловаться на нездоровье. В кругу дежурного и ремонтного персонала подстанции, собиравшегося погреться и отдохнуть в помещении щита управления, он неоднократно красноречиво рассказывал, что его нездоровье наиболее ярко выражалось ослаблением потенции. Он сопоставлял свои возможности ненаучно, но выразительно. По его словам, несколько лет назад, когда его жена не могла зачать, он не стал обращаться к медицине, а взялся «разрабатывать» ее и занимался этим «дневно и ночью». И помогло. А теперь на такой труд он не способен. Приписывал он эту свою слабость тому, что вынужден при обходе подстанции находиться под сборными шинами напряжением 500 кВ, а от них исходят не только шорох и треск коронного разряда или иногда и мелкие разряды по коже, особенно во влажную погоду, но и вредное влияние на человека.

Он излагал это с такой большой убедительностью, что и другие сотрудники стали замечать в себе недостатки. Чтобы уменьшить опасность, они додумались усовершенствовать процесс осмотра распределительного устройства: они стали совершать его в

ускоренном темпе – на велосипеде, нисколько не заботясь о том, что осматривать требуется не землю а подвешенную наверху изоляцию. Мало этого, они стали писать жалобы начальству, в надзорные инстанции и т.д. Начальство смотрело на это, как на вредную блажь, но на подстанцию явились комиссии, стали замерять силу электрического поля под шинами, а она, конечно, не мала, санитарные службы стали думать о влиянии на организм человека, зашла речь о компенсации нездоровья...

Дальнейшее известно – образовалось экологическое движение, появились «зеленые» партии в парламентах, а уж, например, получить согласие жителей на сооружение линии электропередачи поблизости от их жилья и вовсе стало трудно. А началось всё, казалось бы, с «фантазии» не очень ученого человека. Он, в сущности, начал экологическое движение, по крайней мере – в СССР.

Отсюда, правда, не следует, что мысли ученых мужей, наоборот, непременно ценны.

Продолжая обсуждать фантазии пока вне темы об авариях, можно заметить, что обстановка неудовлетворенности существующим положением порождает желание найти простой рецепт какого-то выхода из нее, и эта почва порождает фантазии, куда более широкие, чем в технике. Легкость придуманного выхода как будто подтверждается речением Архимеда: «Дайте мне точку опоры, и я переверну весь мир». На этом пути нам предлагаются соблазнительные опоры: идеи и решения. Еще недалеко ушедшее время дало несколько замечательных примеров.

В конце 1940-х годов лысенковское отрицание наследственности и его же чудеса с перевоспитанием растений были подняты до уровня верного средства, наконец, накормить народ. Ту же цель преследовала сталинская брошюра «Экономические проблемы социализма в СССР», 1952, в которой основная беда послевоенного социализма с его недокормом усматривалась в наличии атавистической формы собственности – колхозов, которые поскорее нужно бы преобразовать в совхозы, что и осуществлялось. В чуть более ранней сталинской брошюре «Марксизм и вопросы языкознания», 1950, излагались проблемы, чуждые реальной жизни, экономике, политике (и автору брошюры – тоже),

но чуть ли не вся страна изучала ее и ею восторгалась, как если бы там можно было вычитать путь в рай.

Курьезная история, которую можно считать почти техногенной аварией, произошла с писателем А.А. Фадеевым. Написав в свое время талантливую повесть «Разгром», он к началу 1950-х годов стал самым важным (и сильно выпивающим) чиновником от литературы, но еще не оставил надежды написать значительное художественное произведение в духе канонов того времени. Подвернулась замечательная тема в виде широко пропагандируемого в то время движения «передовиков производства» за увеличение съема чугуна с площади пода доменной печи. Идея эта обещала прорыв в производстве чугуна, который считался основой обороноспособности, и Фадеев взялся создать сюжет вокруг печей. Он начал писать большой роман под ученым названием «Черная металлургия», но неожиданно для него выяснилось, что печи, реальные, а не романские, не выдерживают напора рационализаторов и лопаются. Тут тему свернули, а с ней исчерпался и роман Фадеева о печах. В 1956 году и сам автор, расстроенный смертью Сталина и крушением его «культа», расстался с жизнью. В журнале были опубликованы несколько написанных глав романа; в них некие кряжистые рабочие, идейно, напряженно и скучно обсуждают проблему печей и борются с отсталыми и недоверчивыми.

Возвращаясь к авариям, можно заметить, что ход аварий в какой-то определенной области техники – не слишком разнообразен, а меры по их предупреждению и локализации – дело достаточно ответственное, чтобы в нем не было места фантазиям или принципиальным заблуждениям. Но нет, – и то и другое время от времени возникает. С такого рода историями автор знаком не понаслышке и может опыт своих наблюдений передать читателям.

В двух следующих сюжетах – заведующие научными лабораториями, люди ладные, импозантные, решительные, артикулированно дискутирующие, принятые своими в администрации и в общественных организациях институтов, легко ориентирующиеся и выше.



### **3.5.2. Глобальная «экономическая» идея наталкивается на реальность и законы электротехники**

В СССР не создавалось системы автоматического регулирования, подобной той, которая повсеместно применяется в западных странах для поддержания нужного в тот или иной момент обмена мощностью между отдельными частями энергообъединения, совместно работающими в его рамках. Для этого было две причины, обусловленные, так сказать, бытием, и еще одна – обусловленная сознанием.

Бытие являло, во-первых, отсутствие каких-либо коммерческих обязательств по обмену мощностью между частями энергообъединения страны и, во-вторых, тяжелый дефицит каналов передачи информации на дальнее расстояние, каналов, без которых регулирование по западному образцу невозможно.

От сознания шло представление, что задавать и поддерживать обмен мощностью между отдельными энергосистемами не нужно, а следует экономить общие для всей страны энергоресурсы (расход топлива и воды) и для этого правильно загружать электростанции мощностью. Для этого, по мере увеличения нагрузки потребителей и поэтому уменьшения частоты в энергосистеме требовалось увеличивать мощность именно тех электростанций и тех агрегатов на них, у которых это увеличение сопряжено с наименьшим расходом энергоресурсов по сравнению с другими.

Кстати, такой подход соответствовал всеобщему призыву экономить именно топливо и, притом, не требовал каналов связи.

Эта теория родилась в 1950-х годах благодаря трудам ряда научных работников, затем настойчивостью одного из них она была доведена до выпуска на малосерийном заводе необходимой электромеханической аппаратуры и даже подробно представлена в учебниках. Автор данного текста изучал эту аппаратуру в учебном институте и затем, уже работая инженером в проектной организации, даже создавал документацию по ее применению.

Теория выглядела стройной и представлялась ее автором в качестве точно отражающей именно социалистический характер производства. Тем не менее, она вызывала разнообразные возра-

жения как из области экономики (мол, топливо не есть единственная составляющая себестоимости электроэнергии – §1.4), так и типа «гладко было на бумаге, да забыли про овраги». Одно из возражений заключалось в том, что строго экономическое распределение мощности между электростанциями во многих случаях оказывается неосуществимым из-за недостаточной для этого пропускной способности сети. Например, в §2.3 уже упоминалось, что поднять мощность Саяно-Шушенской ГЭС до ее полных 6000 МВт, может быть, иногда было бы и экономично, но передать ее от станции невозможно, а создавать для этого дополнительные линии электропередачи вряд ли окупилось бы.

Ответом явилось усовершенствование теории путем учета еще одного экономического фактора – потерь мощности в электрической сети. Выглядело довольно стройно: если дальнейшая загрузка станции вызывает увеличение потерь мощности в сети, то она становится как бы менее экономичной, автоматика учитывает это, загрузка этой станции не производится, и тем самым предотвращается перегрузка сети. При этом, правда, пришлось мириться с неприятной необходимостью передачи информации о мощности, передаваемой через слабые сечения сети.

Вся эта система автоматики была создана в энергосистемах Украины и в 1962 году подготовлена к показательным испытаниям (автор данного текста находился при испытаниях на диспетчерском пункте Донецкой энергосистемы в качестве наблюдателя). Некоторое время после включения системы в работу, по мере роста нагрузки потребителей, электростанции загружались в приемлемом для электрической сети порядке, близком к тому обычному, который обеспечивали операторы. Но затем их стала беспокоить опасно большая загрузка связи 220 кВ с соседней Днепровской энергосистемой, поднимавшаяся время от времени слишком близко к пределу пропускной способности связи. То же самое из своего кабинета наблюдал по приборам главный инженер энергосистемы, и он понял, что ситуация грозит ему потерей параллельной работы и большой аварией. Во время очередного подъема передаваемой мощности он стремительно явился на диспетчерский пункт и очень решительно приказал оператору

немедленно вывести из действия эту автоматику. На этом испытании закончились.

