

В. А. Иокст, К. М. Ефимова, В. В. Левакин,
Е. А. Иокст, М. П. Романюк, Б. О. Мартинюк

Государственный научно-технический центр по ядерной
и радиационной безопасности, г. Киев, Украина

Современный подход к организации электропитания систем, важных для безопасности АЭС при обесточивании собственных нужд

Рассмотрены предпосылки к пересмотру стратегии электропитания собственных нужд АЭС в Украине и новые подходы к организации электроснабжения потребителей систем безопасности от внутренних резервных источников электропитания и мобильных дизель-генераторных электростанций.

Ключевые слова: атомная электрическая станция, Фукусима, мобильные дизель-генераторные электростанции, системы электропитания собственных нужд, потребители систем безопасности, внешние источники электроснабжения, открытое распределительное устройство.

**В. О. Іокст, К. М. Єфімова, В. В. Левакін, О. О. Іокст,
М. П. Романюк, Б. О. Мартинюк**

Сучасний підхід до організації електроживлення систем, важливих для безпеки АЕС у разі знеструмлення власних потреб

Розглянуто передумови до перегляду стратегії електропостачання власних потреб АЕС в Україні та нові підходи до організації електропостачання споживачів систем безпеки від внутрішніх резервних джерел електроживлення і мобільних дизель-генераторних електростанцій.

Ключові слова: атомна електрична станція, Фукусіма, мобільні дизель-генераторні електростанції, системи електроживлення власних потреб, споживачі систем безпеки, зовнішні джерела електропостачання, відкритий розподільний пристрій.

© В. А. Иокст, К. М. Ефимова, В. В. Левакин, Е. А. Иокст,
М. П. Романюк, Б. О. Мартинюк, 2015

В результате землетрясения у берегов Японии 11 марта 2011 года произошла крупная техногенная катастрофа на АЭС «Фукусима». Существенные разрушения на площадке станции, полное обесточивание и последовавшая за ними потеря контроля над протекающими в реакторе процессами привели к значительным выбросам радиоактивных веществ в окружающую среду. Аварии на АЭС «Фукусима» присвоили 7-й уровень по шкале INES, что соответствует наивысшей степени тяжести аварий на АЭС. Данный инцидент заставил мировое ядерное сообщество пересмотреть подходы к обеспечению безопасности АЭС.

В 2011 году Госатомрегулирования был подготовлен Национальный отчет Украины по результатам выполнения стресс-тестов [1], в основе которого лежит документ, разработанный для европейских АЭС «Declaration of ENSREG, Annex I «EU “Stress-test” specifications» [2].

В рамках стресс-тестов эксплуатирующими организациями НАЭК «Энергоатом» детально проанализированы:

внешние экстремальные природные воздействия (землетрясения, затопления, пожары, смерчи, экстремально высокие или низкие температуры, экстремальные осадки, сильные ветра, комбинации событий);

обесточивание и (или) потеря конечного поглотителя тепла;

вопросы управления тяжелыми авариями.

В данной статье рассматриваются вопросы частично-го (с сохранением связи с объединенной энергосистемой, работой одного или нескольких энергоблоков, работоспособностью части резервных дизель-генераторов) и полного обесточивания собственных нужд АЭС по переменному току (потеря питания собственных нужд АЭС с одновременным отказом запуска всех резервных дизель-генераторных станций).

Общее описание схемы электропитания потребителей систем, важных для безопасности АЭС. Для питания потребителей систем безопасности первой и второй групп надежности на украинских АЭС на каждом энергоблоке проектом установлено три автономных канала системы надежного электроснабжения по количеству каналов системы безопасности в технологической части [3]. В каждом канале предусматриваются распределительные устройства на напряжение переменного тока 6,0 кВ, 0,4 кВ и постоянного тока 220 В, включающие автономные источники питания (дизельные генераторы, аккумуляторные батареи), агрегаты бесперебойного питания, щиты постоянного тока 220 В, трансформаторы 6,3/0,23 кВ для выпрямителей, герметические проходки для силовых и контрольных кабелей, кабельную продукцию и конструкции.

Все устройства и электрооборудование, получающие питание от системы аварийного электроснабжения АЭС, классифицируются по [4] как системы, важные для АЭС, и должны отвечать требованиям [5] в части сейсмостойкости, предъявляемым к категории I.

