

# Актуальные вопросы совместимости АЭС и электрической сети

СКОПИНЦЕВ В.А.

*Приводится обобщенный анализ требований к совместимости атомной электрической станции (АЭС) с внешней электрической системой. Совместимость оценивается риском потери внешнего электроснабжения, что неразрывно связано с надежностью и безопасностью эксплуатации АЭС. Дан анализ требований нового документа МАГАТЭ и отечественной практики по оценке безопасности при проектировании АЭС.*

**Ключевые слова:** электрическая сеть, атомная электростанция, совместимость, безопас-

В «Требованиях Европейских эксплуатирующих компаний к АЭС с легководными реакторами» (т. 2, гл. 4 «Проектные основы»), версия «С» которых опубликована в 2001 г. в разделе «Потеря внешнего электроснабжения», содержится требование к проектировщику АЭС: «При выборе площадки следует ознакомиться с информацией о средней частоте и продолжительности выхода из работы линий электропередачи энергосистемы из-за повреждений». Приводятся также стандартные условия для потери внешнего электроснабжения (ПВЭ) АЭС от электросети. На рис. 1 события ПВЭ подразделяются на три категории: кратковременные, среднесрочные и долговременные – области которых представлены в координатах логарифмов частоты (статистической вероятности) ПВЭ в течение года и продолжительности восстановления.

В отечественной практике отмеченные условия до настоящего времени не использовались на стадии выполнения предварительного отчета по оценке безопасности (ПООБ) АЭС. События, связанные с потерей внешних источников электроснабжения (ПВИЭ) собственных нужд (с.н.) АЭС в Швеции (2006 г.), США (2005 г.), Великобритании и, особенно, в Японии (2011 г.), которые привели или могли привести к серьезным последствиям для безопасности атомных блоков, способствовали выпуску серийной публикации МАГАТЭ [1]. В публикации обобщается международный опыт и делается вывод о необходимости постоянно следить за работой электроэнергетической системы (ЭЭС), особенно сопряжению АЭС с электрической сетью, чтобы избежать событий, которые могут поставить под угрозу безопасность АЭС.

Безопасная и экономичная эксплуатация АЭС возможна при надежных связях с электрической сетью ЭЭС для выдачи электрической мощности, а

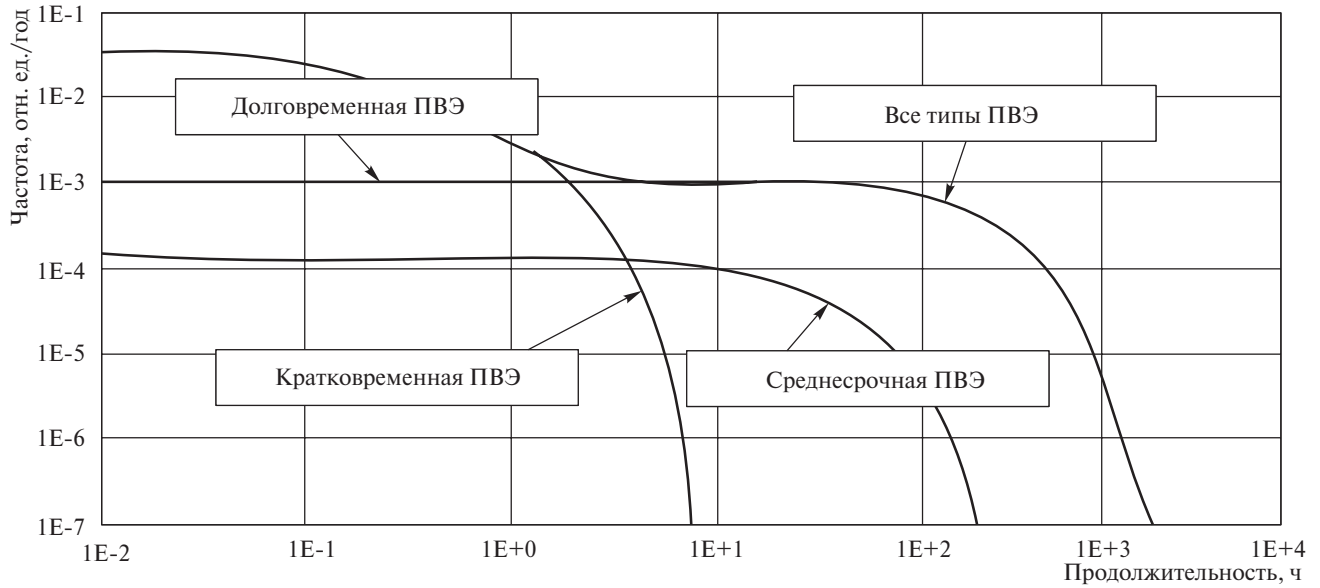
*A generalized analysis of the requirements concerned with compatibility of a nuclear power plant with an external grid is presented. This compatibility is estimated as a risk of loss of offsite power supply, which is closely linked with reliability and safety of NPP operation. A comparison between the relatively new IAEA document with LWRs with the Russian practices used for estimating safety in designing NPPs is given.*

