

Глава 1

Введение об авариях

§1.1. Истоки бед от аварий

1.1.1. Беды от катастроф и 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 несет 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 и, с другой стороны, уровнем культуры и гуманности общества. Конкретнее 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 этого, какие жертвы недопустимы, какую цену оно готово платить за безопасность.

Вот свидетельство газеты о пресс-релизе швейцарской компании Swiss Re, занимающейся перестрахованием:

«Ущерб, нанесенный мировой экономике природными и техногенными катастрофами в 2010 г. составил 218 млрд долл. ...в 2009 г. экономический ущерб ...составил 68 млрд долл. В 2010 г. основной ущерб экономике нанесли землетрясения. На них пришлось треть потерь. Наиболее затратными оказались февральское землетрясение в Чили и сентябрьское – в Новой Зеландии. Всего в катастрофах 2010 г. погибли примерно 304 тыс. человек, что составляет максимальную цифру с 1976 г. Больше всего жизней унесло землетрясение на Гаити в январе ..., когда погибли более 222 тыс. человек.»

Техническая авария при всей ее возможной тяжести не приводит к сравнимым жертвам и разрушениям. И все же большая авария в технической системе иногда приобретает настолько боль-

шой 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 населенный пункт, да еще зимой, да еще северной ночью, да еще на сутки – трое? А если это большой город, мегаполис? Представим себе людей, оставшихся в шахтах или в лифтах, на операционных столах и т.п. Плюс к этому в темном городе оживает деклассированный люд. А если без электричества остались непрерывные производства, химические, биологические, металлургические? Или же просто животноводство – ведь коровы не могут долго ждать дойки? И получается, что техническая 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 четвертом 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 глубоко под платформой привел к долго не прекращенному разливу нефти, и это вызвало тяжелейшую природную катастрофу в море и на побережье США.

1.1.2. Прогресс как источник аварий

Прежде чем обратиться к большим авариям, посмотрим хотя бы поверхностно на самые распространенные 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 обвинен. Судья решил, что смерть "была случайной" и сказал: "Этого никогда не должно повториться". И

действительно, прошло целых три года до следующей жертвы: 13.09.1899 в Нью-Йорке такси на электрической тяге сбило пассажира, вышедшего из трамвая, он погиб. Водителя арестовали и обвинили в непредумышленном убийстве, но суд его оправдал. А затем аварии стали происходить все чаще, массово, и число жертв стало исчисляться каждый год тысячами, десятками и сотнями тысяч.

За сто с лишним лет автомобиль прогрессировал от минипаровоза с выпирающими во все стороны деталями конструкции до обтекаемого чуда, которое движется электричеством. Его скорость увеличилась с $5 \div 10$ до $200 \div 300$ километров в час. Он принес человеку громадное приращение производительности и комфорта. И одновременно автомобилизация унесла 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.

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.

Россия и Канада географически сходны – их территории находятся, в основном, севернее 50-ой параллели. Южнее находится только небольшая часть России: в европейской части – немного южнее Волгоград, далее Ростов и еще более южные территории, а в азиатской части – немного южнее Хабаровск и сильно южнее более теплый Владивосток. В Канаде же южнее находятся почти все главные города: немного южнее – Ванкувер и Виннипег, значительно южнее – Оттава и Монреаль. В целом, омываемая с двух сторон океанами Канада на одинаковых широтах значительно более благоприятна климатически, чем Россия. В помещенной на следующей странице таблице обращает на себя внимание примечательное обстоятельство: несмотря на это, в Канаде плотность населения в 2,7 раза меньше, чем в России.

Таблица
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
Количество авто в стране, млн авто	21,8	18,6
Количество погибших в дорожно-транспортных авариях за год, всего	30500 *	3700
Количество погибших в дорожно-транспортных авариях за год на каждые из 10000 авто	14	2
Количество авто, покупаемых в стране ежегодно, в предположении** обновления парка авто на 10%, млн авто	2,2	1,9
Количество авто, покупаемых в стране ежегодно, в расчете 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.

** Десятипроцентное обновление парка автомобилей является только предположением, в котором не исключена ошибка раза в два, что не меняет сути сопоставления.

Останавливает ли людей такая плата за автомобильный прогресс? Нет, не останавливает, но заставляет принимать меры для снижения смертности на дорогах. Это – усовершенствование 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, кто воздерживается от этого.

Автомобилизация обходится обществу 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 готовит гибель одного человека в год.

Кстати – сравнение, иллюстрирующее пользу затрат. Канада создает в 2,5 раза больший ВВП, чем Россия, и за счет этого (вероятно, также за счет 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 полезны.

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

Иллюстрацией этому может служить различное отношение к атомным электростанциям в Германии и в России после аварии на японской Фукусима 1 (подробнее – в разделах 1.2.1 и 1.5.3).

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 колесами и в связи с ними. Единственное утешение – не сразу, как при большом катаклизме, а постепенно! Однако, можно предположить, что, не изобрети человек колеса, не используй 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 вперед, исследуя, уместно применяя новые технологии, всемерно избегая аварий и все же разумно рискуя в рамках гуманизма и расширения возможностей общества.

Вряд ли стоит 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. Так мистически сто лет назад многие восприняли гибель «Титаника» – как кару за самоуверенную попытку сравниться с высшими силами, а то и превзойти их: имя судна, Титаник, напоминает о титанах, восставших против греческих богов. Вот далеко идущие мысли на эту тему известного исследователя культуры Б.М. Парамонова (из эссе от 12.04.2012):

«Гибель "Титаника" была событием в высшей степени символическим, неким пророческим предупреждением человечеству, начинавшему терять голову в упоении собственными колоссальными достижениями. Громадный корабль, чудо техники XX века, был объявлен непотопляемым. Это была не только уверенность в его техническом совершенстве, но и самодовольство человечества, в непомерной гордыне провозгласившего себя владыкой мира и повелителем стихий, ...узурпация человеком высших, божественных прав, захват престола богов».

«И вот это корабль погиб, столкнувшись с айсбергом, затонул за три часа. Это было не просто кораблекрушение, но первая глава мировой катастрофы, вскоре последовавшей. Через два года после гибели «Титаника» началась первая мировая война...».

«Много писали о технических недочетах в «Титанике»: недостаточная герметизация нижних отсеков, плохое качество клепальных работ, некомплект спасательных шлюпок, даже непроведение шлюпочных репетиций. Но в свете последовавших скоро событий стало ясно, что дело не в недостатках той или иной техники, а в самом ее гипертрофированном избытке. Сама война стала технической, и не люди на войне управляли этой техникой, а она ими. Человек, человечество в целом оказалось заложником технологического прогресса, экстенсивного распространения техники. А после первой мировой войны случилась и вторая, и атомная бомба была изобретена и применена».

Древняя тема вины человечества и возмездия ему далеко выходит за рамки темы о собственно авариях, теперь она соприкасается еще и с такими широкими проблемами как экология, антиглобализм, и мы не будем ее далее развивать. Но последствия гигантомании и рискованного вторжения в неизученную область можно понять вполне рационально – они проявляются очевидными авариями, и примеры этого мы продемонстрируем.

1.1.3. Те, кого связывают с аварией

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 ресурсов, 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. Во всяком случае, в области энергосистем автору известен только один случай преднамеренного создания аварии – нападение нескольких диверсантов в 2009 году на небольшую гидроэлектростанцию на Кавказе.

Вот курьезный пример рукотворного повреждения оборудования. Приблизительно в 1958 году, вскоре после ввода в работу первой электропередачи напряжением 400 кВ, автор часто бывал на среднем из ее трех переключательных пунктов, соединяющих две параллельные линии этой электропередачи (на этом пункте он занимался вводом в действие различной автоматики). Эта электропередача была задумана и сооружена с одной конкретной целью – для передачи приблизительно 1000 МВт мощности от гидроэлектростанции, расположенной на Волге чуть выше Самары, к Москве. Обе ее громадные на вид параллельные линии проходили в районе переключательного пункта (под Арзамасом, недалеко от города Саров, закрытого в то время под именем Арзамас 16) по бедной и очень слабо электрифицированной территории. Это положение воспринималось местным населением как унижающее вторже-

ние чего-то чуждого, и от электромонтеров я слышал историю (может быть, – выдумку) об издевательском использовании высоковольтных линий. Местные пастухи за неимением спичек прикуривали от этой линии: приставляли к проводу ствол дерева, и он от проходящего тока обугливался. Говорили даже, что кто-то из пастухов прислонил к проводу слишком сырой ствол и сильно пострадал. Конечно, такого рода маневр может привести к дуговому перекрытию с провода на землю и к отключению линии.