Дополнительно к системе аварийного электроснабжения систем безопасности, на энергоблоках АЭС Украины предусмотрена (уже внедрена или находится на этапе внедрения) общеплощадная система надежного электроснабжения (ОСНЭ) для снабжения надежным электропитанием потребителей нормальной эксплуатации, важных для безопасности, обеспечивающих подкритичность реактора, долговременную подпитку парогенераторов и сохранность основного технологического оборудования в режиме потери внешнего энергоснабжения АЭС.

ОСНЭ состоит из двух секций 6 кВ надежного питания с оперативным наименованием «ВJ» и «ВК». Эти секции

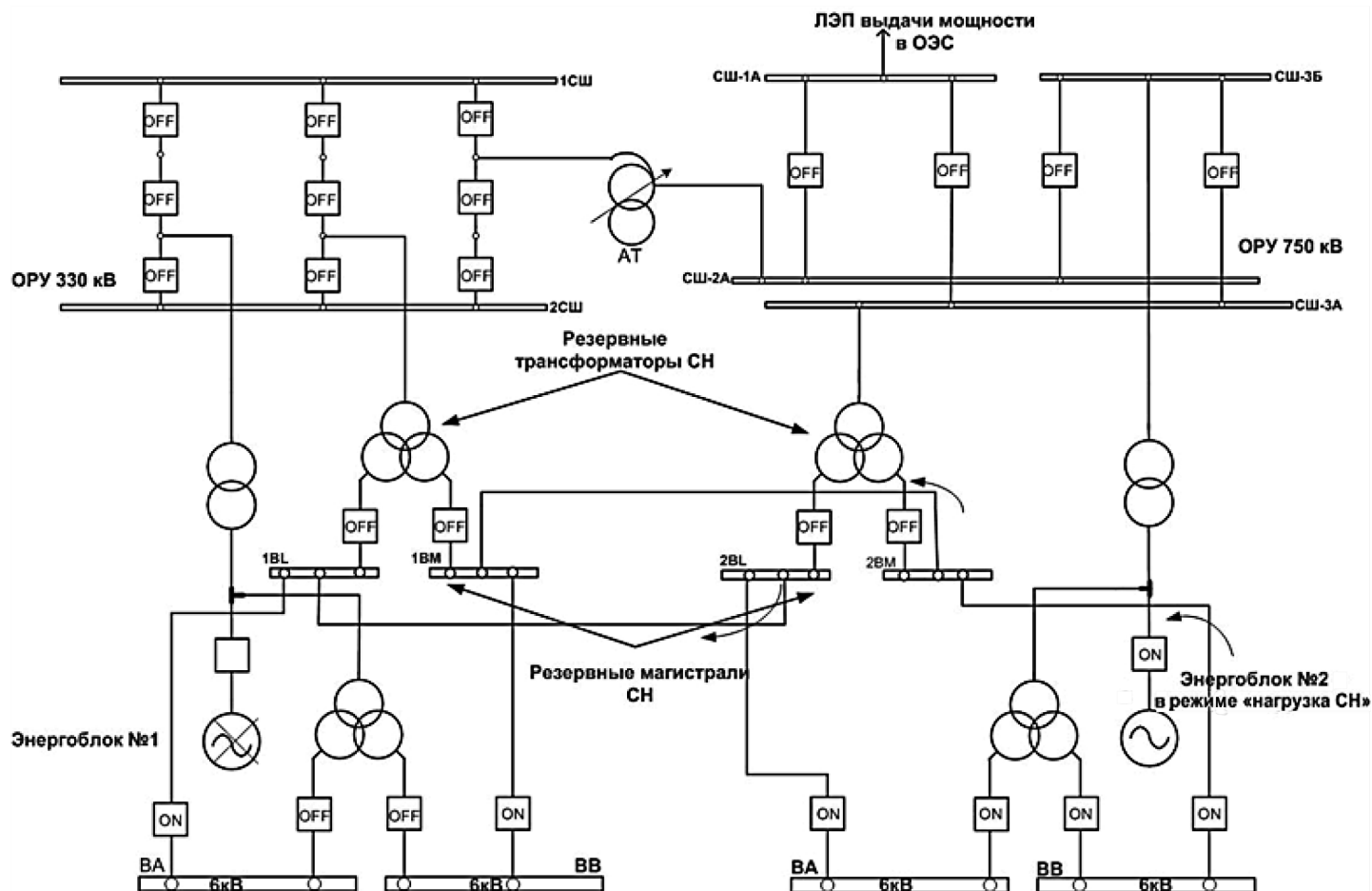


Рис. 1. Принцип подачи питания на СН нерабочего энергоблока через резервные магистрали

подключаются через два выключателя к основным секциям 6 кВ нормальной эксплуатации «ВА», «ВД» и соединены между собой двумя последовательно включенными секционными выключателями для надежного обеспечения автономности в работе секций при потере внешнего проектного энергоснабжения собственных нужд АЭС.