Эти связи 220 кВ подложили создателю системы большую неприятность – потери мощности в них были не столь велики, чтобы их учет заметно снизил экономичность передачи по ним мощности и тем самым уменьшил излишнее рвение донбасских станций, но зато пропускная их способность оказалась недостаточной для должного использования станций.

Во время обсуждения результата этого испытания создатель системы утверждал, что данный случай свидетельствует не о том, что его система негодна, а о том, что нужно усилить связь между энергосистемами, построить дополнительные линии электропередачи и т.п. Его воображение, видимо, рисовало картину: везде работает его система и организацией нарушений параллельной работы она выявит хилые связи, тогда нажмут бульдозеристы стартеры, и связи будут немедленно усилены. А персоналу энергосистемы и без его системы было хорошо известно о слабостях имеющейся электрической сети, из-за которых от него требуется немалое искусство, чтобы назначить безопасный порядок загрузки электростанций мощностью и разгрузки их, и о наличии слишком малых ресурсов усиления сети.

Испытания сильно подорвали престиж этой теории и этой системы автоматики, и с тех пор регулирование мощности в энергосистемах СССР пошло по совсем другому пути. Возобладали интересы сохранения параллельной работы, и регулирование мощности свелось почти исключительно к автоматическому ограничению мощностей, передаваемых по связям между частями энергосистемы (этим занималась, например Саяно-Шушенская ГЭС – см. §2.3). И это действительно уменьшило количество нарушений параллельной работы.

Новые условия работы энергосистем и крупных электростанций в России, более, чем прежде, связанные с коммерческими интересами, выдвинули, конечно, новые задачи, близкие к тем, которые решаются на Западе.

Изложенная история иллюстрирует то, как, пытаясь увлеченно решить задачу с одной точки зрения, неблагоприятно и иногда даже совершенно недопустимо вторгаются в соседнюю область.

### **3.5.3. Соседское дело кажется простым**

#### *Положение дел*

Турбина создана достижениями теплотехники и механики, а генератор – электротехники и тоже механики, хотя последняя здесь играет меньшую роль. На агрегате турбина–генератор соприкасаются интересы теплотехников-турбинистов и электриков. На «стыке» этих наук иногда появляются любопытные идеи. Итак, тема данного раздела – управление агрегатом турбина-генератор тепловой электростанции.

Обычно турбинисты справедливо хотят простого – чтобы турбина могла работать в энергосистеме спокойно, не изменяя отдаваемой генератору мощности. Электрики же утверждают, что не энергосистема для турбины, а турбина для энергосистемы, и энергосистеме настоятельно нужно, чтобы в нормальных условиях ее работы турбина четко, довольно быстро и в большом диапазоне своей мощности отзывалась на изменение частоты в энергосистеме, на команды, подаваемые вручную или автоматикой, внешней по отношению к турбине. Более того, еще в начале 1930-х годов теоретически и экспериментально было доказано, что вполне осуществимо по команде извне на закрытие клапанов, через которые подается пар в турбину, за десятые доли секунды понизить мощность паровой турбины и что такая разгрузка может существенно помочь избежать аварий, связанных с нарушением параллельной работы генераторов. Упоминание в этой фразе «команды извне» предполагает, что в энергосистеме наличествует какой-то уровень автоматического противоаварийного управления, который должен выработать эту команду, если она действительно требуется для сохранения параллельной работы, и вложить в эту команду информацию о том, в какой именно мере турбине следует срочно уменьшить ее мощность, разгрузиться.

Несколько позже обнаружилось, что после отключения от сети полностью нагруженного генератора турбина большой мощности, несмотря на воздействие от регулятора скорости, склонна к недопустимому для нее повышению скорости вращения (больше, чем на 10%), к «угону» турбины. Турбинисты ЛМЗ, озабоченные этой

опасностью, предусмотрели подачу в систему регулирования турбины дополнительного сигнала, вызывающего в случае быстрого разгона турбины максимально быстрое закрытие ее клапанов. Для этого они создали электрический вход в гидравлическую систему, которая регулирует скорость вращения турбины. Не рассматривая здесь проблему формирования этого сигнала, важно заметить, что созданный ими электрический вход в их систему они предложили использовать также для приема внешних команд противоаварийной автоматики. И применительно к турбинам ЛМЗ эта задача была решена.

#### *Суть новой идеи*

Вера в успех новаций в мало знакомой соседней области техники (как оптимистически говорят, «на стыке наук») привела некоторых турбинистов к более радикальной идее.

Первоначальный изобретатель этой идеи, считавшийся лучшим электриком среди турбинистов, поставил перед собой и турбиной цель обойтись без внешнего противоаварийного управления, поскольку, с его точки зрения, собственная система управления турбиной, в основном в то время гидравлическая, сможет сама выработать нужную команду. И он сконструировал аппаратуру, принцип действия которой можно поверхностно выразить так: она воздействовала на разгрузку турбины в случае возникновения значительной разности между механической мощностью турбины и электрической мощностью генератора.

Поскольку в предаварийном состоянии энергосистемы мощность турбины приблизительно равна мощности генератора, этот способ в основных чертах похож на то, что команда на разгрузку турбины подается по причине резкого уменьшения (так называемого сброса) электрической мощности генератора по сравнению с исходным значением. Такое бывает при близком КЗ.

Надо отдать автору изобретения должное, следствием сброса генератором мощности действительно может явиться то, что ротор генератора начнет ускоряться и возникнет неблагоприятный процесс: он грозит или угоном турбины, или нарушением параллельной работы. В то время как первую из этих опасностей, опас-

ность для самой турбины, можно оценить по величине и длительности возникшего сброса мощности, для оценки второй из них, опасности для энергосистемы, этой информации явно недостаточно. Сброс мощности может быть вызван коротким замыканием в сети или просто отключением в ней линии электропередачи или части потребителей, но, нуждается ли при этом параллельная работа в разгрузке турбины, зависит от состояния энергосистемы, имевшегося до возникновения аварийного возмущения, и того состояния, которое возникнет в результате возмущения. А этой обширной информации на уровне отдельного агрегата нет и быть не может. Подобные возражения многократно сообщались автору изобретения, но советы не убедили его, и он добился контрольных натурных испытаний.

#### *Жестокость экспериментов*

Он создал свои системы управления на турбогенераторах 50 и 100 МВт Серовской ГРЭС (на Урале), и в 1964 году в присутствии представительной комиссии очень организованно провел испытания. Он доказал, что повышение устойчивости параллельной работы генератора действительно достигнуто, но неожиданно для себя, видимо не проведя предварительных расчетов переходных процессов, убедительно продемонстрировал недопустимую цену этого достижения. Обнаружилось, что турбины разгружались при совсем не опасных повреждениях и даже просто при качаниях ротора испытываемого генератора относительно роторов других генераторов энергосистемы.

Неблагоприятные результаты не смутили изобретателя, и он попытался подправить систему управления турбины вводом в нее недостающей информации об энергосистеме. Однако это дает структурный нонсенс – собирать и перерабатывать информацию об энергосистеме намного надежнее и дешевле в системе управления другого уровня, на уровне электростанции или энергосистемы, а не на каждой турбине. На отдельных же турбинах разумно ограничиться лишь исполнением внешних команд от этого другого уровня.

Здесь уместны два замечания. Во-первых, деятельность этого автора, как не раз бывало в науке, оказалась продуктивной не тем, что ему, изобретателю, казалось важным, а совсем другим – ему потребовалось разграничить два типа разгрузки турбины: разгрузку на короткое время, импульсную, и разгрузку на длитель-

ное время (это позволило учесть различие требований к разгрузке при разном типе процессов в энергосистеме). Во-вторых, соблазн идеи решать вопрос устойчивости энергосистемы, не выходя за рамки турбины, столь велик, что у первоначального автора имеются последователи – до последнего времени исследования в этой области ведутся (кажется: «чужую беду руками разведу»).

### *Управление турбиной извне*

Оно неспешно исследовалось и дорабатывалось силами многих специалистов: турбинистов ЛМЗ и электриков из научных и проектных институтов. Эта тема была практически завершена испытаниями противоаварийной автоматики и турбины 300 МВт на Конаковской ГРЭС, расположенной севернее Москвы на берегу Волги. Для этой крупной электростанции (восемь агрегатов по 300 МВт каждый) под руководством автора был разработан проект противоаварийной автоматики, использующий разгрузку турбин для сохранения параллельной работы этой станции с московской энергосистемой.

