

Часть третья

Против техногенных аварий

Откуда они возникают и как их избежать

Содержание третьей части

<i>Введение</i>	207
<i>Глава 1 Истоки бед от аварий</i>	211
Прогресс как источник и ограничитель аварий	212
Те, кого связывают с аварией.....	217
<i>Глава 2 Авария – от начала до восстановления</i>	219
Аварийный толчок и развитие	219
Случайное и неслучайное развитие аварии	222
Аварийные стадии.....	226
<i>Глава 3 Забота о безаварийности</i>	229
Свойства объекта и его защита	229
Создание безаварийности объекта	232
Поддержка безаварийности действующего объекта.....	240
<i>Глава 4 Потери от аварий и противоаварийные затраты</i>	245
Проблема сопоставления затрат и издержек	245
Ущерб, наносимый потребителю, – составная часть издержек	248
Оценка издержек с учётом «вредности» аварии	251
Реакция общества на аварию на примере АЭС	254
<i>Глава 5 Немного конкретизации</i>	261
Уровень и достижимость безаварийности	261

Отступление об опасностях в энергосистеме.....	264
Пример эшелонированной противоаварийной системы	267

Глава 6 Очерк противоаварийной техники в энергосистемах ... 273

Релейная защита	274
Реле.....	274
Центральная фигура	274
Отдел противоаварийной техники	275
Публичные обсуждения	278
Начало забот о параллельной работе генераторов.....	279
Обстановка.....	281
Моделирование энергосистемы	282
Подход к противоаварийной автоматике.....	283
Роль диспетчерского управления	284
Вступление проектного института.....	285
Трудности нового	286
Период электромеханических реле	289
Первые проекты	289
Первая промышленная аппаратура	293
Экстренное снижение мощности паровых турбин	294
Роль автоматики и новые задачи.....	295
К вычислительной технике	296
Первые достижения	296
Препятствия, действительные и мнимые	298
Движение к желательному алгоритму	299
Исследования, инженерия, производство	301
Трудные пути новаций	301
Достижения производства	302
Новые возможности.....	304
От завода к использованию.....	305
Использование некачественной продукции	305
О подготовке персонала	307
Успехи, неудачи, трудности.....	308
Суммирование успехов	308
Принципиальные трудности	309
Литература к третьей части.....	311

Введение

Прогресс бесспорно улучшает материальную сторону нашей жизни, и, что важнее, нравы на значительной части планеты заметно смягчаются. Но ликовать нет оснований: агрессивность отдельных людей и обществ далеко не исчезла и не исчезнет, а войны и всевозможный терроризм, расовый, религиозный, социальный, становятся всё опаснее, заставляя не терять бдительность.

Мало того, нас сопровождают и, видимо, являются неотъемлемой частью жизни на планете природные катастрофы, и с ними учатся всё лучше, по возможности безболезненной, как-то сосуществовать.

Уже столетие с лишним (с гибели «Титаника» в 1912 году) появилась новая опасность: оказалось, что прогресс науки и техники – не только благо, он увеличивает опасность аварий и катастроф. В этой области, являющейся темой данной части книги, сделано много ошибок, они принесли громадные неприятности и с ними большой опыт. Этот опыт, казалось бы, должен избавить от следующих ошибок, но они возникают и возникают. В самоуверенной надежде помочь кому-то из читателей учиться не на своём горьком опыте, в эту часть книги внесены соображения о том, что нужно без серьёзной необходимости не создавать заведомых источников аварий и как, всё-таки создав большой опасный технический объект, избежать аварий на нём.

Авария в технической системе, или, как говорят, техногенная авария, может иметь самые разнообразные последствия. Возможно, что объект, на котором произошла авария, прекратил выполнять значительную часть своих основных общественно важных функций. Случается уничтожение значительной части аварийного объекта или тем более всего объекта. Наконец, авария может так или иначе затронуть широкий круг людей, даже вызвать тяжелейшую беду – их гибель. Но и менее страшная авария может одним принести горе, другим разоре-

ние, многих заставить взволнованно сочувствовать и участвовать в восстановлении более или менее нормального состояния объекта.

Для всех такого рода аварий ограничимся нейтрально звучащим определением большая, и наша тема – именно такие, большие аварии.

Здесь рассматриваются, вероятно, наиболее принципиальные проблемы борьбы с большими авариями, причём большая часть текста основана на текстах из [1], которые для этого довольно значительно улучшены.

В квадратных скобках здесь и далее даётся ссылка на номер литературы из списка, помещённого в конце данной части.

Однако ни описание, ни анализ конкретных аварий, которые содержатся в [1], здесь не повторены; при необходимости напомнить о той или иной из них даётся ссылка на [1].

Исключение сделано только для одной аварии (в главе 2), не техногенной, а человеческой, описанной М.Ю. Лермонтовым.

В последней главе данной части представлен очерк развития противоаварийной техники в электроэнергетических системах, т.е. той техники, которая много десятилетий является моей профессией.

После большой аварии часто приходится слышать, что люди не удовлетворены, даже крайне возмущены тем, что не наказаны примерно или даже не названы конкретные виновники аварии. Возникает небеспочвенное, но обычно безнадёжное подозрение, что авария «опять будет списана на стрелочника». Я разделяю эту неудовлетворённость и во многих случаях уверен, что ищут и «подсовывают» публике именно «стрелочника». Вместе с тем, уже несколько десятков лет занимаясь авариями и противоаварийными мероприятиями, я понял, что обычно очевиден только инициатор аварии, субъект, который сделал первое неверное движение, дал пусковой толчок аварии, запустил спусковой механизм. Он-то и представляется общественности виновником, хотя как раз этот конкретный виновник большой аварии часто интересен совсем мало, поскольку масштаб аварии определяется не им, не спусковым механизмом. Важнее обстоятельства, предшествующие аварии, и события, непосредственно следующие за пусковым событием, но тоже имеющие корни в прошлом.

Впрочем, не исключено, что первый толчок техногенной аварии – не субъект, а стихия, как это было на японской атомной электростанции Фукусима I.

Глубокие причины большой аварии далеко не всегда могут быть отождествлены с конкретными людьми. До причин не всегда легко доискаться, тем более что поиск их кому-то неприятен, кому-то опасен и поэтому предпринимается и приводит к успеху не очень часто.

Это легко можно увидеть, посмотрев описания некоторых аварий в [1] или первичные материалы их расследования, ссылки на которые приведены в [1].

Тем важнее разобраться в обстоятельствах, в принципе способствующих большим авариям, и продвинуться к выводам, внятным читателям.

Круг заинтересованных читателей расширяется по мере того, как технические системы играют всё большую роль в жизни и аварии касаются нас всё непосредственной. Может быть, предоставляемые здесь сведения позволят читателю вдумчиво отнестись к очередной большой аварии как к некоторой социальной и общекультурной составляющей жизни и даже самому тем или иным образом повлиять в пользу уменьшения опасности таких аварий.

Чтобы понять сущность аварии в технической системе, её глубокие причины, необходимо вникнуть в технологические особенности системы. Это – обязанность профессионалов, и их анализ должен предоставить обществу важную для него общую картину происшедшего, роль людей в ней. А на этом общечеловеческом уровне, несмотря на технологические различия технических систем, аварии в них, подчеркнём это особо, имеют гораздо больше общего, чем индивидуального.

И всё же кажется полезным дать читателю некоторую конкретизацию технической стороны дела. Это сделано в главе 5 данной части. В качестве показательной технологии вполне подходит электроснабжение от электроэнергетических систем. В них происходит много больших аварий, эти аварии затрагивают многих и, вероятно, известны многим читателям. Пришлось, однако, попутно пояснить основные явления и процессы, опасные для энергосистем.

Заканчивая введение, как и в [1], хочу напомнить, что аварии – та тема, которая связана с печальными, драматическими и порой трагическими событиями и что, с другой стороны, понимание феномена аварий внушает оптимистическую веру в наши возможности многое понять, сообщая предупредить, преодолеть.

Вероятно, многие читатели придерживаются более пессимистической точки зрения, и их в этом отношении подкрепляет поэт А.Блок,

который, напомню, в 1911 году начал свою поэму «Возмездие» такими строками:

Жизнь – без начала и конца.
Нас всех подстерегает случай,
Над нами – сумрак неминуемый,
Иль ясность божьего лица.

Но и пессимисту может оказаться интересным поразмышлять о том, откуда является сумрак крупной неудачи и как стоит попытаться её избежать, добываясь ясности в осознании окружающего. На эти вопросы романтик Блок не мог дать ответы, но он пронизательно чувствовал неблагополучие жизни, а отвечать предоставил нам. Ну что ж, попробуем продвинуться к ответам. Заметим, с той поры прошло сто лет, и наш опыт во всевозможных бедах жизни неизмеримо больше, чем был у поэта.

Глава 1 Истоки бед от аварий

Большие технические системы последнее столетие развиваются бурно. Мы так или иначе участвуем в этом: с удовольствием потребляем сопутствующие блага, иногда заворожено наблюдаем ужасные аварии в этих системах или сами становимся несчастными жертвами этих аварий, многие профессионально участвуют в создании и эксплуатации этих систем. Развитие техники несёт человеку и блага и горе. К сожалению, одно без другого невозможно, но тут необходим какой-то баланс, который определяется, с одной стороны, нашим стремлением к благополучной жизни, ради которой мы парадоксально отваживаемся на рискованные действия, и, с другой стороны, уровнем культуры общества, его гуманности и необходимости сохранить среду обитания. Иначе говоря, желательно, чтобы общество хорошо понимало свои цели не только в области умножения благ, но и то, на какие жертвы оно готово идти во имя этих благ, а какие жертвы недопустимы, и, наконец, какую цену оно готово платить за безопасность.

Имеются свидетельства о громадных бедах, нанесённых природными и техногенными катастрофами: например, в 2010 году общий экономический ущерб составил 218 млрд. долл., а в январе того же года землетрясение на Гаити вызвало гибель более 222 тыс. человек.

Техногенная авария при всей её возможной тяжести не приводит к сравнимым жертвам и разрушениям. И все же большая авария в технической системе иногда приобретает настолько большой размах, что поражает воображение и даже вызывает ужас и отторжение техники. Так, гибель десятков и даже сотен человек во время крушения судна или поезда – тоже ужасная катастрофа. А разве можно оставить без электроснабжения населённый пункт, да ещё северной зимней ночью, да ещё на сутки – трое? А если это большой город, мегаполис? Пред-

ставим себе людей, оставшихся в шахтах или в лифтах, на операционных столах и т.п. Плюс к этому в тёмном городе оживает деклассированный люд. А если без электричества остались непрерывные производства, химические, биологические, металлургические? Или же просто животноводство – ведь коровы не могут долго ждать просроченной дойки? И получается, что техногенная авария – как правило, не катастрофа, подобная стихийному бедствию, но тоже может приобрести совершенно недопустимый масштаб, принести громадные беды.

Нельзя, впрочем, не напомнить два недавних исключительных события. Авария на четвёртом блоке Чернобыльской атомной станции, начатая 26 апреля 1986 года ошибочными действиями персонала как техногенная авария, привела к экологической катастрофе – недопустимому и даже смертельному облучению многих людей и к катастрофическому радиационному заражению больших территорий Украины, Белоруссии и России. Другой пример перехода технической аварии в экологическую – авария на нефтяной платформе 20 апреля 2010 года в Мексиканском заливе: прорыв нефти из скважины, возникший глубоко под платформой, привёл к долго не прекращённому разливу нефти, и это вызвало тяжелейшую природную катастрофу в море и на побережье США.

Прогресс как источник и ограничитель аварий

Прежде чем обратиться к большим авариям, посмотрим хотя бы поверхностно на самые распространённые и ясные аварии – автомобильные.

Первой в мире жертвой дорожно-транспортного происшествия стала 07.08.1896 англичанка, которая переходила улицу в Лондоне и была сбита автомобилем. Он двигался со скоростью в 6,4 км/час. Правил дорожного движения тогда не существовало, и водитель не был обвинён. Судья решил, что смерть "была случайной" и сказал: "Это никогда не должно повториться". А аварии стали происходить – все чаще, затем массово.

Автомобиль очень заметно увеличил производительность человека и его комфорт. И одновременно унёс громадное количество жизней. По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире в дорожных авариях погибают 1,2 миллиона человек и около 50 миллионов получают травмы. На дорогах сильно автомобилизированных 28-ми стран Европейского Союза в 2014 году погибли 25700 человек, в среднем по 50 человек на один миллион населения, причём отклонения от этого среднего значения велики: приблизительно вдвое меньше погибли в Великобритании и Швеции, а в Латвии вдвое больше. Например, 81 млн. человек населения ФРГ имеют 44

млн. легковых автомобилей и каждый миллион населения потерял 42 человека, т.е. приблизительно по одному убитому человеку на каждый миллион таких автомобилей.

Уже давно автомобилей много, аварий много, жертв тоже много, и поэтому при всей индивидуальности погибших людей, разнообразии автомобилей и аварий эта картина однообразно выражается большими числами, статистически достоверна. Чтобы представить себе отношение к автомобильным авариям и к уровню потерь в них, посмотрим самые общие ориентировочные данные об автомобилизме и его жертвах в двух характерных странах: России и Канаде (сопоставление тепла и холода в этих странах уже использовано в главе 3 предыдущей части).

*Ориентировочные показатели России и Канады в 1998 году:
страны, автомобили, жертвы*

Показатель		Страна	
		Россия	Канада
Площадь, млн кв. км		17	10
Население, млн человек		145	32
Плотность населения: население/кв. км		8,5	3,2
ВВП на человека, US \$ на человека		10000	25000
Количество авто	на 1 млн. жителей	150000	580000
	в стране, млн. авто	21,8	18,6
Количество погибших в авариях на дорогах за год	всего	30500 *	3700
	на один млн. авто	1400	200
Количество авто, покупаемых в стране, млн. авто	ежегодно**	2,2	1,9
	в расчёте на одного погибшего в дорожно-транспортных авариях	72	514

* Это приблизительная оценка среднего количества ежегодно погибавших в России в дорожно-транспортных происшествиях с 1970 по 2000 год, отсюда – общее число так погибших в России за эти 30 лет составляет около 1 млн человек.

** В сделанном предположении о десятипроцентном обновлении парка автомобилей за год не исключена ошибка раза в два, что не меняет сути сопоставления.

Останавливает ли людей та плата за автомобильный прогресс, которая видна в приведённой таблице? Нет, не останавливает, но заставляет принимать меры для снижения смертности на дорогах. Это – ус-

вершенствование дорог, повышение конструктивной безопасности автомобилей, улучшение обучения водителей, контроль их поведения на дорогах, организационная и медицинская помощь. Все это обходится обществу недешево, платит как тот, кто водит автомобиль, так и тот, как я, воздерживается от этого.

Автомобилизация обходится жизни и здоровью людей всё дороже, относительное количество жертв уменьшается медленно (на дорогах России за 2010 год погибло чуть больше 26 тысяч человек). И мы миримся с этим положением! Последняя строка таблицы показывает то количество автомобилей, покупая которые в течение одного года, население непроизвольно готовит гибель одного человека в год, и ведь каждый из покупателей участвует в этом!

Кстати – сравнение, иллюстрирующее пользу качества жизни. Канада создаёт в 2,5 раза больший ВВП, чем Россия, и за счёт этого (вероятно, также за счёт более рационального его использования) добилась существенно лучшей обстановки на дорогах, и это резко (в 7 раз!) уменьшило человеческую дань прогрессу. Как видим, производительность и целенаправленные мероприятия оказались очень полезны.

Получается, что более богатое общество может позволить себе более дорогие мероприятия. Как ни цинично это звучит, это значит также, что в более богатом обществе страх аварий больше, склонность к риску меньше, – ценность жизни выше.

Это иллюстрирует отношение к атомным электростанциям в Германии и в России после аварии на японской Фукусима 1 (подробнее – в последнем разделе главы 4).

Автомобиль как источник человеческих жертв – сравнительно новый сюжет. Но можно назвать неизмеримо более старый и даже древний предмет, без которого автомобиль, как и вся наша цивилизация, невозможен, этот предмет – колесо. Никакое воображение, если даже встать на место Доре с его впечатляющими иллюстрациями к дантову Аду, не даст представить себе, сколько людей погибло под колёсами и в связи с ними. Единственное утешение – не сразу, как при большом катаклизме, а постепенно! Однако, можно предположить, что, не изобрети человек колеса, не используя его широчайшим образом – в быту и на войне, для производства благ и просто для развлечения, – остались бы люди на уровне, который застали конквистадоры у народов Южной Америки. Сегодня праздну спрашивать, стоят ли колёса погибших людей.

Можно ли из изложенного вывести, что катастрофы и тем более большие техногенные аварии меркнут по сравнению с другими жертвами человечества прогрессу и поэтому с ними спокойно можно мириться? Или, наоборот, в страхе перед жертвами нужно остановить прогресс? Думается и то, и другое одинаково антигуманно, а нужно

идти вперёд, исследуя, уместно применяя новые технологии, всемерно избегая аварий и все же разумно рискуя в рамках гуманизма и расширения возможностей общества.

Другое дело, что большая техногенная авария, авария с гибелью людей, со значительным ущербом для общества, не может развернуться на малом, просто организованном объекте, она возникает на большом и сложном объекте, на который возложены важные для общества и, иногда, опасные функции. Пока такого объекта нет, большой аварии можно не опасаться. Однако, к созданию всё более громадных и опасных объектов настоятельно толкает стремление получить значимый результат наиболее дешёвыми средствами.

Ведь ясно, что, чем вместительней лайнер, морской или воздушный, тем дешевле обходится владельцу перевозка каждого пассажира, да и билеты он может продавать несколько дешевле. Так же точно, большой генераторный агрегат вырабатывает электроэнергию с меньшими затратами на её единицу, чем малый, и подобно этому большая электростанция выгодней малой. Организовывать взаимодействие многочисленных генераторов для снабжения потребителей электроэнергии с помощью общей электрической сети тоже выгодно, как и объединяться людям в громадных мегаполисах.

Итак, стремление к выгоде укрупнения является естественным, но в связи с этим важны по крайней мере два замечания. Первое – здесь не имеются в виду проблемы, возникающие в экологии, проблемы, которые при внимательном к ним отношении могут превратить выгоду укрупнения объекта в убыток и кошмар. И второе, имеющее прямое отношение к нашей теме, – укрупнению объекта почти всегда сопутствует нарастание его сложности, и эта сложность может выйти за пределы ранее изученных или освоенных на опыте явлений, выйти в те области, которые таят опасности, ещё не известные или же известные, но такие, с которыми ещё не научились бороться.

Итак, к выражению «большому кораблю – большое плавание» можно добавить – и большая опасность.

Трагический пример укрупнения, вызванного тщеславной гигантоманией, представляет Саяно-Шушенская ГЭС. На этой неоправданно громадной электростанции были установлены слишком большие недостаточно хорошо сконструированные турбины, подверженные вибрации. Вдобавок, от станции и от её турбин слишком часто требовалось изменять их мощность без надлежащего учёта склонности турбин к вибрации, а элементы, поддерживающие прочность конструкции турбин, находились в безобразном состоянии. В результате, 17 августа 2009 года произошла авария [1, стр.

70-84], погибло 75 человек, и оборудование станции пришло в такую негодность, что на восстановление потребовалось больше пяти лет.

Объединение энергосистем от Забайкалья до Берлина длиннейшей электрической сетью, работающей на одной частоте, научно обосновывалось большими возможностями обмена электроэнергией между удалёнными друг от друга энергосистемами, расположенными в разных часовых поясах. Это преимущество реализуется, однако, только когда достаточно велика пропускная способность сети между энергосистемами. Этого-то и не было; как говорится, «за морем телушка – полушка, да дорога перевоз». А за настойчивым утверждением экономических преимуществ, как видно, стояли психологические мотивы: традиционное стремление к централизации управления и гордость достижением – рекордной протяжённостью такой сети. Не расхолодила даже характерная авария, прокатившаяся по всей этой сети 31 мая 1979 года [1, стр. 162-168]). Только политические события, начавшиеся спустя 10 лет, сузили эту сеть.

Иную, как будто противоположную опасность представляют обширные плотные электрические сети, созданные во многих регионах мира в пренебрежении нарастающей из-за этого взаимозависимостью объектов сети в аварийных условиях. Три связанные с этим аварии описаны в [1, стр. 173-209]: авария 13 июля 1977 года оставила без электроснабжения почти весь в Нью-Йорк («ночь страха»); авария 14 августа 2003 года прокатилась по громадной плотно обжитой территории, оставив без электроснабжения 40 млн. человек в северо-восточной части США и 10 млн. человек в Канаде; авария 25 мая 2005 года, в процессе которой потеряла электроснабжение большая часть Москвы. Эта опасность до сих пор мало изучена, и мероприятия против неё ещё не вошли в жизнь как стандарт.

Вряд ли стоит совсем пренебречь романтической точкой зрения – признанием, что расплата авариями за прогресс справедлива, поскольку он чужеродно вторгается в естественную жизнь мира, в природу, и отсюда – его вина и затем расплата за вину в виде аварий. Далеко идущие мысли известного исследователя культуры Б.М. Парамонова на тему происшедшего сто лет назад столкновения с айсбергом великопленного и громадного корабля «Титаник» (из эссе от 12.04.2012) приведены в [1, стр.14].

Древняя тема вины человечества и возмездия ему далеко выходит за рамки темы о собственно авариях, а теперь она соприкасается ещё и с такими широко обсуждаемыми проблемами как экология, антиглобализм, и мы не будем её далее развивать. Но последствия гигантомании и рискованного вторжения в неизученную область можно понять вполне рационально – они проявляются очевидными авариями (примеры этого уже упомянуты).

Хотя опасность укрупнения очевидна, побудительный мотив столь силен, что с этим приходится не столько бороться, сколько стараться осуществлять те меры, которые могут минимизировать опасность и даже на некоторых особо опасных объектах свести её практически к нулю. Эти меры нужно и обдумывать, и разрабатывать, и создавать, и поддерживать в работе.

Те, кого связывают с аварией

В развитии большой аварии, как видно по уже представленным здесь описаниям, проявляется множество недостатков того, каким технологический объект создан и затем как его функционирование поддерживается персоналом (подробнее – в главе 3).

Мы часто пытаемся истолковать аварийные явления в духе всевозможных авантюрных историй, в изобилии поставляемых нам газетами, книгами, кинофильмами и телевидением; они подталкивают нас подозревать, что в основе неординарных событий, о которых мы слышим, лежит чей-то злой умысел или злонамеренное вмешательство высшего существа. Но большие аварии, при всей их сложности, имеют, в общем, те же глубинные причины, как и малые, которые происходят прямо у нас на глазах и нам вполне понятны, – это осознанное или неосознанное стремление к экономии затрат, недостаток профессиональных знаний, лень, небрежность и т.п. Более того, иногда авария происходит из самых лучших побуждений, от избытка рвения, что, правда, тоже не является признаком профессионализма.

В области энергосистем автору известен только один случай преднамеренного создания аварии – нападение нескольких диверсантов в 2009 году на небольшую гидростанцию на Кавказе. Курьёзный пример повреждения оборудования описан в [1, стр.15]: в конце 1950-х годов в районе Арзамаса за неимением спичек приставляли к проводу линии электропередачи напряжением 400 кВ ствол дерева, ждали, пока он от проходящего тока обуглится, и прикуривали от него.

В известных автору многочисленных примерах аварий в энергосистемах невозможно усмотреть ни преднамеренного создания аварии, ни преднамеренного содействия её развитию. Необычные грозные результаты создаются очень обычными обстоятельствами.

Однако здесь было бы странным не вспомнить катастрофы в других областях, искусственно вызванные и преднамеренные: диверсии, поджоги, террор и т.п. Наибольшая из них – двойная диверсия привела 11 сентября 2001 года к громадной техногенной катастрофе – в Нью-Йорке обрушились два небоскрёба и погибли тысячи людей.

В сложной технической системе взаимодействует множество разнообразных устройств, для неё характерно сложное взаимодействие многих технологий, специалистов и организаций. В пространственном отношении она может являться концентрированной, локальной (корабль, атомный блок) или протяжённой (энергосистема, трубопровод).

Для создания такой системы требуется много ступеней разнообразных работ, в её многоступенчатом процессе участвует много людей многих профессий, собранные в разные коллективы и организации.

Работоспособность созданной системы поддерживают специалисты разных профилей, а на долю части из них приходится непосредственно бороться с аварией, препятствовать развитию аварийного процесса, ограничивать неблагоприятные последствия.

Не так уж удивительно, что время от времени в действиях всех этих людей, помимо простых недоработок, возникают недопонимание, несоответствия и иногда противоречия, и тогда в системе образуются те трещины, через которые при неблагоприятном стечении обстоятельств как бы просачивается авария. Все это тем более вероятно в силу того, что ресурсы, которые могут быть потрачены на создание и затем на функционирование системы, никогда не безграничны, их приходится экономить.

Любой прогресс создаётся конкретными людьми, и многие особенности техники только кажутся само собой разумеющимися, на самом деле они – плод деятельности людей, действовавших в конкретных обстоятельствах.

В этом отношении типичны изменения представлений об авариях, хорошо наблюдаемые в энергосистемах. Так, по мере того, как проходят годы после тяжёлой аварии в энергосистеме и сменяется пара поколений её персонала, развивается привычная вера в её неуязвимость. Тем временем энергосистема усложняется, условия её работы изменяются, но в этом на виду только те положительные стороны, ради которых и вносились изменения, и они обычно действительно есть, а возникновение новых опасностей остаётся незамеченным. Игрет роль и нормальная психологическая склонность полагать, что, если хорошее состояние длиться долго, то оно стабильно продолжится. В результате энергосистема бывает не снабжена даже элементарными противоаварийными средствами, а её операторы не тренированы на серьёзные аварийные процессы. На этом фоне подкрадывается тяжёлая авария, и операторы энергосистемы совершают грубые ошибки как в ходе аварии, так и во время восстановления системы после неё.

В [1] тема иллюстрируется в основном примерами аварий в транспортных системах. А именно: корабль и поезд, затем несколько более подробно – электроэнергетические системы с их транспортом электроэнергии от генераторов к потребителям. Профессией автора является борьба с авариями именно в таких системах.

Глава 2

Авария – от начала до восстановления

Аварийный толчок и развитие

Аварии вызывается каким-то начальным толчком и развивается из него.

Им может оказаться природный катаклизм, стихийное бедствие: землетрясение (ударная нагрузка, сильная вибрация), извержение вулкана (лава, пепел), цунами (высокие волны, опрокидывающие корабли и заливающие сушу). В ряду стихийных бедствий и наводнение; оно возникает не столь внезапно, но иногда все равно приобретает характер катастрофы. Специфическую опасность представляет обширная гроза. От удара молнии могут погибнуть люди, загореться незащищённое здание. Последовательные удары молнии в ряд важных элементов энергосистемы, прежде всего – в воздушные линии электропередачи, могут привести к прекращению электроснабжения многих её потребителей и даже к ее коллапсу (пример – уже упомянутая авария 13 июля 1977 года в Нью-Йорке, вызванная ударами молний в множество важнейших линий).

Среди природных явлений возможны более мягкие, но всё равно неприемлемые для технической системы. Имеются в виду те природные условия, которые выходят за рамки, на которые рассчитана техническая система её создателями, например, слишком высокая или низкая температура, сильные электромагнитные помехи. Ещё пример: гололёд, в особенности сопровождаемый сильным ветром, приводит к обледенению проводов воздушных линий электропередачи, они раскачиваются, возникает «пляска проводов», они схлестываются, обрываются, возникают короткие замыкания, линии автоматически отключаются.

Эти природные явления многократно описаны и сами по себе здесь не рассматриваются, хотя принимаем во внимание, что спусковым механизмом техногенной аварии может явиться природное явление. Но

приведёт ли оно к аварии, насколько эта авария разовьётся широко и глубоко – предмет нашего рассмотрения.

