

УДК 621.311.243:697.329

*В. П. Кравченко, В. А. Дубковский, Е. В. Кравченко**Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина иеv*

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, КАК ИСТОЧНИКА НАДЕЖНОГО ПИТАНИЯ ПРИ ОБЕСТОЧИВАНИИ АЭС

В качестве одного из трех каналов системы надежного питания ответственных потребителей реакторного отделения предложено вместо дизель-генератора использовать полупроводниковую солнечную электростанцию (ПСЭС) с аккумуляторными батареями. Определены необходимое количество электроэнергии для отвода остаточного тепловыделения ядерного реактора в течение трех суток, площадь солнечных модулей, емкость аккумуляторных батарей. Приведен расчет технико-экономических показателей ПСЭС. Учтена возможность уменьшения мощности насосов с уменьшением мощности остаточного тепловыделения. Рассчитана себестоимость электроэнергии.

Ключевые слова: мощность остаточного тепловыделения, полупроводниковая солнечная электростанция, мощность насосов.

Уроки аварии в марте 2011 года на АЭС “Фукусима-1” показали необходимость более надежного энергоснабжения оборудования реакторного отделения при обесточивании блока [1]. Причиной аварии стало отсутствие энергоснабжения ответственных потребителей в результате повреждения дизель-генераторов (ДГ) цунами. Исходя из анализа ситуации на украинских АЭС, отсутствие автономного питания при обесточивании АЭС приведет к аналогичным последствиям [2].

Анализ состояния проблемы. Согласно [3], составной частью системы аварийного энергоснабжения систем безопасности является резервная дизельная электростанция (РДЭС). Она предназначена для использования в качестве автономного аварийного, а также резервного источника электроснабжения ответственных потребителей атомной электростанции с ВВЭР-1000. Дизель-генераторы систем надежного питания в нормальном режиме АЭС не работают и не могут быть использованы для иных целей, кроме аварийного питания. Предусмотрена отдельная независимая дизель-электрическая станция для каждой системы безопасности: на одном блоке смонтированы три автоматизированные дизель-генераторные установки типа АСД-5600, рассчитанные на работу без постоянного присутствия обслуживающего персонала [4]. Мощность ДГ выбрана из расчета обеспечения каждым каналом безопасности надежного питания необходимого состава механизмов, участвующих в процессе аварийного расхолаживания реактора при любом виде аварии. Суммарная мощность потребителей, которые должны обеспечиваться за счет РДЭС, равна 5107 кВт, отсюда и номинальная мощность ДГ — 5,6 МВт.

Если пойти дальше в проектных требованиях, следовало бы указать необходимость в разных принципах работы каждого из каналов системы

безопасности.

В 1986 году в г. Щёлкино была построена экспериментальная СЭС башенного типа мощностью 5 МВт именно в качестве резервного источника электроэнергии для планируемой там Крымской АЭС. При ее эксплуатации пришлось столкнуться с множеством трудностей, в частности с тем, что система позиционирования отражателей практически полностью (95 %) расходовала энергию, вырабатываемую станцией. Также возникали проблемы с очисткой зеркал. Вскоре эта станция прекратила своё существование [5]. В настоящей работе предложено в качестве источника надежного питания одного из каналов безопасности использовать полупроводниковую солнечную электростанцию (ПСЭС) с аккумуляторными батареями. Основным элементом такой электростанции — панели фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). На первый взгляд, такое предложение должно иметь преимущество: тогда как РДЭС простаивает весь срок эксплуатации энергоблока, ПСЭС будет вырабатывать электроэнергию, окупая себя и повышая вероятностные показатели безопасности. Обслуживание и ремонт выработавших свой ресурс АСД-5600 по стоимости сопоставимы с покупкой нового оборудования. Следует отметить, что ремонту подлежит и оборудование, находящееся в дежурном режиме.

Закупаемое дизельное топливо хранится определенное время, затем утилизируется и заменяется новым, что также усложняет и удорожает эксплуатацию.

Для аварийного охлаждения реактора рассматривается использование струйных насосов [6], насосов пожарных машин, соединение энергоблоков специальным кабелем и другие способы [7].

Целью работы является определение технико-экономических характеристик соответствующей

солнечной электростанции, определяющих дальнейшую целесообразность проработки предложенного способа надежного энергоснабжения.

