

4. Правила организации технического обслуживания и ремонта оборудования атомных станций. РД 53.025.002-88. М. 1988.
5. Сигал Е.М. ФОРЭМ как фактор, влияющий на коэффициент использования установленной мощности АЭС. — Атомная энергия. 2001. т. 90. вып. 2, с. 101—106.

Поступила в Редакцию 9.12.02

УДК 621.039.58

СОБЛЮДЕНИЕ НА АЭС ПРИНЦИПА НЕЗАВИСИМОСТИ ПРИ РАБОТЕ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ОТ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Тарасенко В.М. (ГНТЦ ЯРБ Госатомрегулирования Украины)

За последние 20 лет требования нормативных документов верхнего уровня к независимости каналов систем аварийного охлаждения реакторных установок АЭС не менялись. Общие положения обеспечения безопасности АЭС [1—3] требовали и продолжают требовать, чтобы данные системы состояли из нескольких независимых каналов. Того же требуют сегодня и правила ядерной безопасности реакторных установок АЭС [4].

Нормы проектирования [5] в свое время предусматривали, чтобы системы аварийного охлаждения реакторных установок и другие системы безопасности АЭС работали от автономных дизель-генераторов независимо от того, подается напряжение в сеть 6 кВ АЭС от энергосистемы или нет. Регуляторы частоты (скорости) и напряжения, которыми снабжены все дизель-генераторы АЭС, должны были обеспечивать в этой ситуации необходимое качество электроэнергии, а автономность дизель-генераторов и независимость управляющих систем — независимость каналов систем аварийного охлаждения реакторных установок и систем безопасности АЭС в целом.

Вышедшие в 1990—1991 гг. нормативные документы [6—8] среднего уровня и правила проектирования [9] уже предусматривали работу систем аварийного охлаждения реакторных установок и других систем безопасности АЭС от энергосистемы до тех пор, пока в сети 6 кВ АЭС есть напряжение. Согласно этим документам электроснабжение систем безопасности АЭС от автономных дизель-генераторов должно осуществляться только в случае полного обесточивания сети 6 кВ АЭС. Однако при работе этих систем от энергосистемы не соблюдается принцип независимости, а энергосистема, особенно если она дефицитная, не может гарантировать требуемое [10] и другими стандартами качество электроэнергии. Кроме того, такая схема электроснабжения не имеет защиты от отказов по общей причине.

Основные требования к системам аварийного охлаждения реакторных установок АЭС сегодня содержатся в нормативных документах [3, 4, 6]. Требования к независимости каналов этих систем содержат только первые два из них, последние таких требований не содержат, хотя и были разработаны специально для конкретизации общих положений [3, 4]. В таблице приведены требования [3, 4] к независимости каналов систем аварийного охлаждения реакторных установок АЭС и требования [7, 8] к независимости каналов систем аварийного электроснабжения, которые являются обеспечивающими системами для указанных и остальных систем безопасности АЭС.

Требования нормативных документов к независимости каналов систем аварийного охлаждения реакторных установок и аварийного электроснабжения АЭС

Нормативный документ	Требование	Комментарий
[1—3]	В составе защитных систем должны предусматриваться системы для аварийного отвода тепла от реактора, которые состоят из нескольких независимых каналов, обеспечивающих эффективность с учетом принципа единичного отказа.	Требование конкретное и не содержит каких-либо допущений.
[4]	Системы аварийного охлаждения зоны реакторов должны проектироваться с учетом принципов независимости и резервирования* и должны быть способны с учетом принципа единичного отказа или ошибки персонала выполнить свою функцию по предотвращению нарушения проектных пределов повреждения твэлов при проектных авариях.	Требование такое же, как в [1—3]. Кроме того, вводится понятие (термин) «принцип независимости».
[7, 8]	При проектировании систем аварийного электроснабжения должен использоваться принцип независимости работы каналов (физическое и функциональное разделение) для защиты от возможных отказов по общей причине (в том числе при пожаре), происходящих либо непосредственно в связи с выходом из строя оборудования системы безопасности, либо в результате деятельности персонала (например, при эксплуатации или обслуживании).	Требование конкретное. Принцип независимости используется для защиты от возможных отказов по общей причине.