Поразительный пример перехода стихийного бедствия в техногенную аварию и аварии в экологическую катастрофу – то, что произошло в марте 2011 года в Японии на нескольких блоках прибрежной атомной электростанции Фукусима-1 в результате сильнейшего близкого землетрясения и последовавшего цунами с необычайно высокой волной. Об этой аварии известно очень много, а здесь важно отметить лишь одно характерное для многих аварий обстоятельство: то основное оборудование, которое создаёт прямую ядерную опасность, выдержало удары стихии, а вот вспомогательному оборудованию, видимо, было уделено меньше внимания, к нему были предъявлены менее жёсткие требования, чем к основному. Это оборудование обслуживает всю технологию выработки электроэнергии на станции. В данном случае все электродвигатели и системы управления потеряли электропитание, резервные дизельные двигатели проработали слишком короткое время, и, главное, через атомный котёл прекратила циркулировать вода, та вода, которая, при нормальной работе, нагреваясь ядерными стержнями, тем самым охлаждает их. В условиях возникшей радиации это, казалось бы, вспомогательное оборудование долго не могло быть восстановлено, а без него, однако, основное функционировать не может, – и возник перегрев ядерных стержней, превративший аварию в катастрофу: выброс радиоактивного пара, заражение морской воды, в спешке применённой для охлаждения, и т.д.

Этот случай показателен не только пугающими неприятностями, но и тем, какие разносторонние меры были приняты для локализации аварии и каким умением, самообладанием и упорством обладали люди, которые боролись с развитием аварии.

Для котла, работавшего на органическом топливе, исключительно важна бесперебойная подача воды. Для более опасного атомного котла вода ещё необходимей.

Это давно известно, а в подтверждение приятно сослаться на книгу, одним из соавторов которой был мой отец, о чём можно прочитать в [1, стр. 20].)

На Фукусима-1 наверняка было осуществлено гораздо более совершенное питание водой, чем рекомендовалось раньше и принято теперь для не атомных электростанций, но сила стихии оказалась недооценённой при создании системы питания, и произошла катастрофа.

Ближе к нашей теме другие спусковые явления. Среди них прежде всего нужно отметить необычные или совсем недопустимые способы использования оборудования, не предусмотренные изготовителем, использование оборудования в непредусмотренных обстоятельствах. Например, ток короткого замыкания, которое произошло на некотором элементе электрической сети, оказался больше того, который был способен разорвать высоковольтный выключатель этого элемента, и он не справился с отключением.

Затем, повреждение оборудования может произойти из-за потери надёжности какой-то из его составных частей. Несколько упрощая, различают две причины ненадёжности: первая – дефект изготовления, который обычно проявляется в начале использования, вторая – приближение к негодности в процессе старения оборудования. Например, если изолирующие свойства минерального масла, залитого в высоковольтный трансформатор, слишком долго не проверять и масло, потерявшее часть своих свойств, не заменять, то в этом трансформаторе вполне может возникнуть короткое замыкание между витками обмотки, затем горение масла внутри или разлитого масла снаружи – последнее в случае разрыва оболочки трансформатора.

И наконец, поводом для аварии может явиться ошибка персонала, использующего оборудование. Пример ошибки: оператор допустил ремонтную бригаду работать на высоковольтном оборудовании, с которого не позаботился снять высокое напряжение, и в результате произошло короткое замыкание (и, возможно, погибли люди).

Итак, кратко отметим главные спусковые явления аварии в технической системе:

- внешние условия, на которые не рассчитано оборудование системы,
- ненадежность оборудования из-за дефекта или старения какой-то его части,
- ошибка персонала,
- стихийное бедствие.

В большинстве случаев даже сложно развивающуюся аварию вызывает всего один такой толчок, но бывает, что авария возникает как следствие нескольких следующих друг за другом повреждений однотипного оборудования, вызванных необычно плохими природными условиями. Например, густая электрическая сеть переносит довольно спокойно последовательное отключение одной, двух и даже несколь-

ких линий электропередачи, происходящих из-за жары, ударов молнии или налипшего снега, но отключение ещё одной линии может запустить громадную аварию – потерю питания потребителей электроэнергии от большей части этой сети или даже от всей сети. Три такого рода аварии, две в Северной Америке и одна в Москве, уже упомянуты в предыдущей главе.

Для протекания дальнейшего аварийного процесса, следующего за первоначальным толчком, не столь важны конкретные обстоятельства самого толчка, сколь важен его содержательный результат. Например, не важно, из-за чего возникла связь провода с поверхностью земли и отключение линии: в результате дуги, вызванной ударом молнии, из-за провисания провода на жаре или из-за его обрыва под тяжестью налипшего снега. Не столь важно, на каком участке линии электропередачи провод упал на землю, в начале или в конце линии, и какой именно упал из трёх её проводов или упали сразу все три провода. Может не играть роли, что, скажем, ничего этого не было, а линию ошибочно отключил оператор. Важнее всего этого другое – линия оказалась отключённой, электроэнергия больше не может передаваться по ней, и её функцию должны взять на себя какие-то другие элементы энергосистемы. Но они и до того могли быть сильно загруженными, и поэтому резервной возможности передать дополнительную электроэнергию может и не оказаться. Тогда аварийный процесс развивается.

Говоря о начале аварии нельзя не упомянуть, что первоначальный толчок не всегда является неожиданным. Во многих случаях разумная осторожность и деятельность операторов в той обстановке, которая складывалась непосредственно перед аварией, могла бы предотвратить её или, по крайней мере, значительно ослабить её последствия. Способность уклониться от аварии очень важна, и в последнем разделе следующей главы мы обратимся к ней подробнее.

Случайное и неслучайное развитие аварии

Каждая из аварий уникальна, но у больших аварий есть общая черта: каждая из них – результат сложной последовательности неблагоприятных и, реже, благоприятных событий.

В конце прошлого века электроэнергетикам нравился термин «каскадная авария», который подчёркивал, что при нормальной оснащён-

ности энергосистемы большая авария происходит не из-за одного какого-либо повреждения, для её развития требуется сочетание нескольких отказов оборудования или автоматики. Сочетание, как подчёркивалось, представьте себе, случайное!

Хотя обобщённые рассуждения относительно обусловленности и случайности в изложении некоторых авторов вполне заслуживают внимания, избежать их в достаточной мере поможет обращение к некоторым простым вещам.

Объясняя всё случайностями, упускалось из вида, что одна неприятность может непрекращаемо тянуть за собой следующую. Очень часто в рамках уже затронутых аварией технологий неприятности причинно связаны между собой, так что каждая следующая происходит как следствие предыдущих. Причины многих аварийных событий удаётся обнаружить в более ранних событиях и обстоятельствах, казалось бы, очень отдалённых от случившегося. Например, в ходе аварии действие некоторого элемента объекта поставило бы хорошую преграду развитию аварии, но возникли такие условия, на работу при которых этот элемент не рассчитан, что он отказывается действовать и этим способствует дальнейшему ухудшению ситуации.

Но, конечно, возможно и иное, более близкое к случайностям. Помните у А.Блока: «Нас всех подстерегает случай». Попробуем упомянуть две такие возможности, которые возникают во время аварийного процесса как бы случайно. Во-первых, событие может быть подготовлено каким-то предыдущим обстоятельством, обычно – спящей неисправностью, на которую наталкивается аварийный процесс, и тогда она пробуждается и влияет на дальнейший ход аварии. Во-вторых, как раз на необходимость функционировать во время аварии может прийти отказ элемента объекта из-за усталости материала.

Иногда кажется, что большая авария возникла в результате какого-то мистического стечения несчастных обстоятельств, которое невозможно интерпретировать на рациональном уровне. Хотя нельзя исключить возможности хаотического, спонтанно возникающего нагромождения обстоятельств, усугубляющих аварийный процесс, опыт подсказывает, что такое случается редко. Чаще к мистическому толкованию обращаются, когда не имеют физической или интеллектуальной возможности, ленятся или просто не желают вникнуть во взаимозависимость, часто даже предопределённость двигающих развитие аварии фактов.

За подкреплением соображений о роли закономерности и случайности обратимся к событиям, описанным в романе М.Ю. Лермонтова «Герой нашего времени». Этот роман, увлекательный и вместе с тем поразительно глубокий, завершается третьей частью записок главного его героя Печорина, эта часть названа «Фаталист». В ней молодые офицеры спорят о явлении, волнующем их среди опасностей завоевания Кавказа, – о предопределении. Рассказывается о непростой драме, подобной развивающейся аварии. Эта авария не техногенная, конечно, а человеческая, но, как оказывается в финале, она имела и технический аспект.

Вспомним схему повести. Отстаивая на пари наличие предопределения в жизни человека, поручик Вулич ставит опасный эксперимент: нажимает курок пистолета, приставленного ко лбу, и – счастливая осечка. Но предопределению его смерти ещё предстояло проявиться: в ту же ночь его зарубил шашкой случайно встречный пьяный казак. События развиваются: чтобы скрутить этого вооружённого убийцу, на него в одиночку через окно бросается противник в состоявшемся пари – Печорин, пуля солдата удачно пролетает мимо, и казака вяжут.

Об этих событиях Печорин рассказывает умудрённому опытом войны и службы офицеру, к которому прикомандирован служить – Максиму Максимычу. Его суждение, точнее написанное Лермонтовым пером Печорина, невозможно заменить пересказом. Цитируем:

«... я рассказал Максиму Максимычу все, что случилось со мной и чему я был свидетель, и пожелал узнать его мнение насчёт предопределения. Он сначала не понимал этого слова, но я объяснил его как мог, и тогда он сказал, значительно покачав головою:

– Да-с, конечно-с! Это штука довольно мудрёная!.. Впрочем, эти азиатские курки часто осекаются, если дурно смазаны или не довольно крепко прижмёшь пальцем. Признаюсь, не люблю я также винтовок черкесских; они как-то нашему брату неприличны: приклад маленький – того и гляди нос обожжёт... Зато уж шашки у них – просто моё почтение!

Потом он примолвил, несколько подумав:

– Да, жаль беднягу... Чёрт же его дёрнул ночью с пьяным разговаривать!.. Впрочем, видно, уж так у него было на роду написано!..

Больше я от него ничего не мог добиться: он вообще не любит метафизических прений».

Этими простыми ироничными словами Лермонтов закончил и записки Печорина и, вместе с ними, – весь роман о герое своего времени. Автор и за Печорина писал отчётливо и лаконично, надо думать, он считал этот текст важным.

А в интересах нашей темы важно то, что ответ Максима Максимыча разделён на две части: первый эпизод он сводит только к ненадёжности пистолета, а второй объясняет легкомысленной разговорчивостью Вулича и только тут допускает ещё и предопределение. Впрочем, мистическое предопределение, если и имело место, то сказалось не в том, что Вулич был зарублен казаком, а в другом: «уж так у него было на роду написано», что «черт же его дёрнул ночью с пьяным разговаривать».

Теперь осмелимся уточнить слова «азиатские курки часто осекаются». Для этого годится маленький примерный расчёт той вероятности, которую имело начало человеческой аварии – осечка пистолета, приставленного ко лбу рукой фаталиста.

Вероятность дурной смазки пистолета, висевшего до этого случая на стене без дела, оценим в 40%, а вероятность слабого прижима курка в боевых условиях, которые имел в виду Максим Максимыч, – в 30%. При таких данных боевой выстрел состоялся бы с вероятностью

$$(1 - 0,4) (1 - 0,3) = 0,42.$$

Но пистолет направлен не на врага, а у своего виска палец прижимает курок, наверное, не так уверенно, как в бою, и самоубийство успешно свершилось бы с вероятностью

$$(1 - 0,4) (1 - 0,5) = 0,3.$$

Статистически это значит: среди попыток самоубийства не 42 из 100 окажутся успешными, а только 30. Но ещё важнее другое: будет ли как раз данная попытка среди этих 30 или из оставшихся 70! А это как раз известно не полностью, только ясно, что вероятность неуспешности приблизительно в 2 с половиной раза больше, чем успешности. На этот раз Вуличу попался один из семидесяти случаев.

Как видим, не так мало узнал по поводу предопределения Печорин от Максим Максимыча. Автор же романа, жизнь которого скоро после создания романа оборвал пистолетный выстрел, напряжённо размышляя о том же, имел в виду и более широкую общественную тему о судьбе и воле.

Из опыта анализа разнообразных аварий (посмотрим хотя бы [1]), кажется возможным почерпнуть главное. Чтобы снизить вероятность

больших аварий в будущем, нужно признать, что большая авария – следствие сочетания многих не всегда очевидных обстоятельств (хотя бывает, что некоторые лица и организации играют в большой аварии выдающуюся роль). Анализируя аварию, каждый раз приходится обращать внимание не только на непосредственные поводы и причины, которые легко обнаруживаются на поверхности явления. Словом, вспомним возглас Козьмы Прутков: «Зри в корень!»

Необходимо в сложившихся вокруг опасного объекта условиях выявлять основные предпосылки аварии, их анализировать и вырабатывать предложения по изменению именно этих условий. Но это-то задевает множество серьёзных интересов, как раз поэтому является главной трудностью и, следовательно, главной задачей.

Аварийные стадии

Авария проходит несколько типичных стадий. За спусковым толчком (или несколькими, как упомянуто выше, последовательными толчками) следует аварийный *переходный процесс*, в ходе которого авария может получить сколь угодно широкое развитие. Затем наступает сравнительно спокойное *послеаварийное состояние* объекта, которое перетекает в *восстановительный период*.

Переходный процесс может продолжаться всего одну секунду или пару минут, как это бывает в энергосистемах, и в этом случае операторы не успевают вмешаться в него, он протекает только под управлением различных автоматических систем, под управлением в той или иной мере успешным, или, наоборот, при бездействии этих систем.

Возможно и совершенно иное. Может пройти несколько часов от повреждения судна до того, как оно затонет. Аналогично – авария на атомной станции. Авария в энергосистеме, наступившая быстро, часто приводит к длительному горению изолирующего масла внутри оборудования. Если же этим маслом заполнена не металлическая, а фаянсовая оболочка высоковольтного аппарата (в такую среду погружены обмотки высоковольтных измерительных трансформаторов), то возможен взрывной разрыв этой оболочки. Разлив горящего масла и разлетание в стороны осколков фаянса приводят к повреждению соседнего оборудования. Такие случаи предшествовали уже упомянутой аварии в Москве.

Возможно существенное усугубление, развитие и расширение переходного процесса из-за дополнительных внешних воздействий, ошибок персонала, а также из-за внутренних неисправностей, которые ходом процесса выявляются в оборудовании, вовлечённом в процесс.

Во время длительного переходного процесса роль команды судна, операторов огромна. В дело вступают и ремонтные бригады, пожарные расчёты, команды спасателей, оснащённые различным оборудованием, в том числе не относящимся к основной технологии аварийного объекта. Суммируя все это, можно сказать, что во время такого процесса ведётся борьба персонала за поддержание жизни аварийного объекта. Если объект создан так, что его устройство допускает такую борьбу и необходимые для этого средства предусмотрены, то такой объект обладает бесценным свойством, называемым *живучесть*.

Результатом переходного процесса является *послеаварийное состояние* объекта. В нем объект функционирует в разной степени полноценно. К этому состоянию могут привести целенаправленные действия автоматики и персонала во время переходного процесса или, наоборот, хаотичная последовательность повреждений и разрушений вплоть до полного уничтожения объекта (самолёт, судно, здание).

Иногда это состояние реально не является установившимся, стабильным, не исключено, что оно выделяется среди других как промежуточное, квазиустановившееся состояние, в котором какая-то характерная часть процесса уже завершилась или близка к завершению, а другая ещё не проявилась существенно. Например, судно уже затонуло, а люди находятся на подручных спасательных средствах и нуждаются в срочной помощи, должны подойти спасательные суда, и люди должны быть на них подняты.

Наконец, наступает *восстановительный период*. Если объект не разрушен и не может быть быстро заменён другим, его функционирование требуется восстановить.

Может быть, требуется немедленно поднять затонувшее судно. Или требуется снова запустить аварийно остановившуюся электростанцию, без участия которой невозможно подать питание потребителям, а для этого нужно подать ей откуда-то напряжение. Или, что самое важное, нужно срочно подать напряжение на подстанции потребителей электроэнергии. Небоскрёбы в Нью-Йорке, которые были разрушены 11 сентября 2001 года, решили не восстанавливать, но куда деться от необходимости срочно разобрать завалы, обнаружить и похоронить тела людей.

Все эти восстановительные действия связаны обычно с преодолением немалых технических, организационных и финансовых трудностей, требуют организационно-технического обеспечения, которое должно быть создано заблаговременно.

Как видим, переходный процесс, послеаварийное состояние и восстановительный период не всегда удаётся чётко разграничить, но полезно иметь в виду эту последовательность и то, что на этих стадиях предъявляются разные требования к оборудованию объекта и к действиям персонала.

Глава 3 Забота о безаварийности

Свойства объекта и его защита

От любого технического объекта ожидают прежде всего выполнения тех функций, ради которых он создан, но к нему сверх того предъявляются многосторонние другие требования, например, экономические и экологические. В связи с авариями более всего важно требование эффективно функционировать в аварийных условиях.

Для выполнения возлагаемых на объект функций выдвигают определённые требования к каждому из элементов, составляющих этот объект или управляющих им. Эффективность функционирования зависит от того, на каком уровне находятся *техническое совершенство* и *надёжность* элементов и, следовательно, объекта в целом. Конечно, важнейшую роль играет совершенство взаимодействия элементов.

Недостаток одного из этих свойств лишь в небольшой степени может быть компенсирован наличием другого.

Коллега автора по работе в институте «Энергосетьпроект» и его друг Эрик Петрович Смирнов, который впервые разработал вопросы надёжности применительно к защите энергосистем от коротких замыканий, в то же время был любителем и знатоком футбола. Он любил приводить слушателям его лекций следующий пример высокого технического совершенства при слабой надёжности. В 1940-50-х годах ленинградский футболист Архангельский показывал необыкновенно высокую для того времени технику и стал бы великим футболистом, если бы не частые травмы.

Техническое совершенство определяется перечнем заданных к выполнению функций объекта или его элемента, например: вместимость, высота, производительность, быстрота действия, способность заданным образом правильно реагировать на внешние события, способность развития, простота и удобство обслуживания и т.п. Функции должны выполняться не в любых обстоятельствах, а в рамках определённых тоже задаваемых внешних условий: температура, влажность,

ударное воздействие, вибрация, электромагнитное поле, радиация и т.п. Например, от электронного бытового прибора можно потребовать полного в какой-то мере выполнения своей функции, если напряжение, подведённое к нему извне, не меньше 50% и не больше 120% номинального значения. А устойчивость атомной установки может требоваться даже при землетрясении такого уровня, которое ожидается в среднем один раз в 1000 лет или которое вообще невозможно себе представить в данной местности.

Относительно столь редких событий полезно иметь в виду, что их периодичность вряд ли может быть установлена путём анализа статистических данных, почти всегда это – математически вычисленная гипотеза. Обратим внимание, кстати, и на часто забываемое указание «в среднем»; не исключено и то, что два таких события случатся в один год, а потом 2000 лет пройдут спокойно и т.д. И конечно, данная периодичность землетрясения не означает, что оно случится через 1000 лет: оно может случиться и в ближайшем году или завтра.

Надёжность элементов объекта и объекта в целом задаётся различными статистическими показателями, сущность которых зависит от характера выполняемых функций. Для непрерывно выполняемой функции часто задаётся *наработка на отказ*, т.е. среднее время между двумя отказами выполнить эту функцию. Для разрабатываемого устройства релейной защиты, от которого требуется подействовать или нет в зависимости от того, на каком элементе сети произошло короткое замыкание, упомянутый Смирнов предложил задавать более полноценный показатель, названный им *готовностью*. Под этим понимается вероятность того, что устройство окажется готовым выполнить свою функцию в произвольный момент времени, когда бы ни потребовалось. Периоды, когда устройство выведено из действия для плановой ревизии или для устранения неожиданной неисправности, учитываются как неготовность наряду с периодом, когда в устройстве есть неисправность, но она ещё не выявлена и поэтому не устранена. Занимаясь противоаварийной автоматикой, автор вместе со Смирновым принял этот же показатель надёжности.

Для устройства, которое призвано командовать в аварийных условиях, полезно также нормировать допустимое число случаев излишнего действия, не спровоцированного никаким аварийным событием, т.е. беспричинного действия. Такое тоже случается.

Уязвимость объекта резко увеличивается с ростом его сложности. Представим себе для примера противоаварийную систему управления

объектом состоящей просто-напросто из ста устройств, по надёжности подобных персональному компьютеру, причём для правильного функционирования системы в целом необходимо одновременное правильное функционирование всех таких устройств. Очевидно, что такая система слишком часто окажется или совсем неработоспособной или будет действовать неправильно. Это подсказывает, что сложный объект нельзя просто составить из большого количества элементов. Требуется ещё многое. Эти элементы должны присутствовать в нем в избыточном количестве и гибко взаимодействовать друг с другом, контролировать и, если надо, подменять друг друга в условиях самых разнообразных угроз объекту или системе управления, возникающих как внутри них (в виде отказа чего-либо), так и поступающих извне.

Для большинства противоаварийных устройств крайне важна быстрота действия. Необходимость максимальной скорости во многом определяет построение, в частности, устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем. Быстрота действия многих таких устройств доведена до 20÷30 мсек, т.е. до продолжительности одного или полутора периодов промышленной частоты 50 или 60 Гц переменного тока.

Авариям противодействуют разнообразные свойства технического совершенства, надёжности и живучести защищаемого от аварий объекта, но лишь часть этих свойств служит только и непосредственно этой цели, и именно эта часть рассматривается как *противоаварийное управление* в узком смысле этого термина. Ещё сужая взгляд, видим систему автоматики, действующую в ходе аварии с целью предотвратить её дальнейшее развитие, – *противоаварийную автоматику*.

Заметим, что противоаварийное управление – мягкий термин. Мы будем к нему прибегать, когда речь идёт и о более общих проблемах, чем собственно противоаварийная автоматика, – о сумме мероприятий против аварий, о функциях, возлагаемых на эту автоматику, о расчёте необходимых управляющих воздействий автоматики и т.п.

В создании противоаварийного управления участвуют специалисты разных специальностей, каждый из них, решая свою задачу, может произвольно, но нежелательно и даже недопустимо вмешаться в чужую область.

Два таких случая описаны в [1, стр. 125-136]. Так, автор автоматического распределения вырабатываемой в энергосистеме мощности между её генераторами, оптимального в экономическом смысле, не посчитался с тем, что реализация его идеи меч-

тательно требует, чтобы электрическая сеть энергосистемы нигде не ограничивала передачи мощности. В другом случае специалисты в области турбин решили, что система управления каждой из турбин энергосистемы, не обладая почти никакой информацией о происходящем в энергосистеме в целом, может, тем не менее, кардинально улучшить аварийный переходный процесс в ней.

Во избежание неприятностей от несогласованности, в процессе разработки необходим механизм заботы о *непротиворечивости различных мероприятий*. Для этого каждое из них не должно, по возможности, выдвигать дополнительных требований к другим мероприятиям, а если такое требование все-таки необходимо, то оно должно быть минимальным, ясным и, конечно, выполнимым.

Важнейшей особенностью хорошо построенного противоаварийного управления является его *эшелонированность*: различные системы управления призваны на каждой стадии аварийного процесса резервировать действие системы предыдущей стадии и воспрепятствовать развитию процесса к следующей ещё более опасной стадии.

Говоря военным языком, прорыв врагом первой линии обороны – ещё не катастрофа, он наткнётся на вторую линию и т.д. Если имеется одна линия защиты от аварии, прорыв которой происходит в одном случае из двадцати, то такой уровень безаварийности для многих объектов неприемлем, но если создано три подобных линии, то вероятность прорыва составит 0,05 в третьей степени, т.е. 0,000125, иначе говоря, можно надеяться, что только одна авария из десяти тысяч прорвёт все три линии.

Построение эшелонированного противоаварийного управления наглядно выглядит на примере электроэнергетических систем, и мы попробуем конкретизировано это в главе 5 данной части.

Создание безаварийности объекта

Представляется, что вклад в безаварийное функционирование объекта приблизительно одинаков на двух этапах: при создании объекта и во время его функционирования, во всяком случае – эти вклады сопоставимы. Попытаемся охарактеризовать важные аспекты деятельности ответственных лиц на каждом из этих этапов.

Чтобы представить себе сложность создания нового большого объекта, нужно иметь в виду, что этот процесс проходит несколько этапов и для каждого из них нужны учёные и инженеры разных специальностей, и под их руководством трудятся многие и многие исполнители разнообразных работ. Они ведут исследования (если объект не стандартный), продвигаясь от предварительных исследований к анализу итога, ожидаемого в результате создания объекта. Они разрабатывают

документацию для строительства и, если надо, корректируют ее по ходу выполняемых работ. Они выполняют согласно этой документации строительные, монтажные и наладочные работы, они ведут испытания созданного объекта, проверяя его соответствие замыслу. И на каждом из этих этапов возможно появление заблуждений и ошибок, которые впоследствии могут привести к серьёзной аварии.

А за спиной непосредственно действующих организаций стоят финансирующие и контролирующие организации и ведомства, которые в связи с авариями обычно не упоминаются, хотя их деятельность, обеспечивая ресурсы и препятствуя их разворовыванию, может сильно повысить безаварийность. И понятно, к чему ведёт обратное.

На любом этапе создания объекта, как известно, руководствуются действующими нормами и методическими указаниями. В них требования, направленные на безаварийность, должны быть дифференцированы в зависимости от той опасности, которую представляет для общества авария на этом объекте. Если объект традиционен и его создание достаточно чётко регламентировано руководящими материалами, то отступление от них – следствие низкой квалификации, халатности или просто жадности.

Создать хороший объект гораздо сложнее, если его характер таков, что руководящие материалы или не регламентируют важных сторон его создания, или от этих материалов необходимо отступить – ужесточить или смягчить требования к объекту. Тогда требуется разработать новые технические решения, которые должны быть тщательно обоснованы, и тут появляется поле для разнообразнейших фантазий, несогласованностей и фатальных ошибок. Назовём источники наиболее тяжёлых неприятностей.

Во время функционирования объекта в нем могут возникнуть какие-то важные явления, которые к моменту начала разработки не исследованы и в процессе его создания по каким-либо причинам не могли быть достаточно выяснены. Наиболее яркие примеры аварий, имеющих подобные корни, – на Саяно-Шушенской ГЭС [1, стр. 70-84] и в Москве [1, стр. 198-209]. Тут как бы забыли прекрасную пословицу: «Не зная броду, не суйся в воду».

В сложном объекте, как правило, взаимодействует несколько различных технологий, которыми занимаются специалисты и коллективы разных профилей, и руководитель разработки объекта должен уметь выявить возможные из-за этого несогласованности и найти пути их

устранения. Пример разительной несогласованности виден в описании аварии на Саяно-Шушенской ГЭС: генераторам предписана столь большая мощность, что отечественная промышленность (а только от неё в то время разрешалось получать оборудование) и через 50 лет не может снабдить их полноценными высоковольтными выключателями. Совсем элементарный пример несогласованности описан в [1, стр. 109-116]: многочисленные исполнители того, что предписывала исходная документации по автоматике Красноярской ГЭС, поняли одну из надписей на чертеже не буквально, а так, как им предписывала привычка. Не увидев в ней привычных двух слов «без АПВ» (АПВ – автоматическое повторное включение высоковольтного выключателя после отключения им короткого замыкания), они мысленно добавили к ней два слова «с АПВ», так и выполнили автоматику в совершенном противоречии с сутью дела. Это непрошенное повторное включение решительно воспрепятствовало необходимым действиям противоаварийной автоматики, что привело к тяжёлой аварии.

Понятно, что руководители далеко не всегда обладают столь широкой эрудицией и способностью находить компромиссное решение, как требуют обстоятельства. Но если, строго говоря, проектом некому руководить, не слишком ли опасно осуществлять его?

То ли демократизация общественного сознания, то ли недоверие к личности и зато вера в силу организации, особенно государственной, приводят к обычной практике поручать решение сложной проблемы именно организации, игнорируя вопрос о том, имеется ли в ней достаточно профессиональный лидер и доверят ли именно ему руководить проектом. При этом забывают, что главные технические достижения в мире создавались под руководством властных профессионалов. Можно составить длиннейший перечень достижений и имён, но достаточно двух всем известных – Королева и Гейтса.