**Key words:** electric grid, nuclear power plant, compatibility, operational safety, regulatory documents

также, при необходимости, возможность подачи электропитания на АЭС для безопасного ее пуска, эксплуатации и нормального или аварийного отключения станции. При подключении нового крупного блока АЭС к электрической сети могут возникать дополнительные требования к элементам управления и обслуживания электросети. Таким образом, компания, ответственная за работу АЭС, и предприятие, ответственное за электросеть, должны определить и согласовать необходимые характеристики сети и АЭС задолго до строительства АЭС, чтобы обеспечить их совместимость.

Далее приводится обобщенный анализ содержащихся в [1] требований к совместимости АЭС с внешней электрической сетью. Выделяются вопросы подключения АЭС к электросети и предлагаются математические модели количественной оценки надежности электроснабжения с.н. АЭС внешними энергоисточниками.

**Требования к совместимости АЭС и электрической сети.** Важной отличительной особенностью всех АЭС является то, что после выключения атомного реактора он продолжает вырабатывать большое количество тепла в течение длительного периода. Поэтому система охлаждения реактора должна работать в течение нескольких суток после выключения реактора, чтобы предотвратить перегрев и повреждение активной зоны. Необходимо обеспечить надежную работу охлаждающего оборудования, для которого требуются мощные источники бесперебойного электропитания. Продолжительное отсутствие электроэнергии от внешних энергоисточников при выходе из строя собственных источников сыграло существенную роль в разрушении реакторов и выбросе радиоактивного облака на АЭС Фокусимо Даичи в Японии в марте 2011 г.



Продолжительность ПВЭ	Частота ПВЭ (отн.ед./год) при отказах энергосистемы			Всего
	кратковременных	среднесрочных	долговременных	
0	5,0E-2	2,0E-4	1,0E-3	5,1E-2
0,5	1,8E-2	2,0E-4	1,0E-3	2,0E-2
1	6,8E-3	1,9E-4	9,9E-4	8,0E-3
2	9,2E-4	1,8E-4	9,9E-4	2,1E-3
3	1,2E-4	1,8E-4	9,8E-4	1,3E-3
6	3,1E-7	1,6E-4	9,7E-4	1,1E-3
12	~0	1,2E-4	9,4E-4	1,1E-3
18	0	7,4E-5	9,1E-4	1,0E-3
24	0	9,4E-5	8,8E-4	9,6E-4
48	0	2,7E-5	7,8E-4	8,1E-4
160	0	2,5E-7	4,3E-4	4,3E-4
320	0	~0	1,9E-4	1,9E-4
720	0	0	2,4E-5	2,4E-5
1000	0	0	5,5E-6	5,5E-6

Рис. 1. Стандартные проектные условия для ПВЭ (LOOP): частота в год в сопоставлении с продолжительностью отказа

Зависимость работы систем безопасности АЭС от электропитания обуславливает требование обязательного оснащения атомных электростанций несколькими источниками электроснабжения. Это требование включает в себя как минимум два независимых источника питания за пределами площадки АЭС (например два независимых подключения к электрической сети ЭЭС) и один источник питания на площадке (как правило, сочетание аккумуляторных батарей и дизельных двигателей или малых газовых турбин).