При аварийных ситуациях, когда имеют место неполное обесточивание АЭС и (или) сохранение связей с объединенной энергосистемой, можно выделить следующие основные стандартные технические решения:

1) переход хотя бы одного из турбогенераторов «на нагрузку собственных нужд», что позволит запитать как систему электроснабжения собственных нужд АЭС (СН) самого энергоблока, так и соседних энергоблоков через резервные магистрали 6 кВ (рис. 1);

2) подачу электропитания от объединенной энергосистемы через высоковольтные линии электропередачи на открытое распределительное устройство (ОРУ) и, в дальнейшем, — через резервные магистрали на потребителей СН энергоблоков (рис. 2);

3) применение в качестве внешних источников электроснабжения находящихся рядом с площадкой АЭС электростанций: гидроэлектростанций (ГЭС), гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС), тепловых электростанций (ТЭС) и т. д., подающих питание на АЭС через промежуточные подстанции распределения электроэнергии или через независимые силовые кабельные сети или воздушные линии (см. рис. 2).

Данные технические решения подробно описаны в [7].

Согласно аварийным инструкциям и аварийным планам, при аварийных ситуациях с потерей питания собственных нужд АЭС от энергосистемы и отказом отдельных резервных источников электроэнергии действия персонала должны быть направлены на скорейшее восстановление источников питания потребителей второй группы с последующим запуском насосных агрегатов систем аварийного охлаждения активной зоны высокого и низкого давления, аварийной подпитки парогенераторов, технической воды ответственных потребителей.

С учетом результатов анализа Сообщения ВАО АЭС о значительном опыте эксплуатации (WANO SOER 2011–2) «Повреждение топлива на АЭС Фукусима Дайичи, вызванное землетрясением и цунами», а также Сообщения ВАО АЭС (WANO SOER 2011–4) «Безотлагательные действия по принятию мер при длительной потере всех источников электроснабжения переменного тока», при переоценке надежности электроснабжения АЭС особое внимание уделено расширению возможностей применения как внешних источников электроэнергии, так и внутренних.

С целью повышения надежности электроснабжения потребителей систем безопасности АЭС в стратегии подачи питания от внутренних и внешних резервных источников электроснабжения учтены новые технические решения.

Прежде чем описывать нововведения в схемах электроснабжения, целесообразно акцентировать внимание