Станция получила и наладила заказанную для нее аппаратуру автоматики, и после долгих проволочек наступили испытания. Из осторожности для этого был выбран только один агрегат, причем тот, который подлежал скорому плановому ремонту, и он был отделен от остальной станции для работы на простую сеть напряжением 220 кВ. Было проведено несколько экспериментов аварийного ослабления этой связи. Они показали многое. В случае, когда автоматика была не введена в действие, возникло нарушение параллельной работы, а действием автоматики на разгрузку турбины параллельная работа сохранялась. Когда интенсивность воздействия на турбину была назначена меньшей, чем необходимо, произошло нарушение устойчивости, но автоматика быстро выявила асинхронный ход и разгрузкой турбины немедленно восстановила параллельную работу – успешно произошла ресинхронизация.

Успешность испытаний была обеспечена не только разумностью принятого принципа внешнего управления турбиной и не только тем, что перед испытаниями в диспетчерском управлении

энергообъединением страны были внимательно проведены расчеты намечаемых переходных процессов, но и исключительно квалифицированным их проведением. Экспериментами руководил прямо на станции С.А. Совалов, в то время ведавший состоянием электрических сетей энергообъединения.

Работа шла дружно, и не скучно. Ее украшал веселыми спектаклями начальник электрической лаборатории станции. Он в этой компании, играя роль человека из народа, привычно бросал свою кепку о землю и клялся, что турбина предназначена не для такого управления и с ней сделать ничего невозможно, однако – затем все отлично налаживал. На разных этажах станции были осмотрены все устройства автоматики и бдительно приведена в порядок ее настройка. И не дали ничего напутать операторам. После этого турбине ничего не оставалось делать, как прекрасно справляться с выполнением сигналов автоматики, а экспериментаторы успешно заосциллографировали процессы в энергосистеме и вполне четкое поведение турбины и автоматики.

В противоположность фантастическим идеям, эти испытания открыли многим тепловым станциям путь к применению противоаварийного управления турбинами.

### **§3.6. Не доходя до аварии**

Теперь предстоит рассказать о нескольких эпизодах, которые автору известны не по описаниям, не как участнику послеаварийных комиссий, т.е. со слов участников и виновников аварий, не как участнику испытаний, а непосредственно – как действующему лицу или по крайней мере как очевидцу. В этих эпизодах, к счастью, довольно благополучных, просматриваются пусть немногие, но вполне характерные пути к авариям, многообразие которых неисчерпаемо.

Начальные обстоятельства второго и третьего эпизодов многим сходны. Во втором эпизоде всё, относящееся к компетенции автора, происходило спокойно, и этим он противоположен третьему эпизоду, в котором автор «ходит краем, зная край» (А.Т. Твардовский, поэма «Тёркин на том свете») или азартно переступает за край.

Автору кажется, что *обо всём этом естественнее и проще рассказать от первого лица.*



### 3.6.1. Опробование напряжением

#### *Вступление*

Жесткость сталинского времени дала двойственный результат: с одной стороны, неукоснительно ответственное выполнение обязанностей и, с другой, стремление мало-мальски важное дело нудно согласовать с начальством, причем желательно в письменной форме, и даже просто держаться подальше от всякого дела, связанного с риском неудачи. Я знал неплохого специалиста по эксплуатации устройств релейной защиты, который боялся лично выполнять их проверки, во время ответственных операций с защитой старался отсутствовать.

Но были и замечательные исключения. Среди них – руководитель описанных ниже опасных действий Виталий Александрович Вершков. Он был главным инженером Управления, которое занималось эксплуатацией электропередач 400 и потом 500 кВ от гидростанций на Волге к Москве. Он энергично интересовался совершенствованием своего дела и имел большой опыт руководства одним из районов московской энергосистемы, опыт, касавшийся, впрочем, более коротких подмосковных линий электропередачи напряжением не более 220 кВ. С помощью оптимистической веры в возможность быстрых решений непростых технических проблем он добивался значительных успехов. Например, он был одним из инициаторов и энтузиастов перевода первой электропередачи напряжением 400 кВ на более высокое напряжение 500 кВ, с тех пор ставшее для СССР каноническим. Однако проявлялась и некоторая избыточность этой веры, иногда она его подводила, но, прежде чем рассказать такой случай, опишу характерный эпизод из его деловой жизни.

Он поручил мне составлять программы операций, которые, в соответствии с высоко утвержденным планом детальных натурных испытаний высоковольтного оборудования, предстояло выполнить на подстанциях при вводе в работу первой в мире электропередачи 400 кВ. Такая «оперативная программа» – перечень условий и действий, которые поочередно должны соблюсти и выполнить все участники испытаний. В 1956 году я принес ему оче-

редную программу. Она уже подписана Вершковым, затем я ее многократно выправил, обходя всех научных, проектных и эксплуатационных участников и добиваясь утверждающих подписей. Теперь настала пора решиться выполнить эту программу. Он понимает, что при неудаче отвечать ему, и, наклонив голову вбок и вниз, задумывается, потом берет трубку. Звонит главному электрику Министерства И.А. Сыромятникову, человеку очень колоритному, влиятельному и решительному, кстати, автору двух дельных книг о работе электрических двигателей. Поздоровавшись, без всякого вступления, с напором произносит приблизительно следующее: «Иван Аркадьич, мы тут завтра с утра затеяли подать напряжение до Вешкаймы с реактором в Арзамасе». Далее в ответ на короткую реплику: «Автотрансформатор в Ногинске один, но искровые промежутки стоят. Думаем выдержит. Как ты? Благословляешь?» Тот, видимо, поддерживает, и, как генерал перед сражением, Вершков решительно дает распоряжения на завтра. Я получаю указание сопровождать его.

Утром Вершков спешит на собственной «Волге» в Ногинск, на первую подмосковную подстанцию 400 кВ. Дорога строилась как «дорога Москва–Пекин», она мокрая и грязная, дворники не работают, и он время от времени рулит одной рукой, а другой, высунувшись в окно, протирает стекло тряпкой.

Когда я стал ныть об удаленности моей деятельности от конкретной техники, он уверенно высказал мне свое кредо: «Инженер пользуется только тремя инструментами: пером, вычислительной линейкой и телефоном». В число этих инструментов отвертка и торцовый ключ, как видно, не входили. Тем не менее, понимая, что совсем молодому инженеру неплохо бы, кроме бумаг, видеть и техническую реальность, он иногда брал меня с собой на подстанции.

### *Шутка с напряжением*

Итак, Вершков отправился на Ногинскую подстанцию, от которой предстояло впервые подать невиданное до той поры напряжение 400 кВ на уже построенный участок будущей электропередачи – линию длиной 117 км до подстанции, расположенной у города Владимир. Там я оказался свидетелем и почти участником впечатляющего события.

Дело было под общегосударственный праздник, и, несмотря на мерзкую погоду с мокрым снегом, руководители строителей и монтажников дружно собрались на подстанции, предвкушая после опробования линии напряжением рапортовать более высокому начальству о достигнутом к празднику «новом трудовом свершении». Наконец, по телефону получили сообщения, что монтажники с линии удалены и на обоих концах линии с нее сняли защитные заземления, – теперь линия готова к постановке под напряжение. Поворотом ключа управления оператор подстанции торжественно включил ее выключатель, и – он тут же отключился под действием релейной защиты от КЗ. Попробовали включить еще раз, результат тот же: линия не держит напряжения, она неисправна.

Все озабоченно погрузтели, что было делать дальше? Осциллографы переходных процессов на подстанции еще не были налажены, все только могли видеть, как на щите управления стрелки приборов вздрогнули и вернулись на прежние места, что с линией – совершенно непонятно. Как далеко повреждение от Ногинска? На какой оно из трех фаз линии? Жестко ли провод линии соединен с землей – может быть, монтажники забыли снять свое защитное заземление? Или он упал?! Или, напротив, на трассе линии осталась не вырубленное деревце и с провода происходит дуговое перекрытие на него? А может быть, происходит дуговое перекрытие по грязной гирлянде изоляторов? Конечно, во власти строителей, монтажников и Вершкова было послать своих работников осматривать линию, но надеяться на быстрый успех таких действий невозможно (позже в таких случаях Вершков вызывал вертолет и лично пытался сверху обнаружить место повреждения).

В этой неловкой ситуации Вершков решил измерить изоляцию линии и для этого использовать мегомметр.

Так называли переносной генератор, который, если его ротор вращать ручкой достаточно интенсивно, дает на испытуемое оборудование напряжение постоянного тока величиной 2500 В. Попутно в зависимости от тока, пропускаемого испытуемой изоляцией, прибор определяет ее сопротивление, а шкала прибора градуирована в миллионах Ом, т.е. в мегаомах, отсюда и название прибора – мегомметр.