Автор имел удовольствие 15 лет работать с такого рода руководителем, пусть несколько меньшего масштаба, это – Сергей Сергеевич Рокотян, создатель и главный инженер института «Энергосетьпроект», подробнее о нём – в главе 6 данной части.

В сложном объекте имеются не только главные, но и вспомогательные, второстепенные технологии, и, естественно, основные интеллектуальные и материальные ресурсы прилагаются к главным. Но что отнести к не главным, не всегда очевидно, ведь интересы экономики ресурсов требуют уменьшить число главных. В результате среди

не главных ошибочно могут оказаться технологии, исправное функционирование которых совершенно необходимо для главных. Такое положение, как уже упомянуто, сложилось на атомной станции Фукусима 1 [1, стр. 19-21], где напор стихии выдержал атомный реактор, но катастрофически подвели вспомогательные технологии – его электро-снабжение и водоснабжение.

Самые тяжёлые, трудно исправимые ошибки делаются на начальных этапах создания объекта, и поэтому к начальным этапам должно быть приковано наибольшее внимание и на эти этапы должны быть выделены достаточные ресурсы. Это соображение слишком часто не учитывается, потому что кажется, что решающая работа совершается как раз в конце: её итог хорошо виден. Пример непродуманного начала: неверное определение мощности Саяно-Шушенской ГЭС и мощности его гидроагрегата было сделано на самой начальной стадии создания ГЭС; исправить это в дальнейшем было практически невозможно. Напротив, разночтение документации по автоматике Красноярской ГЭС могло быть легко исправлено на любой из следующих стадий работы.

К сожалению, заказчики работы и специалисты разных профилей говорят на разных технических языках, и, чтобы не получалось подобия Вавилонской башни, при создании сложного объекта нужно не чураться нелёгкого труда по достижению взаимопонимания.

Перед началом разработки будущей техники ей предъявляют более или менее определённые технические требования.

Успешная разработка приводит к промышленному выпуску изделия, которое сопровождается техническими условиями поставки. Это – те условия, которым должно удовлетворять изделие в руках потребителя. Но даже при наличии сформулированных условий, после отказа устройства часто возникает путаница в определении вины – то ли виноват изготовитель, то ли неправильное использование. Обычный подход: изготовитель виноват только в том случае, если в процессе эксплуатации соблюдались все оговорённые им условия. Среди них: устройство использовалось только по своему назначению, поддерживались должны внешние условия (температура, влажность, вибрация, электромагнитные помехи и т.п.), устройство в должны сроки подвергалось ревизии, и не вышла оговорённая изготовителем продолжительность эксплуатации. Пример использования не по назначению

имел место на Саяно-Шушенской ГЭС: гидроагрегат, который в силу своих неприятных особенностей способен постоянно производить мощность, лишь близкую к его полной мощности, заставляли, игнорируя опасность возникающей вибрации, часто снижать мощность вплоть до полной разгрузки.

Кстати, приходилось слышать, что катастрофа на Чернобыльской атомной станции произошла при неправильно организованном эксперименте по расширению способности реактора резкого переходить на более низкую мощность.

Как правило, чем проще устройство, тем требования к нему определённые. К сложным же системам, особенно к развивающимся во времени системам вроде энергосистем, сформулировать требования трудно. Для сразу всей относительно сложной системы, для системы в целом никаких технических условий на поставку обычно не существует и, вероятно, не может существовать, и тогда приходится обходиться какими-либо экономическими или информационными критериями. Вместо технических условий на всю систему в целом существуют многочисленные технические условия на поставку составляющих её частей, и создаётся громадное количество инструкций относительно использования этих частей. В особенности же – относительно того, что должен делать обслуживающий систему персонал в многочисленных разнообразных случаях её функционирования: во время нормальной её работы и в аварийных условиях.

В противоаварийном деле, как и в других областях техники, решения о создании тех или иных мероприятий, о затратах на них принимаются или в рамках нормативных актов, или в близком соответствии с ними. Однако, опереться на такие акты не всегда возможно. Во-первых, нормирование может не вполне охватывать конкретный тип объекта. Во-вторых, если создаётся объект существенной новизны, то не только нормы, но и просто сведения о необходимых для него мерах против аварий взять ещё неоткуда. В обоих случаях приходится искать индивидуальные решения, для опасного объекта – очень ответственные.

Как бы ни был объект нов, какие-то, пусть отдалённые аналоги ему всё же существуют, и специалисты черпают первый слой требуемых решений из знания эти аналогов. Если объект нов существенно, должен существовать и второй слой, отражающий эту новизну. Тут-то и возникают проблемы.

Опорой нового решения служат опыт и рождённая им интуиция, однако, с уверенностью можно утверждать, что никто не обладает таким опытом, который избавляет от детального качественного и даже количественного анализа тех явлений, от которых зависит решение. Сложность противоаварийной системы и отсюда, так сказать, неопи-симость таких требований к ней, которые были бы совершенно определённо сформулированы, манят на проторённый путь уже известных технических решений. Не исключено, однако, что они не вполне отвечают особенностям нового объекта или даже вообще противоречат основным закономерностям его функционирования. Результат этого – тяжёлые ошибки. Их сделано немало, и даже скромный личный опыт автора содержит много случаев, когда интуиция предлагала совсем не лучшие решения.

Прежде всего, нужно разобраться, какие особенности аварий таит в себе новизна объекта. Затем нужно выявить весь набор аварийных ситуаций, обратив особенное внимание на нестандартные, новые ситуации, на самые опасные из них. И лишь после этого предстоит для каждой из них разработать адекватные меры противодействия аварии.

Ни обнаружением особенностей объекта, ни разработкой противоаварийных мер мы здесь заниматься не можем – эти аспекты дела слишком конкретны, сколько объектов, столько и особенностей, и сколько разработчиков, столько и решений. А вот подход к выявлению аварийных ситуаций попробуем немного прокомментировать.

С точки зрения создателя противоаварийной системы аварийные ситуации отличаются, прежде всего, сутью мероприятия, которое требуется как ответ на возникновение той или иной из них. Например, один тип ситуации требует увеличить мощность генератора, отдаваемую им с энергосистему, а другой тип – уменьшить.

По опыту автора, количество мероприятий, которое возможно осуществить на объекте, много меньше количества ожидаемых аварийных ситуаций, и поэтому одного и того же мероприятия могут требовать несколько аварийных ситуаций, в том числе очень различных. С другой стороны, одна ситуация может нуждаться в нескольких мероприятиях одновременно. В сложной системе, где возможны разнообразные аварийные ситуации и имеется некоторый набор мероприятий, возникает одна из сложнейших задач противоаварийного управления – как установить связи между ситуациями и мероприяти-

ями, оптимальные в каком-то смысле или хотя бы просто эффективные в отношении противодействия аварии.

Крайне важное, но не всегда выполнимое требование – *независимость мероприятия от предыстории*. Это означает, что мероприятие должно вполне эффективно выполняться вне зависимости от того, какая именно из ситуаций привела к его востребованию.

Например, имеющиеся на судне шлюпки должны спасти пассажиров и экипаж вне зависимости от того, как именно судно пришло к вот-вот ожидаемой катастрофе. Однако, как известно, это затруднено, если повреждение судна привело к сильному боковому крену, и, чтобы люди могли быть спасены и в этом случае, требуется расширить и, вероятно, удорожить это мероприятие.

Требование независимости не имеет отношения к мероприятиям, предназначенным для противодействия только что начатому аварийному процессу (предыстории, собственно, ещё нет), и становится всё более неукоснительным, когда процесс уже грозит катастрофой.

Следующая проблема – *нужна ли суперпозиция?* Многие мероприятия могут осуществляться ступенчато, в меньшем или большем объёме – в зависимости от аварийной ситуации. Бывает, что последовательно возникают две ситуации и каждая из них требует частичной реализации одного и того же мероприятия. Тогда возникает вопрос, как должно быть выполнено второе по времени требование: полностью или с учётом того, что часть требования уже выполнена при первой ситуации? Если учёт предыдущего выполнения нужен, то во второй ситуации *независимость мероприятия от предыстории* должна быть в данном отношении нарушена.

Например, мощность электростанции может быть быстро снижена ступенями по 200 МВт максимум на 1200 МВт, и первая ситуация требует снижения на 400 МВт, а вторая, более поздняя, на 600 МВт. Вопрос: второе значение вычислено с учётом того, что первое снижение уже выполнено, или без учёта? Если с учётом, то при второй ситуации на уже выполненное снижение нужно наложить требуемое и тем самым общее снижение мощности довести до 1000 МВт. Если же без учёта, то следует наложить лишь $600 - 400 = 200$ МВт снижения.

Решив вопрос о типе ступенчатого мероприятия, можно перейти к ответу на вопрос, какая ступень требуется при возникновении той или иной ситуации. Само мероприятие создаётся при создании объекта, а количественный выбор, выбор ступени, вполне вероятно, можно оставить до момента, когда мероприятие действительно потребуется. (Заметим, впрочем, что возможность количественного выбора тоже нуж-

но обеспечить при создании объекта.) Переложив количественный выбор на стадию функционирования объекта, мы существенно, возможно, во много раз сокращаем набор аварийных ситуаций, рассматриваемых на стадии создания объекта. А это сокращение крайне важно: чем больше ситуаций, тем сложнее и дороже противоаварийная система в целом.

Объединение ситуаций в ограниченное число типов, конечно, делает систему более грубой, а проявляя нерешительность в ограничении числа типов, легко прийти к весьма тонкой, но нереализуемой системе.

Любое техническое сооружение, которое может явиться источником крупной аварии, при его создании снабжается подходящими для него средствами предупреждения аварии и локализации её на случай, если она все-таки началась. Затем в течение всего периода существования сооружения эти средства должны бдительно поддерживаться в работоспособном состоянии. Создание этих средств во многих случаях очень заметно удорожает сооружение, а их эксплуатационная поддержка заметно увеличивает издержки его использования. Поэтому заказчик сооружения стремится уменьшить затраты на противоаварийные мероприятия. (Иногда его персонал просто не знает, что они полезны.) Плюс к этому, если сооружение должно быть принципиально новым, то совершенно не исключено, что необходимые для его создания технические и программные средства не поставляются промышленностью и даже не разработаны.

Известно также, что сооружение с течением времени по мере своего развития может претерпевать принципиальные изменения, которые, в свою очередь, могут требовать корректировки противоаварийных мероприятий. Если это не замечается персоналом и он остаётся в плену старого, уже негодного подхода, то при возникновении неподвижного аварийного процесса эта слепота может сказаться тяжелейшим образом. Например, скверно, если бы переход от строительства двухэтажных зданий к многоэтажным не сопровождался изменением противопожарных мероприятий.

Устройство широкого применения обычно вручается потребителю вместе с инструкцией, в которой едва понятно прописаны функции изделия и некоторые его параметры, а также присутствует большой перечень требований к потребителю, особенно относительно его собственной безопасности. Скупость этой документации делает оценку надёжности устройства невозможной. Но кое-что понять все-таки можно.

Например, какой надёжностью обладает персональный компьютер? Обычно продавец даёт гарантию на два года. Заметим, что эта гарантия касается не того, что компьютер будет работать этот срок безаварийно, а лишь того, что его бесплатно отремонтируют или заменят в случае, если поломка случится в течение этого срока. Сколько раз устройство откажет и с какой вероятностью можно ожидать этого, – не известно. Но гарантийный срок все-таки косвенно характеризует надёжность: изготовителю не выгодно, назначив большой срок, продавать ненадёжное устройство – он слишком много потеряет на ремонтах и заменах. Если же покупатель получит гарантию на более длинный срок, он должен заплатить за компьютер, скажем, на 10% больше. Это означает, что продавец считает поломку компьютера в течение первых двух лет, хотя и возможной, но маловероятной, а уже на третий год – настолько вероятной, что за продление гарантии требует оплату ремонта вперёд. Отсюда можно сделать вывод, что продавец оценивает среднюю (!) продолжительность исправной работы примерно двумя годами, а исправности в течение трёх лет ожидает, скажем, только от двух третей продаваемых изделий. Более точные сведения о надёжности для потребителя обычно недоступны.

Поддержка безаварийности действующего объекта

Переходя к проблемам безаварийной эксплуатации объекта, сразу нужно заметить, что на этом этапе возникает масса разнообразных производственных ситуаций, и желательно чётко регламентировать возможно большее их количество, особенно наиболее частые и потенциально опасные. Отсюда – необходимость обучения и постоянного переучивания персонала, необходимость периодической проверки знаний и практических умений.

Конечно, разработка регламента работ, обучение и контроль персонала требуют немалых ресурсов, для этих целей требуются квалифицированные и опытные специалисты. Поэтому работа с персоналом вряд ли может быть организована везде одинаково. На наиболее опасных объектах вроде атомной станции или пассажирских лайнеров эта работа максимально высокого приоритета, а где-то (не осмеливаюсь сказать где именно) уровень может быть не столь высоким, и ещё где-то – ещё ниже...

Кстати, к понижению уровня эксплуатации следует относиться очень осторожно. Например, обычную распределительную электрическую сеть невозможно и, вероятно, не нужно эксплуатировать столь же заботливо, как сеть мегаполиса, но допустимо ли такое послабление, если, скажем, в северном районе построены многоэтажные дома с централизованным теплоснабжением и, следовательно, длительное отсутствие электропитания зимой грозит гибелью людей? Представ-

ляется, что в таких условиях снижение уровня обслуживания возможно только, если не вызывает сомнения, что там предусмотрены автономные аварийные источники питания, эти источники покроют наиболее важные потребности и местные власти проверяют состояние их готовности.

При всей полезности подробной регламентации отразить в ней все опасности вряд ли возможно, и поэтому важную роль играет сознательное следование персоналом «хорошей эксплуатационной практике». Эту практику специалист может воспринять только путём совместной работы с более опытным коллегой или в составе руководимой им группы. Опыт показывает, тем не менее, что целенаправленное перемещение специалистов применяется редко. А отсутствие хорошей эксплуатационной практики видно на примере лихости взятия препятствий, которая по молодости лет обуяла автора [1, стр. 147-155].

Многим руководителям свойственно по временам впадать в состояние нетерпеливого и непрофессионального стремления к немедленному результату. Звучат команды «Все – вдруг!», «Патронов не жалеть!», и получается позор вроде описанного в [1, стр. 137-142] случая, когда в ходе бессмысленных действий чуть не погиб человек. Как не вспомнить старую мудрость: «Семь раз примерь, один отрежь».

Теперь перейдём к редко рассматриваемому, но важному аспекту управления объектом. Дело в том, что многие аварии возникают не вдруг, а созревают в предаварийной обстановке, когда операторы объекта имеют хорошую возможность уклониться от аварии; после же аварии предпочитают это забыть. Сразу признаемся, вопрос этот не из лёгких. Частые сетования на ошибочные действия или досадное бездействие операторов во время аварии, возможно, слишком строги, но отнестись так же строго к предаварийному поведению операторов оснований ещё меньше. Ведь в это время авария ещё не состоялась, оператор надеется, что пронесёт, не исключено, что так и будет и его действия окажутся излишними, а с точки зрения тех, на кого он работает, они могут показаться малодушными, перестраховочными и, хуже того, вредными: они могут уменьшить доход или престиж организации, использующей объект.

Прежде, чем продолжить эту тему, вспомним, что предшествовало некоторым из уже описанных или упомянутых аварий.

Крушение поезда, который вёз императора Александра III с семьёй, возникло вовсе не беспричинно [1, стр. 60-65]. Машинисты царского

поезда и командовавшие ими важные чины знали, что этот тяжёлый поезд идёт слишком быстро по слишком плохому для этого пути. Они не могли не заметить, что паровозы рыскают на рельсах, и вряд ли могли не почувствовать, что вагоны слишком раскачиваются. Почему же они гнали поезд с неподобающе большой скоростью? Судя по имеющимся очень надёжным материалам, ответ прост: некоторые подсознательно опасались прослыть трусами, а другие просто хотели угодить своему начальству быстрой ездой, боялись перечить.

Почему судоводители лайнеров «Андреа Дория» [1, стр. 65-69] и «Титаник» вели свои суда в тумане с непопустительной скоростью? Выяснено, что над ними довлело стремление сохранить репутацию своих кораблей, не допустив их опоздания в порт назначения Нью-Йорк по сравнению с расписанием. А то, что остойчивость «Андреа Дория» была сильно ослаблена тем, что, израсходовав топливо из бортовых отсеков, их не залили морской водой, оставили их пустыми, – ничем, кроме мелочной экономии, не объяснить.

Можно удивляться легкомыслию руководства и операторов Саяно-Шушенской ГЭС [1, стр. 70-84], которые допустили много людей к работе в опасной зоне в то время, когда уже было ясно, что один из агрегатов работает явно ненормально. Но с другой стороны, распорядиться отменить работы и срочно предпринять остановку агрегата показалось бы неоправданным решением, ведь возможность катастрофы с затоплением машинного зала вряд ли кому-нибудь могла прийти в голову.

По линиям электропередачи, питающим Нью-Йорк, молнии били безжалостно [1, стр. 174-183], но первым ударам предшествовало приближение грозы, «ночь страха» наступила не внезапно. Операторы не могли не заметить близкой грозы, как не могли не знать, что для грозы наиболее уязвимы линии электропередачи. Казалось бы, отсюда должны были последовать действия, направленные на уменьшение значимости этих линий для электроснабжения города, т.е. на уменьшение передаваемой по ним мощности. Для этого город имел все возможности: обладал большими резервами мощности собственных генераторов. Но их использование было менее выгодным, чем приём мощности извне, и они до аварии не были введены в действие.

Прелюдия тотальной аварии на Востоке Америки от 14 августа 2003 года [1, стр. 183-196] началась в 12:15, далее возникло много разнообразных неприятностей, но решающее отключение ещё одной

линии напряжением 345 кВ, после которого операторы уже не могли ничем помочь, произошло лишь в 16:06. Чуть ли не четыре часа операторы не видели особой угрозы, ошибались, тревожно, но уже малоцензурно переговаривались и бездействовали.

И последний пример – авария в Москве утром 25 мая 2005 года [1, стр. 198-209]. Её тоже трудно считать случайностью. Ведь прелюдия началась вечером 23 мая с многочисленных повреждений на очень важной для города высоковольтной подстанции 500 кВ Чагино и продолжилась полным выходом из строя этой подстанции и наступлением довольно жаркого утра. Возникло нетипичное распределение потоков мощности по электрической сети, опасное для города. Невозможно сомневаться в том, что операторы пытались воспрепятствовать ухудшению положения и что им, конечно, помогли наиболее квалифицированные специалисты энергосистемы. Но все они то ли надеялись, что обойдётся, то ли в спешке не могли договориться, какие меры нужны, какие из них лучше, и – решительных мер не приняли.

Мы не приводим слишком сложных подробностей катастрофы на атомной станции Фукусима 1, но в связи с темой о прелюдиях к авариям здесь все-таки позволим себе одно предположение. Нельзя ли было за время между толчком близкого землетрясения и приходом громадной волны непосредственно к станции успеть остановить реакторы по команде автоматического датчика землетрясения или даже по команде операторов?

Нужно сказать, что в доступных официальных материалах, посвящённых расследованию аварий, как раз предаварийному периоду уделяется очень мало внимания по сравнению с вниманием к аварийному процессу, хотя даже из приведённого выше беглого обзора понятно, что во многих случаях именно в этот период решается, состоится ли авария и, если состоится, то как глубоко разовьётся.

И снова вообразим состояние операторов при уже ненормальном состоянии управляемого объекта. Это нам теперь ясно, что им требовалось решиться на серьёзные предупредительные меры. А они-то вовсе не знали, что случится, надеялись, что беду пронесёт (как бывало неоднократно!), и опасались, что, предприняв нужные действия и тем самым, возможно, избежав аварии, они окажутся беззащитными перед гневом их руководителей. Не исключено, впрочем, что в нетипичных обстоятельствах операторы просто не знали, что делать.

Чтобы оператор не оказался беспомощным, когда он в стрессовом состоянии должен найти экспромтом то верное решение, которое

остановит подступающую аварию, важно иметь в виду старый парадокс людей театра и цирка: *чтобы экспромт хорошо удался, его нужно хорошо отрепетировать.*

Но некоторые избегают экспромтов и на репетиции. Знаменитый режиссёр Ингмар Бергман пишет (И. Бергман, Жестокий мир кино, М. Вагриус, 2006, стр. 139): «Придя на репетицию, я обязан иметь представление о каждом моменте будущего спектакля. Мои указания должны быть ясными, выполнимыми и предпочтительно стимулирующими. Только тот, кто тщательно подготовился, имеет возможность импровизировать».

Следование такому принципу делает не удивительной громадную продуктивность Бергмана как режиссёра кино и театра, а также как сценариста. Чёткая организация рабочего процесса не помешала ему создать замечательные фильмы, вспомним хотя бы три из них: «Фанни и Александр», «Земляничная поляна», «Волшебная флейта».

Наконец, подчеркнём наиболее важное. Во всех типичных угрожающих обстоятельствах оператор должен неукоснительно следовать за хорошо проработанными инструкциями, которые должны быть у него под рукой, на экране информационной системы и, главное, в его памяти. Среди этих обстоятельств и такие, как туман, жара, гроза, гололёд, плохой путь, землетрясение, волна и т.п. Инструкции по наиболее типичным из таких обстоятельств должны быть особенно подробными, а для редких, разнообразие которых безгранично, должны быть разработаны для оператора рекомендации общего характера, определяющие направление необходимых действий. Вне обстоятельств, охваченных этими инструкциями и рекомендациями, а также конкретно действуя по общим рекомендациям, оператор обязан действовать самостоятельно в соответствии со своей квалификацией, признанной при допуске его к работе.

Все это хорошо работает при соблюдении ещё одного важнейшего условия – признания особенности работы оператора в стрессовой ситуации: его действия, не противоречащие имеющимся в его распоряжении инструкциям и рекомендациям, вне зависимости от исхода дела не могут явиться причиной преследования. Анализ действий – да, критика – да, совершенствование принятия решений – очень да, преследование – нет.

Глава 4

Потери от аварий и противоаварийные затраты

Проблема сопоставления затрат и издержек

Создание почти любого противоаварийного мероприятия требует затрат ресурсов. Прежде, чем на них решиться, естественно, возникает потребность хотя бы ориентировочно их сопоставить с той гадательной пользой, которую обещает будущее использование мероприятия. Ведь не исключено, что авария может долго не случиться и всё это время противоаварийные мероприятия окажутся лишними. А средства на них нужны сразу и, возможно, не малые.

Вспоминается старинный диалог мамы с дочерью: – Дочка, вымой шею, тётя придет! – А вдруг тётя не придет?

Руководители объекта, который подвержен опасным авариям, смотрят на затраты не так, как потребители его продукции или услуг, а со стороны общества в целом они выглядят ещё иначе. Эти разные точки зрения, вероятно, привели бы к разным оценкам аварий. Из опыта создаётся впечатление, что решение о затратах обычно принимается руководителями объекта; не наше дело подвергать это критике, и ограничимся здесь оценкой именно с точки зрения интересов объекта.

Экономическая эффективность противоаварийного мероприятия оценивается сопоставлением затрат на его создание с ожидаемыми эксплуатационными издержками, снижение которых должно окупить затраты. Издержки же, в принципе, должны рассчитываться с учётом

их ожидаемых значений, возникающих в аварийных ситуациях – как в случаях правильного, так и, не исключено, вредного влияния противоаварийных мероприятий. Поскольку речь идёт о тех значениях издержек, которые возникнут не наверняка, а лишь возможны в будущем, возникает осложнение: приходится иметь дело с событиями и величинами, известными лишь статистически.

Заметим попутно, что вполне возможен аналогичный подход и к сравнению вариантов сооружения всего объекта, если эти варианты характеризуются существенно различными издержками, возникающими в аварийных ситуациях.

В то время как принципиальное решение о противоаварийных затратах может в большой мере опираться на имеющиеся нормативы, решение о выборе того или иного мероприятия из нескольких имеющихся в распоряжении вообще невозможно без сопоставления аварийных издержек – другого пути нет. Например, в области противоаварийного управления такой энергосистемой, которая располагает альтернативными управляющими воздействиями, аварийные издержки выступают как один из инструментов, необходимых для автоматического выбора оптимального решения (заметим, это – инструмент только принятия решения, а не реальных коммерческих расчётов). Механизм минимизации аварийных издержек даёт возможность найти единственное решение об управляющих воздействиях из множества возможных решений.

Вопрос об оценке последствий аварий совсем не прост, и он ведёт к вопросу о побудительных мотивах создания противоаварийных мероприятий. С необходимостью учёта издержек, возникающих из-за ненормального функционирования объекта, согласны далеко не все даже «в принципе». Наиболее очевидное объяснение состоит в том, что принимают решение о затратах руководители объекта, но непосредственно у объекта возникает только часть аварийных издержек. Источник этих, собственных издержек – дополнительный износ и возможное повреждение оборудования, предназначенного противодействовать аварийному процессу. Возможна также потеря оплаты за ту часть продукции, которая в интересах противодействия развитию аварии не поставлена потребителю. А другая часть издержек возникает у потребителей. Эти издержки обычно называют ущербом для потребителя. Они касаются объекта как прямо, так и опосредованно.

Было бы грубым упрощением полагать, что руководителям объекта безразличны те ущербы, которые возникают у его потребителей в ре-

зультате его деятельности. Обратная связь от потребителей к объекту имеется и идёт по нескольким каналам. Напомним главные из них.

Во-первых, как уже упомянуто, объект не получает плату за продукцию, которая не доставлена потребителю.

Во-вторых, возможность ограничивать потребителя в получении им продукции (в некоторых разумных размерах и в соответствии с каким-то обоюдно выгодным договором) связана с необходимостью или снизить ему тариф на поставку этой продукции, или платить штрафы за фактический недоотпуск, или с комбинацией этих мер. В некоторых случаях расстройство технологического процесса у потребителя может оказаться, как известно, столь большим и даже катастрофическим, что его компенсация упомянутыми способами становится проблематичной.

Заметим, что, в принципе, противоаварийные мероприятия, направленные на бесперебойность работы потребителя, должен осуществлять не только производитель, но и потребитель или они совместно; пример – наличие газохранилищ, резервирующих газопроводы.

В-третьих, беды потребителей оказывают моральное давление на руководство объекта. Тут играют роль социальная и экологическая опасность аварии, особенно аварии, затрагивающей лайнер или атомную станцию. Это давление может принять характер общественного недовольства, и тогда руководство объекта ощущает его со стороны политических деятелей, а также органов местного и даже государственного управления. Это может приобрести и вполне материальную форму, например, через изменение регулируемых тарифов.

В противоположность этому, вмешательство общества и государства может принять и благоприятную для объекта форму финансовой помощи или освобождения от ответственности. Это возможно в случае особенно крупной аварии, о которой у общества складывается впечатление, что она вызвана неодолимыми силами природы или неизвестными научными явлениями или что она разорит объект, если пустить дело по обычному коммерческому руслу. А в разорении мало кто заинтересован, кроме иногда конкурентов, в том числе не заинтересованы и потребители.

Приняв во внимание эту бегло очерченную обратную связь, можно полагать, что, решая противоаварийные вопросы, объект явно или не явно учитывает интересы потребителей и общества в целом, что

ущерб потребителям увеличивает аварийные издержки объекта и так или иначе должен быть включён в них в качестве одной из составляющих, может быть, – главной.

Выбор противоаварийных мероприятий осложнён тем, что аварии, а также издержки от них носят случайный характер. Поэтому расчёт этих издержек является специфическим делом, для которого, кроме знания мероприятий, требуются ещё и статистические данные об отказах оборудования и системы управления, а также вероятностные характеристики будущих состояний объекта. Для ведения таких расчётов нужна команда специалистов, ориентирующихся, как видно, в широком круге вопросов. Вероятно, не все организации, даже специализированные, обладают такими возможностями.