Полная электрическая нагрузка с.н. АЭС составляет 5—8% номинальной мощности АЭС. Следовательно, электрические связи АЭС с сетью должны быть такими, чтобы обеспечить указанную нагрузку в процессе пуска реактора и при его остановке независимо от того, идет ли речь о запла-

нированном или аварийном отключении, которые могут произойти в любой момент времени. Вероятность, с которой сеть может осуществлять подачу электропитания АЭС с достаточной мощностью и соответствующими значениями напряжения и частоты, является мерой надежности электросети с точки зрения АЭС.

Надежная электросеть — это такая сеть, где напряжение и частота контролируются в заданном диапазоне значений, а отключения происходят нечасто. Стандартные требования устанавливают следующее:

частота контролируется в пределах  $\pm 1\%$  номинальной частоты; несколько раз в году на короткие периоды частота может выходить за указанные пределы;

напряжение контролируется в пределах  $\pm 5\%$  номинального значения системообразующей высоковольтной электрической сети в течение большей части времени; несколько раз в году на короткие периоды времени напряжение может выходить за рамки указанного диапазона, не превышая пределы  $\pm 10\%$  номинального напряжения;

а в а р и и электросети, приводящие к отключению узла нагрузок, происходят редко (гораздо реже, чем один раз в году); особенно это важно для электрической сети, к которой подключена АЭС;

в о з о б н о в л е н и е электроснабжения АЭС после аварийного отключения АЭС от внешних источников электропитания обеспечивается в течение 2 ч.

Для выполнения сформулированных стандартных требований до начала проектирования блока АЭС предприятие электрических сетей и проектировщик АЭС должны осуществить определенный перечень работ [1].

В электрической сети при ее развитии и эксплуатации необходимо обеспечить пропускную способность линий и соблюдать баланс между выработкой и потреблением электроэнергии в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе. Исходя из этого необходимо осуществить следующие действия.

1. Рассмотреть новый энергоблок с точки зрения его участия в покрытии нагрузок с учетом летнего и зимнего графиков нагрузок и определить размер резерва или дефицита выработки энергии в энергосистеме.

2. Убедиться, что в системе всегда имеется достаточная резервная мощность, чтобы исключить возможность недопустимого снижения частоты и, тем самым, необходимость аварийного отключения нагрузок в случае потери крупного энергоблока в системе, в том числе на АЭС.

3. Проверить статическую и динамическую устойчивость системы для множества вариантов ее состояния, особенно для экстремальных ситуаций, возникающих, как правило, в периоды максимальных и минимальных нагрузок. Целью такой проверки является исключение в системе процессов самораскачивания и возникновения асинхронного хода.

4. Проверить уровень напряжения в узлах энергосистемы, особенно вблизи АЭС, для всех возможных вариантов состояния схемы системы, включая состояние, возникающее сразу после отключения атомного блока.

5. Составить план мероприятий по необходимым изменениям в электрической сети таким образом, чтобы была возможность выдачи мощности

с электростанций и передачи энергии по линиям без существенных ограничений и перегрузок линий, которые могут привести к нежелательному ограничению выработки энергии.

6. Спроектировать электрическую схему распределительного устройства (РУ) высокого напряжения на АЭС, число энергоблоков на которой согласуется с проектировщиком АЭС таким образом, чтобы схема отвечала требованиям к надежному внешнему источнику питания АЭС и удовлетворяла требованиям регулирующего органа по вопросам атомной энергетики.

7. Спроектировать системы АСУ и РЗ таким образом, чтобы гарантировать их правильные действия в случае аварий в электрической сети.