Помню и совсем другое отношение к этим линиям. Однажды тогда совсем молодой автор, устав от работы, с досады на житье в общежитии, на непролазную грязь под сапогами и на отвратительную столовую, пробормотал что-то вроде: «Чтоб она пропала эта линия!». Это было сказано при монтерах, обслуживающих опоры, изоляторы и провода линии – работа тяжелая и опасная. Один из них, крупный серьезный человек, возразил так тепло, как крестьянин говорит о корове: «Нехорошо Вы сказали, она – кормилица».

В остальных известных автору многочисленных примерах аварий в энергосистемах невозможно усмотреть ни преднамеренного создания аварии, ни способствования ее развитию. Необычные результаты создаются очень обычными обстоятельствами.

Однако невозможно 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 небоскреба и погибли тысячи людей.

В сложной технической системе взаимодействует множество разнообразных устройств, в ее многоступенчатом создании 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 функциони-

рование системы, никогда не безграничны, их приходится экономить.

Любой прогресс создается 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 тяжелой аварии в энергосистеме и сменяется пара поколений ее персонала, развивается привычная вера в ее неуязвимость. Тем временем энергосистема усложняется, условия ее работы изменяются, но в этом хорошо видны только положительные стороны, и они обычно действительно есть, возникновение же новых опасностей остается незамеченным. Играет роль и нормальная психологическая склонность полагать, что, если хорошее состояние длится долго, то оно стабильно продолжится. В результате энергосистема бывает не снабжена даже элементарными противоаварийными средствами, а операторы не тренированы на серьезные аварии. На этом фоне подкрадывается тяжелая авария, и дежурные операторы энергосистемы совершают грубые ошибки как в ходе аварии, так и во время восстановления системы после нее.

Предвосхищая выводы, можно утверждать, что, хотя технические системы отличаются друг от друга технологически, развитие аварий в них имеет много общего. Большие аварии возникают в больших системах: корабль, атомный блок, энергосистема большого региона, страны или континента. Для такой системы характерно сложное взаимодействие многих технологий и специалистов. В пространственном отношении она может являться концентрированной (корабль, атомный блок) или протяженной (энергосистема, трубопровод). В сложной системе возможно развитие локального события в большую аварию, вплоть до временной потери или безвозвратного уничтожения системы.

Здесь тема раскрывается в основном на примерах аварий в транспортных системах. А именно, – на примере корабля и поезда, затем несколько более подробно рассматриваются электроэнергетические системы с их транспортом электроэнергии от ге-

нераторов к потребителям. Профессией автора является борьба с авариями именно в таких системах.

§1.2. От начала аварии до восстановления

1.2.1. 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 незащищенное здание. Последовательные удары молнии в ряд важных элементов энергосистемы, прежде всего – в воздушные линии электропередачи, могут привести к прекращению электроснабжения многих ее потребителей и даже к ее коллапсу (пример в разделе 4.2.2).

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 ее создателями, например, слишком высокая или низкая температура, сильные электромагнитные помехи. Еще пример: гололед, 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 (такой случай упомянут в разделе 3.6.2).

Эти природные явления многократно описаны [1] и сами по себе здесь не рассматриваются, хотя принимаем во внимание, что спусковым механизмом техногенной аварии может явиться при-

родное явление. Например, сильный ветер может в числе прочих неприятностей опрокинуть дымовую трубу или опору линии электропередачи, но приведет ли это к аварии, насколько эта авария разовьется широко и глубоко – предмет нашего рассмотрения.

Поразительный пример перехода стихийного бедствия в техногенную аварию и аварии в экологическую катастрофу – то, что произошло в Японии на нескольких блоках прибрежной атомной электростанции Фукусима-1 в марте 2011 года 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 создает прямую ядерную опасность, выдержало удары стихии, а вот вспомогательному оборудованию, видимо, было уделено меньшее внимание, к нему были предъявлены менее жесткие 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 котел 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, аварийно примененной 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, раньше работавшего только на органическом топливе, а теперь еще и более опасного, атомного, исключительно важна бесперебойная подача воды – это давно известно, и в подтверждение приятно сослаться на книгу, одним из соавторов ко-

торой был отец автора [3]. Вот цитаты из раздела о питательных насосах, сопровождаемые некоторыми пояснениями.

«Питательные насосы служат для подачи воды в котлы.»

Здесь имеется в виду холодная вода, которая котлом превращается в пар, подаваемый в турбину генератора.

«Современные котлы отличаются относительно малым водяным пространством, поэтому питательные насосы относятся к наиболее ответственным механизмам с.р. Даже кратковременная остановка этих насосов может вызвать понижение уровня воды в котле ниже допустимого и необходимость немедленной остановки котла во избежание тяжелой аварии. По существующим нормам суммарная производительность всех питательных насосов котельной установки должна составлять не менее 3-3,5-кратной максимальной производительности установки. При этом не меньше 50% производительности всех питательных насосов должно обеспечиваться насосами с паровыми приводами.»

Здесь с.р. – собственный расход (теперь предпочитают термин с.н. – собственные нужды), т.е. все то, на что электростанция расходует электроэнергию для нужд ее собственного производства. Под остановкой котла подразумевается прекращение подачи топлива в котел; в атомном реакторе аналогичная операция еще не освобождает от необходимости подавать охлаждающую воду. Уже давно вместо паровых резервных приводов используются другие приводы: дизельные и т.п.

«...на каждый рабочий насос имеются два резервных насоса, из которых один имеет электропривод, а другой – паровой. Между отдельными группами насосов могут быть осуществлены также и ... связи, позволяющие любому из насосов одной группы резервировать насосы других групп.

...присоединение рабочего и резервного двигателей одной группы желательного осуществлять перекрестное.»

В последней фразе имеется в виду питание двигателей от существенно разных источников напряжения.

Немного о судьбе авторов этой книги. Через три года после ее выхода, в конце 1938 года, один из ее авторов, Иофьев, был взят на Лубянку, сидел в одиночке Таганки и в общей камере Бутырки. Ко времени скоро случившейся перетряски в НКВД (уволили и потом расстреляли наркома Ежова и вместо него назначили как бы более сдержанного Берия) он еще «не сознался» и за отсутствием грехов был выпущен из тюрьмы. До ареста он руководил проектированием электрической части Московской энергосистемы и в качестве доцента учил студентов МЭИ. После него он не решился вернуться в слишком опасную среду Мосэнерго и МЭИ и поступил на скромную должность в институт по проектированию предприятий цветной металлургии, там вполне успешно работал еще долгие годы, но по настоящему творческая деятельность сломалась.

А пока Иофьев находился под следствием, его молодой ученик, сотрудник и соавтор Бейлин погиб. Его тело обнаружили в канале отвода теплой воды от электростанции в Бобриках (потом Сталиногорск и Новомосковск), которую

они вместе проектировали. Было ли это результатом своеобразной казни, уголовщины или самоубийства – не известно.

На Фукусима-1 наверняка были осуществлены гораздо более широкие и более совершенные меры питания водой, чем рекомендуется в [3], но сила стихии оказалась недооцененной 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, на который был рассчитан его высоковольтный выключатель, и он не справился с отключением этого элемента.

Затем, повреждение оборудования может произойти из-за потери надежности какой-то из его составных частей. Несколько упрощая, различают две причины ненадежности: дефект изготовления, который обычно проявляется в начале использования, и приближение к негодности в процессе старения. Например, если изолирующие свойства электротехнического минерального масла, залитого в 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 с горением разлитого масла внутри или снаружи – последнее в случае разрыва его оболочки.

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 подавляющем 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 трех линий электропередачи, происходящих из-за жары, ударов молнии или налипшего снега, но отключение еще одной линии может запустить громадную аварию – потерю питания большей части этой сети или всей этой сетью. Такого рода аварии описаны в параграфах 4.2 и 4.3.