*Принцип резервирования используется для удовлетворения принципа единичного отказа и рассматриваться не будет.

Формулировки о независимости систем безопасности АЭС, их каналов и элементов содержат, в основном, нормативные документы [3, 4, 11, 12]. Все они сводятся к одному: независимость должна достигаться путем использования физического и функционального разделения различных частей, каналов и компонентов системы. Принцип независимости наиболее полно раскрыт в документе [11]. Однако в наибольшей мере он раскрыт в документах МАГАТЭ. В документе [13], например, приведены следующие принципы обеспечения независимости:

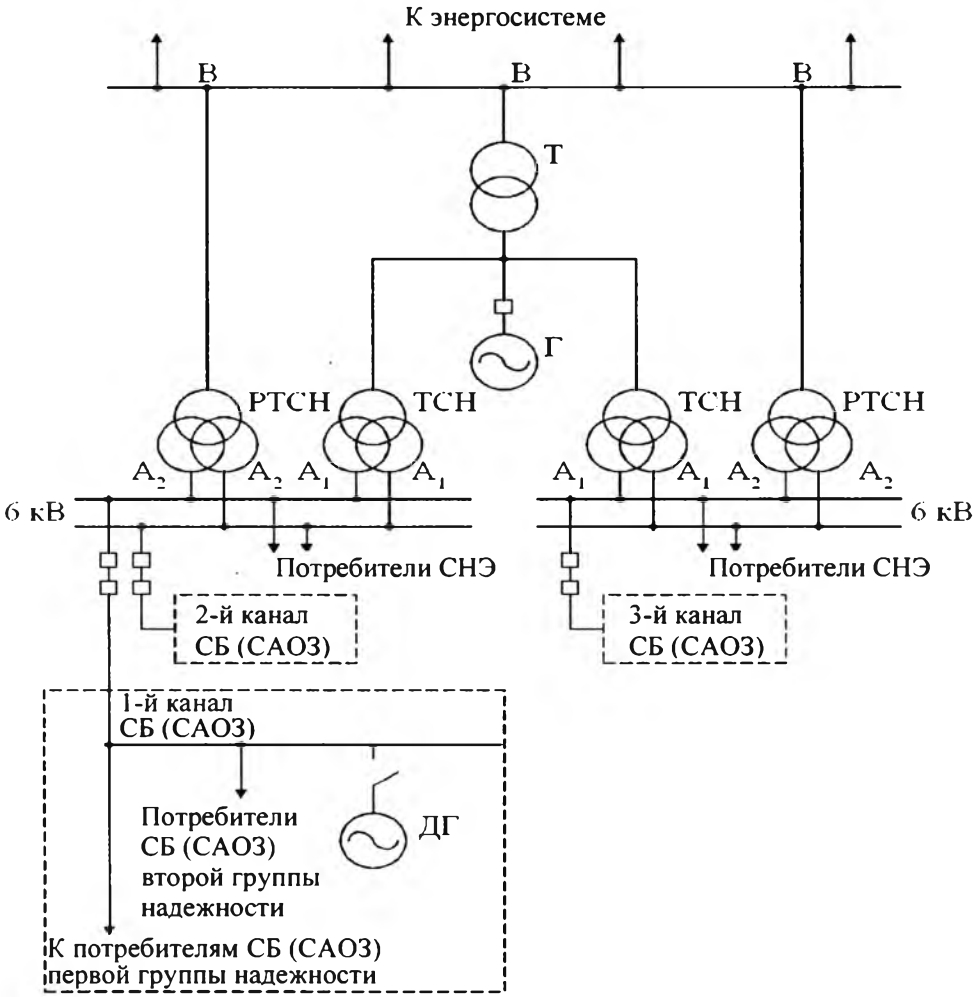
- поддержание независимости компонентов резервной системы;
- поддержание независимости компонентов разных классов безопасности;
- поддержание независимости компонентов системы от воздействия исходных событий;
- поддержание независимости узлов, важных для безопасности, от тех, которые не являются важными для безопасности.