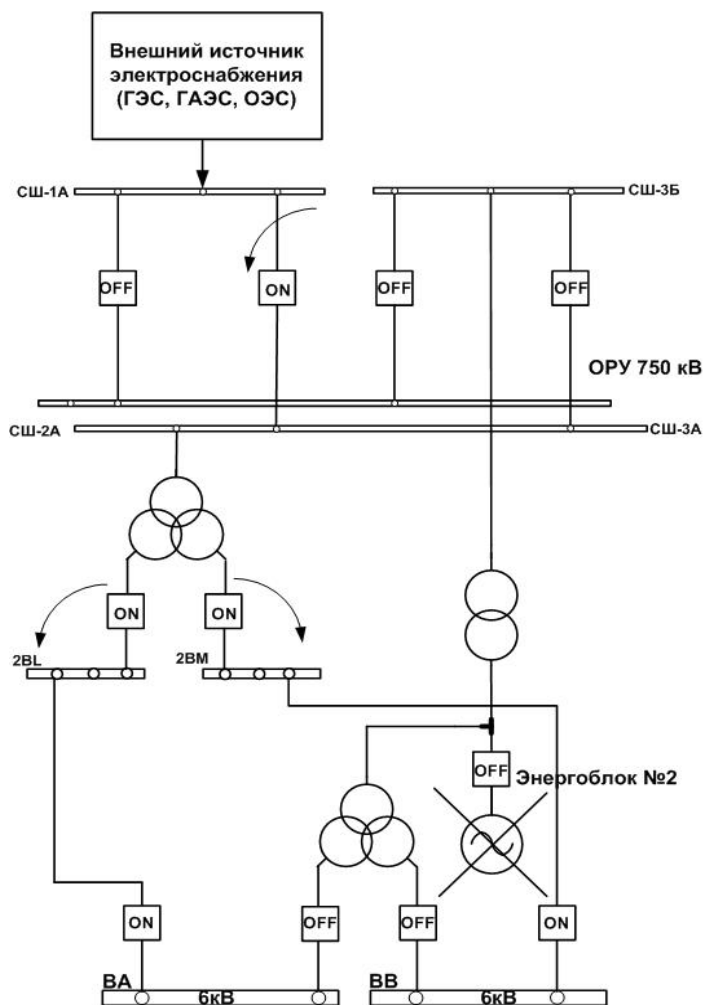


Рис. 2. Принцип подачи питания на СН энергоблока от внешних источников электропитания (ГЭС, ГАЭС, ОЭС)

на существующей нормативной базе, которая лежит в основе проекта системы аварийного электропитания (САЭ):

ПНАЭ Г-9–026-90, п. 2.1.5: «Резервирование электропитания секции напряжением 6,0 кВ (0,4 кВ) каналов систем безопасности от источников резервного питания нормальной эксплуатации не предусматривается» [6];

ПНАЭ Г-9–027-91, п. 3.1.8: «Взаимное резервирование электропитания секций РУ 6 и 0,4 кВ между разными каналами САЭ, а также автономных источников в пределах каждого канала не предусматривается» [3].

Существующий проект системы аварийного электропитания АЭС реализован на основе анализа постулируемого перечня исходных событий нарушений нормальной эксплуатации, аварийных ситуаций и аварий, с учетом принципа единичного отказа, тогда как события с множественными отказами, сопровождающиеся отказами односторонних источников аварийного электропитания, которые рассматривались Рабочей группой по гармонизации реакторов (RHWG) Ассоциации западноевропейских органов ядерного регулирования (WENRA) в рамках Отчета [8], требуют внедрения дополнительных решений, повышающих надежность САЭ и безопасность АЭС в целом.

Согласно новым подходам к управлению авариями, при разработке и согласовании соответствующих инструкций и планов действий в случае обесточивания

энергоблока и отказа отдельных резервных дизель-генераторных станций системы безопасности предусматривается возможность подачи напряжения на секции обесточенного канала систем безопасности от резервных источников питания нормальной эксплуатации или от автономного источника электропитания другого канала системы безопасности.

Таким образом, при обесточивании АЭС с сохранением резервных дизель-генераторных станций оперативный персонал, в зависимости от исходных условий, в течение регламентированного времени (ограниченного ресурсом аккумуляторных батарей) может организовать:

подачу напряжения от дизель-генераторной станции одного из каналов систем аварийного электропитания на другой канал систем безопасности;

подачу питания на канал системы аварийного электропитания от дизель-генераторной станции общеблочной системы надежного электропитания.

Для подобных оперативных действий, помимо переключений в электрической схеме собственных нужд АЭС, можно использовать временные связи при помощи гибких силовых кабелей.

В случае обесточивания собственных нужд АЭС и отказа всех резервных дизель-генераторных станций, до момента восстановления системы электропитания потребителя второй группы, на энергоблоке единственным источником электроэнергии являются аккумуляторные батареи систем безопасности и общеблочные аккумуляторные батареи. Емкости батарей хватает от двух до девяти часов работы (в зависимости от действий персонала по отключению неиспользуемого оборудования и действий по управлению аварией). Аккумуляторные батареи не обеспечивают в полном объеме выполнение основных функций безопасности, а полный разряд аккумуляторных батарей лишает оператора АЭС контроля состояния реакторной установки, влечет к потере аварийного освещения и связи.

Отсюда следует, что при обесточивании АЭС и отказе всех резервных дизель-генераторных станций для обеспечения электропитанием отдельного оборудования, которое является критическим для выполнения функций безопасности, контроля состояния энергоблока, поддержания работоспособности аварийного освещения и связи, необходимо подать напряжение от постороннего источника (мобильной дизель-генераторной станции) на секции 0,4 кВ для питания щитов постоянного тока каналов безопасности, общеблочного щита и зарядки аккумуляторных батарей.