8. Пересмотреть и скорректировать планы по восстановлению работы энергосистемы после полного нарушения электроснабжения узлов нагрузок (блэкаута) таким образом, чтобы возобновление питания нагрузок выполнялось в кратчайшие сроки, при этом АЭС должна рассматриваться в качестве приоритетного узла нагрузок.

9. Изучить схемы выдачи мощности электростанций вблизи проектируемой АЭС, так как они существенно влияют на состояние и параметры работы электрической сети в месте подсоединения АЭС.

Перечисленные мероприятия применимы и к другим типам электростанций, но требуют более тщательного рассмотрения, если речь идет об АЭС.

В свою очередь, проектировщик АЭС должен убедиться в обоснованности намечаемых мероприятий в электрической сети и их соответствии требованиям безопасности работы АЭС. Действия проектировщика:

1) определить обоснованность схем выдачи мощности АЭС в электрическую сеть и ее надежность, выполнить оценку риска потери электроснабжения от внешних источников (ПЭВИ), а также правильность намечаемых мероприятий по реконструкции сети;

2) утвердить технические решения в отношении схем подключения АЭС к сети с учетом требований к независимым источникам электроснабжения;

3) выполнить анализ соответствия АЭС техническим требованиям к электрической сети и при необходимости обсудить возможное решение;

4) оценить частоту и продолжительность событий, связанных с потерей электроснабжения АЭС от внешних источников в соответствии с требованиями процесса лицензирования в области атомной энергетики;

5) представить доказательства регулирующим органам по вопросам атомной энергетики того, что АЭС надежно защищена от возможных нарушений в работе электрической сети; эти нарушения могут быть представлены в виде событий, которые вызывают перенапряжение в сети (например удар молнии), отклонение от стандартных значений напряжения и частоты, кратковременные или продолжительные потери электроснабжения с.н. АЭС от внешних источников;

6) рассмотреть возможные варианты интеграции нового энергоблока АЭС в рынок электроэнергии; варианты могут включать способность отслеживать нагрузку или работать в автоматическом режиме контроля частоты или напряжения, а также минимальный уровень выдачи мощности;

7) установить взаимодействие с системным оператором по вопросам гарантии наличия необходимой пропускной способности линий электропередачи, качества и надежности внешних источников электроснабжения АЭС.

**Требования к внешним источникам электроснабжения собственных нужд АЭС.** Согласно [1] на стадии ПООБ должны выполняться расчеты ожидаемой надежности электроснабжения с.н. АЭС от внешних источников. Для этого потребуются данные о повреждаемости объектов электросети. Как правило, указанные расчеты выполняются представителями электрической сети, но проектировщик АЭС должен указать, какие исследования необходимо выполнить.

При выполнении расчетов надежности электроснабжения с.н. АЭС от внешних источников следует использовать исторические данные о неполадках и повреждениях в сети с их последствиями. Необходимо рассмотреть все возможные причины ПВИЭ, выделяя из них наиболее важные и повторяющиеся. Причины могут включать повреждения непосредственно на АЭС, влияющие на электриче-

скую связь между АЭС и электросетью, а также различные повреждения в сети.

Чтобы обеспечить системы безопасности АЭС надежным электроснабжением от внешних источников питания, требуется наличие, как правило, двух независимых подключений между атомным энергоблоком и электрической сетью. Первое подключение — это подключение посредством генераторного трансформатора, а второе — питание посредством трансформатора с.н. АЭС. Подключения должны быть спроектированы таким образом, чтобы одно повреждение не могло бы вывести из работы оба подключения. Один из способов сделать это — подключить генераторный трансформатор и трансформатор с.н. к разным РУ с отличающимися напряжениями. В качестве альтернативы оба указанных трансформатора подключаются к одному РУ, но подключения должны быть разделены как минимум двумя выключателями.