Качество электроэнергии определяется степенью соответствия ее параметров установленным значениям (нормам). В первую очередь оно характеризует меру электромагнитного воздействия на работу электрических приемников (далее — потребителей). Однако ухудшение качества электроэнергии приводит к отрицательным последствиям не только электромагнитного, но и технологического характера [14—16]. Для потребителей собственных нужд АЭС, объединенных общим технологическим процессом, ухудшение качества электроэнергии может привести к ограничению или полной потере их работоспособности. Ухудшение качества электроэнергии для потребителей АЭС является внешним воздействующим фактором [11]. Данный фактор влияет сразу на всех электрически связанных между собой потребителей АЭС и может стать причиной их общего отказа. Это особенно

важно для потребителей систем безопасности, так как их функциональная способность при ухудшении качества электроэнергии может быть ограничена или даже потеряна независимо от того, какое число каналов они имеют. В проекте АЭС должны быть рассмотрены и обоснованы меры по предупреждению или защите систем и элементов от отказов по общей причине. Такие же требования содержатся и в нормах [7]. Применение для систем безопасности технических решений, при которых возможны зависимые отказы или отказы по общей причине, допускается, если показано, что такие решения имеют преимущества по сравнению с решениями, исключающими зависимые отказы и/или отказы по общей причине [2, 3].

Принципиальная схема выдачи мощности в энергосистему энергоблока с ВВЭР-1000 приведена на рис. 1.

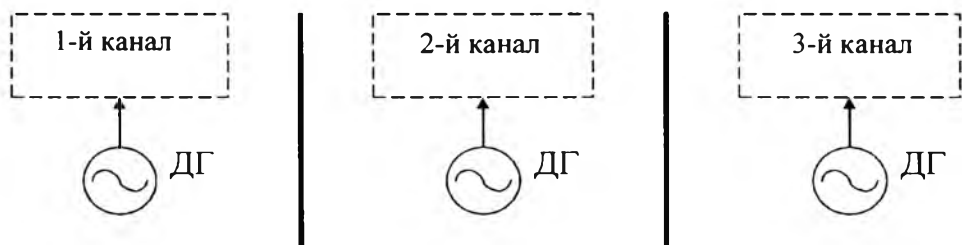
При обесточивании сети 6 кВ энергоблока АЭС (далее — энергоблока АЭС) специальная автоматика разделяет секции нормальной эксплуатации и секции сис-



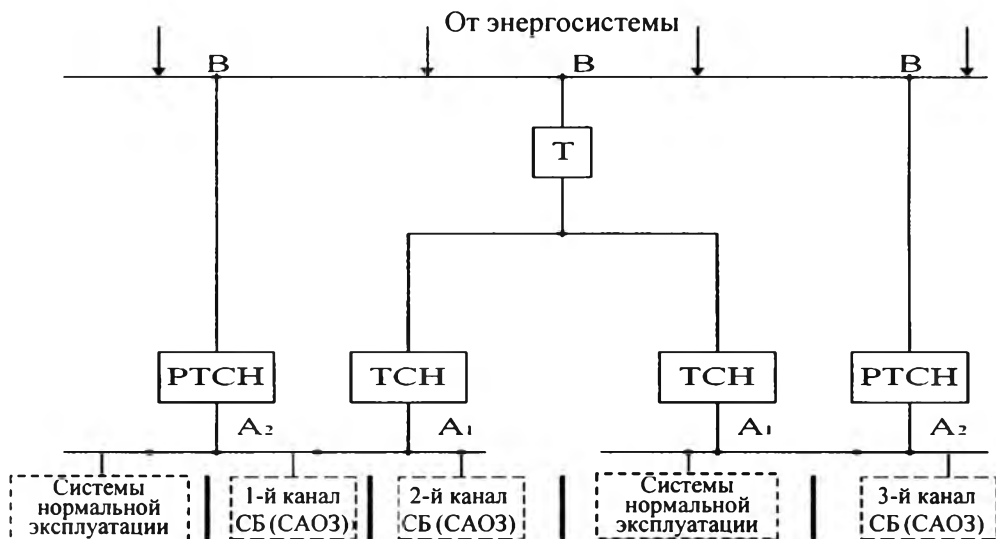
Р и с. 1. Принципиальная схема выдачи мощности в энергосистему энергоблока с ВВЭР-1000 и электроснабжения его потребителей при нормальной эксплуатации АЭС: Г, Т — генератор и трансформатор блока соответственно; ТСН — трансформатор собственных нужд блока (рабочий); РТСН — резервный трансформатор собственных нужд АЭС; CAOЗ — система аварийного охлаждения зоны; СБ — система безопасности; СНЭ — система нормальной эксплуатации