Мобильные дизель-генераторные станции. Западно-европейскими регулирующими органами (WENRA [8]), а также требованиями по безопасности МАГАТЭ SSR-2/1 [9] предусматривается использование на новых энергоблоках АЭС мобильных дизель-генераторных станций (в числе других мобильных установок) в качестве дополнительных источников электроэнергии и регламентируется минимальный объем технических требований, который должен содержать проект в части электропитания.

При проектировании аварийного электропитания следует учитывать использование дополнительных дизель-генераторных станций и их специфику (мобильность, физическая и функциональная независимость от остального оборудования АЭС, повышенные требования к сокращению длительности операций для подключения к потребителям [8]). Проектные данные должны содержать

требования к необходимой мощности дополнительных источников энергии, степени готовности, продуктивности, длительности и непрерывности функционирования оборудования [9].

В соответствии с новыми концептуальными подходами к дополнительному аварийному электроснабжению АЭС в Украине, с целью организации эффективной схемы аварийного электроснабжения наиболее важных потребителей первой и второй групп систем безопасности, а также информационно-вычислительной системы энергоблока при полной неработоспособности резервных источников переменного тока аварийного электроснабжения, было принято решение об использовании на АЭС мобильных дизель-генераторных станций. На каждом энергоблоке АЭС с РУ В-320 предполагается размещение одной мобильной дизель-генераторной станции (МДГС) напряжением 0,4 кВ, мощностью не менее 800 кВт.

К МДГС-0,4 кВ предъявляются требования, как к оборудованию категории сейсмостойкости I по ПНАЭГ Г-5-006-87 и класса безопасности 4; классификационное обозначение, согласно НП-306.2.141-2008, — 4Н.

МДГС-0,4 кВ сохраняет работоспособность при температуре воздуха от минус 40 °С до плюс 50 °С, атмосферном давлении 630..800 мм рт. ст., максимальной относительной влажности 98 % [10].

С учетом требований к непрерывности работы, МДГС должна иметь возможность дозаправиться дизельным топливом из резервуаров резервных дизель-генераторных станций АЭС или топливозаправщиков посредством собственного топливного насоса.

Система охлаждения МДГС автономная (не требующая дополнительного внешнего источника охлаждения) и обеспечивает надежное охлаждение МДГС при граничных температурах.

Предварительная оценка длительности операций по доставке, подключению и подаче напряжения от МДГС-0,4 кВ рассматривалась исходя из максимального времени (1 ч с начала развития аварийной ситуации), по истечении которого необходимо подать напряжение на секции 0,4 кВ потребителей второй группы системы аварийного электроснабжения (а от них — на подзарядку аккумуляторных батарей).

Схемы организации подачи питания от МДГС к потребителям АЭС. В качестве примера рассмотрим мобильную дизель-генераторную станцию 0,4 кВ для энергоблока № 1 Южно-Украинской АЭС, которая конструктивно выполнена на двух платформах двухосных автомобильных полуприцепов длиной 6 и 9 м. На одном полуприцепе, в защитном контейнере, размещается дизель-электрический агрегат мощностью 800 кВт, на другом полуприцепе — распределительные шкафы, понижающие трансформаторы 0,4 кВ/0,22 кВ и соединительные кабели. Полуприцепы соединяются между собой спецкабелем сечением 240 мм².

Дизельный агрегат оборудован электрическим подогревателем воды мощностью 4 кВт, который может поддерживать температуру воды 60 °С. Температура регулируется биметаллической пластиной, установленной внутри подогревателя. Тепло передается по дизелю за счёт естественной конвекции.

Технические характеристики дизельного агрегата:

- дизельный двигатель — четырехтактный, вертикальный, однорядный;
- максимальная мощность — 985 кВт;
- удельный расход дизельного топлива — 252 г/(кВт·ч);
- расход топлива при 100 % нагрузке — 214±10,7 л/ч;