Подаваемого прибором напряжения вполне достаточно для испытания изоляции сравнительно низковольтных устройств с напряжением максимум 380 или 500 вольт, которое в тысячу раз меньше напряжения 400 кВ – уровня изоляции линии. В данном же случае целью являлось, конечно, не испытание неизмеримо более высоковольтной изоляции, которой обладает линия 400 кВ, а только ее измерение: думалось, если на линии возникло жесткое короткое замыкание, то мегомметр и покажет почти нулевой уровень сопротивления изоляции линии.

По-видимому, у Вершкова был такого рода опыт, правда, на прежней его работе линии были покороче, и в каждой фазе было не по три провода, как на этой линии 400 кВ, а один.

Все вышли на территорию открытого распределительного устройства к высоковольтным аппаратам, отключающим линию. Ее заземлили (соединили с контуром заземления подстанции), мой институтский сокурсник Володя Кузнецов, после института обслуживающий релейную защиту подстанции, принес мегомметр и поставил его на снег, затем монтер прицепил провод от мегомметра к одной из фаз линии, и с линии сняли заземление. Всё было готово к измерению, и Володя, сидя на корточках, привычно начал крутить ручку. Линия потребляла большой ток, оттого ручка подавалась тяжело и прибор показывал нулевое сопротивление. Володя уже пыхтел, но его просили покрутить еще.

И тут что-то щелкнуло, прибор вздрогнул, а Володя отлетел от него метра на два и свалился на снег к моим ногам. Все ахнули, затем возникла немая сцена, он зашевелился и с моей помощью поднялся.

Первым пришел в себя Вершков. Он распорядился линию снова заземлить и мегомметр от нее отсоединить.

Все молча разошлись по своим делам.

С Володей я потом не раз встречался, и, конечно, мы обсуждали с ним этот случай. Он рассказывал, что не понимает, какая сила отбросила его тело от прибора, и был уверен, что этот удар не дал последствий. Только нам было не ясно, зачем все это делалось и почему мы не видели опасности. От сонной ли погоды или от почтения к шефу?

### *Возражения*

По существу дела можно представить по крайней мере три возражения.

Даже если бы было определено, что линия имеет повреждение, которое наиболее легко обнаружить с помощью мегомметра, – жесткую связь с землей, это ничуть не продвинуло бы к включению линии. Ведь, чтобы снять эту связь, сначала нужно ее увидеть воочию, а когда еще приказ дойдет до монтеров-обходчиков, когда они соберутся выйти на трассу и когда они что-нибудь плохое заметят? А осенний день уже шел к концу! Так что действия с мегомметром были бесполезны.

Второе возражение касается электротехники. Дело в том, что каждая из трех фаз линии состоит из трех скрепленных друг с другом проводов и эта конструкция образует относительно земли и двух других фаз линии некоторое подобие конденсатора, одна как бы пластина которого – данная фаза, а другая пластина – все остальное. После момента, когда к линии приложено напряжение, и до момента, когда этот конденсатор зарядится, от источника напряжения в линию идет ток, заряжающий емкость конденсатора. Это ток нагружает генератор мегомметра и тем самым препятствует подъему напряжения, затрудняет вращение генератора и, главное, создает иллюзию того, что на данной фазе линии имеется жесткое короткое замыкание. Не исключено, что через некоторое время володины усилия привели бы к выводу об его отсутствии. Но случай помешал этому.

Что же случилось? Мне это не известно, и я полагаю, что никто не стал доискиваться. Можно наметить лишь предположение, если представить себе, что висящая в воздухе горизонтальная конструкция из девяти проводов, каждый длиной больше ста километров, является гигантской антенной, которая вбирает в себя все электрические наводки. Вероятно, в эту сырую погоду на какой-то линии электропередачи, расположенной поблизости от испытываемой линии 400 кВ, случилось короткое замыкание на землю, по ней пошел ток, возможно, в тысячи ампер и этот ток через индуктивную связь с испытываемой линией навел на ней большое напряжение, от которого и пострадал Володя. Отсюда третья и са-

мое главное возражение: в данном случае было нарушено безусловное требование правил о безопасности работы – нельзя работать на незаземленных частях электротехнической установки. Счастье, что дело кончилось благополучно.

Таким образом, приходим к выводу, что вся эта возня с мегомметром имела только эмоциональную причину – хотелось хоть что-нибудь узнать о повреждении, но была бесполезна, технически наивна и совершенно неприемлема с точки зрения безопасности.

А на следующий день повреждение линии нашли и устранили. Сейчас, наверное, никто и не помнит, в чем оно заключалось.

### **3.6.2. О порядке в цепях измерения тока и попутные впечатления**

Измеряемые в сети высокого напряжения токи имеют в нормальных условиях работы энергосистемы величину во многие сотни ампер, а, если возникло короткое замыкание, – даже тысячи ампер. Такие токи не могут быть поданы в приборы контроля и управления непосредственно и поэтому предварительно преобразуются в пропорциональные им токи, величина которых в нормальных условиях работы энергосистемы не превышает одного или, реже, пяти ампер. Преобразование осуществляется в высоковольтных измерительных *трансформаторах тока*.

Любой специалист, который использует в автоматике информацию о токе, протекающем в сети, должен убедиться в том, что в его прибор подаются именно те токи, которые требуются, и притом каждый с нужной полярностью. Дело облегчается, если измерение многочисленных токов на подстанции организовано в упорядоченную систему.

В 1990 году делегация из трех человек пыталась представить большой компьютерной фирме США свои успехи в области систем управления энергосистемами. Толку из этого не вышло никакого, так как, коротко говоря, мыслилось получить для нас интересную работу и заработок, а американцев так вдохновить нашими успехами, что они примут на себя весь финансовый риск при гадательных перспективах. Но это путешествие доставило несколько ярких впечатлений, и одно из них связано как раз с темой о цепях тока.

Делегации показали тепловую станцию с тремя агрегатами общей мощностью приблизительно 2000 МВт. Эта станция работала на угле, имела громадную установку очистки уходящих дымовых газов и сияла чистотой, как не всякая гидравлическая станция. На этой почти безлюдной станции делегация вдруг наткнулась в одном из помещений на двух сотрудников. Молодые люди, сидя на корточках спинами к стене, внимательно разглядывали нарисованную ими диаграмму токов и напряжений – типичная картина в процессе проверки цепей тока.

Мне пришлось этим заниматься многократно, но более всех запомнились два эпизода. Оба имели место приблизительно в 1960 году во время моей работы в центральной службе релейной защиты московской энергосистемы. В обоих случаях требовалось проконтролировать правильность операций с релейной защитой, необходимых при включении в работу нового оборудования подстанции – автотрансформатора, передающего энергию от электропередачи напряжением 500 кВ в местную сеть напряжением 110 кВ. Эти операции касаются устройств, защищающих как сам автотрансформатор, так и непосредственно связанные с ним элементы сети.

Выполнение двух одинаковых служебных заданий прошло различно: первое – совершенно спокойно, а, выполняя второе, я, напротив, очутился в необычно опасной ситуации, в которую по легкомыслию втянулся и с которой, к счастью, благополучно справился.

В этом разделе, расскажу о выполнении первого задания – маленькой командировке на подстанцию, расположенную у города Михайлов Рязанской области и являющуюся последней перед Москвой подстанцией электропередачи 500 кВ от ГЭС у Волгограда на Волге. Электропередача уже действовала, и на этой подстанции был подготовлен к включению в работу ее первый автотрансформатор 500 кВ.

На вокзале меня встретил Борис Николаевич Камкин – опытейший руководитель бригады, которая налаживала систему управления подстанции. Я его уже знал: он перед этим руководил наладкой на подстанции 400 кВ у города Ногинск – первой из приемных подмосковных подстанций электропередачи от ГЭС у Самары на Волге. Тогда у него был очень сильный состав брига-

ды, с ее инженерами автор встретился чуть позже на второй таковой же подстанции – у поселка Бескудниково.

Эта подстанция уже упомянута в разделе 3.5.1, теперь небольшое дополнение. Некоторое время, пока на подстанции включались первые автотрансформаторы и линии 110 и 220 кВ, я был там единственным инженером-эксплуатационником – должен был принимать работу наладчиков и заодно сам выполнять небольшие текущие работы. А наладчики делали основное – доводку и наладку устройств релейной защиты, поставленных заводами, и при этом нельзя было не заметить, что они были опытные в своем деле и исключительно квалифицированы. Соглашаясь на эту работу – в пункте, трудно доступном для ежедневной езды из Москвы, в непролазной грязи, без какого-либо подобия туалета, без столовой, с обогревом самодельными электрическими печками – они чувствовали себя независимо и от своей тогда безвыходной ситуации отгораживались иронией. Один из их остроумцев любил характеризовать все это и тому подобное восклицанием персонажа Аркадия Райкина «система!». Заменить меня на этой подстанции тоже никто не покушался: жилье при подстанции еще не построили, и ездить туда из Москвы никто не желал, а моего согласия не требовалось, да и, к счастью, я жил не далеко от Савеловского вокзала, откуда Бескудниково – вторая остановка. Безнадзорная работа рядом с этими людьми дала мне неоценимые начальные навыки.