тем безопасности, пуск дизель-генераторов и их подключение на секции систем безопасности. Такой алгоритм принудительного разделения секций 6 кВ предусмотрен на всех АЭС независимо от используемых типов реакторов. Необходимость пуска дизель-генераторов, когда все потребители сети 6 кВ остались без напряжения, очевидна и не требует обоснования. Принципиальная схема электроснабжения систем безопасности в этой ситуации показана на рис. 2. Видно, что при обесточивании АЭС электроснабжение каждого канала систем безопасности осуществляется от своего автономного дизель-генератора, который снабжен устройствами автоматического регулирования качества электроэнергии (частоты и напряжения). Все три канала систем безопасности разделены физически (условно изображено в виде перегородок) и функционально, общих цепей и даже точек у них нет. Поддерживается полная независимость компонентов систем безопасности от тех узлов (систем), которые не являются важными для безопасности АЭС. Отказ любого канала не влияет на работу других каналов. Функциональная способность каждого канала систем безопасности (100%) и трехкратное резервирование удовлетворяют принцип единичного отказа даже при нахождении одного из них в ремонте или на техобслуживании. Таким образом, при обесточивании АЭС схема электроснабжения систем безопасности отвечает принципу единичного отказа и всем требованиям нормативных документов, приведенным в таблице, а также формулировкам о независимости [13].

На 2-м энергоблоке Ровенской АЭС с ВВЭР-440 при исходных событиях, требующих работы системы аварийного охлаждения зоны, принудительное разделение секций с пуском дизель-генераторов и их подключением на секции 6 кВ систем безопасности предусмотрено независимо от того, сопровождаются эти события обесточиванием АЭС или нет. Схема электроснабжения потребителей систем безопасности в этом случае такая же, как на рис. 2, со всеми ее плюсами. На АЭС Украины с ВВЭР-1000 и 1-м энергоблоке Ровенской АЭС с ВВЭР-440 при тех же исходных событиях принудительного разделения секций с пуском дизель-генераторов и их подключением на секции 6 кВ систем безопасности не предусмотрено. Работа систем безопасности в этом случае будет осуществляться от энергосистемы со всеми минусами, которые имеет энергосистема как источник и оборудование главной электрической схемы АЭС как элементы, образующие общие цепи. На рис. 3 видно, что схема электроснабжения систем безопасности не отвечает ни требованиям нормативных документов, приведенным в таблице, ни их формулировкам о независимости, ни формулировкам [13]. Она явно уступает схеме, представленной на рис. 2, в части как обеспечения требуемого качества электрической энергии,



Р и с. 2. Принципиальная схема электроснабжения систем безопасности при обесточивании энергоблока



Р и с. 3. Принципиальная схема электроснабжения систем безопасности от энергосистемы

так и требуемой надежности электроснабжения систем безопасности. Физически каналы систем безопасности не разделены. Оборудование главной электрической схемы АЭС с ВВЭР-1000 (на рис. 3 изображено выше условной линии A_2 — A_1 — A_1 — A_2) отнесено к элементам, не важным для безопасности (класс безопасности 4 [2, 3]). Однако, как видно на рис. 3, это же оборудование выполняет функции обеспечения систем безопасности (электроэнергией).