Проблема выделения средств на противоаварийные мероприятия близка к хорошо разработанной проблеме страхования. Это уподобление показывает, что в деле борьбы с авариями, помимо изложенных сложностей, играют роль индивидуальные соотношения оптимизм – пессимизм, смелость – осторожность и т.п. Ведь, решая вопрос о создании противоаварийных мероприятий, приходится принять во внимание противостоящие друг другу величины совсем разной природы. Это, с одной стороны, скалькулированные ущербы и издержки, имеющие вероятностный характер, и, с другой стороны, затраты на противоаварийные мероприятия, которые требуется оплатить и, возможно, оплачивать впредь – вполне определённо.

Как воспринимает непростую связь между этими величинами лицо, принимающее решение о затратах?

Ущерб, наносимый потребителю, – составная часть издержек

Как известно, в процессе создания объекта ищется тот его вариант, который обеспечивает минимальное значение общей себестоимости производства. Например, путём увеличения затрат на сооружение объекта обычно можно добиться уменьшения издержек, которые возникнут в процессе производства: стоимость материалов, оплата труда персонала и т.п. А нас здесь особенно интересует уменьшение издержек, связанных с авариями.

Применение противоаварийных мероприятий со всей очевидностью увеличивает затраты на сооружение объекта и на его эксплуа-

тацию, но вместе с тем, что не так бросается в глаза, может и снизить их. Этого можно добиться за счёт создания мероприятий, позволяющих уменьшить другого рода затраты на сооружение объекта или пойти на более экономичную его эксплуатацию.

Впечатляющий экономический результат дало создание противоаварийной автоматики на атомной станции Bruce канадской энергосистемы Ontario Hydro, описанное, например, в [2, том I, стр. 31-33]. На эту автоматику было затрачено 13 млн. долл. Она позволила значительно увеличить мощность, передаваемую от станции, и обойтись без строительства двух линий напряжением 500 кВ или задержать их строительство. Это ежегодно экономило сумму, в несколько раз превышающую произведённые затраты.

В бывшем СССР экономические оценки прививались с большим трудом. Постулат, что новая продукция порождается только трудом, а не капиталом тоже, делала бессмысленными экономические сопоставления. (Относящиеся к этой теме подробности можно почерпнуть в [1, стр. 39-42].)

Ещё труднее внедряется в сознание мысль о том, что всяческие ущербы, которые возникают у потребителей в результате деятельности поставщика, должны учитываться при расчёте экономических показателей поставщика и что в этом заключается смысл одной из уже упомянутых обратных связей от потребителей к поставщику продукции. Она воздействует на поставщика в сторону ограничения неприятностей, наносимых им потребителю.

Рассмотрим вопрос об ущербе немного подробнее применительно к наиболее знакомому автору производству – к электроснабжению, т.е. применительно к производству с непрерывной поставкой продукции потребителю.

При выборе наилучшего варианта развития электроэнергетики СССР, в отличие от других областей хозяйствования, не без трудностей, но всё-таки использовалось сопоставление величин себестоимости продукции, создаваемой в рамках этих вариантов. Эта вольность привела к предложению пойти дальше – в расчёт издержек производства включить, наряду с традиционными составляющими, ущерб для потребителей, возникающий из-за временного недоотпуска им электроэнергии. Рассматривалась ситуация, когда у энергосистемы недостаёт мощности или энергоресурсов и поэтому она уведомляет часть потребителей о необходимости снизить нагрузку, причём делает это

заблаговременно, чтобы потребители имели возможность подготовиться к ограничению. Такое ограничение есть *ограничение с предупреждением* (это предложил И.М. Маркович).

Наносимый ущерб не рассматривался как ущерб для какого-то конкретного ограничиваемого потребителя – таковой, как и все предприятия СССР, хотя и имел «хозрасчёт», не был экономически самостоятельным, а являлся частью единого централизованного предприятия всей страны. Поэтому этот ущерб выглядел как ущерб для всего «народного хозяйства», «народнохозяйственный» ущерб.

Среди специалистов, занимавшихся планированием развития энергетики, однако, существовало довольно циничное мнение, что никакого ущерба для потребителей вообще не возникает, поскольку согласно официальным статистическим отчётам страна в целом и все её предприятия успешно выполняют план. Тем самым не без иронии подразумевалось, что план работы потребителя составляется в предвиденье того, что он не получит того количества электроэнергии, которое нужно для производства. И действительно, если предположить, что использовалось запрещённое руководством страны, как тогда называлось, «планирование от достигнутого» (планирование на будущий год ведётся по результатам предыдущего), то не исключено, что учёт ограничений, пережитых в предыдущем году, косвенным образом осуществлялся.

Относительно значения ущерба от ограничения с предупреждением существуют различные данные и мнения, соответствующие разным условиям снабжения энергосистемами разнородных потребителей. В СССР, например, считалось, что он оценивается пропорционально количеству той электроэнергии, которую недополучил потребитель. Оценка ущерба принималась в пересчёте приблизительно на уровне 0,6 долл. за недоданный киловатт-час; этот уровень ущерба считался правдоподобным и в США.

Несмотря на довольно специфическое происхождение того, как ущерб попал в состав издержек, с сегодняшней точки зрения ничто не мешает издержки и ущерб полагать не абстрактными народнохозяйственными, а отнесёнными к конкретным потребителям конкретной энергосистемы, а также принять, что этот ущерб у потребителей, в свете изложенного, увеличивает издержки энергосистемы и должен быть поэтому включён в их состав.

Что же касается конкретного значения ущерба, то можно понимать его как некоторую константу, которая отражает обратную связь от потребителей к производителю.

Коль скоро в состав издержек включён ущерб от отключения потребителей с предупреждением, стало естественным пойти дальше и

туда же включить издержки, возникающие в аварийных условиях – с участием противоаварийных мероприятий или при их отсутствии. Имеются в виду и ущерб для потребителей, и собственные издержки энергосистемы.

Внеплановое, т.е. аварийное, уменьшение мощности, получаемой потребителями, происходит в результате или отключения части потребителей от сети, или понижения частоты во всех работающих на одной частоте частях энергосистемы, или понижения напряжения в каком-то узле сети. Любое из этих событий может быть вызвано оператором энергосистемы, её автоматикой или просто ходом аварии.

Усилиями многих специалистов был исследован ущерб для разного рода потребителей от всех трёх указанных воздействий на них. Автор отважился предложить простые соотношения, усреднённо определяющие, во сколько раз ущерб от аварийного ограничения потребителей больше, чем ущерб от их отключения с предупреждением [1, стр. 42-46].

Избегая расширительного употребления этих соотношений не по назначению и обвинения автора в нескромности, уточним. Речь идёт отнюдь не о постоянных, а о временных, на полчаса – час, и нечастых аварийных снижениях потребляемой от энергосистемы мощности. Это означает, что пониженная частота или пониженное напряжение не выступает как новый нормальный параметр электроэнергии и что отключение потребителя не вызывает невыполнения им своих обязательств перед его клиентами. Плюс к этому, полученная оценка ущерба, наносимого потребителям аварийным отключением, касается не хаотического, а только управляемого отключения потребителя, возможность которого с ним, в принципе, согласована. И таким потребителем, конечно, не является потребитель, у которого возникает трудно обратимое расстройство технологического процесса даже при кратковременном перерыве электроснабжения.

Оценка издержек с учётом «вредности» аварии

Ожидаемые издержки, связанные с аварийными событиями, рассчитываются путём наложения повреждений и отказов оборудования на прогнозируемых состояний объекта. События опасных наложений одного на другое рассматриваются с опорой на уже собранную статистику подобных повреждений и отказов и на ожидаемую продолжительность прогнозируемых состояний объекта. Сумма издержек за год содержат сумму произведений, состоящих из двух сомножителей. Сомножителями являются: усреднённая величина ожидаемых издер-

жек от единичного аварийного события данного типа и ожидаемое число таких событий за год.

Хотя, казалось бы, такой расчёт показывает объективную картину, практика выявила серьёзнейший его недостаток: наиболее опасные, но зато редкие аварии дают небольшие величины произведений и из-за этого не оказывают влияния на сумму издержек. Поэтому подобный расчёт почти не выявляет влияния наиболее тяжёлых аварий на те решения о противоаварийных мероприятиях, которые должны быть приняты на основе этого расчёта.

Естественно возникает сомнение в полезности таких расчётов. Спрашивается: каких аварий мы все-таки больше опасаемся – многочисленных малых или малочисленных, но больших? И напрашивается вывод, что было бы легкомысленным пользоваться только среднегодовыми издержками и тем самым недооценивать или почти исключать из рассмотрения самые крупные составляющие затрат, которые как раз и должны были бы внушать наибольшие опасения.

В общем, складывается впечатление, что было бы разумным полагать, что главная задача борьбы с авариями – минимизировать наиболее крупные, хотя и маловероятные потери от наиболее опасных аварий. Однако, одно дело впечатление, а совсем другое регулярный метод расчёта, который направил бы наши действия в правильное русло, а этого-то метода, насколько известно, не выработано.

Нужный подход напоминает стратегию, которую называют «минимакс». Она сформулирована в теории игр и была применена в исследовании операций и затем даже в социологии. Предполагается, что в любом из рассматриваемых вариантов наших действий могут возникнуть потери различной величины. В каждом из вариантов максимальные потери возникли бы в случае наихудшего развития событий (в частности – в случае самого неблагоприятного поведения противника). Цель стратегии – из имеющихся в распоряжении вариантов действий выбрать такой вариант, которому свойственно наименьшее значение максимальных возможных потерь. Согласно этой стратегии ищется такое сочетание доступных действий, при котором самый максимум потерь, зависящих от них, явится наименьшим среди всех возможных вариантов.

Чтобы наметить выход, представляется не лишним обратиться к соображениям о так называемой полезности, которые можно почерпнуть из общенаучной литературы [2].

В самом простом представлении *полезность* есть прямая стоимостная оценка такого рода выигрыша (прибыль), который наступит не

наверняка, а известен только статистически. По аналогии можно рассматривать как бы *вредность*, т.е. возможный проигрыш (убыток), Поясним это на наглядном примере простейшей игровой ситуации [2].

Некому субъекту предлагается участвовать в игре и выбрать в ней один из двух вариантов, в которых он в любом случае ничего не теряет. Первый: он должен угадать результат подбрасывания монеты; если он не угадает, то не получит ничего, а если угадает, то получит некоторую сумму денег, назовём её *удачей*. Второй вариант: ему просто предлагают некоторую сумму денег. Повторяя эту игру в выбор при разных значениях беспроигрышной суммы, узнают, начиная с какого её значения испытуемый субъект предпочтёт беспроигрышный вариант тому, в котором выигрыш и проигрыш равновероятны. Конечно, беспроигрышная сумма всегда называется меньшей, чем *удача*. Эта сумма и есть *полезность*, которой он оценивает для себя целесообразность отказа от рискованной игры с монетой.

Если для субъекта рассматриваемые суммы представляют интерес и он довольно осторожен, т.е. соблазну жребия он предпочитает пусть скромную, но гарантированную сумму *полезности*, то его оценки окажутся ниже оценок того, кто склонен к риску. Более того, каждый легко представит себе, что полезность выигрыша, получаемого осторожно или с риском, иная, чем полезность, определяемая ожидаемым выигрышем в среднем, что было бы характерно для игрока, имеющего большие ресурсы и часто играющего (вроде страхового общества). Например, если сумма *удачи* равна 1000 единицам, то выигрыш от жребия в среднем составит 500, рискованный игрок откажется от жребия, оценив *полезность* в 750, а осторожный будет доволен получить наверняка хотя бы 250 единиц.

Эти игры содержали приятное – выигрыши. Теперь этим же субъектам предлагаются менее приятные игры с проигрышами: всё то же самое, но вместо *удачи* предлагается выплачивать *ущерб*, а отказ от жребия оценивается, так сказать, *вредностью*. Возможные значения *вредности* оказываются в такой игре несколько меньшими, чем полезности, и осторожный выбирает большие платежи *вредности*, чем любитель риска.

Описанная игра напоминает упрощённый вариант телевизионной игры «Как стать миллионером?» Если игрок уже выиграл на одной ступени игры, то перед ним возникает дилемма: отказаться от угадывания на данной ступени и забрать уже достигнутый на предыдущей ступени выигрыш или попытаться рискнуть и ответить на вопрос

следующей ступени. В этом случае, если он выбрал правильный вариант ответа, считается, что он выиграл на данной ступени, и выигрыш поднимается, а при неудаче он не получает ничего и выбывает из игры. Для нас важно, что практически всех осторожных, а их, как показывают наблюдения, большинство, объединяет одно: чем выше степень игры, тем меньше желания идти на риск.

По поводу *вредности* можно нафантазировать такой пример. Пусть аварийное отключение одного из восьми генераторов крупной электростанции создаёт издержки для электростанции, энергосистемы и её потребителей в 10 единиц, и такие отключения ожидаются 2 раза в год. Тогда ожидаемые годовые издержки составят 20 единиц. Пусть также гораздо более тяжёлая авария – потеря всей станции создаёт издержки величиной 400 единиц, и она может ожидаться редко – раз в 100 лет. Тогда ожидаемые годовые издержки составят 4 единицы. Из такой калькуляции получается, что большую аварию можно чуть ли вообще не учитывать при выборе противоаварийных мероприятий. Но так ли это?

В свете изложенного стоит поставить вопрос так: какие издержки, которые обязательно возникнут один раз в ближайшее время, представляются допустимыми, чтобы сделать невозможной аварию всей станции, которая случается редко, но может возникнуть скоро? Очевидно это значение меньше, чем 400 единиц, и можно предположить, что оно составит, например, 100 единиц. Если это так, то *вредность* второй аварии оценивается в эти 100 единиц, что в 25 раз больше рассчитанных выше 4 единиц. Полученная оценка указывает на актуальность мероприятий по предотвращению аварии типа второй, и их разумная стоимость равна издержкам на уровне 100 единиц.

К сожалению, неизвестно, чтобы при рассмотрении противоаварийных мероприятий *полезность* (на самом деле – *вредность*) оценивалась не интуитивно, а осознанно. Хочется надеяться, что методы оценки полезности будут развиваться и что это будет способствовать правильному сопоставлению ситуаций и противоаварийных мероприятий.

Реакция общества на аварию на примере АЭС

Когда случается очень впечатляющая авария, общественность склонна искать срочные меры по исключению подобного впредь, и возникает нечто следующее. Различные срочно создаваемые комиссии

спешат назвать виновного «стрелочника» и рекомендовать ответственным руководителям или даже общественности какие-то мероприятия, как будто избавляющие от опасности. Срочно разрабатываются и выпускаются новые инструкции, нормативы и иногда даже законы. Затем предначертанные мероприятия приблизительно воплощаются, благодаря чему все, кто их задумал, исполнил или стоял поблизости, испытывают моральное (некоторые и материальное) удовлетворение.

Если авария не является совершенно неординарной, а такие совсем редки, возникает негодующий вопрос: «Разве до аварии невозможно было вообразить, что подобное рано или поздно случится, и заблаговременно принять нужные меры?» И действительно, ведь можно было сообразить, что подобное стечение обстоятельств в данной технической системе возможно, пусть и редко – например, раз в 200 лет, и ведь никто не исключил, что этот раз случится именно в данном году! Получается, что по отношению к руководителям аварийного объекта остаётся актуальным утверждение: «Пока гром не грянет, мужик не перекрестится».

Возникает и иного смысла вопрос: «Почему необходимые мероприятия требуется назвать и тем более выполнить немедленно? Разве случившаяся авария даёт информацию о том, что подобное опять случится скоро?»

Если утверждается, что в ходе происшедшей аварии проявилось какое-то неизвестное до той поры явление, что обнаружилась какая-то новая информация, то спрашивается: «Чем принимать меры в спешке, не лучше ли сначала внимательно обследовать проблему и только на основе этого принять решение?»

Ответы на эти вопросы склоняют, во-первых, в пользу непрерывного анализа проблем, связанных с авариями, на основе изучения всего накопленного опыта подобных аварий. И конечно, необходимо учесть, с одной стороны, потребности общества и, с другой стороны, реальные возможности усовершенствования системы, которая подвергается авариям. Во-вторых, после каждой новой случившейся аварии, действительно, может потребоваться скорректировать ранее выработанные рекомендации в свете того нового, что, возможно, несёт с собой эта авария, но в этом деле необходима выдержка, а порой и мужество.

Если же нормальному образу действий не следовать, то каждая новая авария будет вызывать шараханье от одного мероприятия к другому, они будут наслаиваться друг на друга, возможно, противоречить друг другу, и на них будут излишне расходоваться ресурсы, порой очень значительные.

Иногда большим руководителям кажется, что быстрый, как говорят во флоте, «поворот все вдруг» понравится общественности, они его демонстративно совершают, и некоторое время это работает, но затем, если люди не вовсе беспамятны, шараханье дискредитирует последующие решения, возможно, вполне правильные.

Характерная нервность проявилась в Германии в связи с аварией на японской атомной электростанции Фукусима 1.

Всего за несколько месяцев до аварии было ревизовано решение предыдущего правительства, «красно-зелёного», об отказе от атомной энергетики: новое, традиционно правое для Германии правительство легализовало атомные станции. Напуганные ужасной аварией избиратели стали решительно склоняться в пользу «зелёных», впервые эта партия стала даже правящей партией в одной из земель Германии. Угроза потери популярности, видимо, заставила руководителей страны после аварии изменить свой подход к снабжению страны электроэнергией. Было объявлено, что всем атомным энергетическим реакторам, кроме реакторов на одной новейшей станции, остающейся и далее в холодном резерве, осталось работать не больше 11 лет, и за это время взамен атомных будут построены ветровые, газовые и прочие менее опасные установки, а также приняты меры к энергосбережению.

Мы оставляем в стороне то, что в данном случае государство распорядилось атомными станциями так, как будто они являются его собственностью, и от этого неожиданно и очень крупно пострадали многие действительные собственники этих станций, коллективные и частные: они продолжают оплачивать существование сооружений, не получая дохода от производства электроэнергии на них.

Итак, сложнейшая проблема научно-технического прогресса, экономики и экологии решена под давлением испуганных людей в угоду только одной стороне этой проблемы – экологии. Получив избыток пугающей информации и боясь прослыть членоконенавистниками, эксперты и власти не рискнули ясно донести до людей, чем им придётся оплатить отказ от атомной энергетики, и у избирателей не было возможности не сдвинуть свои предпочтения в сторону «зелёной» партии.

Хотя многие последствия этого решения, положительные (среди них – массовое сооружение ветровых станций) и отрицательные, уже налицо, мы не можем глубже вникать в эту проблему, тем более что 11 лет – срок немалый и кто знает, что ждёт впереди. Остановимся на наиболее очевидных аспектах проблемы.

Вряд ли кем-то не признается, что использование человечеством атомной энергии – столь же необходимый элемент его будущего существования, как, скажем, электричество (которое, напомним, тоже принесло и приносит людям множество бед). А данное решение в большой мере устраняет научное, техническое и мастеровое сообщество страны из процесса лучшего освоения этой энергии (устраняет не полностью – потому, что вне этого решения все-таки остаются автономные, менее мощные атомные реакторы: для транспорта, медицины и пр.). В сущности, это решение дополнительно понижает и так подорванный двумя войнами научный потенциал Германии, ранее столь весомый в мире.

Как раз Германия – одна из немногих стран, в которых использование атомной энергии наиболее безопасно. Очевидных в этом смысле стран совсем немного. Каждый может сам составить их список, и, если принять во внимание ряд простых требований, то, думается, разные списки будут мало отличаться друг от друга. Среди таких требований, по крайней мере: во-первых, сравнительно спокойные природные условия, во-вторых, стабильная социально-политическая система, обеспечивающая разумную требовательность и к обществу, и к производству, и к работнику, и, в-третьих, подготовленность достаточной части населения к ответственному, квалифицированному и дисциплинированному исполнению опасной работы.

Данное решение может привести к демонтажу обширной атомной промышленности Германии, требует создания совсем другой промышленности и переучивания (или потери) большого количества специалистов. Освободившись от германского атомного оборудования, международный рынок будет заполнен оборудованием из других стран. Борьба за это уже началась. В России на самом высоком уровне заявлено, что российские атомные электростанции самые надёжные в мире. Атомное ведомство России запланировало соорудить атомные электростанцию в ряде стран, и правительство России согласилось даже кредитовать эти стройки.

Возникает вопрос, достигнет ли цели решение об отказе Германии от атомной энергетики? Ведь крупные атомные установки имеются в соседних странах, рядом с территорией Германии, и они не безопаснее для Германии тех, от которых отказываются внутри страны. А как быть с реакторами, которые не будут использоваться? Ведь просто, как часто выражаются, отключить их генераторы от электрической сети было бы совершенно недостаточно с точки зрения цели: от этого ядерная начинка реакторов и их элементы, заражённые радиоактивностью, никуда не исчезнут. Следовательно, или на этих реакторах нужно осуществлять охранно-консервирующие мероприятия, или нужно их демонтировать. И то и другое вовсе не безопасно (не говоря уж о стоимости работ).

Иногда возникает надежда на некоторое счастливое естественное ограничение: где невелика цена человеческой жизни, там малы экономические ресурсы и поэтому не могут быть созданы большие и опасные технические системы. Опыт, к сожалению, показывает, что это ограничение действует далеко не везде. Некоторые экономически слабые общества, длительно концентрируя свои пусть небольшие ресурсы в какой-то узкой области (в ущерб другим потребностям), могут в этой области создать опасные системы. Конечно, для этого тем или иным способом добываются и затем используются технологические достижения, разработанные в других, более развитых обществах, которым большие системы более органичны. Если в результате концентрации ресурсов и заимствования достижений слаботому обществу удаётся создать опасные системы, то это очень опасно и для этого общества, и для его соседей.

Автор вовсе не безоговорочный сторонник атомной энергетики и, тем более, не противник возобновляемых источников энергии. Скорее наоборот, ещё до аварии на Чернобыльской станции он, зная состояние управляющей техники в своей стране, подозрительно относился к её атомным проектам. Однако, сегодня – другое время, и возможны другие пути решения проблем научно-технического прогресса и безопасного электроснабжения. И можно попытаться кратко очертить эти пути.

Нужно, прежде всего, признать, что достаточно безопасная атомная энергетика наряду с возобновляемыми источниками энергии – неотъемлемый элемент человеческого будущего.

Состояние и того и другого на сегодня не удовлетворительно: атомная энергетика недостаточно безопасна, а возобновляемые источники недостаточно развиты. Следовательно, необходимы меры по исправлению этого положения. Необходимо возможно скорее совершен-

ствовать безопасность существующих атомных установок и срочно ликвидировать вовсе негодные. Эти меры должны идти рядом с мерами экономии электроэнергии, с развитием возобновляемых её источников и с временно необходимым использованием других источников – на основе угля, газа и т.п. Кстати, экологическая приемлемость этих источников может быть современными средствами существенно повышена.

В то время как совершенствование безопасности атомных станций и совершенствование возобновляемых источников может вестись в отдельных странах и фирмах независимо и конкурентно, безопасность работающих атомных станций нуждается в контроле на основе широкой кооперации, так как последствия атомной аварии не остаются в национальных границах. Контроль, как ни трудно этого достигнуть, должен быть независимым от правительств и производителей, не связанным с коммерческими интересами, глубоким и строгим.

Не касаясь функций МАГАТЭ относительно нераспространения ядерных технологий, можно попробовать назвать те стороны дела, которые, исходя из опыта борьбы с авариями, представляются самыми важными для контроля:

- экспертиза основных технических решений по энергетической установке, экспертиза её структуры и взаимодействия с внешними технологиями, влияющими на безопасность, – на предмет соответствия нормам (которые предстоит коллегиально разработать);
- сертификация оборудования самой энергетической установки и упомянутых внешних технологий;
- проверка полноты и правильности технической документации и инструкций для ремонтного и оперативного персонала, касающихся организации и проведения работ на оборудовании установки;
- проверка психологического и профессионального уровня ремонтного и оперативного персонала установки;
- проверка соблюдения персоналом инструкций, а также проверка эффективности аварийных тренировок персонала;
- контроль радиации внутри установки и вокруг неё.

Если идти по пути такого рода контроля, то можно было бы договориться о постепенном совместном вводе его в практику, и это вынудило бы другие страны постепенно присоединиться к соглашению о контроле.

Выше не затронута ещё одна проблема атомной энергетики, не имеющая, правда, прямого отношения к противоаварийным проблемам, – захоронение радиоактивных отходов. Автор далёк от этой области, он лишь осмеливается надеяться, что, если не пытаться слишком экономить на решении этой проблемы, то современная наука и техника, поддержанные мужественными правительствами, смогут найти вполне удовлетворительные решения о транспортировке отходов, об их захоронении на хорошо подходящих для этого территориях, об их сохранении и охране. А народы со временем лучше поймут свои долговременные интересы и будут осознанно влиять на решение всей этой гаммы проблем.

Глава 5

Немного конкретизации

Уровень и достижимость безаварийности

О безаварийности функционирования, как и о надёжности функционирования шла речь уже не раз, и заметно, что, если пытаться отнести эти понятия к сильно различающимся объектам, то в них проявится некоторая неопределённость. Попробуем её, если и не устранить, то хотя бы прокомментировать.

Применительно к простым объектам кое-что высказано в главе 3, и вполне ясно, что абсолютно безаварийных аппаратов не существует и может только варьироваться продолжительность их безаварийной работы. Более того, понятно, что технический объект сам по себе не может обладать полным техническим совершенством и полной надёжностью во всех мыслимых и немыслимых случаях на всем протяжении его использования и что невозможно полностью исключить всевозможные ошибки обслуживающего персонала. Отсюда, казалось бы, неминуемо следует вывод о том, что техногенные аварии неизбежны. С этим положением мирятся в двух случаях. Во-первых, когда имеется в виду авария, не угрожающая перерасти в серьёзную беду. Во-вторых, когда последствия недооценивают, не знают, как бороться с развитием аварии, или просто экономят на противоаварийных мероприятиях.

Устраивает ли нас такой же подход к безаварийности по отношению, например, к атомной станции или к пассажирскому лайнеру? Ответ – решительное нет!

Тут мы затрагиваем социальный и моральный аспекты борьбы с авариями, который в угоду, если это можно так назвать, политкорректности обсуждать трудно, не принято. Но в данном тексте невозможно обойтись без того, чтобы коснуться его хотя бы кратко. А дело в том, что, как показано уже в главе 1 на примере автомобильных аварий, отношение к ценности человеческой жизни не одинаково на земле. Чем благополучнее общество, тем сохранение жизни для него важнее. Не следует ли отсюда, что и требования к безаварийности техни-

ки не универсальны, что они не должны быть одинаковы для бедного и для богатого народа? Ведь, к сожалению, жизнь не даёт «всем сестрам по серьгам».

Мы не можем здесь дальше углубляться в эти проблемы, но все-таки, не сделав следующих трёх замечаний, рискуем впасть в чрезмерный техницизм представлений об авариях, да и о жизни тоже.

Во-первых, нельзя забывать, что в стремлении к безаварийности громадную роль, наряду с материальными ресурсами общества, играет его мораль, уровень его гуманности, или, как говорят, избегая этих высоких слов, его менталитет. Бедность народа не способствует его высокой гуманности, а низкий уровень морали способствует бедности. И оба эти обстоятельства играют на руку авариям. И если происходит то, что поёт В.С. Высоцкий от имени будущих космических конквистадоров: «в космосе забыли десять заповедей рваных», то приходится ждать умножения аварий, не исключено, все более страшных.

Во-вторых, альтернатива «бедность – богатство» разделяет по отношению к безаварийности не только народы, но и разные слои людей внутри одного народа. Так, и в бедной стране богатый ездит на более безопасном автомобиле, чем «мыльница» его бедного соотечественника. Но эта пропасть не так бездонна, как кажется: они ездят почти по одним и тем же плохим и плохо оборудованным дорогам, создающим одинаковые для всех опасности, которые, правда, владельца хорошего автомобиля могут не привести к столь же большой неприятности, как владельца плохого.