Камкин отвез меня к поселку строителей, на окраине которого в двух вагончиках располагалась его бригада. На этот раз бригада была моложе и послабее. Ее быт был по тем временам пристроен, вагончики были неплохо оборудованы: бригадир умел по свойски «выбить» из своих заказчиков и из строителей приемлемые условия работы и оплаты, имел в этом громадный опыт. Включение автотрансформатора было назначено на завтра, бригада считала, что к нему уже все подготовлено, суеты не требовалось, и через небольшое время образовался общий дружеский ужин. Он прошел с таким подъемом, что наутро я не без труда поднял голову.

Однако, наскоро позавтракав, отправились на подстанцию. Дорога шла к линии 500 кВ, потом вдоль нее, и она открылась нам в совершенно немыслимом виде: между опорами линии провода болтались, как веревка-прыгалка в руках двух неумелых девочек. Они причудливо поднимались, опускались, изгибались горизонтально и с разной частотой выписывали причудливые колебания. Но это не детские веревочки, а в каждой из трех фаз линии – по три скрепленные между собой, как связаны вершины треугольника, толстенные многотонные конструкции из много-



жилых алюминиевых проводов, обвитых вокруг стальных тоже витых тросов. Ни тогда, ни теперь я не понимаю, как гирлянды изоляторов выдержали эти броски проводов.

Это редкое явление имеет название – *пляска проводов*. Оно возникает при боковом относительно линии сильном ветре, если на проводах образовались гололедные наросты, которые приобрели со временем в поперечнике форму крыла и благодаря этому создали подъемную силу. Ко времени нашего появления потеплело, ветер и изгибы проводов уже сбили лед, но провода продолжали плясать.

На подстанции мы узнали, что линии 500 кВ, отходящие в обе стороны от подстанции, отключились и их бессмысленно снова включать: провода соседних фаз время от времени схлестывались, и возникли бы короткие замыкания.

К вечеру стихия успокоилась, линии включили в работу, и началось включение автотрансформатора. На него подали напряжение со стороны шин 110 кВ, убедились, что его изоляция выдерживает напряжение, затем его подключили к шинам 500 кВ, и по нему стала передаваться энергия от шин 500 кВ к шинам 110 кВ.

Во время этих операций автотрансформатор не имел собственных защит от коротких замыканий: они еще не проверены на предмет правильности подвода к ним токов. Он защищался защитами смежных элементов сети, и это во многих отношениях рискованно. Теперь предстояло, не теряя времени, все окончательно проверить и включить собственные защиты. Здесь не случайно употреблено слово окончательно: наладчики должны были заранее проверить по отдельности и высоковольтные измерительные трансформаторы, и кабели от них к устройствам защиты и к измерительным приборам, и сами эти устройства. Но отдельных проверок недостаточно, необходимо убедиться в правильности всего в целом.

Итак, предстояло проверить, что к каждому измерительному прибору, устройству автоматики и защиты поданы именно те токи, на которые они должны реагировать, и что эти токи имеют правильную полярность, что позволит не спутать направление тока и мощности в автотрансформаторе.

Сразу после постановки автотрансформатора под нагрузку инженеры бригады вместе с сотрудниками подстанции стали проверять показания каждого прибора на щите управления и с помощью предназначенных для этого переносных приборов – каждый ток и каждое устройство защиты. Эта работа осложнена тем, что размыкать цепь, по которой протекает ток от измерительного трансформатора, ни в коем случае нельзя, так как в месте разрыва может образоваться напряжение в несколько сотен вольт, опасное и для аппаратуры и для человека. Поэтому в устройствах, содержащих цепи тока измерительных приборов, предусматривают измерительные клеммы, каждая со сдвигаемой перемычкой.

Такие клеммы были показаны на рисунке 3.4. Измерение на клемме требует аккуратности и сноровки: провода, идущие от измерительного прибора, присоединяются к клемме винтами *ВЗ*, и только после этого допустимо сдвинуть перемычку *П*, благодаря чему ток направится не через перемычку, а через присоединенный прибор.

По показаниям приборов требуется разобраться, соответствуют ли разные измеряемые токи друг другу по величине и направлению протекания. Бригадир, по-хозяйски переходя вместе со мной от одного сотрудника к другому, контролировал правильность действий и поддерживал, если нужно.

Работа заняла часа два–три, она подтвердила, что токи подведены правильно, и бригадир вместе с сотрудником подстанции сделал в журнале щита управления запись о готовности устройств защиты к включению в работу. Оператор щита управления по подсказкам и под наблюдением специалистов повернул оперативные переключатели защит в сторону «включено».

Напряжение спало, участники работ поздравили друг друга, всем спасибо, и разошлись по своим делам и к своим удовольствиям. Я же отправился на вокзал в Михайлов.

Бродя в ожидании поезда по платформе, я взглянул на скульптуру, украшавшую маленький палисадник у самого здания вокзала. Архаически вылепленная в рост фигура, похожая на Ленина, стояла на шаре размером в половину его роста. Хотя краски полиняли, можно было различить, что подножием ботинок служила

страна с очертаниями СССР. Так наблюдение удивительного природного явления и впечатление от успешной работы дополнились знакомством с очень показательным из такого рода художественных предметов.

### 3.6.3. Проверка токов и себя

#### *Поручение*

Часов в 11 предвыходного укороченного дня я пытался сосредоточиться на описании уже выполненного мною расчета обновленной настройки устройств, защищающих сеть подведомственного мне района около подстанции Чагино – одной из двух приемных подстанций той же самой, как и в предыдущем разделе, электропередачи 500 кВ от ГЭС у Волгограда. Эти рутинные расчеты отслеживали всевозможные изменения в сети, и их приходилось выполнять минимум дважды в год. Расчеты требовалась обосновать и подписанную записку сдать в архив службы, впрочем, никакой срочности в этом не было, и взгляд охотнее направлялся через реку на церкви Зарядья и в ясное летнее небо, чем в бумаги и на вычислительную линейку. В голове бродили заботы, связанные с поездкой к семье на дачу. Зазвонил телефон, и начальник моей службы вызвал меня к себе в соседнюю комнату. Несколько смущенно он приказал немедленно ехать на подстанцию Чагино, чтобы присмотреть за включением в работу релейной защиты нового автотрансформатора, которому предстояло связать там сеть напряжением 500 кВ с сетью 110 кВ. В утешение он прибавил, что машина будет ждать меня внизу.

Это поручение не доставило мне удовольствия. Во-первых, время уже располагало к другому. Во-вторых, Управление, которое занималось эксплуатацией электропередачи 500 кВ, на наладку этих защит не наняло подрядную наладочную организацию, как на рязанской подстанции, а решило это сделать самостоятельно – силами своих сотрудников. Говорилось, что хотели сэкономить средства, но было понятно и другое: хорошо мне известный главный инженер этого Управления В.А. Вершков хотел, чтобы его сотрудники не бездельничали, были более плотно за-

няты и получили опыт серьезной работы. Кто именно выполнил наладочные работы и кто контролировал, – внутренние вопросы этого управления, и мне знать этого не требовалось. Но понятно, что центральная служба защиты энергосистемы, в которой работал я, время от времени должна иметь представление о качестве работ на местах, и в этом смысле поручение справедливо, делать нечего. Наконец, в-третьих, взаимопонимания с персоналом этой подстанции у меня не было. Экзаменуя инженеров подстанции перед допуском к отдельным предстоящим им работам, я не замечал стремления совершенствоваться. Что же касается изменений настройки защит, необходимых время от времени в связи с изменениями в сети, то они обычно выполнялись там с большим скрипом, и мне приходилось терпеть возникавший из-за этого риск излишне длительной несогласованности защит подстанции с защитами соседних подстанций.

Но, повторяю, делать было нечего, и я отправился.

#### *Первая развилка*

На подстанции я увидел всю местную команду, руководитель которой через некоторое время почему-то исчез, оставив при деле своих двух молодых помощников. Из Управления электропередачи тоже никого не было. Провести на подстанции этот прекрасный день никакому работнику Управления не хотелось, и, видимо, поэтому оттуда договорились с моим начальником послать меня. Складывалась ненормальная игра, но в этом проглядывало и доверие, которое льстило моему самолюбию, и я смирился: поручено – будет выполнено!