Для протекания дальнейшего аварийного процесса не важны многие конкретные обстоятельства первоначального толчка, а важен его содержательный результат. Например, не важно, из-за чего возникла связь провода с поверхностью земли и отключение линии: в результате ли дуги, вызванной ударом молнии, или в результате экзотического прикуривания, 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 ее трех проводов или упали все три провода вместе. Может не играть роли, что, скажем, ничего этого не было, а линию ошибочно отключил оператор. Важнее всего этого другое – линия оказалась отключенной, по ней больше не может передаваться электроэнергия, и ее функцию должны взять на себя какие-то другие элементы энергосистемы, которые, в принципе, должны быть способны к этому. Но это не всегда предусмотрено...

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 авари-

ей, могла бы предотвратить ее или, по крайней мере значительно ослабить ее последствия. Способность уклониться от аварии – вопрос очень важный, но в данной, вводной главе обсуждать его преждевременно. Читатель вернется к нему в заключительной главе (раздел 5.2.3), в которой станет возможным опереться на уже прочитанные описания некоторых аварий, имеющих отношение к этому вопросу.

1.2.2. 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 *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, в той или иной мере успешным, различных автоматических систем или при их бездействии.

Возможно и совершенно иное. Может пройти несколько часов от повреждения судна до того, как оно затонет. Авария на атомной станции развивается еще дольше. 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 кусков фаянса приводят к повреждению соседнего оборудования. Такие случаи имели место во время аварийных событий, описанных в §4.3.

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, вовлеченном в процесс.

Во время длительного переходного процесса роль команды судна, операторов огромна. В дело вступают и ремонтные бригады, пожарные расчеты, команды спасателей, оснащенные различным оборудованием, в том числе не относящимся к основной технологии аварийного объекта. Суммируя все это, можно сказать, что во время такого процесса ведется *борьба персонала за живучесть* аварийного объекта.

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 (самолет, 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 еще не проявилась существенно. Например, судно уже затонуло, а люди находятся на подручных спасательных средствах и нуждаются в помощи.

Наконец, наступает *восстановительный период*. Если объект не разрушен и не может быть быстро заменен другим, его функционирование требуется восстановить. Например, должны подойти спасательные суда, и люди должны быть на них подняты. Может быть, требуется поднять затонувшее судно. Наверняка требуется снова запустить аварийно остановившуюся электростанцию, а для этого нужно подать ей откуда-то напряжение, и, что самое важное, нужно подать напряжение на подстанции потребителей электроэнергии. Небоскребы в Нью-Йорке, которые были разрушены 11 сентября 2001 года, решили не восстанавливать, но все равно было необходимо 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.

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

§1.3. Забота о безаварийности

1.3.1. Техническое совершенство и надежность

К любому техническому объекту предъявляются многосторонние требования, например, экономические и экологические. В связи с авариями более всего важно требование эффективности функционирования объекта в аварийных условиях. Для его выполнения выдвигаются определенные требования к каждому из элементов, составляющих этот объект или управляющих им. Эффективность функционирования зависит от того, на каком уровне находятся *техническое совершенство* и *надежность* элементов и, следовательно, объекта в целом. Конечно, важнейшую роль играет совершенство взаимодействия элементов.

Недостаток одного из этих свойств лишь в небольшой степени может быть компенсировано наличием другого. Коллега по работе в институте Энергосетьпроект и друг автора Эрик Петрович Смирнов, который впервые разработал вопросы надежности применительно к релейной защите энергосистем от коротких замыканий, в то же время был большим любителем и знатоком футбола. Он любил приводить слушателям его лекций следующую аналогию. В 1940 - 50-х годах ленинградский футболист Архангельский показывал для того времени необыкновенно высокую технику и стал бы великим футболистом, если бы не частые травмы. Это – пример высокого технического совершенства при слабой надежности.

Любопытно, что с течением времени продуктивные занятия надежностью релейной защиты привели Смирнова к попытке найти оптимальное сочетание требований к ней, а это натолкнулось на отсутствие теории научного управления централизованной экономикой в условиях возможных внешних воздействий на

нее. Он занялся этой проблемой и, завершив в конце 1980-х годов ее разработку, составил докладную записку на имя М.С. Горбачева, тогда генерального секретаря правящей партии, и отнес записку в его приемную. Ответа не последовало – видимо, там понимали, что уже поздно.

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 определенных тоже заданных 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, подведенное к нему извне, не меньше 50% и не больше 120% номинального значения. А устойчивость атомной установки может требоваться даже при землетрясении такого уровня, которое в данной местности ожидается в среднем один раз в 1000 лет или которое вообще невозможно себе представить.

Относительно столь редких событий полезно иметь в виду, что их периодичность вряд ли может быть установлена путем 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 случаться 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.

Надежность элементов объекта и объекта в целом задается различными статистическими показателями, сущность которых зависит от характера выполняемых функций. Для непрерывно выполняемой функции часто задается *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

элемента сети произошло короткое замыкание, упомянуый Смирнов предложил задавать более полноценный показатель, названный им *готовностью*. Под этим понимается вероятность того, что устройство окажется работоспособным в произвольный момент времени, когда бы ни потребовалось. Периоды, когда устройство выведено из действия для плановой ревизии или для устранения неожиданной неисправности, тоже учитываются как неготовность наряду с периодом, когда в устройстве есть неисправность, но она еще не выявлена и поэтому не устранена. Занимаясь противоаварийной автоматикой, автор вместе со Смирновым принял этот же показатель надежности.

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

Уязвимость объекта резко растет с ростом его сложности. Представим себе для примера противоаварийную систему управления объектом состоящей просто-напросто из ста устройств, по надежности подобных персональному компьютеру, причем для ее правильного функционирования 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, – эти элементы должны присутствовать в нем в избыточном количестве и гибко взаимодействовать друг с другом в условиях самых разнообразных угроз объекту, возникающих как внутри объекта (в виде отказа того или иного из его элементов), так и поступающих извне.

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

1.3.2. От разработки к применению

По мере увеличения роли техники в жизни людей увеличивается и количество крупных аварий, и опасность каждой из них. Поэтому любое техническое сооружение, которое может явиться источником крупной аварии, при его создании снабжается подходящими для него средствами предупреждения аварии и локализации ее 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 повышает издержки его использования. Поэтому владелец 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. Вполне возможна уже упомянутая ситуация (раздел 1.1.3), когда сооружение с течением времени по мере своего развития претерпевает принципиальные изменения, которые требуют изменить подход к противоаварийным мероприятиям, что не замечается персоналом, и он остается в плену старого, уже негодного подхода. При возникновении непредвиденного аварийного процесса эта слепота может сказаться тяжелейшим образом. Например, скверно, если бы переход от строительства двухэтажных зданий к многоэтажным не сопровождался изменением противопожарных мероприятий.

Устройства 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 безопасности. Скупость этой документации делает оценку надежности невозможной. Но кое-что понять все-таки можно.

Например, какой надежностью обладает персональный компьютер? Обычно продавец дает гарантию на два года. Заметим, что эта гарантия касается не того, что компьютер будет работать этот срок безаварийно, а лишь того, что его будут бесплатно ремонтировать или заменять в случае, если поломка случится в течение этого срока. Сколько раз устройство откажет и с какой вероятностью

этого можно ожидать, – не известно. Но гарантийный срок все-таки косвенно характеризует надежность: изготовителю не выгодно, назначив большой срок, продавать ненадежное устройство – он слишком много потеряет на ремонтах и заменах. Если же покупатель хочет получить 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 возможной, но маловероятной, а уже на третий год – настолько вероятной, что за продление гарантии требует оплату ремонта вперед. Отсюда можно сделать вывод, что продавец оценивает среднюю (!) продолжительность исправной работы примерно двумя годами, а исправности в течение трех лет ожидает, скажем, только от двух третей продаваемых изделий.