Наконец, допуская различный уровень требований к безаварийности, нельзя зайти на этом пути слишком далеко. Те поблажки, которые допустимы по отношению к кухонному комбайну, к мобильному компьютеру или к автомобилю, совершенно недопустимы по отношению к некоторым другим объектам, последствия аварий в которых далеко выходят за интересы отдельного человека, группы людей и даже за границы государств. К таким объектам относятся атомное, биологическое и химическое оружие, а также непосредственно касающиеся нашей темы атомные электростанции, пассажирские лайнеры...

Понятно, что выше помещённое «решительное нет» вызвано громадным уровнем опасности. Но, с другой стороны, высказываются сомнения в достижимости полной безаварийности, если многочисленные элементы, из которых создан сложный объект, вовсе не безгранично совершенны и надёжны, если обслуживающий объект персонал

не может вовсе обойтись без ошибочных действий. И наконец, если безаварийность опасного объекта признается достижимой, то как именно?

Сразу нужно сказать, что в этом деле громадную роль играет степень устойчивости самого объекта к различным внештатным внешним воздействиям на него, к отдельным ошибочным действиям его операторов и к отказам отдельных видов его оборудования. Желательная устойчивость определяется его основными технологическими и конструктивными свойствами. Чтобы не погрузиться в данный слишком сложный вопрос, специфический для каждого объекта, ограничимся парой примеров. Ясно, что самолёт не должен срываться в штопор от неверного вздрагивания руки на штурвале. Атомный котёл не должен переходить в неуправляемое состояние из-за резкого изменения нагрузки. Энергосистема не должна терять собственную устойчивость работы из-за отключения любого даже важного её элемента. И тому подобное.

Если объект создан в этом смысле правильно, то, надо полагать, достижима практически полная безаварийность такого объекта (пусть сверхответственного, опасного) даже вопреки его большой сложности. Для этого на такого рода объекте должна быть создана разносторонняя система мероприятий против аварий, настолько технически совершенная и надёжная, что она сделает практически невозможной перерастание неизбежной неприятности в серьёзную аварию. Такая система включает:

- высокую надёжность составляющих её элементов,
- тщательность строительства, монтажа и наладки,
- систему противоаварийных мероприятий, выстроенную эшелонировано, с тем чтобы авария, не остановленная предыдущим, более мягко действующим эшелоном мероприятий, была остановлена следующим, более жёстким,
- высокое совершенство и надёжность системы управления, особенно – противоаварийной автоматики,
- эффективный контроль исправности и резервирование всех устройств и систем, обеспечивающих жизнедеятельность объекта, если требуется, – многократное резервирование,
- грамотную, чётко формализованную, дисциплинированную и контролируемую эксплуатацию объекта.

Напомним, на случай серьёзной аварии, на случай угрозы для общества со стороны объекта должны быть созданы все необходимые предпосылки и предусмотрены все необходимые меры для того, чтобы сохранить в неприкосновенности наиболее ценную или опасную часть объекта. Во многих случаях основа стратегии состоит в том, чтобы решительно отделить эту важнейшую часть от всего остального, может быть – тоже важного, но которым допустимо пожертвовать в условиях крайней опасности.

Создание и функционирование такой системы – дело сложное и дорогое, но если она не создана, опасный объект не имеет права существовать.

За примером эшелонированности, к счастью, не нужно идти дальше той отрасли техники, которой я всю жизнь занимаюсь. А именно – борьбы с авариями в больших энергосистемах. Но, прежде чем привести пример, требуется сделать небольшое отступление о сути опасностей в энергосистеме.

Отступление об опасностях в энергосистеме

Энергосистемой называют совокупность электростанций и потребителей электроэнергии, объединённых общей электрической сетью с помощью *линий электропередачи* и *трансформаторов*, повышающих или понижающих напряжение переменного тока.

С самого начала основные линии выполнялись не на том напряжении, на котором электроэнергия производится генераторами, и не на том, на котором она приходит к потребителям, а на значительно более высоком напряжении (сначала – до 35, теперь – до 750 кВ). При большем напряжении для передачи нужной мощности требуется меньший уровень тока, протекающего по длинным проводам линий, и это снижает потери напряжения и мощности, создаваемые протеканием тока. Связь между генераторами и линиями электропередачи выполняется на электростанциях с помощью трансформаторов, повышающих напряжение. Эти линии доводят электроэнергию до подстанций, имеющих трансформаторы, понижающие напряжение до уровня, нужного для питания потребителей.

Если не транспортируемые энергоресурсы (сначала – вода, теперь – ещё и ветер, солнце) располагаются вдалеке от потребителей электроэнергии, то может оказаться необходимой её передача на довольно значительное расстояние (сначала до десятков километров, теперь – до нескольких сотен). Такая потребность возникает и при использовании угля: чтобы не перевозить его на дальнейшее расстояние к месту кон-

центрации потребителей электроэнергии, электростанцию располагают рядом с местом добычи угля и от неё передают электроэнергию к потребителям.

Пока энергосистема находится в стабильном состоянии, роторы всех её генераторов вращаются синхронно с той скоростью, которая с высокой точностью обеспечивает нормальную частоту изменения переменного тока. Эта частота – 50 Гц (в Европе) и 60 Гц (в Северной Америке). Под синхронностью вращения роторов понимается то, что не только скорости их вращения одинаковы, но и, говоря строже, – вращающиеся магнитные полюса каждого из этих роторов сдвинуты друг относительно друга на неизменный угол. Это чудо согласованного вращения многотонных роторов многих генераторов в энергосистеме называют *синхронной работой* или *параллельной работой* генераторов. Она поддерживается *обменом мощностью* между генераторами через сеть линий электропередачи.

Пропускная способность любых линий электропередачи ограничена, и чем больше расстояние, на которое требуется передать электроэнергию из отправной части энергосистемы в приёмную, тем при прочих равных условиях она меньше. Пропускная способность сети может быть совсем малой (например 5%) по сравнению с мощностью ею соединяемых групп генераторов и их потребителей.

Из-за *аварийного отключения* какого-либо из элементов или нескольких элементов, участвующих в электропередаче: линии, трансформатора и т.п., пропускная способность может существенно уменьшиться и стать гораздо меньше, чем требуется для передачи мощности, протекавшей по сети до этого момента.

Чаще всего потеря за короткое время многих элементов бывает вызвана не вполне удачным отключением повреждённого элемента, несколькими ударами молнии или последовательной термической перегрузкой и отключением элементов сети.

Другая опасность – *повышение мощности*, передаваемой по сети. Оно происходит или резко, являясь следствием возникновения аварийного отключения части генераторов или потребителей мощности в одной из частей энергосистемы, или нарастает постепенно из-за того, что обычное изменение потребления мощности недостаточно контролируется предназначенными для этого системами автоматики и операторами.

Несоответствие пропускной способности сети требованию передать по ней должную мощность приводит к тому, что разные части

энергосистемы вместо одинаковой частоты переменного тока приобретают разные частоты, т.е. *параллельная работа* этих частей нарушается. Наступает опаснейший процесс, так называемый *асинхронный ход* тех двух групп генераторов, которые работают в разных частях энергосистемы.

С физической сущностью аварийных процессов в энергосистемах можно познакомиться в простейшем изложении в [1]. Здесь ограничимся лишь беглым описанием. Ослабление сети немедленно уменьшает мощность, отдаваемую генераторами от правой части, и ведёт тем самым к нарушению там баланса мощности: механическая мощность турбин, вращающая валы генераторов, теперь превышает электрическую мощность, отдаваемую генераторами в сеть, поэтому вращение этих валов ускоряется. В приёмной части энергосистемы, наоборот, не хватает части мощности, поступающей извне до отключения; для снабжения своих потребителей генераторы вынуждены отдавать в сеть больше мощности, чем поступает к ним от их турбин, и вращение их валов замедляется. Так генераторы в двух частях энергосистемы приобретают разные скорости вращения: в одной – больше исходной скорости, в другой – меньше.

После момента, когда на оборудовании электропередачи возникает *короткое замыкание* (КЗ), проходит некоторое время (от одной десятой секунды до нескольких секунд), пока это КЗ выявляется так называемой *релейной защитой* и повреждённый элемент по её команде отключается высоковольтными выключателями. В течение этого времени пропускная способность электропередачи становится совсем низкой, чуть ли не исчезает совсем, и процесс становится ещё более опасным.

Если баланс мощности на валах тем или иным способом достаточно быстро не восстанавливается, то синхронная параллельная работа прекращается, и наступает асинхронное вращение, упомянутый асинхронный ход групп генераторов.

Представим себе, что в отправной части энергосистемы частота переменного тока от 50 Гц поднялась до 51 Гц, а в приёмной опустилась до 49 Гц. Это значит, что генераторы этих частей, вращаясь приблизительно одинаково, тем не менее за каждую секунду два раза полностью проворачиваются друг относительно друга. Из-за этого направление передаваемой мощности два раза изменяется с исходного на противоположное ему, и в среднем она вообще не передаётся. В отношении небалансов мощности, возникших в каждой из двух частей энергосистемы, это состояние мало отличается от того, как если бы электрическая связь между ними совсем разорвалась: в отправной части частота повысится, в приёмной – понизится. Вероятно, там понизится и напряжение, причём то и другое может понизиться в недопустимой степени.

Заметим попутно, что состояние асинхронного хода ещё хуже, чем полный разрыв электрической связи между частями энергосистемы. Так, в указанном примере в течение одной секунды ток в линиях электропередачи два раза почти полностью исчезает и поднимается до недопустимо большого уровня, а напряжение в окрестности электропередачи два раза недопустимо уменьшается, причём в её средней части – полностью.

Понятно, что описанные состояния энергосистемы чреваты неисчислимыми крайне опасными последствиями как для потребителей энергосистемы, так и для её собственного оборудования.

Пример эшелонированной противоаварийной системы

Не вдаваясь в излишние здесь подробности, попробуем обрисовать противоаварийную систему, характерную для энергосистем (о развитии этой системы во времени и о её создателях рассказано в следующей главе). Сразу нужно заметить, что я далёк от мысли продемонстрировать эту систему в качестве идеальной или единственно возможной; она лишь в редких энергосистемах реализована полном объёме, и, даже где-то будучи реализованной, может оказаться недостаточно эффективной, а причин для этого – много.

Любой элемент энергосистемы непременно оснащается *релейной защитой от коротких замыканий* (сокращённо – КЗ) в нем. *Назначение релейной защиты – выявить возникновение КЗ и быстро подействовать на отключение высоковольтными выключателями именно повреждённого элемента энергосистемы* [3,4 и 5]. Этим она препятствует дальнейшему разрушению оборудования и нарушению функционирования энергосистемы. В простом случае на элементе энергосистемы устанавливается одно устройство релейной защиты, на крупном оборудовании – несколько разнотипных резервирующих друг друга устройств.

Устройство содержит измерительные и логические элементы, в числе последних – элементы, которые отсчитывают время, прошедшее после какого-то события, и сравнивают это время с заданным значением.

Эти цели достигаются и в условиях отказа отдельных составляющих защиты или высоковольтных выключателей, на отключение которых она действует, и это обеспечивается широко применённым в ней резервированием. Резервирующие устройства имеют другой принцип действия по сравнению с основными устройствами, действующими быстро, большинство из них отключает не только повреждённый элемент, но и соседние, и в этом случае их действие наступает только вследствие неуспешного действия основных устройств.

Таким образом, релейная защита снижает интенсивность наиболее частых аварийных возмущений – КЗ. Всё это характеризует релейную защиту как эшелонированную систему.

После отключения повреждённого элемента ещё не все потеряно. В расчёте на то, что короткое замыкание устранилось (как это бывает, если оно вызвано ударом молнии), устройства *автоматического повторного включения* делают попытку быстро включить этот элемент

снова в работу. И в большинстве случаев цель достигается. А если потребители потеряли источник питания, но имеется ещё какой-то, то устройства *автоматического включения резерва* включают это резервное питание.

Если авария развивается дальше, то вступает в действие собственно *противоаварийная автоматика* в узком смысле этого термина, вернее – последовательно вступают в действие её отдельные подсистемы, предназначенные для разных ситуаций развития аварии и для разных её этапов.

В современном понимании, *цель противоаварийной автоматики – сохранить максимум источников электроэнергии из ещё оставшихся в процессе аварии, чтобы питать соответствующее этим источникам количество тоже оставшихся потребителей, особенно наиболее ответственных из них.* К числу таких потребителей относятся в первую очередь электрические двигатели самих электростанций, без которых выработка электроэнергии невозможна; на электростанции они потребляют до 10% её мощности. По крайней мере, *необходимо сохранить максимум источников электроэнергии в состоянии готовности к полному их восстановлению.*

Конечно, в каждой аварийной ситуации указанная цель должна достигаться с применением минимума управляющих воздействий, поскольку сами по себе они убыточны и, подобно хирургическому вмешательству, в какой-то степени опасны.

В большой энергосистеме количество возможных аварийных возмущений и путей развития аварии бесконечно, но их все-таки удаётся классифицировать и для каждого из выделенных немногочисленных видов ситуаций создать свою подсистему автоматики, причём выстроить их эшелонировано. Кратко охарактеризуем эти подсистемы.

Для *сохранения параллельной работы* частей энергосистемы существует подсистема противоаварийной автоматики, довольно мягко воздействующая на энергосистему в сторону восстановления нарушенного соответствия между мощностью, подлежащей передаче по сети, и способностью сети пропустить эту мощность.

Воздействие осуществляется в двух направлениях. Первое – на изменение соотношения между мощностями турбин и нагрузки энергосистемы в её отправной или в приёмной части. Второе направление – воздействие на увеличение пропускной способности сети, чтобы она

стала достаточной для передачи требуемой мощности. Оба направления используются порознь или совместно. Первое из них сопряжено с перераспределением мощности в энергосистеме, с изменением частоты и напряжения в гораздо большей мере, чем второе, которое в этом отношении более предпочтительно. Но энергосистемы редко обладают оборудованием для него, и приходится, в основном, применять воздействия по менее желательному первому направлению.

Перераспределение мощности в энергосистеме достигается, в основном, уменьшением мощности, производимой электростанциями, или уменьшением мощности, забираемой от энергосистемы потребителями. Для последнего имеется три способа.

Первый из них – *аварийное отключение потребителей*, которое производится оператором энергосистемы или, более быстро, её автоматикой. Имеется в виду отключение части потребителей, чтобы спасти остальную часть, обычно гораздо большую.

Отключение потребителей стараются выполнять в очерёдности, согласно которой первые места в очереди занимают потребители, наиболее легко переносящие временное отключение от сети. При соблюдении такой очерёдности аварийный удельный ущерб увеличивается с увеличением той доли, которую мощность отключаемых потребителей составляет в общей их мощности. Однако, реальная очерёдность не может не отличаться от оптимальной, и это увеличивает ущерб.

Два других способа – снижение частоты во всех работающих на одной частоте частях энергосистемы или снижение напряжения в каком-то узле энергосистемы. Этим достигается следующее: снижение частоты или напряжения на 1% уменьшает потребляемую мощность приблизительно на $0,5 \div 2,0\%$ – в зависимости от вида потребителей.

Конечно, снижение указанных главных параметров электроэнергии ущербно для потребителей: двигатели вращаются медленнее, их производительность падает. Оба способа неприятны и помимо ущерба для потребителей. Так, снижение частоты, естественно, выполняется одновременно во всех работающих на одной частоте частях энергосистемы, где нужно и где не нужно, т.е. это воздействие недостаточно адресно.

Уменьшение вращающей способности части двигателей ведёт к тому, что они затормаживаются, и при неблагоприятном состоянии энергосистемы это угрожает их полной остановкой. Чем ближе двигатель к остановке, тем больший ток он потребляет, а это понижает напряжение в сети. Возникает дурное кольцо причин и следствий: понижено напряжение, затормаживание двигателей, увеличение потребляемого тока, ещё сильнее пониженное напряжение... Этот процесс опасен приближением к так называемой лавине напряжения.

Подсистема, предназначенная для сохранения параллельной работы, не может охватить все разнообразие аварийных возмущений в разнообразных условиях работы энергосистемы, поэтому нельзя исключить того, что отдельные части энергосистемы приобретут разные частоты и возникает асинхронный ход её частей. На этот случай создаётся подсистема, состоящая из основных и резервных устройств и

действующая более жёстко – в основном, на возможно более быстрое разделение асинхронно работающих частей энергосистемы путём отключения электрической связи между ними, той самой связи, параллельную работу по которой автоматика предыдущего эшелона пыталась, но не сумела сохранить.

Разделение энергосистемы на части может произойти и не в результате асинхронного хода, а просто вследствие повреждения и последующего отключения всех элементов, связывающих эти части.

Если в сечении, по которому разделилась энергосистема, до этого протекала большая мощность, то разделение приводит в одной части к избытку производимой мощности и опасному повышению частоты, а в другой части к обычно ещё более опасному дефициту производимой мощности и *понижению частоты*. Последнее может дойти до так называемой *лавины частоты*, в результате которой останавливаются двигатели на электростанциях и, следовательно, сами электростанции, – наступает *коллапс* энергосистемы. Чтобы такого рода процессы остановить, энергосистема оборудуется многочисленными устройствами, по мере изменения частоты последовательно отключающими лишние генераторы или лишних потребителей – в зависимости от того, повысилась ли или понизилась частота.

Другая опасность – *недопустимое понижение напряжения*. Оно может произойти вследствие возникновения аварийного дефицита мощности в части энергосистемы или длительно не отключённого короткого замыкания.

Ещё одна причина понижения напряжения – недопустимый перегрев отдельного элемента энергосистемы, высоковольтной линии или трансформатора, так называемая *термическая неустойчивость*. Она возникает из-за протекания по элементу недопустимо большого тока и, если не приняты меры к достаточно быстрой разгрузке этого элемента, приводит к его отключению. Потеря элемента заставляет протекавшую по нему мощность распределиться по другим элементам сети и тем самым увеличить их загрузку током вплоть до опять-таки недопустимых значений. В результате может возникнуть последовательное отключение перегружаемых элементов. Каждое отключение, увеличивая загрузку других элементов, увеличивает потери напряжения в них и понижает напряжение в сети.

Понижение напряжения в сети может привести к полной остановке асинхронных двигателей как потребителей электроэнергии, так и, что особенно опасно, тепловых электростанций. Последнее ещё больше понижает напряжение, происходит *лавина напряжения*. Последовательно происходящее отключение линий электропередачи и электростанций грозит полным прекращением электроснабжения во всей той части энергосистемы, которая имеет хорошо развитую, плотную электрическую сеть, *коллапсом* этой части.

Во избежание *коллапса* в большинстве энергосистем применяются разнообразные автоматические устройства, которые в ответ на приближение частоты или напряжения к недопустимому уровню почти всегда действуют на отключение части потребителей электроэнергии. В одних случаях это выполнялось немедленно, в других – через интервал времени вплоть до нескольких десятков секунд. Тем самым баланс между генерируемой и потребляемой в энергосистеме мощностями восстанавливается, и наиболее ответственные потребители, в том числе и двигатели, обслуживающие электростанции, не теряют питание.

Если это не помогает и частота или напряжение в сети продолжает угрожающе понижаться, автоматика действует более радикально – на отделение от дефектной энергосистемы наиболее важных электростанций или их отдельных генераторов, питающих по возможности наиболее важных потребителей соответствующей мощности.

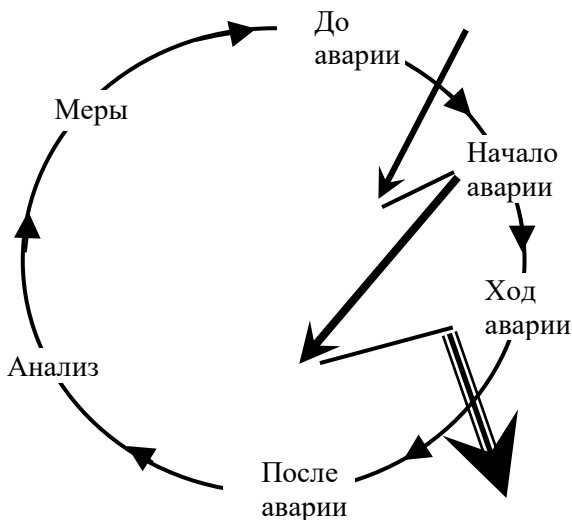
Любая из упомянутых опасностей может перерасти в другое, ещё более опасное явление, распространиться в том или ином виде на другие части энергосистемы и в конечном итоге привести её к катастрофе. Часть из этих опасностей имеет локальный характер (например – опасное для оборудования повышение напряжения), другая часть затрагивает основы функционирования энергосистемы, возможность её работы целиком или её значительной части.

Нельзя, конечно, забывать, что параллельно с релейной защитой и противоаварийной автоматикой в энергосистеме действуют многочисленные устройства автоматики, постоянно регулирующие частоту, мощность и напряжение.

Изложенное относительно энергосистемы и её противоаварийной техники показывает, насколько сложными могут быть современные технические системы, от которых зависит благополучие человека, и, с другой стороны, насколько они хрупки и нуждаются в целой системе сложных (и, заметим, дорогих) противоаварийных мероприятий.

Не трудно видеть, что прогресс техники открывает ранее не существовавшие пути для возникновения больших аварий и что он же, к счастью, создаёт новые возможности противодействовать им. А то, насколько полно мы ими воспользуемся, целиком зависит от нас. В связи с этим вспомним удивительное достижение человечества – недавние дерзновенно выполненные трудные и дорогие космические проекты. Имеется в виду, в частности, доставка исследовательского робота на Марс. Не иначе как чудом кажется, что в ходе доставки удалась вся длинная последовательность сложнейших манипуляций. Но это чудо сотворили люди!

Наконец, обратимся к кольцу событий и действий, которое изображено на обложке книги [1].



Изображено именно кольцо, но автор всё ещё оптимистически уверен, что это – не замкнутое кольцо, мы не обречены бесконечно брести по одному несчастному кругу, наталкиваясь на пути на всё новые аварии. Напротив, это – один из повторяющихся витков спирали, устремлённой туда, где дуга анализа и мероприятий станет все больше сжимать дугу аварийных событий.

Глава 6 **Очерк** **противоаварийной техники** **в энергосистемах**

До конца 1950-х годов развитие противоаварийной техники происходило довольно медленно, оно известно мне лишь по литературным источникам и рассказам старших коллег, а более поздние события происходили на моих глазах. То, что я увидел, представлено ниже, и, конечно, эти собственные наблюдения, не исчерпывают темы, неизбежно односторонни. Уверен, другие авторы раскроют другие стороны событий, и картина дополнится.

По мере сил я пытался осмыслить увиденное и донести до читателя то, что, в связи с фактами, мне кажется понятным. Ведь история – это не мозаика фактов, но картина, в которую эти факты включены.

Необходимо предупредить читателя о возможных в данном разделе ошибках, особенно касающихся имён и отдалённых дат. Отсутствие под рукой ряда документов объясняет это, но не избавляет от потребности заранее попросить прощения у всех, кто заметит недостатки текста и, к сожалению, нельзя исключить, будет справедливо не удовлетворён.

Возникновение проблемы относится к концу 1920-х годов, когда в промышленно развитых странах стали объединять электростанции общей электрической сетью переменного тока, чтобы их генераторы, резервируя друг друга, все вместе экономично снабжали электроэнергией подключённых к этой сети потребителей.

Релейная защита

Реле

Оборудование стали защищать от коротких замыканий (КЗ), как только возникло электроснабжение, – сначала предохранителями в виде плавких вставок, а затем стали необходимыми релейные устройства, всё более сложные, воздействующие на отключение сначала низковольтных автоматов, а потом, по мере освоения более высоких напряжений – на высоковольтные выключатели. Появился термин *релейная защита*, уже упоминавшийся в предыдущей главе.

Ещё лет 30 назад, пока микропроцессоры широко не применялись, практически все основные элементы релейной защиты были электро-механическими реле [3].

Такое реле имеет сердечник из стальных пластин, на который насажены катушки проводов, в каждую из которых подаётся ток, пропорциональный измеряемому току и/или напряжению в высоковольтной сети. Сердечник охватывает якорь (пластина или цилиндр из металла), несущий контактную перемычку и имеющий вместе с ней некоторую свободу перемещения. При определённом соотношении токов в обмотках и силы пружины, противодействующей движению якоря, он поворачивается, и перемычка создаёт мост для протекания тока между неподвижными контактами реле. Реле, как говорится, «срабатывает». Оно может иметь не один контакт, а несколько, и не замыкать их при срабатывании, а размыкать.

Теперь в релейную защиту широко вошли микропроцессоры и вычислительная техника, но название защиты не изменилось, тем более что для связи устройств друг с другом на их выходах очень часто устанавливают именно реле с контактами.

Воздерживаясь от суждения о первоначальных этапах развития релейной защиты, когда в стране применялись в основном заграничные устройства или их копии, сосредоточимся на её послевоенном развитии.

Центральная фигура

Развитие релейной защиты решающим образом связано с Алексеем Михайловичем Федосеевым. Его научная [4], образовательная [5], инженерная и координирующая деятельность классификатора и систематизатора сыграла исключительную роль в превращении казалось бы локальной технической проблемы в признанную в стране научно-техническую отрасль. Конечно, этому во многом способствовал целый

ряд талантливых специалистов, работавших под его руководством, рядом с ним и в других организациях.

Автор увидел его впервые осенью 1953 года. Казавшийся пожилым профессор довольно крупного сложения с хорошо поставленной коротко стриженной головой начал первую лекцию по релейной защите для очередных двух групп студентов, которые специализировались в этой области на электроэнергетическом факультете Московского энергетического института – МЭИ. Читал он медленно, выговаривая баритоном слова ясно, фразы строил несколько старомодно. Иногда проглядывало ироническое отношение к излагаемому, то ли из-за необходимости представить проблему слишком упрощено, то ли от скуки повторять одно и то же в который раз. Не надеясь на способность студентов правильно конспектировать, он чуть ли не всё произнесённое аккуратно выписывал на доске, и студенты успевали это переписать в свои тетради.

О более поздних личных коллизиях, связанных с Федосеевым, уже рассказано в главе 6 первой части.

Отдел противоаварийной техники

Параллельно с заведыванием кафедрой в МЭИ Федосеев руководил отделом в институте «Теплоэлектропроект» (этот отдел имел разные многословные названия, которые здесь нет смысла воспроизводить; он представлен в [6]). Хотя прямая обязанность этого института состояла в проектировании тепловых электростанций, он, кроме того, разрабатывал энергосистемы и проектировал линии электропередачи для них. В этих сложно переплетённых трудах отдел Федосеева играл существеннейшую роль. Он, прежде всего, выполнял проекты релейной защиты для строящихся электрических сетей, но сверх того вёл необходимые для этого исследования, разрабатывал новые устройства релейной защиты и методы расчёта переходных процессов в энергосистемах, разрабатывал устройства, моделирующие эти процессы, и вёл практические расчёты с помощью этих устройств. Для этих работ Федосеев собрал на редкость квалифицированных инженеров, исследователей и мастеров, механиков и электриков. Работать в отделе Федосеева считалось делом не только трудным, но и почтенным, к нему устраивали своих детей значительные энергетики, и они поддерживали отдел своим влиянием.

Осмелюсь ограничиться упоминанием лишь сотрудников отдела, самых известных в энергетике как своими практическими работами, так и научными трудами. Виктор Михайлович Ермоленко руководил проектированием релейной защиты для наиболее сложных отечественных и зарубежных объектов; именно он взял в отдел под своё

начало автора данного текста. Вениамин Львович Фабрикант руководил разработкой новых устройств релейной защиты. Приблизительно в 1961 году он уехал в Ригу и основал там в Политехническом институте очень творческую и продуктивную школу релейной защиты. Абрам Борисович Чернин разрабатывал методы расчёта токов КЗ в сложных электрических сетях и руководил стандартизацией проектных решений по релейной защите. Методические материалы и сборники стандартизированных чертежей релейной защиты, разработанные его группой, использовались по всей стране. Дмитрий Иванович Азарьев руководил расчётами переходных процессов в энергосистемах и создал для этой цели целый ряд «расчётных столов», в которых элементы энергосистемы моделировались различными сопротивлениями и источниками напряжения. Благодаря его необыкновенной настойчивости эти столы выпускались заводом, и до появления приемлемых программ для ЭВМ они являлись незаменимым инструментом для практически всех энергетических организаций. В расчётной работе он опирался на Ханун Осиповича Орлова, а исследовательскую работу в области генераторов вёл Натан Львович Поляк.