Так была пройдена первая развилка возможных поступков.

#### *Вторая развилка*

В силу каких-то обстоятельств, осложнивших работу московской энергосистемы, ее диспетчер долго не разрешал подавать напряжение на автотрансформатор, и после томительного ожидания обычные операции начались только под вечер.

Наконец, автотрансформатор был включен с обеих сторон, и должна была начаться проверка защит.

Тут я расслышал в помещении щита управления довольно ощутимое жужжание, даже потрескивание, как будто перегружен какой-то прибор или где-то проскакивают искры. Я бросился к устройствам защиты автотрансформатора и, зайдя с задней стороны, увидел искрение на клеммах. Оказалось, что на части измерительных клемм прерывисто появляются искры. Такого я никогда не видел, а, всмотревшись, обнаружил, что на этих клеммах сдвинуты их перемычки. Остальное было понятно: на месте снятой перемычки цепь тока разорвана, и на выводах измерительных трансформаторов тока образовалось напряжение, достаточное для того, чтобы перекрыть дугой воздушный зазор клеммы. Как всегда на подстанции, моя рабочая отвертка торчала из кармана, и я немедленно пустил ее в ход: ослабить винт перемычки, накинуть ее на место и закрепить с двух сторон винтами, потом снова и снова. Все это, конечно, не пальцами, а отверткой – для этого она хорошо изолирована. Подбежали и местные инженеры, стали делать то же самое. И скоро искрения стало не слышно.

Я попытался дознаться, как это безобразие возникло, но они ничего не могли сказать, кроме того, что поставить перемычки на место, как видно, забыли. Что было делать? Потребовать отключить автотрансформатор, предпринять пере проверку цепей тока и только после этого, через недельку, снова включать его? Это вполне возможно, но вызовет большой скандал, я же избегал подсовывать свои проблемы начальству, привык решать их самостоятельно. Включение этого автотрансформатора я к тому моменту, видимо, уже считал своей проблемой, к счастью, его нагрузка была в это время небольшой, так что изоляция цепей тока вряд ли пострадала, и, вообще, пора было приступить к проверке цепей.

Так была пройдена вторая развилка.

### *Третья развилка*

Приступили. Как уже упомянуто, в каждой из цепей тока специально для таких работ предусмотрена измерительная клемма. Параллельно ее съемной перемычке подключаются приборы, перемычка снимается, ток идет через приборы, и по ним определя-

ется величина тока и его направление. Эта операция повторяется многократно, и показания приборов сопоставляются. И сопоставление показало, что направление тока в части цепей в точности противоположно должному, что к каждой из таких цепей измерительная обмотка трансформатора тока включена с неправильной полярностью. Перепроверки подтвердили это. Итак, было похоже, что в ряде цепей тока два провода релейной защиты присоединены к двум проводам от измерительной обмотки трансформатора тока не так, как требуется, а вперекрест.

С таким обстоятельством я столкнулся впервые. Если этого не изменить, то защита будет совершенно неправильно воспринимать расположение КЗ: при КЗ в автотрансформаторе она не действует, как будто это КЗ находится где-то во внешней сети, а при КЗ во внешней сети, наоборот, подействует, – как будто поврежден автотрансформатор.

Наконец, я догадался спросить местных инженеров, как проверялись полярности измерительных обмоток трансформаторов перед тем, как к ним присоединить цепи тока. И получил поразительный ответ – вообще не проверялись. Последовало и обоснование: думали, это делать не обязательно, одно к другому можно присоединить наудачу, а, когда автотрансформатор будет включен, комплексная проверка цепей тока как раз и выявит возможные неправильности, после чего всё поправим.

В этом обстоятельстве проявилась разница между профессиональными наладчиками и эксплуатационным персоналом. Он имеет дело с уже налаженными цепями и поэтому может вообще не догадываться о ранее проведенной проверке полярности. И я тоже никогда не участвовал в такой проверке, только видел, как наладчик поднимался к выводам высоковольтной обмотки трансформатора тока, чтобы дать в нее поверочный импульс тока.

Опять возникла дилемма. Прекратить включение автотрансформатора, заставить всё проверить и затем снова начать весь процесс включения? Или вопреки обстоятельствам немедленно поправить цепи? У меня был опыт безошибочной работы в различных действующих цепях, я верил в свое умение, и выбрал второе.

Занимаясь эксплуатацией автоматики, я, конечно, не раз ошибался, но сам исправлял дело и ни разу не довел его до аварии. Но был случай, когда руководству Управления, в котором я прежде работал, оказалось удобным назначить виновником одной из аварий именно меня.

Это случилось на подстанции под Арзамасом. Там местные работники занимались идентификацией (иначе – «прозвонкой») проводов кабеля. Для выявления наличия или отсутствия напряжения на проводе они неграмотно использовали обычную лампу накаливания, через которую по одному из проводов подали напряжение на катушку отключения выключателя 400 кВ. Он отключился и тем самым отключил линию 400 кВ, идущую в сторону Москвы. Она была частью единственной в то время линии длиной 752 км от ГЭС на Волге до подстанции у Ногинска под Москвой. Московская энергосистема потеряла несколько сотен мегаватт мощности, передаваемых по линии, но пережила это без особо неприятных последствий: она была готова к такой потере, ведь столь длинная линия, да еще находясь в пусковой период работы, могла отключиться по самым разнообразным причинам и отключалась довольно часто.

После того как на подстанции у Бескудниково появились другие инженеры, мне там делать стало нечего, и меня стали отправлять в командировки на упомянутую подстанцию под Арзамасом, чтобы я там выполнял те работы, которые местный персонал делать не умел. Я стал как бы ответственным за систему управления этой подстанцией, именно «как бы ответственным», так как официально возложить эту функцию на меня было невозможно: я по молодости лет занимал должность простого инженера и, соответственно, получал низшую зарплату. И все-таки моя вина усматривалась в том, что, находясь в командировке на этой подстанции, я допустил аварийное безобразие. На самом деле я занимался там совершенно другим, гораздо более сложным делом, и ни ее работники никоим образом не были мне подчинены, ни их работа не входила в цель моей командировки, я и понятия не имел, что они делали и кто руководил их работой. Директор Управления, как теперь выражаются, «крепкий хозяйственник», в своих ритуальных докладах на общих собраниях неизменно критиковал меня как «аварийщика», и это продолжалось, пока он почему-то не счел, что под влиянием его благотворной критики я исправился. Однако, целый год после этого случая я получал в среднем половинную премию, и это делало мой заработок «молодого специалиста» еще ничтожнее. Как сказано, – «система».

Итак, последняя развилка была пройдена в пользу самостоятельного завершения дела, в пользу нелегкой и опасной работы.

### *Перекрещивание цепей*

К тому времени уже стемнело, и дежурный по подстанции включил освещение открытого распределительного устройства.

А работа состояла в следующем. По довольно шаткой лесенке нужно было подняться к каждой коробке высоковольтного транс-

форматора тока, в которой ошибочно соединены два вывода этого трансформатора тока с двумя отходящими проводами, открыть коробку и в ней эти провода поменять местами. Конечно, такую работу делают при отсутствии высокого напряжения на трансформаторе тока, а в этот раз оно присутствовало, и поэтому требовалось следить, чтобы голова не высывалась выше фундамента трансформатора тока.

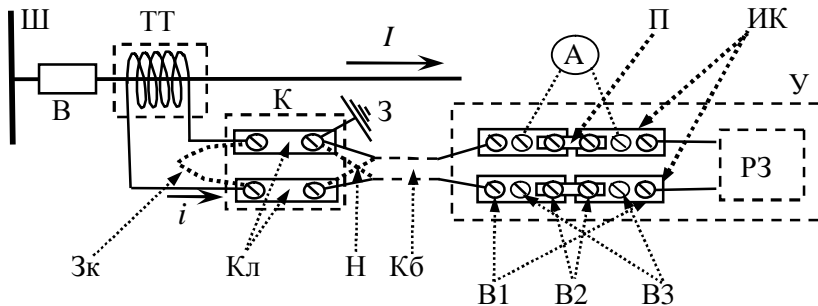


Рис. 3.7. Путь тока от трансформатора тока к реле защиты

Сущность дела иллюстрирует рисунок 3.7. На нем схематично изображена цепь тока и обозначено:

- Ш – сборная шина открытого распределительного устройства подстанции,
- В – высоковольтный выключатель элемента сети,
- ТТ – измерительный трансформатор тока,
- К – коробка проводов от трансформатора тока,
- Кл – клемма в коробке,
- З – заземление измерительной цепи тока,
- Кб – кабель от трансформатора тока в помещение автоматики,
- I; i – направление тока в элементе сети и в цепи к устройству его защиты,
- У – устройство автоматики,
- РЗ – релейная защита,
- А – амперметр,
- ИК – измерительная клемма,
- П – переключатель на клемме, показан в нормальном состоянии (для разрыва цепи она сдвигается с одного из винтов),



- В1 – винты для присоединения проводов основной цепи,
- В2 – винты для крепления сдвигаемой перемычки,
- В3 – винты для временного присоединения приборов,
- Зк – временная перемычка, необходимая на время перекрещивания проводов кабеля (показана пунктиром),
- Н – новое присоединение кабеля (показано пунктиром).