АЭС с РБМК-1000 первого поколения имели взаимное резервирование дизель-генераторов, а также вводы на секции 6 кВ систем безопасности от резервных магистралей (резервных трансформаторов собственных нужд). При проектировании систем аварийного электроснабжения на АЭС с РБМК-1000 второго поколения, а также на АЭС с ВВЭР-440 и -1000 такие меры уже не предусматривались, при этом руководствовались принципом независимости [17]. Схема, представленная на рис. 3, не предусматривает взаимного резервирования дизель-генераторов и вводов от резервных магистралей, зато имеет общие достаточно протяженные участки главной электрической схемы АЭС. При электроснабжении систем безопасности через трансформатор блока Т и трансформаторы собственных нужд ТЧН (в случае, если основной генератор блока Г имеет свой выключатель, как показано на рис. 1) повреждения на общих участках B — A_1 приведут к одновременному отказу всех каналов систем безопасности. Аналогичные последствия будут иметь место при повреждениях на участках B — A_2 при электроснабжении систем безопасности через резервные трансформаторы собственных нужд (в случае, если генератор блока не имеет своего выключателя). Вероятность отказов систем безопасности в последнем случае выше, чем в первом. Ведь автоматический перевод собственных нужд с трансформатора ТЧН на трансформатор РТЧН обязательно сопровождается кратковременным перерывом питания, значит, и режимом выбега электродвигателей с последующим разбегом. Этот режим, называемый самозапуском электродвигателей, не всегда бывает успешным [15]. Тогда напряжение на секциях 6 кВ может стабилизироваться на уровне 50—80% номинального, что недостаточно для работоспособности потребителей систем безопасности (так как электромагнитный мо-

мент электродвигателей в 2 раза и более ниже того, который они имели при номинальном напряжении). Кроме того, электродвигатели не обладают способностью выдерживать повышенный (пусковой) ток в течение всего периода аварийного расхода жидкостного реакторной установки АЭС.

АЭС, спроектированные по нормам [5] либо еще до их выпуска, как правило, не имеют того числа резервных трансформаторов собственных нужд АЭС, которое требуется согласно действующим сегодня правилам [9]. Например, на Запорожской АЭС имеются всего две группы таких трансформаторов на все шесть энергоблоков, что является одной из основных причин того, что на этой АЭС (как, впрочем, и на других, например, на первых двух блоках Ровенской АЭС) режим самозапуска является необеспеченным проектом режимом. Кроме того, схема электроснабжения систем безопасности на таких АЭС при их работе от энергосистемы является еще более разветвленной, чем та, которая представлена на рис. 3.

Управление элементами главной схемы электрических соединений АЭС осуществляется персоналом центрального щита управления (электриками), а не персоналом блочного щита управления (технологами) АЭС, наблюдающего за работой систем безопасности. Электрики не только не видят, но могут и не знать о том, что элементы главной электрической схемы АЭС в это время обеспечивают работу систем безопасности и аварийное охлаждение активной зоны реакторной установки. Запрет на управление элементами главной электрической схемы проектом не предусмотрен, значит, вероятность допущения ошибок персоналом АЭС при авариях выше, чем при работе систем безопасности от автономных дизель-генераторов. Электроснабжение систем безопасности от энергосистемы делает их еще и заложниками самой энергосистемы. Контроль состояния энергосистемы со стороны АЭС не ведется и вестись в принципе не может. Ее основные элементы находятся в ведении и управлении диспетчера энергосистемы. Кроме того, энергосистема, особенно если она дефицитная, не может постоянно поддерживать требуемое качество электроэнергии. Например, в энергосистеме Украины суточные колебания частоты при ее раздельной (изолированной) работе в 1999—2001 гг. достигали ± 1 Гц и более, что в 2,5 раза выше установленных ГОСТом 13109-97 предельно допустимых значений $\pm 0,4$ Гц [14].