В свой наиболее продуктивный период (1950-е годы) отдел помещался на Китайском проезде в тесном полуподвале здания Министерства, ведающего электроэнергетикой. Главные специалисты отдела легко добивались до чиновников, а те не пренебрегали зайти в полуподвал, чтобы посоветоваться, починить какой-нибудь свой прибор или принять участие в праздновании (с поздравлениями, обильным питьём, нелепыми беседами, симпатиями, антипатиями и танцами). В таких случаях Федосеева можно было увидеть выпивающим с мастерами отдела. Они ценились не только за свои умные руки, но и за принадлежность к правящей тогда партии. Изначально целью этой партии была «диктатура рабочего класса», но и позднее, когда некая диктатура была уже достигнута, верхушка партии считала своей главной опорой именно рабочих. Их и приглашали в партию, приглашали в отличие от инженеров и учёных, приём которых квотировался, и почти все они, как и руководитель отдела, были беспартийными.

В целом, сотрудники отдела вели жизнь, полную не только сложными профессиональными делами, но и за долгие годы совместной работы напряжённо переплетённую эмоционально.

В некоторых отношениях показательна следующая сцена. В своём кабинете Федосеев выслушивает бесполезные жалобы Ермоленко и мои на недостаточную поддержку нашей работы расчётами Азарьева. Вдруг стремительно входит начальник технического отдела института Р. Не отходя от двери, он говорит, что у него освободилась должность начальника электротехнического сектора и он хочет узнать мнение Федосеева относительно приглашения на эту должность федосеевского сотрудника М. Этот М. в лаборатории отдела разрабатывает отдельные узлы аппаратуры защиты. Ради

подъёма оклада до уровня, соответствующего стажу, он имеет должность руководителя группы, хотя руководил людьми разве что по незначительным партийным делам. Свой вопрос Р. излагает как само собой разумеющийся, а речь идёт, в сущности, о назначении М. не кем-нибудь, а главным электриком института. Все присутствующие понимают, что ни сам технический отдел института, ни его главный электрик не занимаются координацией отдела Федосеева, не имеют к нему отношения, так как он в рамках своей тематики сам выполняет функции технического отдела. Вероятно, и поэтому Федосеев в обсуждение не вступает, как будто ждёт продолжения, стул, впрочем, не предлагая. Тогда Р. добавляет, что М. – неплохой парень, и задаёт прямой вопрос о мнении Федосеева. Опять пауза, и протяжно-задумчиво произносится: «Можно». Видимо, Р. хочет получить нечто более одобрительное или хотя бы сожаление отдела о предстоящем расставании с М. и напористо ставит вопрос снова, так как же, мол. И в ответ получает в точности то же единственное слово. Он делает третий заход, и снова, в третий раз, произносится одно лаконичное «можно». Оторопевший Р. скороговоркой произносит, что удовлетворён, считает вопрос согласованным, и с тем исчезает. При мне ни слова не было сказано о происшедшем, просто вернулись к прерванному разговору. А этот М. вскоре занял предложенную ему должность, и видно было, что он честно старался дотянуться до уровня своего нового положения.

Отдел Федосеева был тесно связан с Московским энергетическим институтом (МЭИ). Это совмещение («совместительство») не только давало специалистам отдела дополнительный заработок, но и стимулировало их и их сотрудников уважать научные достижения и стремиться к большей систематичности. Взамен сотрудники кафедры Федосеева получали живой доступ к актуальным задачам и к их решению. Например, один из курсовых проектов по релейной защите разрабатывался автором под руководством Федосеева, другой – под руководством Ермоленко, а дипломный проект – под руководством Фабриканта.

Федосеев создал замечательный отдел, привлёк в него прекрасных специалистов, провёл его через многие бури, но клянчить в отделе кадров повышение зарплаты для сотрудников было ему не с руки, он слишком велик был для этого и ростом, и осанкой, и помыслами. Призванный заведовать административными делами, его пожилой партийный заместитель Михаил Андреевич Королев был человеком с принципами из другого времени, чуть ли не из военного коммунизма. Ему самому материальная сторона работы была чужда, а что сотрудникам, кроме удовольствия работать с его кумиром Федосеевым, нужно ещё что-то для существования, он и вовсе, видимо, не понимал.

В середине 1960-х годов дела повернулись в плохую сторону: сверху приказали прекратить совместительство – видимо, из интересов борьбы с излишними заработками одних и отсутствием работы для других. Специалисты принуждены были выбирать между отделом и кафедрой. Федосеев оставил за собой кафедру и с тех пор руководил

отделом «на общественных началах», т.е. бесплатно, а Ермоленко и Чернин, наоборот, покинули места доцентов на кафедре. И то и другое нанесло вред делу. С тех пор к преподаванию на кафедре стали приходиться вчерашние студенты, едва успевшие изготовить свои ученические диссертации под руководством позавчерашних студентов, как и они далёких от реальных задач энергетики.

Приходилось видеть много таких диссертаций; позднее эту псевдонаучную пену пышно украсили компилятивные диссертации больших чиновников, а затем учёными степенями и званиями обзавелись ещё и успешные предприниматели и политики.

Ложное положение Федосеева в институте и в отделе не могло продолжаться долго. Постепенный уход его от руководства был, с одной стороны, большим ударом для отдела, а с другой – как ни странно, сиюминутным выигрышем. Руководить отделом поручили его двум беспартийным сотрудницам: Зинаиде Игнатьевне Якушкиной вместе с Алевтиной Александровной Рудман. Они по-матерински заботилась о развитии отдела, об его людях, об их зарплате, но авторитетное руководство развитием дела было утрачено. В дальнейшем появление моды неперемного партийного контроля за всеми ячейками не только общественной, это было и раньше, но и производственной жизни привело к замене беспартийного женского руководства отделом партийным мужским. Поскольку цель замены была не связана с делом, делу это не помогло, скорее наоборот.

Публичные обсуждения

Появление в стране полупроводниковой и затем микропроцессорной техники открыло многообещающие возможности совершенствования релейной защиты. Для многих исследователей и разработчиков устройств было крайне важно, что теперь их работа гораздо менее, чем раньше, была связана с мало кому доступным конструированием механической части аппарата. Скоро, кстати, стало очевидным, что эта не связанность относится только к стадии исследования, а не разработки, когда довлеют вопросы компоновки, защиты от электрических и магнитных помех т.п.

Обилие новых исследований и разработок породило потребность в каком-то механизме сравнения и отбора наиболее перспективных предложений. Ответ нашёл Федосеев: он образовал для этой цели комиссию под эгидой Комитета по науке. Она рассмотрела великое

множество работ, и, надо сказать, тщательно подготавливаемые Федосеевым обсуждения проходили на хорошем профессиональном уровне, публично, живо и непредвзято. Значимость комиссии была велика, её решения исполнялись практически всеми заинтересованными специалистами, институтами и производством.

Начало забот о параллельной работе генераторов

К концу 1920-х годов часто возникающие и медленно отключаемые КЗ (тогда – за несколько секунд; теперь это время уменьшено до 0,1 с) стали раздражающе прерывать чудо параллельной работы генераторов. Наблюдение за такого рода процессами и их последствиями стимулировало теоретические и практические работы по противодействию им. Ответом в начале 1930-х годов явились серьёзные исследования аварийных переходных процессов в энергосистеме. Практически одновременно Р.Н. Рагг и Е.Н. Ванкер в США и А.А. Горев (Ленинградский политехнический институт) в СССР описали эти процессы на двух уровнях: вполне удовлетворительно – большой системой дифференциальных уравнений и ориентировочно – простой алгебраической аппроксимацией.

Было понято, что нарушению параллельной работы можно противодействовать. Так, Р.И. Майер (Всесоюзный электротехнический институт – ВЭИ, Москва) опубликовал статью [7], в которой показал, что для этой цели можно использовать разгрузку тепловых турбин электростанции, выполняемую быстро вслед за возникновением КЗ. Удивительно, что он не только показал эффективность такого управления турбинами, но и понял его ограниченность в определённых условиях работы энергосистемы. Свои выводы он обосновал многочисленными расчётами переходных процессов в энергосистеме, а это требовало тогда громадного труда.

Теоретическая работа была подкреплена опытами в энергосистеме. В начале 30-х годов были выполнены первые эксперименты по быстрой разгрузке турбин тепловой электростанции Бобрики, передающей мощность в Москву с Юга (позднее – Сталиногорская, теперь – Новомосковская ГРЭС) [8]. Для этой цели была разработана необходимая аппаратура, в частности – реле, которое выявляло такое внезапное и резкое уменьшение электрической мощности, отдаваемой в сеть генератором, которое свойственно возникновению близкого КЗ в сети. Это

реле – видимо, первый аппарат, созданный специально для автоматики, позже названной противоаварийной. Конечно, он был изготовлен в одном экземпляре, максимум в двух.

Быстрая разгрузка турбины была сложной и ответственной задачей, связанной к тому же с нетрадиционным резким изменением её состояния, в чём-то для неё опасным. Да и окружающая обстановка не располагала к опасным тонкостям.

Более успешно выполнялось быстрое снижение мощности на гидравлических электростанциях (ГЭС). Для этого на ГЭС используется технологически довольно простое мероприятие – отключение части генераторов. Пример – верхневолжские ГЭС, созданные в конце 1930-х годов в связи с сооружением канала Москва-Волга и расположенные севернее Москвы. Там применялось отключение части генераторов в случаях аварийного ослабления электропередачи 220 кВ в сторону Москвы.

Энергосистемам часто не хватало энергоресурсов, нередко электростанции отключались в результате аварий, особенно в военное время. Это приводило к понижению частоты и напряжения в сети, недопустимому как для потребителей энергии, так и для двигателей, обслуживающих технологический процесс выработки электроэнергии (прежде всего – для так называемых питательных насосов, подающие воду в тепловые котлы). Отсюда и мероприятие – уже упомянутое в предыдущей главе автоматическое отключение части потребителей электроэнергии по мере понижении частоты. Со временем применение такого отключения стало повсеместным.

Несмотря на принимаемые противоаварийные меры, аварии не прекращались, и наконец, 18 декабря 1948 года произошла наиболее значимая авария – почти полная потеря электроснабжения Москвы. Авария началась с отключения линий 220 кВ, по которым передавалась городу значительная мощность от верхневолжских гидроэлектростанций, продолжилась потерей связей с тепловыми станциями, расположенными южнее Москвы, и завершилась остановкой почти всех городских электростанций. К счастью, одна из них (станция автомобильного завода) со своими немногочисленными потребителями своевременно отделилась от остальной сети. От этой станции удалось подать напряжение другим станциям для восстановления их работы. Эта авария сильно повлияла на дальнейшее развитие противоаварийной техники.

Обстановка

Обстановку того времени можно представить себе, заглянув в тот номер журнала, в котором напечатана упомянутая статья Майера. Он открывается статьёй от имени редакции, в которой бичуется вредительство в энергетике и самокритично признается слабая борьба с ним со стороны редакции. Согласно статье, вредительство выразилось в создании массы недостатков: частые отказы высоковольтных выключателей, слишком медленное отключение КЗ, низкое напряжение в сети и т.п. Самокритика считалась тогда общественным долгом и вместе с тем давала удобный материал для начала следствия об антисоветской деятельности, о вредительстве, в сущности, представляла собой самоднос. Судя по тому, что следующий номер журнала выпустил другой состав редакции, предпринятая прежней редакцией самокритика не спасла её. Недостатки же энергосистем были указаны в статье настолько верно, что часть из них жива и сейчас.

Нужно сказать, что в конце 1930-х годов для ареста достаточно было даже не доноса, а просто неблагоприятного упоминания. Такая ситуация возникла с моим отцом, она уже описана в первой части.

Возможны были и более мягкие меры. Инженер *К* центральной службы релейной защиты Московской энергосистемы проверял релейную защиту на электростанции, которая расположена почти напротив Кремля на другой стороне реки. И по какому-то несчастному обстоятельству он отключил кабель, питавший Кремль от этой электростанции. Свет там погас, через несколько секунд автоматически включилось резервное питание, и свет восстановился. Говорят, что как раз в это время Сталин беседовал там с каким-то важным гостем. Они это как-то пережили, а за *К* через 20 минут приехали с недалёкой Лубянки. Дали ему немного – год «принудительных работ»: он работал на прежнем месте, но с вычетом 20% зарплаты.

И наконец, пример другого рода из уже менее жёстких 1960-х годов. Руководитель службы релейной защиты и автоматики одной из энергосистем Сибири, так увлёкся, наставляя провинившихся подчинённых, что своей рукой вызвал замыкание контактов важного реле, оно дало команду на отключение линии 500 кВ, и это привело к серьёзной аварии [1, с. 100]. Вероятно, виновник получил административный или партийный выговор, всё это определённо повредило его здоровью, но через пару лет он работал на небольшой должности в министерстве, ведающем энергетикой страны [1, с. 105].

В расследовании упомянутой аварии в Москве «органы» участвовали, но она, насколько известно, не была приписана вредительству. И все равно она крепко запомнилась энергетикам. Память об авариях и об их тяжёлых последствиях и для энергетиков, и для причастных и не причастных дала результаты. Память стимулировала развитие методов анализа аварийных процессов и управления ими. Память вместе со страхом в течение ещё нескольких более мягких десятилетий была тем кнутом, который диктовал энергетикам страны скрупулёзное выполнение своих обязанностей (пример – в [1, с. 266]). Но был и пряник: каждому сотруднику, выполнявшему эксплуатационную работу, персонально давалась ежемесячная премия вплоть до 56% от оклада; она нарастала постепенно в течение года при условии отсутствия аварии по его вине, а в противном случае полностью снималась [1, с. 151].

Страх порождал у многих уклончивую осторожность. Часто можно было видеть склонность уйти от самостоятельного решения, от участия в полемике или от выпол-

нения ответственной работы. Конечно, мир не без праведников, и встречались решительные специалисты, даже иногда – излишне решительные (примеры того и другого – в [1, с. 137-140]).

Моделирование энергосистемы

Проектирование энергосистем, включая проектирование релейной защиты и противоаварийной автоматики, и затем эксплуатация всего этого требуют проведения расчётов пропускной способности электрической сети и электромеханических переходных процессов. Пока не появились достаточно производительные ЭВМ и затем настольные компьютеры, эти расчёты выполнялись на уже упомянутых расчётных столах Азарьева, в которых элементы сети моделировались физическими аналогами, а расчёт переходного процесса во времени вёлся оператором «шаг за шагом» путём подрегулировки моделей всех генераторов и потребителей, представленных в сети. Естественно, на этих столах можно было выполнять лишь очень небольшое число расчётов, которое для ряда исследований и, например, для настройки противоаварийной автоматики было совершенно недостаточно.

Эти потребности вызвали поиск новых методов анализа аварийных процессов в энергосистемах. Ответом явилось в начале 1950-х годов создание в МЭИ под руководством Валентина Андреевича Веникова так называемой *динамической модели энергосистемы* [9]. Эта модель представляет статические элементы энергосистемы (линии, трансформаторы и т.п.) физически подобными им элементами, а динамические элементы (генераторы, двигатели) – вращающимися машинами. Их мощность в тысячи и даже в миллион раз меньше, чем моделируемых машин. Такого рода модель создаётся так, что процессы в ней протекают во времени так же, как в моделируемой энергосистеме, и поэтому она пригодна для взаимодействия с натуральной аппаратурой. Эта модель МЭИ содержала несколько вращающихся машин, их было достаточно для решения локальных исследовательских задач.

На самых первых этапах использования модели МЭИ были испытаны новые регуляторы возбуждения электрических генераторов, названные регуляторами сильного действия. Такие регуляторы, разработанные в ВЭИ под руководством Григория Рафаиловича Герценберга, с тех пор изготовлены промышленностью для многих крупных электростанций [10].

Затем для решения наиболее важных практических задач энергосистем СССР в Научно-исследовательском институте постоянного тока (НИИПТ, Ленинград) была создана гораздо более обширная динамическая модель. Схему энергосистемы и характеристики элементов можно было изменять применительно к объекту моделирования, но всё равно ремонт и настройка модели занимали каждый раз много времени и требовали много внимательного квалифицированного труда. Первая серия таких расчётов для противоаварийной автоматики была выполнена группой Льва Ананьевича Кощева для Братской гидроэлектростанции. Усилиями Евгения Андреевича Марченко, Кощева и их очень квалифицированных сотрудников эта модель к пику своего развития содержала несколько десятков генераторов, и на ней можно было исследовать сложнейшие процессы. Однако, в 1980-х годах стала образовываться всё более успешная альтернатива в виде расчётов на больших ЭВМ, а в 1990-х годах стало ясно, что эта модель не выдерживает конкуренции персональных компьютеров.

В мире создано не так много программных комплексов, с помощью которых хорошо, т.е. подробно, достоверно, быстро и удобно, моделируются различные переходные процессы в энергосистемах. Причина в том, что разработка такого комплекса требует длительного согласованного творческого труда большого коллектива специалистов разных уровней и умений. В СССР был выполнен целый ряд программных разработок подобного назначения, они использовались, но ни одна из них не удовлетворяла требованиям практики.

Видны две причины такого положения. Во-первых, эти разработки ориентировались на наличие у самих разработчиков и тем более у пользователей слишком слабых имеющихся в стране ЭВМ (больших и потом персональных), а сами разработчики не вполне владели передовыми методами создания больших программных комплексов. Во-вторых, разработки слишком убого финансировались. Вместо того, чтобы выделить на разработку серьёзные суммы на длительное время, ведающие средствами структуры недоверчиво дробили их между многими разработчиками, не связанными между собой, и каждому выдавали средства небольшими порциями, поэтапно. Создавалась иллюзия бдительного руководства наукой со стороны этих структур, но серьёзно развить работу в этой области нигде не могли. Надо сказать, подобный метод финансирования, насколько могу судить, применялся не только в программировании.

Подход к противоаварийной автоматике

Проект электропередачи к Москве от крупной ГЭС на Волге, чуть выше Самары, первой в мире электропередачи напряжением 400 кВ,

выполнил институт «Теплоэлектропроект» (точнее его Отделение дальних передач, главным инженером и идеологом которого был Сергей Сергеевич Рокотян). Этот проект предусматривал две параллельных линии длиной под 1000 км с тремя промежуточными переключательными пунктами, в которых эти линии соединялись. Были запроектированы и некоторые противоаварийные средства и устройства автоматического управления ими, но только те, которые казались самыми необходимыми для значительного улучшения параллельной работы гидростанции с приёмной энергосистемой. Выполнить их позже, в период эксплуатации, оказалось бы невозможным.

Так, на ГЭС было предусмотрено торможение роторов генераторов в случае их опасного ускорения при КЗ на электропередаче. Это должно было осуществляться автоматическим подключением на её шины нагрузки в виде специально изготовленных резисторов, создающих в течение нескольких десятых секунды импульс большого потребления мощности от генераторов (установка была смонтирована, но не доведена даже до испытаний). На среднем переключательном пункте электропередачи (под Арзамасом) были врезаны в электропередачу три параллельно работающие громадные батареи конденсаторов, которые компенсировали часть сопротивления длинных линий электропередачи. При аварийной надобности компенсация могла по команде автоматики форсироваться путём отключения одной из трёх батарей.

В дальнейшем широко применяемое отключение части работающих гидрогенераторов впервые было запроектировано для следующей ГЭС, передающей электроэнергию в Москву (теперь уже на напряжении 500 кВ), – для ГЭС под Волгоградом.

Роль диспетчерского управления

По мере возникновения нестандартных пусковых схем электропередач от упомянутых гидростанций, проведения испытаний и накопления разнообразного опыта эксплуатации выявлялись все новые требования к автоматике. В этом отношении значительнейший вклад в развитие дела внесли специалисты, осуществлявшие диспетчерское управление центральными энергосистемами СССР (ОДУ ЕЭС Центра).

Эта совсем небольшая организация занималась тогда только техническими вопросами, избегая организационных дел. Например, на создание её нового диспетчерского пункта на Раушской набережной ОДУ влияло отнюдь не непосредственно: этим ко-

мандовало Управление, занимавшееся финансированием строительства и эксплуатацией указанных выше электропередач (главный инженер этого Управления В.А. Вершков чуть не возложил на меня курирование работ по ОДУ). Начальник ОДУ Карюн Татевосович Нахапетян собрал инженеров очень высокой квалификации, выходцев, в основном, из Мосэнерго, и командовал ими, предоставляя им возможность по-многу работать и не шадя себя тоже. Это были: в службе электрических режимов Солomon Абрамович Совалов и Сергей Николаевич Баскаков, в службе релейной защиты и автоматики Николай Васильевич Чернобровов, Михаил Фёдорович Мельников, Абрам Бенционович Барзам, потом Михаил Арнольдович Беркович, в оперативной службе Василий Тихонович Калита. Работая после окончания института в упомянутом Управлении, автор данного текста многократно согласовывал с ними программы испытаний электропередачи от ГЭС под Самарой, видел уважительное отношение к нему – ещё мальчишке, и не мог не оценить высоко их эрудицию и ответственность.

Уважаемые всеми специалисты из ОДУ решительно привлекали внимание проектных и научных организаций, а также руководства министерства к необходимости развернуть работу в области противоаварийной автоматики, доказав на опыте её эффективность даже в простейшем исполнении.

Вступление проектного института

Немного раньше Федосеева и Ермоленко заставили заниматься автоматическим регулированием частоты в энергосистеме страны (об этом уже упомянуто при описании поступления автора в Теплоэлектропроект – глава 5 первой части). Надо сказать, вопросы регулирования частоты были несколько чужды Теплоэлектропроекту, так как частота в энергосистемах страны, как и сейчас, регулировалась исключительно гидростанциями, немногочисленными, но более приспособленными к быстрому изменению своей мощности. (Впрочем, авария 2009 года на Саяно-Шушенской ГЭС показала, что это верно не для любой ГЭС и не в любом её состоянии [1, с. 70-84].) Мои начальники Федосеев и Ермоленко не имели вкуса к этому делу, и поэтому моя небольшая группа занималась не только частотой, но и автоматикой, нужной в аварийных условиях, связанных с КЗ, что выглядело делом, значительно более реальным, чем регулирование частоты.

Едва убедились в ложности той системы регулирования частоты [1, с. 129-131], которая чуть не была принята в качестве единственной для страны, едва были сделаны наши первые работы по этой теме, как произошла существенная реорганизация энергетических проектных организаций: проектирование энергосистем и электрических сетей

было переведено из института «Теплоэлектропроект» в институт ВГПИиНИИ «Энергосетьпроект» [6], созданный Рокотяном в 1962 году специально для этой тематики. Отдел Федосеева тоже перевели в этот институт. Реорганизация затронула и проектирование регулирования частоты: оно было передано от нас в другой отдел нового института.

Благодаря реорганизации моя маленькая группа освободилась от регулирования частоты, но не осталась без дела. Ведь она занималась не только частотой, но и автоматикой, нужной в аварийных условиях. И это дело стало единственным занятием группы, она впервые в стране специализировалась только на противоаварийной автоматике.

Этот термин «противоаварийная автоматика» возник несколько впопыхах. Однажды Федосеев, тогда руководитель отдела, вызвал Ермоленко, тогда руководителя проектного сектора релейной защиты, и с ним меня. Ему нужно было в какой-то бумаге для начальства, которой он придавал большое значение, похвастаться тем, чем мы занимались, бытовавший же тогда термин «режимная автоматика» его смущал, видимо, своей близостью к лагерной тематике, тогда зловеще актуальной. Этого он, конечно, объяснять не стал, а попросил быстро придумать что-нибудь более приемлемое. Ермоленко отнёсся к этому прохладно, я же заинтересовался и предложил этот самый термин «противоаварийная автоматика», который уже где-то промелькнул у нас. Федосееву, естественно, такой корявый термин не понравился, но мы ничего более изящного придумать не могли, он тоже, да и некогда ему было. С тех пор так и говорят. Некоторое время после этого говорили ещё «противоаварийная режимная автоматика» (аббревиатура ПАРА), но это ещё более громоздко.

Трудности нового

Работа в новой области техники помимо научных и технических трудностей натолкнулась также на трудности организационные и финансовые. Эта техника требовала затрат, но была непривычной, казалась, да и теперь многим кажется не обязательной. В то время как относительно релейной защиты всем очевидно, что без неё нельзя включить под напряжение ни один элемент энергосистемы, аналогичное суждение о противоаварийной автоматике не может быть высказано столь же непререкаемо, ведь далеко не всякое повреждение ведёт к аварии.

Главное противоречие состоит в следующем: основные затраты на создание и эксплуатацию противоаварийной автоматики ложатся на энергосистему, а основной ущерб от аварии в энергосистеме, экономический и внеэкономический, терпят совсем другие – потребители электроэнергии. Этот ущерб расплывён по потребителям, он плохо, спорно описывается в денежном выражении и далеко не всегда предъясняется энергосистеме для возмещения убытка. Несмотря на общественное давление, энергосистема может воздерживаться от вложений в надёжность своей работы и, во всяком случае, стремится свести их к минимуму. Исключения составляют случаи, когда автоматика избавляет от серьёзных затрат на строительство основных сооружений или от экономически невыгодного ограничения величины передаваемой мощности. Именно такая ситуация возникла, например, на электропередачах в Москву от гидростанций на Волге и в США при передаче мощности от крупной атомной станции [11, с. 288-290].

Более подробно вопросы затрат, издержек и ущербов затронуты в главе 4.

В советское время ни о каких компенсациях ущерба даже речи не возникало, и для финансирования затрат на автоматику имелись только чисто бюрократические пути. Тогда они работали.

Во время очередной кампании Госстроя по пересмотру ценников на проектные работы Нормунд Евгеньевич Рибель (ближайший помощник Ермоленко, очень хорошо понимавший не только релейную защиту, но и чиновничьи дела) сказал мне несколько глумливо: «Дядя Боря, ты всё сидишь без денег, а почему бы тебе не создать, так сказать, постоянный источник? Давай рядом с ценником на релейную защиту сунем ещё и ценник на эту твою с Людочкой автоматику». Было придумано несколько не очень определённых наименований работ. Благодаря авторитету и обаянию Рибеля, этот ценник был защищён и утверждён в верхах. С тех пор появилось законное право и чуть ли не обязанность включать разделы по противоаварийной автоматике в документацию и сметы объектов электроэнергетики.

Дальше – больше: во время очередной кампании министерства по пересмотру «Правил устройства электроустановок» аналогичным образом был включён раздел о противоаварийной автоматике и туда. Это сделало обязательным её применение. Затем последовала разработка более подробных руководящих указаний и т.д.

Однако всё это вовсе не решило проблему финансирования автоматики (оплата оборудования, монтажа, наладки) не на строящемся объ-

екте, а, как обычно требуется, – на уже действующих объектах, соседних или даже удалённых от него на сотни километров. Для этого потребовался приказ министра: после долгих препирательств решили всё финансировать за счёт строительства нового объекта, явившегося причиной новой опасности. Этот приказ выполнялся со скрипом: средств на строительство электроэнергетических объектов с начала 1970 годов выделялось всё меньше.

И конечно, энергетическим предприятиям не расширили «штатных расписаний», и они не получили увеличения «фондов зарплаты». Поэтому их не могло обрадовать получение противоаварийных устройств, тем более если они не решали какую-либо насущную внутреннюю проблему, а не проблемы соседних станций и подстанций.

Наконец, энергетическим предприятиям неоткуда было взять специалистов по противоаварийной автоматике, целенаправленной системы подготовки таких специалистов нигде не было, её никак не могли заменить нескольких моих лекций в МЭИ и короткие курсы повышения квалификации.