Перед началом разработки будущей техники ей предъявляют более или менее определенные 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. Так вот, изготовитель виноват только в том случае, если в процессе эксплуатации соблюдались все оговоренные им условия: устройство использовалось только по своему назначению, поддерживались должные внешние условия (температура, влажность, вибрация, электромагнитные помехи и т.п.), устройство в должные сроки подвергалось ревизии и не вышла оговоренная изготовителем продолжительность эксплуатации. Пример использования не по назначению приведен далее, в §2.3: энергетическую установку, предназначенную постоянно производить мощность, превышающую 80% ее полной мощности, заставляли часто снижать мощность вплоть до полной разгрузки.

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

Как правило, чем проще устройство, тем требования к нему определеннее, а к сложным 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 отдельных ее частей, и создается громадное количество инструкций относительно использования этих частей. В особенности же, – относительно того, что должен делать обслуживающий систему персонал в многочисленных разнообразных случаях ее функционирования, во время нормальной ее работы и в аварийных условиях.

Во многих областях техники, решения о затратах принимаются, в основном, или в рамках нормативных актов или в близком соответствии с ними. Там, где нормирование не проведено (его еще нет или речь идет о такой редкой или даже уникальной ситуации, для которой нормирование невозможно), требуется индивидуальное решение. К сожалению, громадное разнообразие аварийных ситуаций не удается охватить нормированием полностью, и поэтому в области борьбы с авариями приходится принимать много важных решений, используются оба подхода.

Опорой самостоятельного решения служит опыт и 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 системы или, так сказать, неопиcуемость таких требований к ней, которые были бы совершенно определенно сформулированы, создают соблазн применить технические решения, не вполне отвечающие особенностям конкретной системы или даже, вообще, противоречащих основным закономерностям. Результат этого – возможные довольно тяжелые ошибки. Их сделано немало, и даже скромный личный опыт автора содержит много случаев, когда интуиция предлагала совсем не лучшие решения.

Автор может пояснить данную опасность на хорошо известных ему примерах из области энергосистем и поэтому отсылает интересующегося читателя к §3.5.

1.3.3. Развитию аварии противостоит эшелонированная защита

Противоаварийные мероприятия аккумулируют многочисленные свойства технического совершенства, надежности 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. Еще сужая взгляд, видим систему автоматики, действующую в ходе аварии с целью предотвратить ее дальнейшее развитие, – *противоаварийную автоматику*.

Заметим, что противоаварийное управление – мягкий термин. Мы будем к нему прибегать, когда речь идет не о собственно противоаварийной автоматике, а о таких более общих проблемах, как сумма мероприятий против аварий, функции, возлагаемые на противоаварийную автоматику, расчет необходимых управляющих воздействий этой автоматики и т.п.

Важнейшей особенностью хорошо построенного противоаварийного управления является его *эшелонированность*: различные системы управления призваны предупредить развитие аварийной ситуации на различных ее стадиях, резервируя друг друга.

Говоря военным языком, прорыв врагом первой линии обороны – еще не катастрофа, он наткнется 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 прорвет все три линии.

Существенной проблемой, возникающей при создании противоаварийного управления, является *непротиворечивость* различных его мероприятий – каждое из них не должно, по возможности, выдвигать дополнительных требований к другим мероприятиям, а все-таки выдвигаемые требования должны быть минимальными, ясными и, конечно, выполнимыми.

Последовательность построения хорошего противоаварийного управления легко увидеть в электроэнергетических системах, и мы попробуем показать это.

Так, любой элемент энергосистемы непременно оснащается *релейной защитой* от коротких замыканий (КЗ) в нем. Она осу-

ществляет быстрое отделение поврежденного элемента от энергосистемы, препятствуя этим дальнейшему разрушению оборудования и нарушению функционирования энергосистемы. Эти цели достигаются и в условиях отказа отдельных составляющих защиты и высоковольтных выключателей, на которые она действует, и это обеспечивается широко примененным в ней резервированием. Резервирующие устройства имеют другой принцип действия по сравнению с основными устройствами, действующими быстро, и часто их действие наступает только вследствие неуспешного действия основных устройств – все это характеризует релейную защиту как эшелонированную систему. Таким образом, релейная защита снижает интенсивность наиболее частых аварийных возмущений – КЗ и предшествует действию противоаварийной автоматики.

После отключения поврежденного элемента еще не все потеряно. В расчете на то, что КЗ устранилось, как это бывает, если оно вызвано ударом молнии, устройства *автоматического повторного включения* (АПВ) делают попытку быстро включить этот элемент снова в работу. И в большинстве случаев цель достигается. А если потребители потеряли источник питания, но имеется еще какой-то, то устройства *автоматического включения резерва* (АВР) включают это резервное питание.

Если авария развивается дальше, то вступает в действие собственно противоаварийная автоматика, вернее – последовательно вступают в действие ее отдельные подсистемы, предназначенные для действия в разных ситуациях развития аварии и на разных ее этапах.

В общем плане, *цель противоаварийной автоматики – сохранить максимум источников электроэнергии из еще оставшихся в процессе аварии, чтобы питать соответствующее этим источникам количество тоже оставшихся потребителей, особенно наиболее ответственных из них. К числу последних относятся, конечно, электрические двигатели самих электростанций* (двигатели собственных нужд), без которых выработка электроэнергии невозможна (на электростанции они потребляют до 10% ее

мощности). По крайней мере, *необходимо сохранить максимум источников электроэнергии в состоянии готовности к полному их восстановлению.*

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

В результате отключения одного или нескольких элементов электрической сети ее пропускная способность может стать гораздо меньше, чем требуется для передачи мощности, протекавшей по ней до этого момента (чаще всего потеря многих элементов бывает вызвана не вполне удачными действиями релейной защиты на отключение КЗ или последовательной термической перегрузкой и отключением шунтирующих друг друга элементов сети). Другая опасность – повышение передаваемой по сети мощности. 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 мощности генераторов и потребителей 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 (подробнее – в разделах 3.1.2 и 3.1.5). Для ее сохранения существует подсистема противоаварийной автоматики, довольно мягко воздействующая на энергосистему в сторону восстановления нарушенного соответствия.

Воздействие осуществляется в двух направлениях. Первое – на изменение соотношения между мощностями турбин и нагрузки энергосистемы в ее отправной или в приемной 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 оборудова-

нием для него, и приходится, в основном, применять воздействия по менее желательному первому направлению.

Эта подсистема 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 опаснейший процесс – так называемый *асинхронный ход* ее частей (подробнее об этом – в разделе 3.1.5). На этот случай создается подсистема, состоящая опять-таки из основных и резервных устройств и действующая более жестко – в основном, на возможно более быстрое разделение асинхронно работающих частей энергосистемы путем отключения 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 из-за повреждения и отключения какого-то элемента, связывающего 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 еще 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, тоже приводящая к коллапсу энергосистемы, – *недопустимое понижение напряжения*. Оно является следствием возникновения аварийного небаланса мощности или тяжелого короткого замыкания. Понижение напряжения может привести к полной остановке асинхронных двигателей и тепло-

вых электростанций, оно особенно опасно прекращением электроснабжения во всей той части энергосистемы, которая имеет хорошо развитую, плотную электрическую сеть (*лавина напряжения*).

Во избежание *коллапса* энергосистемы применяются разнообразные автоматические устройства, почти всегда действующие на отключение части потребителей электроэнергии, и, если это не помогает, – на отделение от дефектной энергосистемы наиболее важных электростанций или их отдельных генераторов, питающих по возможности наиболее важных потребителей соответствующей мощности.

Наконец, отдельному элементу энергосистемы грозит *термическая неустойчивость*. Она возникает из-за протекания по нему недопустимо большого тока и приводит к отключению элемента. В результате может возникнуть последовательное отключение перегружаемых элементов, увеличение потерь напряжения в перегруженном сечении и, затем, лавина напряжения. Чтобы предупредить отключение элемента, требуется его достаточно быстро разгрузить.

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

Нельзя, конечно, забывать, что параллельно с релейной защитой и противоаварийной автоматикой в энергосистеме действуют многочисленные устройства автоматического регулирования частоты, мощности и напряжения.

Изложенное в этом разделе относительно энергосистемы 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.