В коробке К, расположенной непосредственно у высоковольтного аппарата, клеммы не предназначены для измерений, тут клемма Кл – просто металлическая пластинка с двумя винтами: один крепит к ней провод от трансформатора тока, другой – отходящий провод. У клемм не было дополнительных винтов для закрепления временной перемычки (иначе – закоротки) между ними, той перемычки, которая заменила бы внешние цепи на время, пока они разомкнуты для перекрещивания их проводов. Временную перемычку нужно было установить под те же винты, которые крепят выводы от трансформатора. Казалось бы, дело не сложное. Но оно требовало совершенно не стандартных, очень осторожных манипуляций с винтами проводов от трансформатора и с самими этими проводами.

Некоторое время мне помогали местные инженеры, но часа в два ночи они куда-то сгнули. Я нашел их в помещении щита управления трогательно спящими на полу между шкафами автоматики. Дежурный по подстанции, сидя за пультом, тоже спал. Я не стал их расталкивать и как заведенный с этого времени вопреки правилам безопасности работал в одиночку.

Все это лазанье по клеммным коробкам я закончил уже за светом.

Перейдя в помещение щита управления, перепроверил правильность подвода токов к устройствам, все оказалось в порядке, осталось разбудить дежурного, сделать запись в журнале и уже туманным сознанием проследить, чтобы дежурный правильно включил защиты в работу.

### *На отдых*

От дальнейшего в памяти осталась только последовательность действий. Спросил, как добраться до платформы электрички, дошел до автобуса, доехал

до платформы, зашел в вагон, сумел не проспать свою станцию, ноги донесли до снятой нами дачи, без интереса посмотрел на своих, поставил на землю свой чемоданчик, затем, не евши уже сутки, только выпил воды и лег. Явился я, как мне потом сказали, в 11 часов утра. Помню также, что, идя по дачной дорожке от станции, я обнаруживал себя то на одном ее краю, то на другом, и в голове мутно ютился стыд выглядеть, как будто надрался с самого утра.

### *Критическое заключение*

Этот подробный рассказ написан совсем не для того, чтобы восславить замечательный «трудовой подвиг». Прежде всего, он содержит пример того, как пренебрежение рутинными обязанностями, происшедшее как от незнания их, так и от самоуверенной лени, может создать немалые трудности. Но еще виднее неуместность стремления немедленно преодолеть эти трудности своими силами.

Выше отмечены три развилки, на которых мне казалось первостепенной задачей, именно *моей* задачей успешно завершить включение автотрансформатора и под прессом этой ответственности я принимал глубоко неверные решения, опасные и для меня самого, и для энергосистемы. На всех трех развилках правильной альтернативой совершенному мною было обращение к разного рода начальству, и этого, по-видимому, мне подсознательно хотелось избежать. В то время, по молодости лет, я не стал анализировать ситуацию и обоснованность моего подсознания, а был доволен, что, к счастью, все прошло удачно: и я жив, и дело сделано. Я не стал рассказывать подробности даже своему начальнику, сказал только, что цепи тока были плохо подготовлены, и поэтому включение автотрансформатора затянулось на всю ночь.

Кстати, к этому времени мой интерес к эксплуатационной работе исчерпывался, прогресс релейной защиты мне, по неведению, казался завершенным, и я уже подыскивал другую работу. Вскоре мне предложили совсем новое для меня дело, которое захватило меня сильно и надолго. С этого времени я перестал быть участником аварийных событий, а знал их только по расследованиям, к которым меня привлекали, надеясь свалить вину на мой институт и конкретно на меня. И конечно, по литературным источникам. А позже я понял, что исключительно престижная работа в центральной службе защиты столичной энергосистемы была для меня бесперспективной. Тут были на месте или профессионалы, которые тесно срослись с окружением на своем участке работы, отлично зная и этот участок и разного рода условности на нем, или люди, которым эта

служба открывала быстрый подъем по чиновничьей лестнице, – ни к тем, ни к другим я не относился. Вместе с тем, работа в службе требовала той оглядчивости, которой я не обладал.

#### **3.6.4. Суета вокруг непонятого**

Таинственное, непонятое влечет нас к себе так сильно, что порой не хочется расстаться с ним и узнать взамен нечто сухорациональное. А тем, в кого внедрена привычка свои беды сваливать на чуждые злые силы, такое пробуждение грозит разочарованием, расстройством и для некоторых совсем неприемлемо.

На эту тему читателю предлагаются две истории, одну из которых я близко наблюдал, а в другой сам участвовал.

##### *Первая история*

На подстанции у Бескудниково параллельно с сексуально-экологической историей, описанной в разделе 3.5.1, возникло еще одно чудо – по ночам стали самопроизвольно отключаться высоковольтные выключатели автотрансформатора, который преобразовывал и передавал энергию с шин напряжением 500 на шины 110 кВ, питающие внутреннюю московскую сеть. Причина отключений была совершенно загадочна, так как никаких флажков, призванных сигнализировать действие релейной защиты автотрансформатора, не было видно, ни одно сигнальное реле ни одного устройства защиты не действовало.

Персонал подстанции сбился с ног; наезжали многочисленные начальники, смотрели на три громадных бака автотрансформатора (для каждой фазы А, В и С – свой бак) и на тоже громадные изоляторы, выходящие из крышки каждого бака, он нормально гудел, гудели и его охлаждающие вентиляторы, разглядывали и панели его защиты, удивлялись их многочисленности, затем, подумав, мрачно высказывали подозрения: то ли вредители по ночам шалят, то ли крысы, пользуясь темнотой, грызут кабели управления?

В один из таких наездов автотрансформатор отключили, чтобы приглядеться подробнее. Как полагается перед ремонтом, отключили не только его выключатели, но и так называемые разъе-

динители, а также поставили защитное заземление. И тут руководитель бригады наладчиков (о ней – в разделе 3.6.2) В.Черняк вызвался влезть на крышку одного из баков автотрансформатора, чтобы посмотреть хотя бы внешне, нет ли какой-либо неполадки с так называемым газовым реле. Затем он сверху попросил включить выключатели и дать ему с земли валяющуюся там метра полтора длины доску. Включили и дали. К удивлению присутствующих, он, мужчина высокий и на вид крепкий, бывший офицер, стал бить доской по трубе, в рассечку которой вмонтировано газовое реле, – от удара к удару сильнее. После нескольких ударов грохнули выключатели, завывла сирена, автотрансформатор как бы отключился. А со щита управления сообщили, что флажков сигнальных реле не видно.

Немного о сути этого дела. В баке автотрансформатора находятся стальной сердечник и медные обмотки автотрансформатора, залитые минеральным маслом, которое изолирует обмотки и вместе с тем охлаждает и обмотки и сердечник. Упомянутая труба с врезанным в нее газовым реле идет от этого бака к установленному выше него сравнительно небольшому баку-расширителю. Последний нужен для того, чтобы принять излишек масла из основного бака, которое расширяется при нагревании работающего автотрансформатора.

А газовое реле представляет собой маленькую стеклянную колбу, внутрь которой впаяны два провода-контакта, а в колбу налито немного ртути.

Если по трубе идет сильный поток масла или газа, колба поворачивается этим потоком так, что ртуть образует токопроводящий мост между впаянными контактами, через ртуть напряжение подается на выходные реле защиты автотрансформатора, и он отключается. Эта защита очень важна, так как при повреждении внутри бака она может подействовать, не дожидаясь развития КЗ.

Итак, инцидент был исчерпан, осталось только выяснить, почему не работало сигнальное реле газовой защиты. Это не составило труда. Измерение показало, что выходные реле действуют от импульса напряжения длительностью меньше 0,01 с, а для выпадения флажка сигнального реле требуется, по крайней мере, вдвое большее время. По-видимому, удары по трубе вызывали настолько кратковременное перемыкание ртутью контактов газового реле, что выходные реле успели подействовать, а сигнальное не успело. Вполне естественно предположить, что аналогичное явление вызывала вибрация автотрансформатора: она передавалась его трубе к баку-расширителю, и эта вибрация при ночной

малой нагрузке автотрансформатора содержала те частоты, с которыми вступала в резонанс колба реле.