Тем не менее, с тех пор разработка противоаварийной автоматики стала неотъемлемой частью проектной работы по наиболее крупным энергетическим объектам. Она велась сначала только в Москве. Но численность сотрудников в Москве была лимитирована; к тому же толковые и, вместе с тем, пригодные с точки зрения отдела кадров во все не стремились к пусть интересной, но сложной, требующей многолетней профессионализации и скромно оплачиваемой работе, которая предлагалась.

Большие трудности в подборе специалистов испытывали и другие подразделения института, где требовалось выполнять сложную работу. Последствия такого положения были видны и по составу руководства институтом, среди которого резко выделялся его главный инженер Рокотян. Напомню уже приведённый в [1, с. 219] характерный эпизод его работы как главного конструктора проектируемой тогда уникальной линии электропередачи постоянного тока из северного Казахстана в район Тамбова (протяжённость 2000 км, пропускная способность 6000 МВт, напряжение на его двух проводах относительно земли +750 и -750 кВ). Однажды его попросили рассудить выбор способа электроснабжения промежуточных пунктов связи на длинной трассе этой электропередачи. В его кабинете собралось человек 25 специалистов из разных организаций, были высказаны основные точки зрения; к сожалению, легкомысленное суждение высказал и я. Председатель задал один вопрос, на который получил ответ, затем поставил второй вопрос, который оказался настолько важным и притом неожиданным, что и без ответа на него стало ясно, как нужно поступить. После неловкой паузы председатель что-то проговорил нейтральное, и в смущении все быстро удалились.

Поэтому к проектированию пришлось привлечь десять наиболее сильных отделений института, обеспечивать их необходимыми материалами (включая стандарты чертежей) и многократно проводить для их сотрудников «курсы повышения квалификации».

С 1970 года московская группа выполняла различные работы, определяющие направление развития противоаварийной автоматики на перспективу лет пяти-десяти как для страны в целом, так и для каждого её региона. К работе для регионов обязательно привлекались отделения Энергосетьпроекта, и совместная работа способствовала профессионализации их сотрудников.

Заказ аппаратуры противоаварийной автоматики для подстанций вели отделения Энергосетьпроекта, а для тепловых, гидравлических и атомных станций – их генеральные проектировщики: институты «Теплоэлектропроект», «Гидропроект» и «Атомэлектропроект».

Период электромеханических реле

Первые проекты

Ко времени моего появления в секторе Ермоленко он уже был вынужден параллельно с релейной защитой проектировать для линий электропередачи 500 кВ Куйбышев – Москва и Волгоград – Москва некую специфическую автоматику. Она требовалась потому, что пропускная способность электропередачи не достигала заданных значений, высоковольтное оборудование не справлялось с перенапряжениями и возникали ситуации, опасные для энергосистем, связанных с электропередачами. Необходимые устройства автоматики разрабатывали попеременно Валентина Николаевна Красева, Мирра Марковна Богина и иногда выше упомянутый Рибель. В институте задачи ставили: со стороны пропускной способности электропередачи – Азарьев и в области борьбы с подъёмами напряжения, не допустимыми для оборудования, – Николай Николаевич Соколов и его правая рука Юрий Иосифович Лысков. Затем по мере того, как эти вопросы становились актуальными для эксплуатации, стал активно выдвигать задачи Савалов из диспетчерского управления, а в их решении участвовали Мельников, Чернобровов, Беркович. Основным методом разработки и корректировки противоаварийной автоматики для уже работающих линий была вполне коллегиальная, оживлённая, многоцикловая беседа этих исключительно квалифицированных специалистов.

В этих условиях Ермоленко сделал удивительно смелый шаг – решился не только разработать устройства автоматики, но и попытаться обосновать проект противоаварийной автоматики в целом. Он долго не мог найти хотя бы символического финансирования такого рода работы, и, наконец, как-то нашёл задание для Калининской энергосистемы. Тогда, в самом начале 1960-х годов, в связи с началом строительства большой электростанции в Конаково, которая расположена на берегу Волги приблизительно на 60 км ниже Твери, возникло беспокойство руководства энергосистемы относительно опасности нарушения параллельной работы после отключения важной для этой энергосистемы линии 220 кВ. Испытанным помощникам Ермоленко, уже сложившимся и признанным, новое приключение не требовалось, и эту задачу он поручил новой группе.

Аварийные переходные процессы рассчитывали Людмила Петровна Шипунова и Ирина Владимировна Соболевская на расчётном столе Азарьева под руководством Азарьева же и Орлова.

В связи с занятиями регулированием частоты я был принуждён дополнить институтское образование некоторыми основами теории регулирования, и Орлов поразил меня тем, что хорошо знал, что такое передаточная функция.

Расчёты шли медленно и трудно, на расчёт одного переходного процесса уходил тогда целый день, а то и больше. Эти расчёты выявили существование опасности и полезность отключения части потребителей вслед за отключением линии 220 кВ.

Моя группа разработала чертежи нужных для этого немногочисленных и довольно простых, но новых для того времени устройств автоматики, и персонал энергосистемы их смонтировал и наладил.

За этот проект Ермоленко взял 3 тыс. руб. (месячная зарплата молодого специалиста была в то время около 100 руб., а я получал 150 руб. и жил очень бедно), но и эта сумма ему представлялась опасно большой, так как он не был уверен в том, что товар будет достаточно значим.

А в то время соответствию проектного продукта цене придавалось гораздо большее значение, чем позже.

Это опасение не оправдалось, проект оказался сложным, выглядел солидно и был принят в Калининске с удовольствием.

Перед включением автоматики в работу были произведены натурные испытания (их провела группа Марлена Гдальевича Портного, который тогда работал во ВНИИЭ), и тут оказалось, что отключение ли-

нии не представляет ожидаемой опасности. Конечно, как и после всяких единичных испытаний, оставалось не ясным, повторится ли удача при каком-то другом состоянии энергосистемы.

Эта работа сыграла всё-таки положительную роль, открыв глаза на многое, до тех пор не известное:

- трудность подобных проектов велика;
- возможности обосновать проектные решения расчётом переходных процессов досадно малы;
- к имеющимся знаниям о поведении потребителей энергосистемы во время аварийного процесса нужно относиться осторожно (моделирование потребителей выполнялось общепринятым способом, который ранее создали Азарьев и Орлов и который, видимо, не отражал специфики потребителей в данном районе);
- аппаратура релейной защиты не подходит для задач автоматики;
- поэтому нужно просить промышленность создать некую аппаратуру специально для автоматики.

Однако, заметим, не всякая возможность понять – используется. Что же касается задачи о создании новой аппаратуры, то она в том понимании была не сложна, но даже первые шаги её решения были далеки.

Решающий этап в создании противоаварийной автоматики – разработка целого комплекса устройств, нужных для Братской ГЭС в период её ввода в работу и для отходящих от неё линий электропередачи 500 кВ в сторону Иркутска и Красноярска. Главной трудностью этой разработки, помимо неопытности авторов, было отсутствие в стране (вероятно, и в мире тоже) той аппаратуры, которая требовалась для решения такого рода задач: применялась только аппаратура, выпускаемая заводами для релейной защиты.

Проектирование для Братской ГЭС было украшено напряжённым соперничеством двух видов торможения роторов её генераторов кратковременным включением на её шины мощных резисторов. Спорили однократное включение (Азарьев) с многократным (Яков Натанович Лугинский и уже упомянутый Портной из ВНИИЭ). Победило однократное, которое при разработке нами схемы управления превратилось в двукратное. Установка была создана и подготовлена к испытаниям. Для них управление отключением резистора было выполнено не по заранее заданной программе, как предусмотрено проектом, а, в принципе, более прогрессивно: в зависимости от хода электромеханического процесса, как предложил и выполнил Кощев из НИИПТ.

Первый же эксперимент (он был проведён совместно с Лугинским) оказался, к сожалению, совершенно неудачным. Автоматика не отключала резистор на несколько десятых секунды дольше, чем требовалось и было допустимо, и это создало столь мощное избыточное торможение роторов испытываемых генераторов, что их параллельная работа с приёмной частью Иркутской системы нарушилась. Принудительное торможение генераторов было скомпрометировано, и с тех пор институт не возобновлял попытки применить его.

Кстати, на Братской ГЭС спустя небольшое время в нём отпала необходимость в принципе.

В связи с разработками торможения для генераторов Братской ГЭС оба указанных участника испытаний написали и защитили кандидатские диссертации.

Первые итоги большой проделанной в СССР работы по противоаварийной автоматике были подведены в Москве в 1963 году на широком научно-техническом совещании, где, в частности, впервые были представлены результаты разработки комплекса автоматики для Братской ГЭС [12]. Был выпущен первый сборник докладов по этой тематике. По нашей публикации можно заметить, что тогда не прошли мимо ряда проблем, частью не решённых до сих пор.

Эта работа сблизила нашу группу с рядом специалистов. Уже пожилой Зиновий Павлович Черногубовский, приятель Ермоленко из ленинградского отделения института, безотказно и квалифицированно представлял данные об Иркутской энергосистеме, а Кошечев проделал на своей модели множество интереснейших расчётов.

С Братской ГЭС связан мало кем замеченный шаг в области автоматики. Для управления торможением её генераторов Юрий Александрович Гаевенко, работавший тогда в лаборатории отдела Федосеева, разработал по заданию Азарьева реле, выявляющее резкое уменьшение передаваемой мощности, свойственное КЗ. Была проявлена уникальная изобретательность: кроме электромагнитной системы в реле были шестерни, пружины и даже воздушный демпфер с крыльчаткой. На модели НИИПТ реле было налажено дважды: один раз автором реле и другой раз мною – на пари с Кошечевым. Пари я выиграл, а приз – две бутылки – не получил. Это реле было первым после 1930-х годов, разработанным специально для противоаварийной автоматики, и оно же явило последнюю попытку придать электромеханической системе сложные динамические характеристики.

С не раз упомянутым выше Виктором Михайловичем Ермоленко (по примеру Рибеля за глаза его звали Витя; а Федосеева – Лёша) я познакомился как с руководителем моего курсового проекта. Это был совершенно фантастический, не жизненный проект, но в нём требовалась довольно вычурная логика, и Витя увлечённо занимался ею со мной, хотя я и простой релейной логикой ещё не владел.

Вторая встреча с Ермоленко была менее удачной для меня и для руководителя моим дипломным проектом Фабриканта. Я создавал сложную схему устройства для

отключения при КЗ не сразу трёх фаз линии 220 кВ, а только той из них, которая повреждена, и для однофазного же автоматического повторного её включения, а также рассчитывал поведение электрических величин во время этих процедур (сейчас даже представить себе трудно, что это делалось на логарифмической линейке). Когда я задавал руководителю вопросы, он или отвечал на них сам, или обращался к Вите, чтобы тот как проектный маг подсказал ему марку реле или что-нибудь подобное. Все было дружелюбно и естественно. По своей же инициативе руководитель не считал полезным вникать в мои бумаги. Проект попал на рецензию к Вите. Он вполне оценил моё чудовищное трудолюбие, но на листе со схемой устройства обвёл жирным красным карандашом важнейший узел схемы, в котором зияла грубая и ребёнку ясная ошибка. Защита проекта, впрочем, прошла очень удачно.

Далее, Витя взял меня к себе на работу (конечно, вместе с Лёшей и с согласия своих сотрудников). Первым же человеком, поздравившим меня в день прихода на работу, был Рибель. Мне было так приятно, что я хорошо это запомнил и впоследствии старался возможно торжественней представлять своих новых сотрудников старым.

Работалось мне с Витей удивительно интересно. У него был очень живой ум, позволявший ему выказывать приязнь к окружающему и окружающим. Правда, высказывал он и неодобрение, но не крепче слова «крутёжник». Он поразительно легко проверял устным счётом величину тока короткого замыкания, рассчитанную его сотрудниками с помощью сложных средств и притом иногда неправильно. Он часто увлекался, но в целом был склонен к компромиссу и умеренности, и я не раз раздражал его своим максималистским упрямством. Два-три раза сотрудники слышали и громкие вскрики, но обычно он уводил меня в коридор к дальнему окну и увещевал там. Эмоции успешно уходили, а противоречий-то, собственно, не было.

По мере того, как моя группа понемногу профессионально опережалась, по мере углубления наших проблем, Витя стал охладевать к ним. Он стал всё более подолгу задерживать у себя наши работы, нуждавшиеся в его подписи, и всё менее внимательно их просматривать.

А в 1968 году произошла реорганизация. Для Ермоленко создали лабораторию релейной защиты, а его проектный сектор был разделён на два: релейной защиты и противоаварийной автоматики. Во главе их были поставлены Рибель и я. Некоторое время Витя ещё опекал меня, а потом я стал забывать советоваться с ним, а он – интересоваться нашим делом.

Последний эпизод с Витей был на его прощании с его сотрудниками. Дарились подарки и произносились банальные слова в искусственно приподнятом тоне. Я решился сказать то, что тут написал о нем. Он был очень растроган, а я счастлив, видя это.

Первая промышленная аппаратура

Не вдаваясь пока в причины явления, напомним только, что упростить заводы изготавливать новую аппаратуру автоматики было тогда практически невозможно. Поэтому первый успех в области создания и производства промышленностью специализированной аппаратуры противоаварийной автоматики был достигнут только с помощью

высшего партийного и правительственного постановления по поводу проектирования в 1965-67 годах линий электропередачи 500 кВ от Асуанской ГЭС на Ниле в Каир. Оно вынудило и одновременно заинтересовало завод «Нептун» (г. Одесса) поставить в Египет аппаратуру быстрой (за 0,03 с) телепередачи любого из пяти возможных аварийных сигналов или команд автоматики. Она была разработана в виде ламповых высокочастотных аппаратов. Это было выполнено в московском институте ВНИИЭ группой Владимира Семёновича Скитальцева в лаборатории Генриха Викентьевича Микуцкого. Аналогичным образом электроаппаратный завод ЧЭАЗ (в г. Чебоксары) сам разработал и затем много лет производил три новых типа электромеханических реле. Они реагировали на увеличение мощности и напряжения сверх заранее назначаемых значений.

Попутно: в Египет пришлось поставить много аппаратуры, ещё не прошедшей опробования в энергосистемах страны, а вместе с тем далеко не всякого разработчика разрешалось послать в эту страну, и это не могло не создать недоразумений.

На новой аппаратуре в 1965-70 годах удалось создать регулярные структуры противоаварийной автоматики. Помимо египетского, главными были комплексы автоматики такого рода для строящейся Красноярской ГЭС и для линий связи между Поволжьем и Центром (в связи со строительством Саратовской ГЭС). Не без недоразумений [1, с.109-116] эти системы были введены в действие и успешно работали. На базе этих разработок были созданы и стандартизированы все основные узлы противоаварийной автоматики.

Помимо более подходящих для автоматики указанных выше реле, важнейшим усовершенствованием – психологическим и техническим – явилось повышение гибкости логической части устройств за счёт применения коммутаторов (правда, добиться производства мало-мальски удовлетворительных коммутаторов для применяемого в автоматике напряжения постоянного тока 220 В удалось много позже).

Новое понимание проблем противоаварийной автоматики, а также новые возможности её аппаратуры и её реализаций отражены в [13].

Экстренное снижение мощности паровых турбин

На этом этапе, удалось, наконец, преодолев заблуждения [13], промышленно применить тот способ экстренного снижения мощности тепловой станции, который, как упомянуто выше, начали исследовать 30 лет назад, – имеется в виду быстрое, за десятые доли секунды,

снижение мощности паровых турбин вместо отключения генераторов. В конце 1960-х годов для Конаковской тепловой станции (в 150 км северо-западнее Москвы) был исследован и спроектирован целый комплекс противоаварийной автоматики, управляющий быстрой разгрузкой всех её восьми тепловых турбин мощностью по 300 МВт. На одной из турбин были проведены испытания разработанного способа управления турбинами, после чего весь комплекс, к тому времени уже сооружённый, был введён в действие. Это явилось плодом совместной работы специалистов очень разных профилей: автор и Л.Н. Чекаловец (Энергосетьпроект), М.З. Хейфец, М.С. Фрагин и математик Е.А. Любан (отдел регулирования Ленинградского металлического завода – ЛМЗ), Г.Р. Герценберг и В.С. Мельников (отдел автоматики ВЭИ), Я.Н. Лугинский (ВНИИЭ).

Испытания были проведены дружно и исключительно успешно. Руководил ими Совалов. Усман Киямович Курбангалиев, тогда начальник электролаборатории станции, темпераментно бросал свою кепку о землю и клялся, что с «моторчиком» (привод механизма управления открытием клапанов) и с прочими не предназначенными для такого управления деталями турбины сделать ничего невозможно. Однако – делал. Г.Л. Брухис (о нём – в главе 5 первой части) позаботился о приёме сигналов от нашей автоматики в электрическую часть регулирования турбины. Чекаловец вместе с Владимиром Александровичем Семеновым, тогда занимавшимся релейной защитой в диспетчерском управлении страны, осмотрела все устройства автоматики и бдительно привела в порядок их настройку и переключатели. И не дали ничего напутать дежурным операторам. После этого турбине ничего не оставалось, как прекрасно управляться по сигналам автоматики.

Роль автоматики и новые задачи

Работа над противоаварийной автоматикой велась в этот период и в США, где R.N. Park получил патент чуть ли не на всю её в целом. Однако, в США это не получило тогда практической реализации.

Знаменитая авария в Нью-Йорке 09.11.1965 [1, с. 173] вызвала значительные дискуссии о надёжности и живучести энергосистем и об их противоаварийной автоматике. Одна из комиссий США пригласила Рокотяна, чтобы выслушать его мнение, вытекающее из другого опыта. Оно, естественно, заключалось в том, что надёжность и живучесть большой энергосистемы достигается не только сооружением электростанций и линий электропередачи, но и централизованным в каких-то пределах оперативным управлением и противоаварийной автоматикой. Это было названо «тощий план». Принят же был «жирный план», сводившийся почти исключительно к строительству новых электростан-

ций и линий электропередачи. В СССР же к этой аварии отнеслись, как к очень поучительному примеру, но, понятно, сделали выводы скорее по тощему плану, и это способствовало расширению работ в области противоаварийной автоматики.

Её роль в обеспечении надёжности и живучести понималась и понимается в разных странах и энергосистемах специалистами разных профилей далеко не однозначно. Но опыт показал, что недооценка возможностей противоаварийной автоматики ведёт, как правило, или к большой аварийности или к необходимости значительных дополнительных затрат на основные сооружения энергосистемы, а переоценка – к излишней аварийности из-за её неправильных действий.

Разработка систем противоаварийной автоматики для всё более сложных энергосистем и необходимость экономии при этом управляющих воздействий привели к мысли о централизации выработки в автоматике этих воздействий на основе применения вычислительной техники. Этот момент отмечен в [13] и докладом на сессии CIGRE (International Conference on Large High Voltage Electric Systems) в 1974 году [14]. В нем охарактеризованы две структуры локальных комплексов противоаварийной автоматики: децентрализованная, разработанная для линий электропередачи от ГЭС на Волге к Москве, и централизованная – для линий электропередачи от Братской ГЭС к районам Иркутска и Красноярска.

К вычислительной технике

Первые достижения

В 1973 году в качестве центрального узла комплекса противоаварийной автоматики определился узел *автоматической дозировки управляющих воздействий*, сокращённо – АДВ. Потребовалось разработать принципы его организации и алгоритм действия, что и было меньше, чем за год, совместно с Чекаловец сделано на основе простых моделей энергосистемы. Они представлены в [13] и много позже развиты в [15], где алгоритмам АДВ посвящена большая глава.

Параллельно с этим был предпринят поиск технических средств, пригодных для надёжного решения задачи в реальном времени. Невозможность находить решение во время только что начавшегося аварийного процесса в энергосистеме (интервал в пределах 0,1 с) была очевидна. Исходя из предыдущего опыта разработки устройств АДВ

на электромеханических элементах, было предложено, не дожидаясь аварии, постоянно, в довольно медленно изменяющихся условиях нормальной работы энергосистемы (с запаздыванием в пределах 20 с) подготавливать решения для набора из нескольких десятков наиболее возможных в энергосистеме аварийных ситуаций. Но и для этой облегчённой задачи, как оказалось, в стране ещё не было подходящей вычислительной техники гражданского назначения.

Единственным вариантом явилось предложение Александра Михайловича Гуревича (Центральный научно-исследовательский институт комплексной автоматизации – ЦНИИКА, Москва) использовать аппаратуру, разрабатываемую его небольшой группой для системы управления одной из гидростанций [16]. Эта аппаратура, названная ТА-100, начала изготавливаться в Нальчике заводом «Севкавэлектронмаш» (конструктор разработки Геннадий Васильевич Антонов) на полупроводниковой технике в её ещё не интегрированном варианте. Для ввода программы в устройство и его перезапуска после сбоя использовалась запись программы перфорацией бумажной ленты. Должная надёжность устройства была достигнута за счёт параллельной работы трёх громоздких комплектов аппаратуры и мажоритарного сопоставления их данных: чуть ли не на каждом такте вычислений сравнивались три результата и, если один из трёх не совпадал с двумя другими, то он отсеивался. Устройство обладало удивительной живучестью: в условиях неисправности целого ряда модулей в разных комплектах аппаратуры оно продолжало правильно решать свою задачу. Технологическая часть программного обеспечения была разработана группой Гуревича по алгоритмам моей группы.

Первый централизованный комплекс противоаварийной автоматики с использованием такого вычислительного устройства АДВ был запроектирован для Братской ГЭС, но туда был поставлен головной образец устройства, и дело шло со скрипом. Второй такой комплекс, запроектированный для Костромской тепловой станции, оказался изготовленным лучше и, главное, попал в более заинтересованные руки. Руководители этой громадной электростанции (восемь агрегатов по 300 МВт и один уникальный агрегат 1200 МВт) придавали надёжности работы первостепенное значение, а затраты, связанные с освоением ещё одного вида автоматики, представлялись в масштабе станции не особенно существенными. Под руководством исключительно энергичного Семёна Альбертовича Заботина была образована

небольшая группа молодых инженеров (среди них выделялся Юрий Изосифович Капустин), и она вместе с авторами ТА-100 ввела вычислительный комплекс в работу первым (в 1984 году) и затем долгие годы вполне успешно обслуживала его.

Таким образом, от замысла до первого воплощения потребовался одиннадцатилетний труд моего коллектива, ЦНИИКА, Севкавэлектронмаша и персонала Костромской ГРЭС. Затем это устройство проработало, насколько известно, без неприятностей минимум 20 лет.

Препятствия, действительные и мнимые

Но дело шло совсем не гладко. Достигнутое решение задачи АДВ раздражало многих влиятельных лиц, препятствовало даже скромному финансированию работ, дальнейшему применению.

Во-первых, не одобрялось, что задача решается не на производимой более серийно вычислительной технике, разные сменявшие друг друга типы которой начинали внедряться на диспетчерских пунктах энергосистем и их объединений. Эти критики, не имея опыта работы с противоаварийными устройствами на энергообъектах, не понимали, какой уровень надёжности и живучести требуется от техники, которая должна работать полностью автоматически лишь с редким вмешательством персонала электростанции, имеющего много других обязанностей. А эта ситуация гораздо ответственней и сложнее, чем работа техники на диспетчерском пункте под разносторонним круглосуточным контролем квалифицированных операторов (впрочем, даже такой уход не избавляет от драматических ошибок [1, с. 188-189]).

Во-вторых, работникам диспетчерских пунктов, привыкшим назначать настройку простых релейных устройств АДВ, не хотелось вникать в дающий большие возможности, но и более сложный алгоритм АДВ. Они мечтали получить такой алгоритм, который не требовал бы предварительной настройки, а сам рассчитывал бы все необходимые дозировки управления, живём то мы в век нового слова – кибернетика! Но в таком алгоритме требуются сложные и объёмные расчёты электрической сети, для которых развитие моделирования энергосистем ещё не создало ничего даже отдалённо подходящего. Моя группа и подавно предложить такой алгоритм не могла, да и вычислительной техники, пригодной для него, не было (кстати, не уверен, что полноценное устройство АДВ такого рода и сейчас осуществимо в стране).

В результате, данное направление работы развивалось слабо, и реализовалось в чистом виде, кроме уже упомянутых Костромской ГРЭС и Братской ГЭС, только на Итатской подстанции 500 кВ в районе Саяно-Шушенской гидроэлектростанции (для обслуживания связей между районами Красноярск и Кузбасс).

Попытка пойти навстречу критикам была предпринята при проектировании под руководством Чекалова противоаварийной автоматики для электропередачи мощности из СССР в соседние страны восточ-

ной Европы. Работавшей в Энергосетьпроекте Марии Григорьевне Рязановой с её двумя совсем молоденькими помощницами удалось разработать для Западно-Украинской подстанции 750 кВ и приблизительно в 1990 году сдать там в эксплуатацию вычислительное ядро комплекса АДВ, составленное из двух мини-ЭВМ типа СМ-4, причём она заставила их работать параллельно и контролировать друг друга. Производительность этого вычислительного ядра была гораздо выше, чем предыдущих, а надёжность и живучесть значительно ниже.

Упомянутые выше устройства АДВ собирали доаварийную и аварийную информацию с нескольких объектов, расположенных на расстоянии вплоть до трех-четырёх участков линий электропередачи, и направляли туда управляющие команды.

Итак, пока я работал в Энергосетьпроекте, моей группе удалось разработать четыре комплекса противоаварийной автоматики с центральным ядром – устройством АДВ, выполненном на вычислительной технике. Не только разработать, но и добиться использования. Много это или мало? Ответ зависит от того, какую применить мерку. Мне хотелось бы большего. Но препятствия были значительны. К двум уже отмеченным выше добавлю основное: в стране ещё не было вычислительной техники, полноценно подходящей для выполнения столь сложной и ответственной функции, и не была разработана алгоритмическая база для расчётов электрической сети. В этом смысле мы пытались идти впереди прогресса. И ещё одно обстоятельство, последнее, но немаловажное, – только до середины 1970-х годов я ощущал поддержку моих руководителей, потом наступило иное время.

Как мне кажется, в этой ситуации проявился стыдливый максимализм такого типа: то, что реально могу сделать, я делать не желаю, потому что, мне кажется, где-то там делают лучше, как я, правда, сделать не могу. Ленивая мечтательность подкрепляется поговоркой «лучшее – враг хорошего», гордо игнорируя совет: «по одежке протягивай ножки».

Начало применения в противоаварийной автоматике вычислительной техники довольно полно отражено в статьях сборника трудов Энергосетьпроекта [16]. Вводная статья этого сборника даёт представление о наиболее актуальных в то время (во многом – теперь тоже) проблемах. В [17] технические решения в области противоаварийной автоматики рассмотрены наряду с проблемами такого управления энергосистемами в нормальных их состояниях, которое способствует надёжному электроснабжению. В [18] была предпринята редкая попытка представить за границей отечественные достижения того времени, связанные с использованием противоаварийной автоматики и, в частности, вычислительной техники.

Движение к желательному алгоритму

На стремление уменьшить работу по настройке системы АДВ ответил в 1980-х годах в НИИПТ группа Юрия Дмитриевича Садовского: И.А. Богомолова, П.Я. Кац, В.Н. Кондрашкина, Л.М. Левит и др. Она разработала оригинальный алгоритм расчёта управляющих воздей-

ствий, необходимых для предотвращения перегрузки сети в послеаварийных условиях (он охарактеризован в [19] и затем внимательно интерпретирован в [11, с. 249-265] с опорой на статьи авторов, опубликованные в «Трудах НИИПТ» 1982 и 1983 годов). Этот алгоритм впервые был применён для объединения энергосистем Урала. Вычислительное ядро комплекса АДВ было создано (разработчик – ВЭИ) на подходящей мини-ЭВМ в помещении диспетчерского управления Урала. Там Е.А. Мошкин сумел организовать работу многих специалистов (А.М. Слодарж и др.), которые собрали этот большой комплекс и включили его в работу.