Для соблюдения принципа независимости, обеспечения качества электроснабжения и защиты систем безопасности от отказов по общей причине необходимо, чтобы их работа осуществлялась от автономных дизель-генераторов, т.е. так, как это было предусмотрено нормативным документом [5]. Однако предлагается рассмотреть также вариант упреждающего пуска дизель-генератора по сигналам САОЗ с подключением к системам безопасности в случае снижения на их секциях 6 кВ напряжения до 0,85 номинального и ниже или частоты до 46 Гц и ниже. Предлагаемый вариант не удовлетворит в полной мере принцип независимости. Однако надежность электроснабжения систем безопасности при этом будет не ниже требуемой, так как дизель-генераторы по данному сигналу сразу же будут переводиться в состояние горячего резерва и в случае снижения качества электроэнергии будут незамедлительно (за время менее 1 с) подключаться к системам безопасности. Данный вариант обеспечит соблюдение принципа независимости, требуемое качество электроснабжения и защиту систем безопасности от отказов по общей причине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Общие положения обеспечения безопасности атомных станций при проектировании, сооружении и эксплуатации (ОПБ-82).** М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88).** ПНАЭ Г-1-011-89. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. **Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.** НП 306.1.02/1.034-00. Киев, Гос. адм. ядерного регулирования Украины, 2000.
4. **Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций (ПБЯ РУ АС-89).** ПНАЭ Г-1-024-90. М., Госпроматомнадзор СССР, 1990.
5. **Нормы проектирования атомных электрических станций ВНТП 80.** М., Минэнерго СССР, 1981.
6. **Правила устройства и эксплуатации систем аварийного охлаждения и отвода тепла от ядерного реактора к конечному поглотителю.** ПНАЭ Г-5-020-90. М., Госпроматомнадзор СССР, 1991.
7. **Общие положения по устройству и эксплуатации систем аварийного электроснабжения атомных станций.** ПНАЭ Г-9-026-90. М., Госпроматомнадзор СССР, 1991.
8. **Правила проектирования систем аварийного электроснабжения атомных станций.** ПНАЭ Г-9-027-91. М., Госпроматомнадзор СССР, 1992.
9. **Правила технологического проектирования атомных станций (с реакторами ВВЭР).** РД 210.006-90. М., Минатомэнергопром СССР, 1990.
10. **ГОСТ 13109-97.** Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Киев, Госстандарт Украины, 1999.
11. **Требования по ядерной и радиационной безопасности к информационным и управляющим системам, важным для безопасности атомных станций.** НП 306.5.02/3.035-2000. Киев, Гос. адм. ядерного регулирования Украины, 2000.
12. **Правила устройства электроустановок (ПУЭ).** М., Минэнерго СССР, 1986.
13. **Общие принципы безопасности, учитываемые при проектировании атомных электростанций.** Руководство по безопасности 50-SG-D11. Вена: МАГАТЭ, 1988.
14. **Тарасенко В.М., Васильченко В.Н., Мехед А.И. и др.** Устойчивость энергосистемы Украины по частоте и ее влияние на надежность и безопасность работы АЭС. — Ядерная и радиационная безопасность (Киев), 2001, т. 4, вып. 3, с. 85—97.
15. **Тарасенко В.М., Васильченко В.Н., Мехед А.И. и др.** О самозапуске электродвигателей собственных нужд АЭС. — Там же, вып. 4, с. 30—41.
16. **Тарасенко В.М., Васильченко В.Н., Мехед А.И. и др.** Контроль и управление качеством электрической энергии у потребителей собственных нужд АЭС. — Там же, 2002, т. 5, вып. 1, с. 77—85.
17. **Фельдман М.Л., Черновец А.К.** Особенности электрической части атомных электростанций. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отд., 1983, изд. второе, с. 51—52.

Поступила в Редакцию 18.07.02

УДК 621.039.534

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГРАФИТОВОЙ КЛАДКЕ КАНАЛЬНЫХ РЕАКТОРОВ ПРИ АВАРИЙНОМ РАЗРЫВЕ ТОПЛИВНОГО КАНАЛА

*Соловьев С.Л. (Отраслевой центр Минатома РФ по расчетным кодам),
Габараев Б.А., Новосельский О.Ю., Филинов В.Н. (ФГУП НИКИЭТ
им. Н.А. Доллежале), Парафило Л.М., Крючков Д.В.
(ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Обоснование безопасности эксплуатации реакторов канального типа требует доказательства невозможности вторичного разрыва топливных каналов, инициированного первичным разрывом одного аварийного канала. Наиболее вероятной причиной первичного разрыва является перегрев канала при дисбалансе между его