§1.4. Потери от обычной аварии и от аварии, особенно крупной

1.4.1. Затраты и издержки

Поскольку существенной стороной почти любого противоаварийного мероприятия являются затраты ресурсов, необходим механизм хотя бы ориентировочной оценки затрат на его создание и затрат, возникающих в процессе его использования. Оценка может быть произведена с разных точек зрения: со стороны общества в целом, со стороны руководства объектом, который подвержен опасным авариям (далее для краткости – просто объектом), а также со стороны потребителя продукции, если таковая в том или ином смысле создается этим объектом, – и эти точки зрения, вероятно, привели бы к разным оценкам.

Решение о затратах обычно принимается тем или иным руководством объекта, и мы не будем подвергать это критике и ограничимся здесь оценкой именно с точки зрения объекта.

Экономическая эффективность противоаварийных мероприятий оценивается с помощью расчета затрат на их создание и ожидаемых эксплуатационных издержек, снижение которых должно окупить затраты. Издержки, в принципе, должны рассчитываться с учетом их ожидаемых согласно статистике значений, возникающих в аварийных ситуациях – как в случаях правильного, так и, не исключено, неправильного функционирования противоаварийных мероприятий. Аналогично должны сравниваться варианты сооружения объекта, если они характеризуются существенно различными издержками, возникающими в аварийных ситуациях.

В то время как принципиальное решение о противоаварийных затратах может в большой мере опираться на имеющиеся нормы, решение о выборе того или иного мероприятия или сочетания мероприятий вообще невозможно без сопоставления аварийных издержек – другого пути нет. Например, в области противоаварийного управления энергосистемой, которая располагает аль-

тернативными *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 расчетов). Механизм минимизации аварийных издержек дает возможность найти единственное решение об управляющих воздействиях из часто бесконечного разнообразия возможных решений.

Вопрос о побудительных мотивах противоаварийных мероприятий совсем не прост. С необходимостью учета 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 не поставлена потребителю в интересах противодействия развитию аварии. 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 объекту безразличны те ущербы, которые возникают у его потребителей в результате его деятельности. Обратная связь от потребителей к объекту имеется и идет по нескольким каналам. Вот главные из них.

Во-первых, как уже упомянуто, объект не получает плату за не доданную потребителю часть продукции.

Во-вторых, возможность ограничивать потребителя в получении им продукции (в некоторых разумных размерах и в соответствии с каким-то обоюдным 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 технологиче-

ского процесса у потребителя может оказаться, как известно, столь большим и даже катастрофическим, что его компенсация с помощью штрафа становится проблематичной. В принципе, противоаварийные мероприятия, направленные на бесперебойность работы потребителей, 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 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 непреодолимыми силами природы или неизвестными научными явлениями или что она разорит объект, если пустить дело по обычному 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 включен в них в качестве одной из составляющих, может быть, – главной.

Выбор противоаварийных мероприятий осложнен тем, что аварии, а также издержки от них носят случайный характер. Поэтому расчет этих издержек является довольно специфическим делом, для которого, кроме знания мероприятий, требуются еще и

статистические данные об отказах оборудования и автоматики и вероятностные характеристики будущих состояний объекта. Для ведения таких расчетов нужна команда специалистов, ориентирующихся в широком круге вопросов. Очевидно, не все объекты и даже специализированные организации обладают такими возможностями.

Проблема выделения средств на противоаварийные мероприятия близка к хорошо разработанной проблеме страхования. Это уподобление показывает, что тут, помимо изложенных сложностей, играют роль индивидуальные соотношения оптимизм – пессимизм, смелость – осторожность и т.п.

Далее затронуты проблемы возможной непростой связи между, с одной стороны, скалькулированными ущербами и издержками, имеющими вероятностный характер, а также восприятием их лицом, принимающим решение, и, с другой стороны, затратами на противоаварийные мероприятия, имеющими не вероятностный, а вполне конкретный характер.

1.4.2. Приведенные затраты

Как известно, в самой общей и простой форме стоимость производства продукции, приведенная к одному году производства, имеет две составляющих:

$$C_{\Sigma} = C + m ,$$

где C – себестоимость производства, m – прибавочный продукт. Себестоимость производства в течение одного года имеет тоже два слагаемых:

$$C = p_{\text{ам}} K + I .$$

Здесь в первом слагаемом K – затраты капитала, который требуется для создания средств производства, умноженные на $p_{\text{ам}}$ – долю стоимости средств производства, нужную для компенсации их амортизации. Другая составляющая I – издержки в процессе производства: стоимость материалов, оплата труда персонала (зарплата) и т.п.

Оценка желательного прибавочного продукта пропорциональна вложенному в производство капиталу:

$$m = E K ,$$

где E – коэффициент окупаемости капитальных вложений. Если он равен E_n – процентной ставке, иначе банковскому проценту (на капитал), то такой расчет прибавочного продукта дает минимальную оценку целесообразности данного инвестирования: это приращение капитала инвестор мог бы получить, если бы он вместо вложения средств в данное производство положил бы их в банк. Понятно, что наличие в стоимости члена m является необходимым условием расширения производства, и желательно, чтобы было $E > E_n$.

Поскольку возможны различные варианты создания производства, в процессе его проектирования ищется тот вариант, который обеспечивает минимальное значение общей себестоимости C . Например, путем увеличения K обычно можно добиться уменьшения издержек I .

Применение противоаварийных мероприятий со всей очевидностью увеличивает члены K и I , но вместе с тем, и это не так бросается в глаза, может и снизить их – за счет уменьшения затрат на создание объекта и за счет возможности осуществления более экономичной его работы.

В СССР экономические оценки прививались с большим трудом. Принятое представление, что новая продукция порождается только трудом, делала неприемлемым наличие члена m в стоимости. Пока это было еще возможным, экономисты шли на ухищрение – камуфлировали процентную ставку под срок окупаемости T , который в случае увеличения инвестиций должен быть меньше некоего нормативного срока T_n :

$$T = \frac{K_2 - K_1}{C_2 - C_1} \leq T_n .$$

В этом выражении величины с индексом 1 относятся к исходному варианту, а с индексом 2 – к новому. Понятно, что T_n является

просто обратной величиной от E_n . При этом предполагалось, что значение этой величины T_n резко различно в разных отраслях экономики; для предпочтительных с точки зрения руководства страны отраслей допускалось большее значение, чем в не столь важном производстве предметов потребления (отсюда и не только отсюда – их постоянный дефицит).

Расчет приведенных затрат применялся почти исключительно в электроэнергетике и то только на стадии проектирования энергосистем, а не во время их функционирования (не в «хозяйственном расчете», как это называлось).

Потребность в расчете приведенных затрат была особенно остра в связи со спорами о том, что выгоднее строить – тепловые или гидравлические станции: у первых много больше издержки I , а у вторых – капитальные затраты K . Ответ зависел от того, каким брать значение E_n , но это-то было как бы не ясно (преобладающим было мнение, что $E_n = 0,15$). Впрочем, многим участникам этих дискуссий было понятно, что действительный ответ лежит совсем в другой области: гидравлическую станцию проще построить и эксплуатировать, ей не нужно угля, а для обширных строительных работ годится даровая рабочая сила заключенных.

Немного о лицах и окружающей обстановке. В середине 1970-х годов почти всё здесь изложенное становилось ясным автору из лекций, которые время от времени читал Леонид Александрович Вааг, и из следующих затем по дороге к метро бесед с ним. На его лице был большой шрам с войны, в МЭИ он как доцент занимался электрическими станциями и временами выполнял административные функции. Затем он работал в Комитете по науке и технике и увлеченно занимался экономикой. Он сетовал, что руководители этого Комитета, академики, чье мнение выслушивают в правительстве, хотели бы его понять, но не могут.

В 1949 году Вааг был заместителем председателя приемной комиссии МЭИ и по долгу этой непростой службы внимательно рассматривал многостраничные анкеты абитуриентов, затем беседовал с ними. В свою очередь к нему в кабинет вошел и автор, пытавшийся поступить в институт. Вааг вернул ему анкету и спокойно объяснил, что нельзя в ней писать, что отец, бывший доцент МЭИ, не был под судом и следствием, ведь он был в 1938 году арестован, и многие преподаватели МЭИ это знают. Автор выяснил у отца документальные подробности его нахождения под следствием, вписал их в анкету и сдал ее Вагу. Впрочем, можно было этого и не делать: три пустяшные ошибки в сочинении и нерешаемая математическая задача не пустили в институт. Взамен очного МЭИ автор поступил в заочный, с удовольствием занимался дома и вполне успешно окончил там первый курс, после чего вместе с несколькими подобными ему студентами был переведен на второй очный курс, в чем содействовал тот же

Вагг. Он был заместителем декана электроэнергетического факультета Ивана Ивановича Соловьева, который ранее возглавлял центральную службу автоматики Московской энергосистемы и не одного выручил из беды своей рискованной в то время порядочностью, а перейдя в МЭИ, читал как профессор курс об устройствах автоматики. Курс был скромнен по содержанию, в нем большое место занимало описание аппаратуры для фантастической системы, упомянутой далее в разделе 3.5.2.