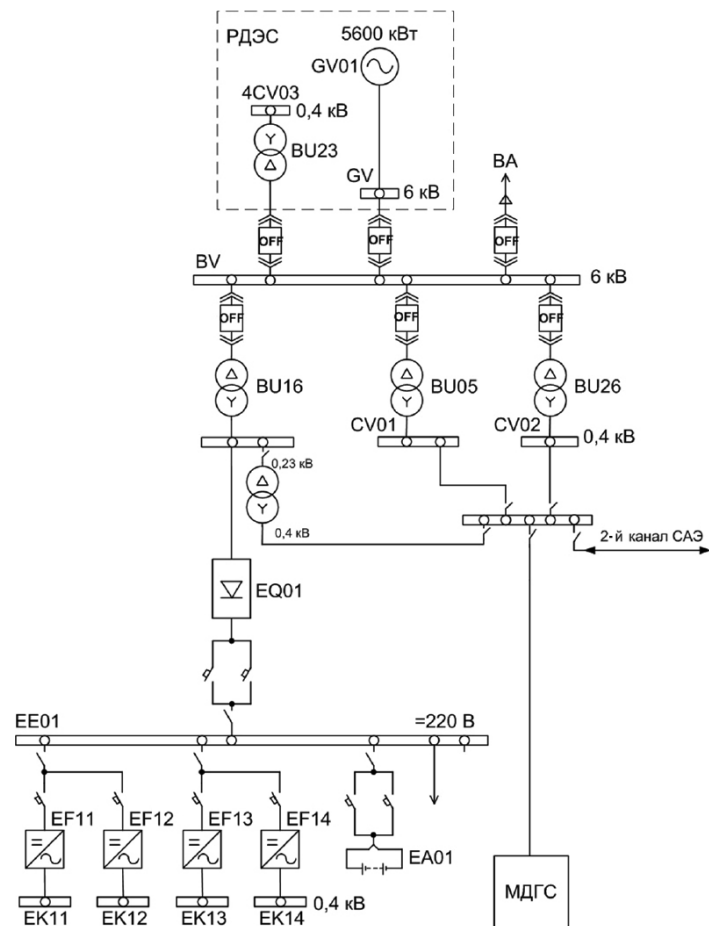


Рис. 3. Схема подключения МДГС-0,4 кВ к каналу САЭ

- КПД навешенного генератора — 95 %;
- масса сухого дизеля — 3428 кг;
- габариты МДГС (высота×длина×ширина) — 1780×2879×1577 мм;
- время запуска — 5...10 с.

Дизель-генераторная установка 0,4 кВ располагается на расстоянии 50 метров от входа в помещение распределительных секций систем безопасности 0,4 кВ, на огражденной площадке с дополнительным шкафом питания 220 В для подзарядки батарей, подогрева топливной и смазочной систем МДГС-0,4 кВ в зимнее время при нормальной работе энергоблока. В случае аварии на энергоблоке, МДГС-0,4 кВ подключается к потребителям с помощью гибких электрических кабелей (рис. 3).

Можно выделить следующие положительные аспекты выбранной на украинских АЭС стратегии применения МДГС:

МДГС находится в постоянной готовности для ввода в работу независимо от погодных условий;

МДГС вводится в работу простыми действиями оперативного персонала после выбора канала системы безопасности для подачи напряжения;

непрерывность работы МДГС обеспечивается дозаправкой топлива с помощью собственных технических средств;

технические характеристики МДГС-0,4 кВ позволяют поддерживать работоспособность отдельного аварийного технологического оборудования АЭС до восстановления основных источников электроснабжения переменным током.

Выводы

В целом, АЭС в Украине имеют достаточно высокий, заложенный еще на стадии проекта, уровень надежности электроснабжения потребителей систем безопасности. Внесение в проекты электроснабжения собственных нужд дополнительных решений, ранее не предусмотренных нормами и правилами, расширяет пути обеспечения надежной эксплуатации АЭС и готовности станции к преодолению аварийных ситуаций, связанных с длительной потерей внешнего энергоснабжения и множественными отказами резервных дизельных генераторных станций.