**Математическая модель для оценки надежности электроснабжения собственных нужд АЭС от внешних источников.** Если рассматривать электроснабжение с.н. АЭС с позиций действующих в России ПУЭ [2], то указанную нагрузку следует относить к особой группе электроприемников первой категории, для которой требуется три независимых взаиморезервируемых источника питания, причем один источник должен быть автономным. Однако в ПУЭ не даются количественные оценки надежности электроснабжения для подобных потребителей. Такими оценками для АЭС согласно [1] могут быть стандартные проектные условия (см. таблицу и рис. 1).

В методических указаниях [3] определено понятие риска аварий как меры опасности, характеризующей возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий.

Потеря внешнего электроснабжения	Среднее время для восстановления связи с энергосистемой $t_{\text{ср}}$ , ч	Интервал времени отказов $t_{\text{в}}$ , ч	Интенсивность аварий за год $I$ , отк./год	Комментарий
Кратковременная	0,5	£ 7	$5 \cdot 10^{-2}$	Соответствует наиболее часто встречающимся отказам энергосистемы с небольшим временем восстановления
Среднесрочная	24	7, 200	$2 \cdot 10^{-4}$	Соответствует в большинстве авариям коммутационного оборудования, приводящим к отключению линий электропередачи
Долговременная	192	> 200	$1 \cdot 10^{-3}$	Состоит из редких аварий на сборных шинах, а также аварий на линиях электропередачи вблизи АЭС от климатических воздействий, которые связаны с длительным временем восстановления

Значение последствий от аварий обозначим через  $x\phi$  при равенстве или при превышении которого авария расценивается как неприемлемое по последствиям событие. В [4] в общем виде выведено математическое выражение риска того, что за время  $t$  на объекте рассмотрения произойдут аварии с неприемлемыми последствиями:

$$R(t, X^3 x\phi) = 1 - e^{-\lambda t P(X^3 x\phi)}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – интенсивность потока аварий – число аварий в течение единицы времени;  $P(X^3 x\phi)$  – условная вероятность равенства или превышения последствий  $x\phi$  в случае аварии.

В (1) условная вероятность определяется по случайной функции распределения последствий, т.е.

$$P(X^3 x\phi) = 1 - F(x), \quad (0 \leq x \leq x\phi), \quad (2)$$

и может быть задана в виде установленного теоретического распределения случайной величины или гистограммой случайной величины, построенной по статистическим данным о последствиях нарушений [4].

В рассматриваемой задаче оценки надежности электроснабжения с.н. АЭС от внешней электрической сети в качестве количественного показателя тяжести последствий от аварии является интервал времени с нарушенным электроснабжением  $T_B$  (время восстановления в часах), а риск аварии  $R$  представлен в качестве частоты (статистической вероятности) случаев нарушений электроснабжения с.н. АЭС на интервале времени  $t = 1$  год, т.е.

$$R(T_B^3 t_B) = 1 - e^{-\lambda P(T_B^3 t_B)}. \quad (3)$$

В (3) предполагаются пуассоновские потоки событий нарушения и восстановления внешнего электроснабжения с.н. АЭС, в которых время восстановления подчиняется показательному (или экспоненциальному) распределению [5]:

$$F(t_B) = 1 - e^{-t_B/t_{cp}}, \quad (4)$$

где  $t_{cp}$  – среднее время (математическое ожидание) восстановления электроснабжения.

Для более точного моделирования времени восстановления в [6] рассматривается метод с параллельными этапами состояний. Такие этапы на рис. 1 представлены тремя типами отказов электроснабжения с.н. АЭС: кратковременное ПВЭ ( $t_B \leq 7$  ч), среднесрочное ( $7 < t_B \leq 200$  ч) и долговременное ( $t_B > 200$  ч). С учётом (2)–(4) математическая модель для стандартных трех типов отказа имеет вид

$$R(T_B^3 t_B) = 1 - e^{-\lambda e^{-(1/t_{cp})t_B}}, \quad (5)$$

где значения  $\lambda$  и  $t_{cp}$  приведены в таблице.

Проверка модели (5) дала совпадающие результаты со стандартными проектными условиями.

**Оценка надежности внешнего электроснабжения собственных нужд АЭС.** Схема оценки надежности включает в себя следующие укрупненные этапы.