1.4.3. Ущерб потребителей – составная часть издержек

Еще труднее внедряется в сознание мысль о том, что всяческие аварийные события у поставщика наносят ущерб потребителю и влияние этого ущерба должно учитываться при расчете экономических показателей поставщика. Рассмотрим этот вопрос применительно к случаю непрерывной поставки товара, что наглядно проявляется в электроснабжении.

Как уже упомянуто, в планировании электроэнергетики использовалась минимизация приведенных затрат, и это привело к предложению пойти дальше, а именно в расчет издержек I наряду с традиционными составляющими включить ущерб, возникающий из-за временного недоотпуска электроэнергии потребителям. Рассматривалась ситуация, когда у энергосистемы не хватает мощности или энергоресурсов и поэтому она уведомляет часть потребителей о необходимости снизить нагрузку, причем делает это заблаговременно, чтобы потребители имели возможность подготовиться к ограничению. Такое ограничение есть *ограничение с предупреждением*.

Это предложил И.М. Маркович. Из своего огромного кабинета окнами на реку и Зарядье, оборудованного, как и другие начальственные комнаты в Мосэнерго, громоздкой трофейной мебелью, он руководил ответственной службой, ведавшей электрической частью энергосистемы, сумел сохраниться в сложных ситуациях этой службы и пользовался своим острым умом, чтобы и избегать аварий и развивать науку об энергосистемах. Так например, в начале 1930-х годов он участвовал в первой разработке противоаварийного управления тепловыми турбинами.

Наносимый ущерб не рассматривался как ущерб для какого-то конкретного ограничиваемого потребителя. Таковой, как и все предприятия страны, хотя и имел «хозрасчет», не был экономи-

чески самостоятельным, а являлся частью единого централизованного предприятия страны, и поэтому этот ущерб выглядел как ущерб для всего «народного хозяйства», «народнохозяйственный» ущерб.

В организациях, занимавшихся планированием развития энергетики, однако, существовало твердое мнение, что никакого ущерба для потребителей вообще не возникает, поскольку, согласно статистическим отчетам, страна и все ее предприятия успешно выполняют план. Этим не без иронии подразумевалось, что план работы потребителя составлен в предвиденье того, что он не получит того количества электроэнергии, которое нужно для производства. И действительно, если принято «планирование от достигнутого», т.е. планирование на будущий год ведется по результатам предыдущего, когда потребление ограничивалось, то не исключено, что учет ограничения косвенным образом осуществляется.

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 как стоимость той электроэнергии, которую недополучил потребитель. Удельная оценка принималась в три раза выше тарифа 0,2 руб. на промышленное потребление одного киловатта мощности в течение часа. Она приблизительно соответствовала оценке 0,6 долл. за киловаттчас, считавшейся правдоподобной и в США.

Впрочем, если сопоставляются только издержки, связанные с ненормальными состояниями энергосистемы, если они не сопоставляются с одновременными затратами и с эксплуатационными издержками, то значение ущерба в стоимостном выражении не играет роли, и он может быть вычислен просто как величина той энергии, которая не додана потребителям.

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 отнесенными к конкретной энергосистеме и к ее потребителям, а также полагать, что этот ущерб у потребителей, как изложено выше, увеличивает издержки энергосистемы и должен быть поэтому включен в их состав. Что же касается значения ущерба, то можно понимать его как некоторую константу, которая отражает обратную связь от потребителей к энергосистеме.

1.4.4. Аварийные издержки

Коль скоро в состав издержек включен ущерб от отключения потребителей с предупреждением, стало естественным включить туда же и издержки, возникающие в аварийных условиях и связанные с противоаварийными мероприятиями: ущерб для потребителей и собственные издержки энергосистемы.

Быстрого уменьшения нагрузки потребителей можно добиться тремя способами.

Первый из них – *аварийное отключение потребителей*, которое производится оператором энергосистемы или ее автоматикой. Имеется в виду отключение части потребителей, чтобы спасти остальную часть, обычно гораздо большую. Это управляющее воздействие наиболее ясно как по технике выполнения, так и по двойственному результату, полезному с точки зрения цели и вредному с точки зрения потребителя. Отключение потребителей должно выполняться в очередности, согласно которой первые места в очереди занимают потребители, наиболее легко переносящие временное отключение от сети. При соблюдении такой очередности аварийный удельный ущерб увеличивается с увеличением доли ε мощности отключаемых потребителей в общей мощности потребителей. Однако, реальная очередность не может не отличаться от оптимальной, и это может существенно увеличить удельный ущерб.

Два других способа – снижение частоты во всех работающих на одной частоте частях энергосистемы или снижение напряжения в каком-то узле энергосистемы (снижение того или другого на 1% вызывает уменьшение потребляемой мощности приблизительно на $0,5 \div 2,0\%$ – в зависимости от вида потребителей).

Оба способа по своему 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. Оно приносит и другую неприятность – двигатели вращаются медленнее, их производительность падает. Снижение напряжения тоже уменьшает вращающую способность

асинхронных двигателей, 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, еще сильнее пониженное напряжение... Этот процесс опасен приближением к упомянутой лавине напряжения.

Усилиями многих специалистов был исследован ущерб для разного рода потребителей от всех трех указанных мероприятий. Было найдено, во сколько раз ущерб от аварийного ограничения потребителей больше, чем ущерб от их отключения с предупреждением. Этот повышающий коэффициент, обозначенный y , графически представлен на рисунке 1.1 как зависимость от ε – доли снижения потребляемой мощности по отношению к ее общей величине.

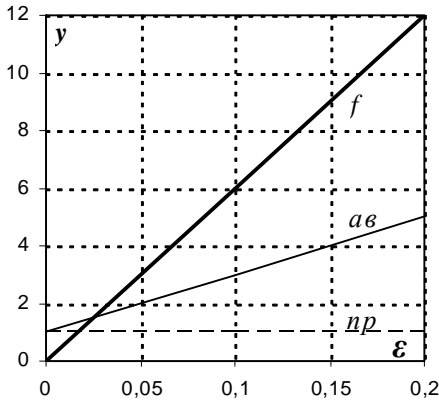


Рис. 1.1. Зависимости повышающего коэффициента ущерба y от доли ε снижения нагрузки путем: f – снижения частоты, av – отключения потребителей, аварийного (без предупреждения), $пр$ – то же с предупреждением

Речь идет отнюдь не о постоянных, а о временных (например, на полчаса – час) и нечастых послеаварийных снижениях потребляемой 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. Полученная оценка ущерба, наносимого нагрузке аварийным от-

ключением, касается не хаотического, а только управляемого отключения потребителя, которое с ним, в принципе, согласовано. И таким потребителем, конечно, не является потребитель, у которого возникает трудно обратимое расстройство технологического процесса даже при кратковременном перерыве электроснабжения.

В практике СССР и России централизованному отключению, в основном, подвергаются энергоемкие промышленные потребители.

Особо чувствительных потребителей по мере совершенствования технологий становится все больше, они сильно страдают от колебаний напряжения и частоты и тем более от перерывов электроснабжения, но эти явления, а также потери от хаотического отключения потребителей не оценены непосредственно.

На рис. 1.1 видно, что если без предупреждения отключается 5% нагрузки, то $u = 2$. Если отключение выполняется централизованно, то можно ожидать, что невозможность выполнить отключение потребителей в оптимальной очередности увеличит удельный ущерб еще вдвое и тогда он составит приблизительно

$$2 * 2 * 0,6 = 2,4 \text{ долл/кВт.}$$

Для сопоставления – данные одного из исследований, проведенного в США: при перерыве электропитания на полчаса ущерб для промышленных потребителей составляет $3 \div 11$, для бытовых $0,3 \div 1,5$ и для коммерческих $0,002 \div 0,05$ долл/кВт.