Пришлось изменить расположение колбы, чтобы для замыкания контактов требовался чуть больший ее поворот. Эта простая поправка разрешила загадку: отключения автотрансформатора прекратились.

### *Вторая история*

Вероятно, лучшее из устройств релейной защиты от КЗ, созданных в СССР, – устройство защиты линии электропередачи напряжением 400 кВ, названное ДФЗ-400. Принцип действия этой защиты прост: она сравнивает направления токов по концам линии. Если мощность передается по неповрежденной линии, или где-то в сети вне этой линии возникло КЗ, то какой ток в линию вошел, *приблизительно* такой и выйдет, т.е. токи по концам направлены в какую-нибудь одну сторону линии. Если же именно на этой линии имеется КЗ, то с обеих сторон линии токи текут к месту КЗ и направления этих токов противоположны.

Как это часто бывает, простота принципа обрастает массой осложнений, и поэтому эта защита реализуется сложным устройством. Оно было разработано в 1950-х годах, т.е. в эпоху, когда полупроводники применялись только для выпрямления переменного тока, а слов процессор и тем более микропроцессор вообще не существовало. Поэтому устройство располагалось на двух панелях, одна из которых была плотно набита электротехнической аппаратурой, а другая несла высокочастотный приемо-передатчик на вакуумных лампах. С помощью этого приемо-передатчика устройство защиты, установленное на одном конце линии, передавало информацию о направлении тока к такому же устройству защиты на другом конце (ведь поврежденную линию требуется отключить с обеих сторон).

Когда электропередача 400 кВ от гидростанции под Самарой к Москве была почти полностью введена в работу, на станции, на каждом из трех переключательных пунктов электропередачи и на обеих ее приемных подстанциях обе ее линии были оборудованы защитой ДФЗ-400 в качестве основной защиты. Все 18 устройств

защиты прекрасно выявляли КЗ на своих линиях, тратя на это всего 0,04 с.

Однако, в конце 1950-х годов одно за другим стали происходить неправильные действия этих устройств. Наблюдалась такая картина: на какой-либо из линий возникает КЗ, с обеих сторон этой линии устройства защиты прекрасно действуют, линия отключается, но попутно еще и на другом участке электропередачи совершенно излишне отключается одна из двух параллельных линий, и виновата в этом ее защита ДФЗ-400.

Эти излишние отключения происходили, к счастью, *при передаче небольшой мощности*, не приводили к нарушению параллельной работы, не были особенно опасны, но все равно серьезно беспокоили. Кто знает, а вдруг такое случится при большой передаче? Кроме того, всякое излишнее отключение рассматривалось как брак в работе и требовало расследования.

Конечно, возникла версия о злом умысле. После массовых обвинений во вредительстве, звучавших с 1920-х до начала 1950-х годов, эта версия часто всплывала в сознании людей, но в данном случае ей противоречило то, что излишне срабатывали устройства, установленные в разных точках электропередачи. Не слишком ли много вредителей? Словом, после каждого такого рода случая требовалось проверить исправность подозрительного устройства.

Поскольку часть аварийных отключений происходила на подстанции под Арзамасом, а я считался ее неотъемлемым придатком (см. предыдущий раздел 3.6.3), то на проверки арзамасских устройств непременно высылали меня. Я служил и проводником в специфических условиях этой подстанции и помощником основного проверяющего. Не умолчу о тех, кого я сопровождал.

Г.Якубсон – один из разработчиков устройства, мой сверстник. С ним у меня сложились приятельские отношения, он меня кое-чему подучил в области тонкостей своего устройства и заодно научил песенкам об участии Енты в революции в Каховке и о месяце на небе, который «ночью светит, а днем не».

Сергей Леонтьевич Володин занимался эксплуатацией систем управления, но был много старше меня, выше чином и неизмеримо опытнее. Он считался назначенным сразу на три должности:

во-первых, заместитель начальника всей службы, ведающей в Управлении электропередачи релейной защитой, автоматикой и связью и расположенной сначала при самом Управлении в Москве, а потом на подстанции в Бескудниково, во-вторых, руководитель местной службы такого же рода на подстанции 400 потом 500 кВ под Ногинском и, в-третьих, старший мастер по вторичной коммутации.

Пояснение: все, что не находится под высоким напряжением считается не первичной, а вторичной коммутацией, т.е. на более современном языке – системой управления.

Из этих трех должностей первая служила для придания Володину большего веса в бюрократических делах, которыми он впрочем, не занимался, а третью он получил потому, что она оплачивалась выше, чем две первых. Выполнял он, в основном, функции по второй должности. Ценили же его вполне оправданно: на первой из подстанций 400 кВ его знание дела и его неукоснительная ответственность были незаменимы.

Как и некоторые другие, с кем мне довелось встретиться на работе, он был из поколения моего отца, человек закрытый, строгий и требовательный как к себе, так и к своим помощникам, а по отношению к начальникам иногда строптивый, но именно иногда и только если слышал явно вредное указание. Не всем это нравилось, тем более что выражалось и лексически. Не руганью, конечно, а выбором дистанцирующих слов. Он не сказал бы: «Поручите (или скажите, попросите...) Николая приварить то-то»; у него это звучало бы так: «Заставьте Николая приварить то-то». Приведу еще пример. Завершая дневную работу, он и я снимали провода, соединявшие испытательную установку с устройством защиты. Я отсоединил с двух сторон длинный провод и скомкал его, чтобы спрятать. Володин меня резко остановил, мол, провод не комкать надо, а, чтобы он подольше служил, аккуратно смотать кольцом. Теперь это кажется странным – такая бережливость по отношению к грошовому отрезку провода, ему же так не казалось. До тех пор пользовались очень толстыми грубыми проводами с резиновой изоляцией в текстильной оплетке, а этот провод был легким и гибким: он был сплетен из тонких медных жил и помещен в тонкую пластмассовую оболочку, еще и цветную. Такие замечательные провода только что появились, их было мало, на подстанции их и не видели, и несколько кусков получил где-то и привез с собой сам Володин, чтобы облегчить нашу работу. С тех пор я непременно свертываю провод кольцом и, когда поступаю так, вспоминаю Володина.

Проверяли устройства, скрупулезно следуя инструкции, в которой разработчики изложили всю процедуру, и согласно тем параметрам настройки, которые были заданы индивидуально для

каждого устройства. И ничего подозрительного нигде не находили.

Тем временем в Москве руководитель разработки Евгений Давыдович Сапир со своими инженерами провел ревизию своего научного хозяйства. Это-то и дало результат, догадались.

А разгадка была в следующем. В начале этого подраздела не зря указано на *приблизительное* равенство токов по концам неповрежденной линии. Как уже упомянуто в разделе 3.6.1, длинная линия да еще с тремя толстыми проводами в каждой фазе представляет собой как бы конденсатор, отсасывающий часть передаваемого тока в землю. Поэтому токи по концам неповрежденной линии не равны друг другу в точности, и это особенно проявляется при малой нагрузке линии и может привести к тому, что внешнее КЗ будет воспринято как собственное. Разработчики в принципе правильно скомпенсировали в своем устройстве эту утечку тока, но градуировку этого учета рассчитали ошибочно.

Устройство прошло многочисленные лабораторные испытания, оно уже несколько месяцев использовалось, и все-таки вылезла тяжелая ошибка, причем – при совершенно безобидных обстоятельствах. А ведь оно – несравнимо менее сложно устроено, чем, скажем, энергосистема или воздушный лайнер; сколько же там таких обстоятельств? Как часто мы оптимистично полагаемся на хорошие результаты испытаний и забываем, что уверенность дает только очень важное утверждение «проверено длительным опытом использования»!

Устранили ошибку быстро: всем устройствам рассчитали другую настройку и ее выполнили. И такого рода неправильные действия устройства защиты ДФЗ-400 прекратились.

Кстати, упомянутые выше С.Л. Володин и Е.Д. Сапир вполне заслуженно получили вскоре самую высшую в СССР премию. В связи с Володиным было проявлено своеобразное лукавство: в премируемый коллектив он был включен как будто бы рабочий: по своей третьей должности – старший мастер. Премия была дана за успехи в релейной защите электропередачи 400 кВ, и мне приятно отметить, что возглавляли премируемый коллектив два моих руководителя в то время А.М. Федосеев и В.М. Ермоленко.