1. Из существующей электрической схемы энергосистемы выделить ее часть – внешнюю электрическую сеть АЭС с наиболее близко расположенными электростанциями достаточной мощности для электроснабжения с.н. АЭС и линиями передачи с достаточной пропускной способностью

2. В качестве исходных данных для выполнения расчетов следует получить от энергосистемы репрезентативные статистические данные о повреждениях линий электропередачи и оборудования ПС в рассматриваемой электрической сети и случаи блэкаутов в энергосистеме, а от АЭС (если она действующая и стоит задача ее расширения) получить статистические данные о повреждаемости элементов действующей электрической схемы.

3. Статистические данные п. 2 разделить на три группы в зависимости от времени восстановления согласно таблице и рассчитать для каждой группы средние значения параметра потока отказов и времени восстановления для элементов электрической схемы.

4. Составить расчетную схему электроснабжения с.н. АЭС (рис. 2) с учетом структурных схем внешней сети и РУ АЭС.

5. Выполнить расчеты интенсивности потока нарушений электроснабжения с.н. АЭС и среднего времени восстановления этих нарушений с использованием метода минимальных путей и сечений, а также формул эквивалентирования последовательно-параллельных структур схем [4, 6].

6. По формуле (5) с учётом результатов в п. 5 рассчитать фактические границы областей надежности внешнего электроснабжения с.н. АЭС, которые сравниваются со стандартными проектными условиями ПВЭ на рис. 1. Если границы лежат внутри стандартных условий, то надежность считается удовлетворительной, в противном случае следует выполнить углубленные исследования на предмет изменения неудовлетворительной ситуации.

**Заключение.** Рассмотрение вопросов оценки надежности электроснабжения с.н. АЭС от источников во внешней электрической сети должно совмещаться с анализом режимов работы сети, включая наиболее неблагоприятные по параметрам аварийные режимы, а также с оценками показателей статической и динамической устойчивости.