1.4.5. Чего же мы опасаемся?

Издержки, связанные с аварийными событиями, рассчитываются как усредненное ожидание издержек на основе прогнозируемых состояний объекта и уже имеющейся статистики повреждений и отказов оборудования. Годовые издержки содержат сумму произведений, состоящих из двух сомножителей: издержек от единичного аварийного события и ожидаемого числа таких событий за год. Каждое произведение составляется для одного какого-то типа из учитываемых в расчете событий.

Такой расчет не вызывает сомнений только в том случае, если состав указанных произведений однороден, т.е. имеются издержки одного порядка и их количества – тоже одного порядка. В противном же случае, если событие происходит редко, то, как бы ни было оно опасно, как бы ни были велики связанные с ним из-

держки, его вклад в сумму издержек может оказаться очень невелик. Практика таких расчетов для энергосистем показала, что наиболее опасные, но, естественно, редкие развития аварий при подобном расчете не оказывают влияния на результат расчета и, отсюда, – на те решения о противоаварийных мероприятиях, которые должны быть приняты на основе этого расчета. И естественно возникает сомнение в полезности таких расчетов: каких аварий мы все-таки опасаемся – многочисленных малых или малочисленных, но больших?

Сопоставим две гипотетические аварии в энергосистеме, имеющей потребителей общей мощностью 20000 МВт. Первая: отключение довольно длинной линии электропередачи ведет к необходимости отключить потребителей, в среднем потребляющих 200 МВт (в зависимости от конкретного состояния энергосистемы может потребоваться то меньшее значение, то – большее), и ожидается в среднем два раза в год. Вторая авария: потеря в этой энергосистеме крупной электростанции ведет к потере потребителей мощностью в среднем 4000 МВт и происходит редко – в среднем один раз в 100 лет (в частности, это означает, что из 100 подобных электростанций каждый год терялась бы одна). Рассчитанные в мегаваттах ожидаемые среднегодовые издержки составят:

от первой аварии $200 * 2 = 400$ МВт,

от второй аварии $4000 / 100 = 40$ МВт.

Отсюда может быть сделан вывод, что против первой аварии нужны мероприятия, а вторая не имеет значения. Однако этот вывод явно противоречит здравому смыслу. Ведь первая авария, хотя и случается часто, наносит незначительный ущерб, поскольку требует отключить небольшое (всего 1%) количество потребителей, в качестве которых, вероятно, могут быть выбраны потребители, переживающие отключение без значительного ущерба для своей деятельности. Вероятно также, что через полчаса эти потребители опять могут нормально получить электроэнергию. Вторая же авария вызывает потерю многих потребителей (20%), только часть из них отключится организованно, в порядке, близ-

ком к оптимальному, а другая часть отключится хаотически, и вполне вероятно, что в составе таковых окажутся и очень ответственные потребители, которые вряд ли восстановят свою деятельность в ближайшие часы. А то, что эта авария – редкая, является слабым утешением, поскольку не исключено, что она произойдет вскоре.

Эти аварии можно сопоставить, пользуясь линией *ав* на рисунке 1.1. Для первой аварии получается $y = 1,2$, а для второй $y = 5,0$. Если ущерб исчислить в мегаваттах, то он составит:

для первой аварии $1,2 * 200 = 240$ МВт,

для второй аварии $5,0 * 4000 = 20000$ МВт,

т.е. в 83 раза больше. Если же учесть еще и хаотичную потерю потребителей, и разную продолжительность восстановления нормальной работы потребителей, то вторая авария выглядела бы еще хуже по сравнению с первой.

Однако, переход от оценки аварий по потерянной мощности к оценке по ущербам, а также затем ввод в расчет количества аварий все-таки оставляют более значимыми малые аварии:

от первой аварии $240 * 2 = 480$ МВт,

от второй аварии $20000 / 100 = 200$ МВт.

Итак, возникает подозрение, что было бы легкомысленным пользоваться только среднегодовыми издержками и тем самым исключать из рассмотрения самые крупные составляющие затрат, которые как раз и внушают наибольшие опасения.

В общем, речь идет о том, что главный вопрос – это минимизировать наиболее крупные, хотя и маловероятные потери.

Такой подход напоминает стратегию, которую называют «минимакс». Она сформулирована в теории игр и была применена в исследовании операций и затем даже в социологии. Ее цель – из имеющихся в распоряжении действий выбрать такое действие, которым достигается наименьшее значение тех максимальных потерь, которые возможны среди рассматриваемых вариантов действий. Эти максимальные потери возникли бы в случае наихудшего развития событий (в частности – в случае самого неблагоприятного поведения противника). Согласно этой стратегии ищется такое сочетание доступных действий, при котором максимум потерь, зависящих от них, явится наименьшим из всех возможных вариантов.

Хотя недооценка крупных аварий грубо искажает действительность, регулярного метода исправить это положение, насколько известно, не выработано. Чтобы наметить выход, представляется не лишним обратиться к соображениям о так называемой полезности, которые можно почерпнуть из общенаучной литературы [4].

1.4.6. Оценка «полезности» и «вредности»

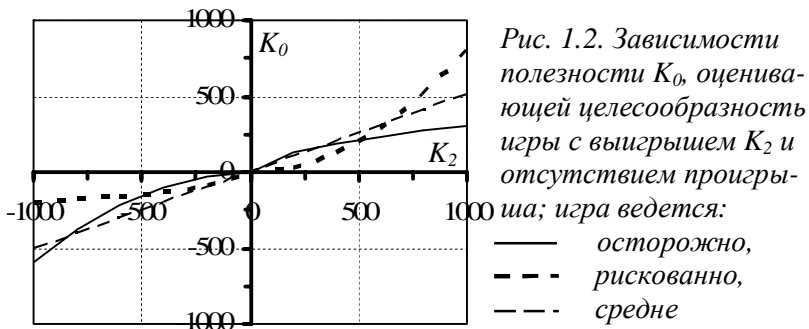
В самом простом представлении *полезность* есть прямая стоимостная оценка такого рода выигрыша (прибыль), который наступит не наверняка, а известен только статистически. По аналогии можно рассматривать как бы вредность, т.е. возможный проигрыш (убыток), Поясним это на наглядном примере простейшей ситуации [4].

Представим себе, что некому субъекту предлагается выбрать один из двух вариантов, в которых он в любом случае ничего не теряет. Первый: он просто получает сумму денег, равную K_0 . Второй вариант: он должен угадать результат подбрасывания монеты; если он не угадает, то получит сумму K_1 , а если угадает, то получит K_2 . Конечно, беспроигрышная сумма K_0 больше, чем неудачная сумма K_1 , и меньше, чем удачная K_2 . Повторяя эту игру в выбор, при каждом значении K_2 узнают, начиная с какого значения суммы K_0 он предпочтет первый, беспроигрышный вариант второму, в котором выигрыш и проигрыш равновероятны.

Примем частный случай, в котором неудача ничего не дает и не отнимает: $K_1 = 0$, и будем варьировать K_2 от нуля до 1000 долл.

Если рассматриваемые суммы для субъекта представляют интерес и он довольно осторожен, то его ответы обрисуют кривую вроде показанной на рисунке 1.2 в правом верхнем квадранте и обозначенной «осторожно»: соблазну жребия он предпочтет пусть скромную, но гарантированную сумму K_0 . Если он склонен к риску, то, вероятно, его кривая – она обозначена «рискованно» – сначала идет ниже, поскольку малый выигрыш его мало интересует, а потом выше. Заметим, что при реальном эксперименте обе эти кривые не столь гладки, как показано на рисунке.

Как видим, полезность K_0 выигрыша, получаемого осторожно или с риском, иная, чем полезность, определяемая ожидаемым выигрышем в среднем (там же прямая, обозначенная «средне»; при $K_1 = 0$ эта средняя полезность составляет половину от K_2). Это было бы характерно для игрока, имеющего большие ресурсы и часто играющего (вроде страхового общества).