Список использованной литературы

1. Национальный отчет Украины : Результаты проведения «стресс-тестов». — К. : Государственная инспекция ядерного регулирования Украины, 2011. — С. 137.
2. Declaration of ENSREG, Annex 1 «EU “Stress-test” specifications». — ENSREG, 2011. — P. 18.
3. ПНАЭ Г-9-027-91. Правила проектирования систем аварийного электроснабжения атомных станций. — М. : Комитет СССР по государственному надзору за безопасным ведением работ в промышленности и атомной энергетике. — 1991. — С. 12.
4. НП-306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. — К. : Державний комітет ядерного регулювання України. — 2008. — С. 35.
5. ПНАЭ Г-5-006-87. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — С. 28.
6. ПНАЭ Г-9-026-90. Общие положения по устройству и эксплуатации аварийного электроснабжения атомных станций. — М. : Комитет СССР по гос. надзору за безопасным ведением работ в промышленности и атомной энергетике, 1991. — С. 9.
7. ПОАБ «Комплекса мероприятий в рамках стратегии управления запроектной аварией “Длительное полное обесточивание энергоблоков на площадке АЭС с потерей отвода тепла к конечному поглотителю для РУ В-320”». — К. : НАЭК «Энергоатом», 2014. — С. 91.
8. Report. Safety of new NPP design. — WENRA RHWG, 2013. — P. 50.
9. Safety of nuclear power plants: design. Specific Safety Requirements № SSR-2/1. — Vienna : IAEA, 2012. — P. 91.
10. Технические требования и условия поставки дизель-генераторной станции напряжением 0,4 кВ для обеспечения автономного энергоснабжения потребителей в условиях запроектной аварии «Длительное полное обесточивание энергоблоков на площадке АЭС с потерей отвода тепла к конечному поглотителю» для энергоблоков № 1, 2 ОП РАЭС с РУ В-213 с изменением № 1 от 07.05.2013. — К. : НАЭК «Энергоатом», 2013. — С. 27.

References

1. National Report of Ukraine: The Results of Stress-Tests [Natsionalnyi otchiot Ukrainy: Rezultaty provedeniia “stress-testov”], Kyiv, SNRIU, 2011, 35 p. (Ukr)
2. Declaration of ENSREG, Annex 1 “EU “Stress-test” specifications”, ENSREG, 2011, 18 p.
3. ПНАЭ Г-9-027-91. Rules of NPP Emergency Power Supply System Design [Pravila proektirovaniia system avariinogo elektrosnabzheniia atomnykh stantsii], Moscow, USSR Committee on State Oversight of Safety in Industry and Nuclear Energy, 1991, 12 p. (Rus)
4. НП 306.2.141-2008. General Safety Provisions for Nuclear Power Plants [Zahalni polozhennia bezpeky atomnykh stantsii], Kyiv, State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine, 2008, 35 p. (Ukr)
5. ПНАЭ Г-5-006-87. Standards for Design of Seismically Resistant Nuclear Power Plants [Normy proektirovaniia seismostoikikh atomnykh stantsii], Moscow, Energoatomizdat, 1989, 28 p. (Rus)
6. ПНАЭ Г-9-026-90. General Provisions for the Design and Operation of Emergency Power Supply Systems of Nuclear Power Plants [Obshchiie polozheniia po ustroistvu i ekspluatatsii avariinogo elektrosnabzheniia atomnykh stantsii], Moscow, USSR Committed on State Oversight of Safety in Industry and Nuclear Energy, 1991, 9 p. (Rus)
7. PSAR “Complex of Measures within the Management Strategy for Beyond Design-Basis Accident “Long-Term Unit Blackout at the NPP Site with Loss of Heat Removal to the Ultimate Heat Sink” for V-320” [POAB “Kompleksa meropriiatii v ramkakh strategii upravleniia zaproektnoi avariiie “Dlitelnoie polnoie obestochivaniie energoblokov na ploshchadke AES s poterei otvoda tepla k konechnomu poglotiteliu dlia RU V-320”], Kyiv, National Nuclear Energy Generating Company “Energoatom”, 2014, 91 p. (Rus)
8. Report. Safety of New NPP Design. WENRA RHWG, 2013, 50 p.
9. Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific Safety Requirements. Vienna: IAEA, 2012, 91 p. (No. SSR-2/1).
10. “Technical Specifications and Delivery Conditions for 0.4 kV Diesel Generator Station to Ensure Independent Power Supply of Loads in Beyond Design-Basis Accident “Long-Term Unit Blackout at the NPP Site with Loss of Heat Removal to the Ultimate Heat Sink” for RNPP-1,2 with V-213” with Amendment No. 1 dated 07 May 2013 [Tekhnicheskiiie trebovaniia i usloviia postavki dizel-generatornoi stantsii napriazheniim 0.4 kV dlia obespecheniia avtonomnogo energosnabzheniia potrebitelii v usloviakh zaproektnoi avariiie “Dlitelnoie polnoie obestochivaniie energoblokov na ploshchadke AES s poterei otvoda tepla k konechnomu poglotiteliu” dlia energoblokov No. 1, 2 OP RAES s RU V-213” s izmeneniim No. 1 ot 07.05.2013], Kyiv, National Nuclear Energy Generating Company “Energoatom”, 2013, 27 p. (Rus).

Получено 01.04.2015.