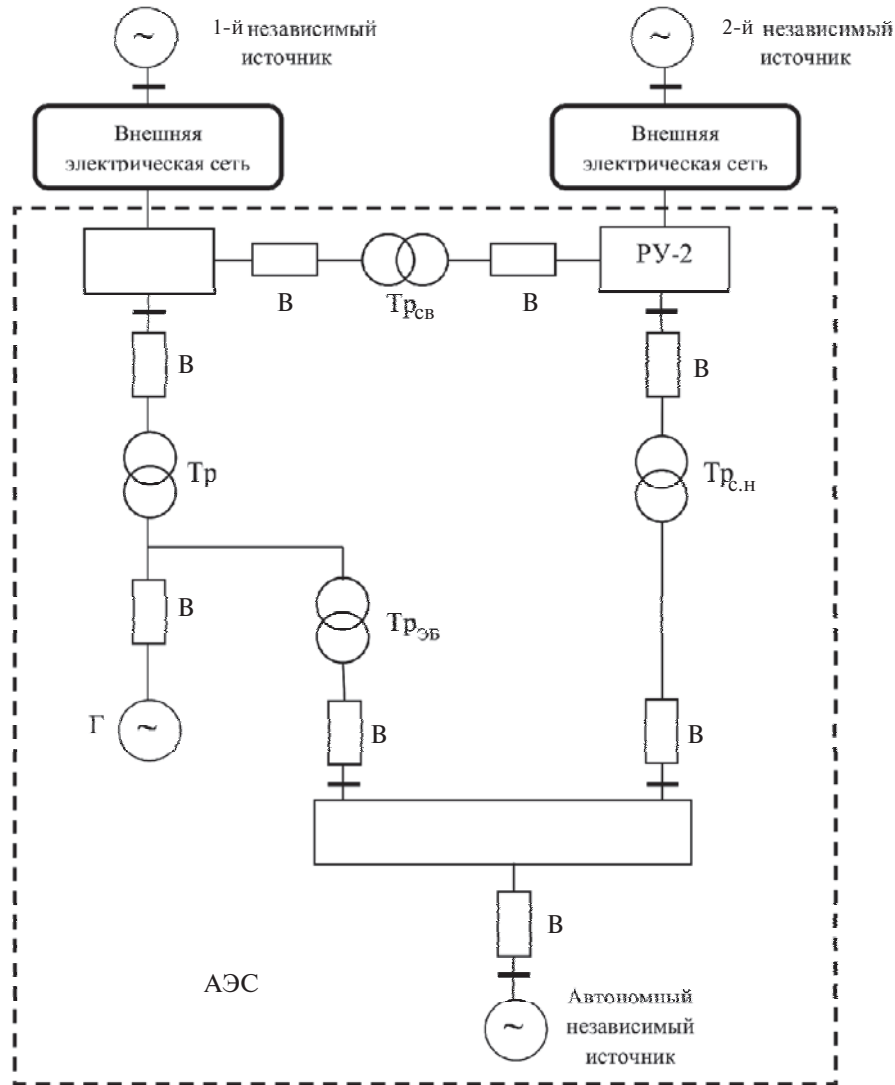


Рис. 2. Схема электроснабжения собственных нужд энергоблока АЭС от трёх независимых источников

Полученные результаты на стадии строительства АЭС или ее расширения должны периодически пересматриваться и обновляться с учетом изменений в электрической сети, например, если увеличение нагрузок значительно отличается от спрогнозированных значений или в случае изменений в структуре электрической сети. Подобные исследования должны продолжаться и на протяжении всего срока службы АЭС [1].

Важным выводом документа [1] является то, что, хотя оператор АЭС несет основную ответственность за безопасность АЭС, действия оператора электрических сетей могут также влиять на ее безопасность, поскольку состояние передающей сети высокого напряжения, методы ее эксплуатации и управления существенно влияют на функционирование АЭС как в нормальных режимах работы, так и в случаях аварийных нарушений в сети. В свою очередь, АЭС оказывает влияние на функциониро-

вание электрической сети из-за большой мощности современных атомных энергоблоков.

В связи с отмеченным взаимовлиянием АЭС и электрической сети необходимо обеспечить тесное взаимодействие и согласованность управляющих органов работой АЭС и электрической сети, начиная с самого раннего этапа проектирования АЭС. Такое сотрудничество должно продолжаться в течение всего периода строительства АЭС и соответствующих её подключений к сети. Впоследствии операторы АЭС и электросети должны продолжать взаимодействие на протяжении всего срока нахождения в эксплуатации АЭС.

В условиях России вопросами безопасности работы АЭС должны быть озабочены три действующие государственные компании: «Росатом», ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «СО ЕЭС». Учитывая масштабы развития атомной электроэнергетики в России, следует рассмотреть вопрос о создании совместной

рабочей группы, включающей специалистов по технологии работы АЭС, по режимам работы энергосистем, по надежности и безопасности технических систем и математическому обеспечению работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IAEA Nuclear Energy Series № NG-T-3.8. Electric Grid Reliability and Interface with Nuclear Power Plants, 2012 (Серийная публикация Международного агентства по атомной энергии № NG-T-3.8 «Надежность электрической сети и сопряжения с атомными электростанциями»).
2. **Правила** устройств электроустановок (Министерство энергетики Российской Федерации). 7-е изд. — М.: ЭНАС, 2004.
3. **РД 03-418-01**. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. — М.: Госгортехнадзор России, 2001.
4. **Скопinceв В.А.** Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность и живучесть. — М.: Энергоатомиздат, 2009.
5. **Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.** Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. — М.: Наука, 1991.
6. **Эндрени Дж.** Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах. Пер. с англ./Под ред. Ю.Н.Руденко. — М.: Энергоатомиздат, 1983.

[11.09.12]

*А в т о р : Скопinceв Владимир Алексеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института в 1965 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию по анализу аварийности электроэнергетических систем. Начальник департамента ОАО «Институт «Энергосетьпроект».*