Эти игры содержали приятное – выигрыши. Теперь этим же субъектам предлагаются менее приятные игры с проигрышами: всё то же самое, но значение K_2 отрицательно, оно варьируется от нуля до -1000 долл. Возможные результаты показаны в левом нижнем квадранте того же рисунка. Они симметричны прежним, но теперь значения, так сказать, *вредности* $|K_0|$ несколько меньше, и осторожный выбирает большие платежи $|K_0|$, чем любитель риска.

Еще один пример – игра вроде упрощенного варианта телевизионной игры «Как стать миллионером?» Она имеет много ступеней выигрыша, который нарастает приблизительно от 15 до 100000 долл., причем каждая следующая ступень дороже предыдущей приблизительно вдвое. На каждой ступени игры игроку задается вопрос и предлагается 4 варианта ответа на него, из которых только один – правильный

Если игрок уже выиграл на одной или на нескольких ступенях, то перед ним возникает дилемма:

1. Отказаться от угадывания на данной ступени и забрать уже достигнутый на предыдущей ступени выигрыш. Обозначим его величину K_0 .
2. Попытаться ответить, и в этом случае:

2а. Если он выбрал правильный вариант, считается, что он выиграл на данной ступени, и выигрыш поднимается до $K_2 = 2K_0$.

2б. При неудаче – он не получает ничего ($K_1 = 0$) и выбывает из игры.

Очевидно, что, если игрок полагает, что знает ответ, риска почти нет, вероятность правильного ответа близка к 1, и он отвечает. Если же он не уверен в своем знании или совсем не знает ответа, то вероятность правильного ответа падает вплоть до 0,25.

Рассмотрим случай, когда игрок уверенно опознал два неправильных ответа, но остальные два для него одинаково неизвестны. Тогда, выбирая между продолжениями 1 и 2, игрок должен учесть, что вероятность правильного ответа составляет 0,5. В этом случае игра свелась к выбору между уверенным получением суммы K_0 и согласием предоставить монете дать выигрыш $2K_0$ или 0. Заметим, что сумма K_0 является как раз усредненным результатом многократной игры с монетой.

В описанной ситуации оценка полезности разными игроками оказывается различной, но практически всех осторожных, а их, как показывают наблюдения, большинство, объединяет одно: чем выше ступень игры, тем меньше желания соглашаться на решение монеты.

Изложенное относительно «вредности» позволяет вернуться к оценке второй аварии из предыдущего раздела, аварии с потерей станции. Теперь кажется возможным задать персоналу энергосистемы следующий вопрос. Какое отключение нагрузки, которое обязательно произойдет один раз в ближайшее время, он сочтет допустимым, чтобы сделать невозможной вторую аварию, которая случается редко, но может возникнуть скоро? Очевидно это значение меньше, чем 4000 МВт, и можно предположить, что оно составит, например, 800 МВт. Если это так, то вредность второй аварии оценивается как $|K_0| = 800$ МВт. Полученная оценка указывает на актуальность мероприятий по предотвращению аварии типа второй, и их разумная стоимость равна издержкам, связанным с аварийной потерей нагрузки мощностью 800 МВт (или может быть ограничена несколько меньшим значением).

К сожалению, неизвестно, чтобы при рассмотрении противоаварийных мероприятий полезность (т.е. 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.

§1.5. Предсказание, авария, решения

1.5.1. Удивительное предсказание

История знает много чудесных предсказаний. Почти 200 лет назад А.С. Пушкин создал поэтическую притчу о неотвратимо сбывшемся предсказании волхвов: «Песня о вешем Олеге». Не этот ли великолепный рассказ вдохновил некоторых наших современников на совсем не поэтические предсказания различных бед?

Самое сенсационное предсказание довелось услышать по радио. Некий пожилой физик, которого известный литератор и публицист представил еще как философа, пугал слушателей возможностью гибели нашей цивилизации. По его словам, существуют группы серьезных математиков, которые разработали модели существования человеческого рода и с их помощью вычислили, что гибель человечества состоится с вероятностью 50% в ближайшие 100 лет. Легкомысленность этого прогноза очевидна: единичные, не повторяющиеся события, подобные этому предрекаемому событию, не оцениваются статистически.

Попутное замечание относительно математиков. Если они сами взялись разрабатывать модели столь глобальных явлений, то от этих моделей можно ожидать самых фантастических результатов. Ведь при нормальном распределении работы (кстати, и ответственности) модели различных важных для поставленной задачи явлений разрабатывают специалисты в предметной, моделируемой области. Их знания и опыт позволяют внести в модели всё то, что известно как наиболее существенное для достоверного решения задачи. А математики решают тоже сложные, но более формальные задачи о взаимодействии моделей, о создании алгоритма решения и программного обеспечения, нужного для фактического решения.

1.5.2. Реакция на аварию

Когда случается очень впечатляющая авария, общественность склонна искать срочные меры по исключению подобного впредь, а различные создаваемые ввиду этого комиссии спешат назвать виновного «стрелочника» и рекомендовать ответственным руководителям или даже общественности какие-то мероприятия, как будто избавляющее от опасности. Срочно разрабатываются и вы-

пускаются 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 остается 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 дает 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 в пользу, во-первых, 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, несет 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.

1.5.3. После Фукусима

Прогресс как естественный источник аварий обсуждался в разделе 1.1.2, затем в предыдущем разделе 1.5.2 высказано сомнение в разумности подвергать технику после аварии «суду скорому и несправедливому», а теперь эти темы пора рассмотреть вместе, и для этого есть актуальнейший повод – авария на атомной электростанции Фукусима 1.

Характерная нервность в связи с этой аварией проявилась в Германии. Всего за несколько месяцев до аварии было ревизовано решение предыдущих руководителей, «красно-зеленых», об отказе от атомной энергетики. После аварии напуганные избиратели стали решительно склоняться в пользу «зеленых», 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. Теперь 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 приватные: 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 изобилие пугающей информации и боясь прослыть человеко-ненавистниками, эксперты и власти не рискнули ясно донести до людей, чем им придется оплатить отказ от атомной энергетики, и людям не было возможности не сдвинуть свои предпочтения в сторону «зеленой» партии.

Мы не можем вникнуть во многие последствия этого решения и в первую очередь отвлекемся от вопроса о том, поможет ли это решение популярности данных руководителей, и о том, насколько скрупулезно будет выполнено это решение, ведь 11 лет – срок немалый, и кто знает, что ждет впереди. Остановимся на наиболее очевидных аспектах проблемы.

Вряд ли кем-то не признается, что использование человеческого 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 мастерское 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.). Уже теперь прозвучало приглашение немецким атомщикам работать в Китае. 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 следующие: во-первых, сравнительно спокойные природные условия, во-вторых, ста-

бильная социально-политическая система, обеспечивающая справедливую и строгую 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. Действительно, найдутся ли покупатели германских атомных установок, если в самой Германии они считаются недостаточно надежными? 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 надежные в мире. Атомное ведомство России запланировало соорудить атомную электростанцию в западной части Белоруссии, и правительство России согласилось льготно кредитовать эту стройку. Эти решения приняты незадолго до аварии на Фукусима, и эта авария не повлияла на них.

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, зараженные 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).

Автор вовсе не безоговорочный сторонник атомной энергетики и, тем более, не противник возобновляемых источников энер-

гии. Скорее наоборот, еще до аварии на Чернобыльской станции он, зная состояние управляющей техники в СССР, подозрительно относился к советским 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 совершенствовать безопасность существующих атомных установок и срочно ликвидировать вовсе негодные. Эти меры должны идти рядом с мерами экономии электроэнергии, с развитием возобновляемых ее 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 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. Этот контроль, как ни трудно этого достигнуть, должен быть независимым от правительств и производителей, 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 ее структуры и взаимодействия с внешними технологиями, влияющими на безопасность, – на пред-

мет 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 нее.

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 еще одна проблема атомной энергетики, не имеющая, правда, прямого отношения к аварии на Фукусима 1, – захоронение радиоактивных отходов. Автор далек от этой области, он лишь осмеливается думать, 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 и об их захоронении. А народы со временем лучше поймут свои долговременные интересы и будут осознанно влиять на решение всей этой гаммы проблем.