В алгоритме АДВ, созданном в НИИПТ, пропускная способность послеаварийных состояний электрической сети оценивалась не путём строгого (в смысле законов электротехники) расчёта этой сети в целом: для решения этой слишком обширной и сложной задачи потребовалась бы значительно более мощная вычислительная техника, и расчёт шёл бы слишком медленно. Взамен этого выполнялся расчёт ряда отдельных ячеек сети, каждая из которых состоит из одного узла и примыкающих к нему ветвей сети. Конечно, и этот алгоритм требует ввода в устройство многочисленных данных, но приятная сторона дела заключалась в том, что подготовкой данных занимались, в основном, не сотрудники энергосистемы, а разработчики алгоритма, обладающие большим опытом расчётов разнообразных сетей, электродинамической моделью и временем.

Следующий подобный комплекс был разработан в НИИПТ и ВЭИ для объединения энергосистем Поволжья. В отношении надёжности и живучести его структура выгодно отличалась от уральской развитием в сторону двухуровневой системы. Кроме стандартной центральной части АДВ, расположенной в помещении диспетчерского управления энергосистемами (Самара), он обладал удалёнными терминалами, выполненными в ВЭИ и расположенными на нескольких узловых объектах энергосистем. Эти терминалы не только управлялись центральной частью, но каждый из них имел возможность самостоятельного действия по упрощённому алгоритму управления, подобному тому, который был применён на аппаратуре ТА-100.

Конечно, самостоятельные действия, предпринимаемые в нескольких частях энергосистемы одновременно, выдвигают на первый план проблему координации действий, исключаяющей опасные противоречивые решения. Эта задача поставлена, исследована [15, том II, с. 289-323], однако не решена.

На развитии алгоритма АДВ для комплексов противоаварийной автоматики рельефно отразилась порочность того кусочно-лоскутного принципа организации и финансирования пионерских работ, который уже отмечен применительно к расчёту состояния электрической сети и её пропускной способности. А между тем эти расчёты,

выполняемые инженером off-line, при всей их сложности проще в том отношении, что выполняются не on-line, как выполняются задачи прямого управления энергосистемой, решаемые автоматически, без участия человека, в предаварийных условиях или тем более в условиях уже начавшегося аварийного процесса.

Исследования, инженерия, производство

Трудные пути новаций

Оглядываясь назад, можно заметить, что в гражданских областях было существенно нарушено взаимодействие между наукой и инженерией: обширная фундаментальная наука мало давала довольно ху-досочной прикладной науке, которая, создав что-то полезное, редко могла склонить руководителей производства и инженерию применить это. Отсюда – слабость научно-технического прогресса в стране.

Руководство страны видело скверный результат и пыталось исправить дело бюрократическим путём. Так, в 1980-х годах каждое исследовательское подразделение обязано было ежегодно составить «план внедрения» своих разработок и затем отчитаться успехами, представив их суммой «экономического эффекта», который де уже получила страна. Эта суетливая деятельность отнимала много времени, а задача рещалась, естественно, на уровне «липы».

В те же годы правительство призывало военные заводы производить продукцию мирного назначения, которая так нужна была населению. Для этого применяли и кнут, и пряник, но попытка конверсии военного производства в мирное практически повсеместно провалилась.

Коротко говоря, суть трудностей была проста – практически любой поставщик нужного для чужого производства оборудования, материалов или комплектующих деталей не имел коммерческого интереса в производстве. С исчерпанием энтузиазма 1920-30-х годов он не желал изготавливать ничего сверх уже предписанного в обязательном порядке: завод не получил бы от этого никаких преимуществ. Любое нововведение грозило дополнительной нагрузкой на конструкторское бюро и производственные цехи, а для заводского работника – дополнительной работой без вознаграждения. Даже предписанное сверху заводы поставляли не охотно, зачастую не вовремя и не должного качества.

Но всё же, способы получения чего-либо от не заинтересованных в этом поставщиков существовали, и они были разными и в разной степени надёжными.

Бюрократический способ – на самом веру страны добиться приказа всем нужным поставщикам. В разделе о противоаварийной автоматике уже рассказано о том, что именно так были получены от промышленности первые устройства, поскольку они удачно потребовались для поставки в Египет.

В других случаях руководителю производства приходилось пустить в ход личные связи – «ты мне, я тебе» и т.п. В этом деле были большие специалисты, для них организовывали «отдел снабжения», и они очень ценились. Совершенно помимо государственного планирования они создавали причудливые схемы в сущности товарообмена, основанные на доверии и авторитете. Если предприятию А нужно получить нечто от предприятия Б, но ему самому нечем прельстить предприятие Б, то оно ищет такое предприятие С, которому нужно что-то от А и которое зато располагает и даст нужное предприятию Б, и тогда это Б вознаградит предприятие А. Ценность продукции оценивалась её дефицитностью. Напротив, стоимость продукции почти не играла роли, так как оценивалась в мифических «безналичных» рублях, а их только очень рискованными манипуляциями удавалось превратить в реально нужные наличные.

Повод для производства мог выглядеть и интеллектуально: внедрению уже разработанной научной организацией аппарата способствовал кто-то на заводе – например, заинтересованный в создании и защите своей диссертации.

И наконец, предпочитали более надёжный путь – производство всего необходимого внутри своего забора. Этот путь вёл производителя продукции к некоторому подобию натурального хозяйства. (Возможно, на это бессознательно подталкивало хозяйственника его во многих случаях недалёкое крестьянское прошлое с его подлинным натуральным хозяйством?) Это означает приблизительно следующее. Например, каждый винт, каждую гайку и т.п., нужные для производства изделия, изготавливать прямо на своём заводе, т.е. малосерийно в собственном вспомогательном цехе, а не покупать у профессионального изготовителя широкого круга подобных изделий, обслуживающего множество потребителей. Понятно, что в случае такой организации производства качество изделия получается скверным, а стоит оно настолько дорого, что сбыт оказывается слишком малым. И не забудем – чем меньше сбыт, тем выше себестоимость продукции. В результате, этот тип производства экономически губителен.

Вот пример. В начале 1990-х годов я знал инженеров, которые работали на заводе в Рызани, производившем сложную технику, но уже не имевшем заказов. Они маялись там почти без дела, без заработка, и подрядились разработать по моему заказу программу для расчёта команд противоаварийной автоматики. В этой новой для них задаче они выглядели способными и инициативными людьми, и я не удержался спросить их, почему же они не организуют у себя на заводе производство чего-то нужного людям, скажем, портативных коротковолновых приёмников. Ведь мне пришлось купить такой приёмник в США! Они ответили вполне определённо: в принципе, сделать такого рода приёмник их завод, конечно, может, но он получится громоздким и дорогим, его покупать не будут. Видимо, этот завод, как и подобные ему, привык к несоразмерной стоимости своей продукции и не имел необходимости в том навыке и в том веере хозяйственных связей с поставщиками, которые требуются для качественного и экономически выгодного серийного производства.

Достижения производства

Хотя, как сказано, промышленности не требовались новации, были и замечательные исключения.

В период электромеханических реле важную роль сыграло то, что ленинградский завод «Электропулт» перенял американский опыт, со-

гласно которому монтаж заказанного релейного устройства автоматизируется на однотипной металлической панели, имеющей удобные способы раскладки проводов и подвода внешних кабелей к многочисленным маркированным клеммам. Заводу стало безразлично, для какой функции заказано устройство и сколько экземпляров требуется, любое устройство он изготавливал как уникальный экземпляр.

Была хорошо отработана следующая технология. Разработчик устройства создавал принципиальную схему соединений аппаратов, образующих устройство, и составлял спецификацию этих аппаратов. Другие специалисты, работающие в организации – генеральном проектировщике объекта, конкретизировали схему устройства, определяли размещение аппаратов на его панели и показывали подвод внешних проводов к её внешним клеммам. По этой документации завод заказывал применённые в устройстве аппараты, разрабатывал схему раскладки проводов на панели и изготавливал панель. Специфическая подробность: каждый «отвечал» только за своё дело, за дело в целом – никто.

Громадное влияние на релейную защиту и противоаварийную автоматику оказал переход от устройств, построенных на электромеханических реле, к полупроводниковой технике, сначала на дискретных элементах, затем на интегральных схемах. В этом деле неоценимую роль сыграли специалисты из Чебоксар, работавшие во Всесоюзном институте релестроения (ВНИИР), на заводе ЧЭАЗ и затем в родственных им предприятиях. Электронная аппаратура противоаварийной автоматики была впервые разработана группой Феликса Михайловича Розенблюма (ВНИИР) с использованием полупроводниковых приборов. Это были измерительные устройства, реагирующие на частоту переменного тока, его мощность, напряжение и на сдвиг по времени синусоид напряжений [21]. Следующее поколение этой аппаратуры было разработано той же группой на интегральных микросхемах [22]. Эту аппаратуру через несколько лет начали производить малыми сериями. В неё постепенно вводились элементы цифровой техники. Обзор приблизительно современного состояния этого дела дан в [23].

В то же время, используя те же успехи микроэлектроники, сотрудники ВНИИЭ и одесского завода «Нептун» довели число передаваемых аварийных сигналов или команд до 12. Телепередача осуществлялась через несколько участков линий электропередачи столь же быстро, как и раньше, информация могла быть использована и допол-

нена на любом из промежуточных объектов, и в аппаратуру был введён канал для передачи информации в нормальных условиях работы энергосистемы.

Новые возможности

Применение микропроцессорной аппаратуры дало возможность повысить техническое совершенство автоматики, сохранив на достаточном уровне стойкость к условиям внешней среды и надёжность. Документирование состояния энергосистемы, состояния аппаратуры и действий персонала способствует удобству обслуживания и снижению числа ошибок операторов. Происходит унификация устройств, т.е. создание различных по функциям устройств из небольшой номенклатуры основных блоков, что доступно большим корпорациям-производителям управляющей техники. Возникла тенденция объединять разные функции автоматики и оперативного управления в общем устройстве, обслуживающем линию электропередачи или высоковольтный аппарат, и даже в общей системе управления энергообъектом. Создалась также возможность объединять устройства автоматики в большие территориально распределённые комплексы для централизованного решения задачи с использованием большого количества информации от нескольких объектов.

Формальное алгоритмическое преимущество централизации и, у многих, психологическая тяга к централизации склоняют, однако, к игнорированию понятных практических соображений против создания излишне громоздких централизованно управляющих монстров. Вместо этого следовало бы как можно больше задач решать децентрализованно, а остальные, в которых без централизации обойтись невозможно, — путём создания иерархически построенной структуры с централизацией на нижнем уровне и координирующими органами на верхнем уровне [13, 15].

Применительно к географически распределённому объекту, каким является энергосистема, важную роль играет получение информации, удалённой от центра её обработки, и особенно важна быстрая доставка аварийных сигналов и команд автоматики на дальнейшее расстояние. Жёсткие ограничения в этом отношении, технические и стоимостные, были особенно ощутимы в СССР и других странах, где за неимением лучшего для передачи аварийных сигналов и команд использовались специфические, полные помех, каналы связи, идущие по проводам высоковольтных линий электропередачи.

Много ограничений на объем и удалённость информации, используемой автоматикой, снимает передача информации по оптоволоконным кабелям.

Несколько лет назад появилась замечательная возможность с помощью сигналов времени от системы спутников получать информацию о сдвигах во времени между синусоидальными токами и напряжениями. Оптимизм внушает, что в некоторых странах уже созданы системы с измерением этих сдвигов на большом числе подстанций, а также что, насколько известно, необходимая для таких систем аппаратура не дорога.

От завода к использованию

Успехи производства и использования в энергосистемах новой аппаратуры автоматики достигались большим трудом многих специалистов своего дела. Они достигли бы и большего, не будь существенных помех, из которых некоторые уже упомянуты. Всего не перечислишь, но напомним ещё пару.

Использование некачественной продукции

Трудно было не заметить недочётов заводской продукции, которые требовали внимательной проверки и доналадки новой аппаратуры и затем её частых эксплуатационных проверок и ремонтов. Этими работами было занято громадное количество персонала. Видимо, при распределении ресурсов в централизованно управляемом хозяйстве предполагалось, что людей и оплату их труда, «фонд зарплаты», нужно сосредоточивать на главных работах, дающих окончательный продукт, в нашем случае – на производстве электроэнергии, а не на процессах, обеспечивающих это производство оборудованием или, тем более, проектной документацией.

Пример для сравнения. В 1990 году во время служебной командировки я был на тепловой станции возле Миннеаполиса (Миннесота, США). Эта станция с тремя агрегатами общей мощностью приблизительно 2000 МВт работала на угле, имела громадную установку очистки уходящих дымовых газов и сияла чистотой, как не всякая гидравлическая станция. Все агрегаты работали, а станция была почти безлюдна – дама у проходной стойки, несколько человек дежурного персонала и два инженера по релейной защите, кто-то командовал перевалкой угля из вагонов на транспортёры. За сетчатой загородкой – небольшая площадка для автомобилей, почти пустая в тот момент, и кукурузные поля, река (верховье Миссисипи; речная вода станцией не используется). Никаких ремонтных помещений, жилья и пр. Это безлюдье выглядело неправдоподобно.

добно. Например, упомянутая уже Конаковская станция по сравнению с американской – целый город, чуть ли не социальный и культурный центр. На ней в то время трудилось столько же людей, сколько во всей энергосистеме штата Миннесота, а эта энергосистема осуществляла снабжение не только электроэнергией, но и газом.

В результате устройства автоматики требовалось не только настраивать под местные условия (предусмотренным изготовителем образом), но и внимательнейшим образом проверять, поправлять и иногда даже дорабатывать. У некоторых это породило брезгливо пренебрежительное отношение к заводской продукции как к некоторому конструктору для творчества рационализаторов (тем более что рационализаторские предложения поощрялись морально и даже немного материально). Поставленное заводом устройство рассматривалась не как законченное изделие, которое можно сразу доверчиво использовать и за правильное функционирование которого несёт ответственность изготовитель, а скорее как в некотором смысле полуфабрикат.

Отсюда возникало крайне вольное обращение с заводской продукцией (оно привело, например, к тяжёлой аварии, описанной в [1, с. 89-109]). Другая сторона дела: экономическое сопоставление вариантов строительства объекта или создания системы автоматики было довольно бессмысленно (см. главу 4 и [1, с. 36-51]).

В условиях отсутствия коммерческих отношений гарантии завода носили символический характер. О какой ответственности производителя можно было говорить при дефицитности и исключительно низкой стоимости аппаратуры? Её определял специальный правительственный комитет из интересов, политических или социальных, далёких от минимизации общих затрат и от обеспечения предприятий – участников производственной цепочки средствами для развития.

Она из моих сотрудниц любила решать логические задачи, связанные с созданием лаконичных релейных устройств, и могла потратить день-другой, чтобы исключить из схемы устройства одно из часто употребляемых реле. Оно стоило 4 руб., т.е. чуть дороже килограмма сливочного масла (3,6 руб.), в то время как её зарплата составляла около 10 руб. за рабочий день.

Помимо заводских недоработок, техническое совершенство и надёжность аппаратуры страдали от невозможности применять в ней многие наилучшие отечественные элементы и материалы (не говоря уж о более подходящих зарубежных комплектующих). Они выпускались промышленностью в слишком малом количестве, чтобы обеспечить все потребности страны, и поэтому, в основном, не предназна-

чались для применения в гражданских отраслях. Любая новая разработка аппаратуры должна была пройти апробацию в специальном комитете, который, как правило, требовал замены более совершенных комплектующих и материалов на менее совершенные, но не дефицитные и притом порой даже более дорогие. Разработчики аппаратуры попадали в клещи: с одной стороны, энергетики требовали высокие технические характеристики, а с другой стороны, объяснения относительно опасных последствий замены комитет редко признавал убедительными.

В СССР военное производство питалось экономически от общегражданского, но его успехи не опирались на общегражданский технический уровень и не поднимали этот уровень. Надо думать, этот разрыв сильно удорожал военное производство и замедлял развитие всей техники, как общегражданской, так и военной.

Если инженер уже имел дело с качественной продукцией, ему легко заметить невысокое качество, взглянув лишь на применённые в ней такие простые, казалось бы, вещи, как винты, гайки, клеммы и т.п. Выше уже говорилось, что отсутствие коммерческих отношений приводило заводы к стремлению завести у себя натуральное хозяйство, и каждый производил у себя всё, не имея для многих стандартных элементов ни специалистов, ни хорошего оборудования,

О подготовке персонала

При всём отмеченном обилии персонала, занятого эксплуатацией оборудования энергосистемы, отсутствовала целенаправленная система совершенствования корпуса сотрудников – планового продвижения перспективных людей и удаления мало пригодных для такой работы. В энергетике в целом и в отдельных энергосистемах в частности существовали, конечно, «курсы повышения квалификации», но они были непродолжительны, персонал проходил их редко, и, поскольку успеваемость на них не являлась критерием служебного роста, персонал рассматривал их скорее как отдых, а не как путь к совершенствованию. То, что называется школой, образовывалось редко, а образовавшись, могло казаться подозрительным сектантством.

К этой теме имеет отношение и составление списков «резерва на замещение руководящих должностей», которое оставим в стороне. Думается, такая ситуация сложилась не только из-за отбора людей не «по деловым признакам», а в силу опасения раздуть безработицу, прибегнув к жёсткому отбору специалистов в условиях повсеместной нехватки жилья и отсюда малой возможности их миграции.

И ещё два замечания относительно подготовки инженеров в институтах и затем в процессе смены или повышения квалификации.

Преподавание в МЭИ на кафедре Федосеева (по всей видимости, на других кафедрах тоже) велось почти исключительно с точки зрения подготовки к проектной работе, в то время как большинство выпускников института попадало на работу в энергосистемах, и они оказывались не подготовленными к эксплуатационной работе.

За время обучения в институте автор проходил по месяцу практику два раза на тепловых станциях, один раз на подстанции. Все три раза польза была, но совсем недостаточная. О сочетании обучения с длительной и оплачиваемой работой неполный рабочий день в качестве практиканта по специальности – тогда почти не знали.

На всевозможных курсах инженеров, так сказать, усовершенствовали обычно в наиболее сложных аспектах профессии, упуская из виду, что чаще они встречались с более простыми работами, уровня не инженера, а, скорее, техника, и именно там делается наибольшее количество ошибок (говорю со знанием дела, поскольку сам грешен). Простые работы разнообразны, их систематизировать, им научить не легко, тем более что не всякий почтенный лектор сам имеет о них достаточно реальное представление.

Успехи, неудачи, трудности

Суммирование успехов

Известны многочисленные примеры применения противоаварийной автоматики в Канаде, США, Швеции, Японии. В [17] содержатся сведения о ПА в энергосистемах Японии и Канады, имеющие помимо технического ясный экономический аспект. В Японии микропроцессорными системами противоаварийной автоматики занялись раньше, чем в других странах. Так, в одной из энергосистем уже с начала 1980-х годов функционировала трёхуровневая иерархическая система [11, с. 288], в состав которой входило 13 ЭВМ. Отмечается высокая эффективность этой системы, её внедрение позволило повысить пропускную способность основной сети 275 и 500 кВ на 200-400 МВт.

В докладе [20] представлены две очень показательные стороны современного состояния противоаварийной автоматики в США и Канаде, косвенно характеризующие и другие стороны дела. Так, видно,

что нормирование в области противоаварийной автоматики прошло там путь от употребления в 1980-х годах, насколько известно, довольно разрозненных терминов до обстоятельных нормативных документов, общих для громадных энергообъединений. Стоит обратить особенное внимание на два из выводов доклада:

1. учитывая относительно низкую стоимость противоаварийной автоматики по сравнению с основным оборудованием, важно не пытаться минимизировать её стоимость, проектируя систему маргинального качества;
2. при её создании важно организовать взаимодействие со специалистами, занимающимися теми многочисленными аспектами работы энергосистемы, которые затрагиваются созданием противоаварийной автоматики – иначе неминуемо возникают недопустимые ошибки.

Но всё-таки, наиболее широко противоаварийная автоматика применялась в энергосистемах на территории бывшего СССР. Здесь развилось не фрагментарное, как в других странах, а обычное, почти повсеместное её применение. К концу 1980-х годов устройства противоаварийной автоматики были установлены на всех основных объектах, имеющих напряжение 500 или 750 кВ, а также на многих объектах 330 и 220 кВ. Опубликовано несколько работ, содержащих серьёзные данные об авариях и эффективности противоаварийной автоматики. Например, в [17] сообщено, что за счёт её применения были существенно повышены возможности передачи мощности по основным высоковольтным сетям страны (в сумме на тысячи мегаватт) и вместе с тем предотвращён переход большинства (около 300 в год) опасных повреждений в аварии. Необходимое здесь добавление: указанный успех достигнут затратами на автоматику, несравнимо меньшими, чем потребовалось бы для строительства дополнительных сетей нужной для подобного успеха пропускной способности.

Было бы полезно обратить внимание на многообещающие, но пока не используемые возможности микропроцессорного устройства автоматики принимать управляющее решение по ходу аварийного процесса на основе прогнозирования исхода этого процесса [15, 25].

Принципиальные трудности

Очень многое в известных тяжелейших авариях последних десятилетий [1] определяется недостатками именно противоаварийной тех-

ники. Поэтому, описав успехи и не забыв неудачи, нельзя, однако, не упомянуть ещё некоторых трудных обстоятельств.

Имеющийся благоприятный опыт применения противоаварийной автоматики относится в основном к таким районам энергосистемы, через которые передаётся значительная мощность по немногочисленным линиям. В отличие от этого, не в пример более скромнен опыт решения задач, относящихся к сложным плотным сетям, которые подвержены многим очень разнообразным опасностям, к борьбе с резким снижением (лавинной) частоты и, особенно, напряжения. Это показали тяжёлые аварии нового типа [1], происшедшие одна 14.08.2003 на Северо-востоке США и Юго-востоке Канады и другая меньшего масштаба 25.05.2005 в Москве. По поводу первой из них высказывалось даже мнение о невозможности построить автоматику, адекватную таким авариям, что, на мой взгляд [1 и 15], свидетельствует скорее о растерянности перед новым вызовом, чем о действительной сложности проблемы.

Однако, ограниченность возможностей противоаварийной автоматики действительно существует. Она определяется, прежде всего, недостаточной управляемостью энергосистем в аварийных условиях, т.е. отсутствием у них возможности ввести нужные противоаварийные воздействия. Так, во многих случаях для спасения энергосистемы требуется пойти на отключение части потребителей, а найти таких потребителей, которые подходят для этого, договориться с ними, решиться на отключение – всё это трудно. Отсюда – склонность недооценивать актуальность этих задач, преувеличивать их сложность, научную и техническую.

Для противоаварийного управления благоприятно создание управляемых элементов энергосистемы:

- элементов обмена электроэнергией на постоянном токе, позволяющих разным частям энергосистемы иметь не одинаковые частоты;
- статических источников мощности;
- потребителей-регуляторов, потребляемую которыми мощность можно гибко регулировать извне, и т.п.

Связь между частями энергосистемы на постоянном токе применяется во многих странах. Её необходимость предвидели в СССР ещё в 1932 году, и через 50 лет институту «Энергосетьпроект» пришлось вернуться к проработке этого способа обмена. Но привычка, несмотря

на трудности и убытки, передавать мощность на переменном токе осталась неизменной [1 и 15, том I, с. 182-190]. В России имеется только одна электропередача такого рода на постоянном токе – для передачи мощности в Финляндию.

Другой ограничивающий фактор: хотя возможности современной техники очень велики, в области противоаварийной автоматики ещё не созрели хорошо отработанные технические решения. Расширению её применения мешают недостатки её аппаратуры и её программного обеспечения, а оно нужно как для расчётов off-line настройки автоматики, так и для действия on-line непосредственно в устройствах. Это, наряду с нехваткой профессионально подготовленного персонала, является оборотной стороной ограниченного применения.

Расширению применения противоаварийной автоматики противостоит суровая реальность рынка: в сегменте её устройств он значительно уже по сравнению, например, с серийно производимыми устройствами релейной защиты для оборудования напряжением 110-380 кВ. Так, потребность энергосистем России в такого рода аппаратуре автор не так давно оценивал на уровне 500 различных микропроцессорных устройств в год. Понятно, что низкий спрос повышает стоимость устройств, препятствует совершенствованию.

Наконец, напомним, что опасность больших социально неприемлемых аварий заставляет энергосистемы всё внимательней относиться к противоаварийной технике и страховаться от аварий финансово неприятными, но необходимыми мероприятиями (связанные с этим вопросы обсуждаются в [24]). В результате, противоаварийная автоматика совершенствуется, и практика показывает, что по мере этого область её эффективного применения расширяется.

Литература к третьей части

1. Иофьев Б.И. Аварии и вокруг них. «Эдитус», 2013, 282 с.
2. DeGroot М.Н.. Optimal Stistical Decisions. McGraw-Hill, 1970. (М. Де Гроот. Оптимальные статистические решения. М. «Мир», 1974, 491 с.)
3. Иванов В.И. Реле и релейная защита. М.-Л. Госэнергоиздат, 1932, 276 с.
4. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. М.-Л., Госэнергоиздат, 1952, 480 с.
5. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. М., «Энергия», 1976, 560 с.

6. «Луч прожектора». История института «Энергосетьпроект». М., Энергоиздат, 2003, 370 с.
7. Майер Р.И. Аварийное регулирование паровых турбин как мера увеличения устойчивости электрической системы. «Электричество», 1934, №13.
8. Жданов П.С., Майер Р.И., Маркович И.М. Аварийное регулирование на Сталинградской ГРЭС. «Электрические станции», 1937, №6.
9. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. М., «Энергия», 1976, 479 с.
10. Веников В.А., Герценберг Г.Р., Совалов С.А., Соколов Н.И. Сильное регулирование возбуждения. М. -Л.: Энергоиздат, 1963. 152 с.
11. Совалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. М., Энергоатомиздат, 1988, 416 с.
12. Гладышев В.А., Иофьев Б.И., Чекаловец Л.Н. Противоаварийная автоматика электропередач 500 кВ, отходящих от гидростанций (опыт проектирования) В кн.: Средства противоаварийной автоматики энергосистем, «Энергия», 1964, с. 131-162.
13. Иофьев Б.И. Автоматическое аварийное управление мощностью энергосистем. М., «Энергия», 1974, 416 с.
14. Berkovich M.A., Iofiev B.I. Disaster control automation for 500 kV transmission lines. CIGRE, 1974, Session 21-29 August, N34-05.
15. Глушкин И.З., Иофьев Б.И. Противоаварийная автоматика в энергосистемах. М., «Знак». Том I, 2009, 568 с. Том II, 2011, 528 с.
16. Вопросы противоаварийной автоматики электроэнергетических систем. Сборник научных трудов Энергосетьпроекта, М., Энергоиздат, 1982, 96 с.
17. Воропай Н.И., Ершевич В.В., Лугинский Я.Н. и др. Под ред. С.А. Совалова. Управление мощными энергообъединениями. Энергоатомиздат, 1984. 256 с.
18. Iofiev B.I., Cosheev L.A., Lagusker V.M., Luginsky Ja.N., Sadovsky Jn.D., Semenov V.A. Process control computers in power system stability control. CIGRE, 1984 Session - 29th August - 6th September, N39-16.
19. Кошечев Л.А., Садовский Ю.Д. Алгоритм дозировки управляющих воздействий противоаварийной автоматики сложных энергосистем. «Электрические станции», 1981, №9.
20. C.F.Henville, E.Struyk. RAS and stretched Power Systems. Western Protective Relaying Conference, Spokane, WA 17-19.10.2006.
21. Розенблюм Ф.М. Измерительные органы противоаварийной автоматики энергосистем. М.: Энергоиздат, 1981, 159 с.
22. Розенблюм Ф.М. и др. Устройства автоматического ограничения повышения напряжения на базе шкафа автоматики ШП2704. Электрические станции №4, 1989, с. 60-65.
23. Овчаренко Н.И. Автоматика энергосистем. Под редакцией А.Ф. Дьякова. Изд-во МЭИ, 2007, 476 с.
24. Иофьев Б.И. Об авариях в больших системах. «Релейщик» 03/декабрь 2013, с. 51-55.2.
25. Iofiev B.I., Tchekalovets L.N. Prediction of the Outcome of Transient Processes in the Protection against Large Emergencies in Power Systems. Proceedings of the 12th International Conference on Power System Protection – PSP 2000. Bled, Slovenia. September 27th- 29th, 2000, pp. 27-36.