Определение требуемой мощности ПСЭС. Результатом анализа возникновения аналогичной с аварией на АЭС “Фукусима” ситуации с отказом РДЭС для блоков с ВВЭР стало заключение о том, что при аварийной ситуации, приводящей к полному обесточиванию АЭС и неработоспособности РДЭС, перевод блоков в безопасное состояние невозможен. Используемые системы безопасности, необходимые для ликвидации аварийных ситуаций и проектных аварий, ограничения их последствий и предотвращения перерастания в запроектные аварии, не обеспечат выполнение своих функций из-за отсутствия электропитания. В связи с этим был определен необходимый минимум систем, требующих электропитания при полном обесточивании:

система ТХ (аварийный ввод питательной воды в парогенераторы) — 800 кВт;

система ТQ (аварийный ввод бора в активную зону реактора) — 800 кВт;

прочие системы, участвующие в отводе остаточного тепловыделения (ОТ) от теплоносителя, — 150 кВт.

С учетом пусковых токов подключаемых нагрузок мощность мобильной дизель-генераторной станции должна быть не менее 2 МВт.

Таким образом, минимальная необходимая мощность автономного источника энергии, в нашем случае — ПСЭС, должна составлять 2 МВт.

Определение характеристик фотоэлектрических преобразователей. Солнечные модули классифицируются по пиковой мощности в ваттах (Втп). Один пиковый ватт — техническая характеристика, которая указывает на значение мощности установки в определенных условиях, т. е. когда солнечное излучение в 1 кВт/м^2 падает на элемент при температуре 25°C . Такая интенсивность достигается, если Солнце находится в зените при хороших погодных условиях. Чтобы выработать 1 Втп, нужен ФЭП размером 10×10 см. Однако солнечная освещенность редко достигает величины 1 кВт/м^2 . Более того, на солнце модуль нагревается значительно выше номинальной температуры. Оба эти фактора снижают производительность модуля. При мощности 1 Втп производительность ФЭП составляет около $6 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ электроэнергии в сутки или $2000 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ в год [8]. Современные и фотоэлектрические преобразователи имеют КПД — 15,4 % [9]. Так батарея площадью $1,681 \text{ м}^2$ имеет пиковую мощность 260 Вт при оптовой стоимости 304,2 \$. Суточная производительность ФЭП площадью 1 м^2 составит

$$q_{\text{мод}} = 6 \text{ Вт}\cdot\text{ч} \cdot 260 \text{ Вт} / 1,681 \text{ м}^2 = 928 \text{ Вт}\cdot\text{ч} / (\text{сут}\cdot\text{м}^2) \quad (1)$$

Определение требуемой емкости и количества аккумуляторов. Длительность работы ДГ по регламенту равна десяти суткам [4]. Длительность обеспечения электроснабжения от ПСЭС принята равной трем суткам. Возможность низкой инсоляции в момент аварии компенсируется установкой аккумуляторов. Желательно применение щелочных аккумуляторов, имеющих больший ресурс работы, а также допускающих большее количество разрядок и зарядок. Применение аккумуляторов с большой емкостью позволяет снизить их удельную стоимость. В данной работе номинальная емкость аккумулятора принята $200 \text{ А}\cdot\text{ч}$. При напряжении 12 В емкость аккумулятора будет равна $2400 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$. Оптовая стоимость равна 455 \$/шт. [11].

По условиям допустимого перерыва в электропитании все потребители электроэнергии на собственные нужды разделены на 3 группы:

- первая группа не допускает перерыва в питании более чем на доли секунды;

- вторая группа допускает перерыв в питании на десятки секунд, но требует обязательного питания после срабатывания аварийной защиты;

- третья группа допускает перерыв в питании и не предъявляет к нему особых требований.

К потребителям первой группы относятся системы контрольно-измерительных приборов и автоматики; приборы технологического контроля реактора и его систем. Для обеспечения этих потребителей при обесточивании используются аккумуляторные батареи. Кроме приборов блочного щита управления батареи питают еще некоторые системы радиационного контроля; электроприводы быстродействующих каналов и отсечной аппаратуры, обеспечивающих вступление в работу систем расхолаживания и локализации аварии, а также часть аварийного освещения; оперативные цепи управления, защиты и сигнализации; аварийные маслососы турбогенератора и уплотнения вала генератора. Время работы аккумуляторов — полчаса.

К потребителям второй группы относятся механизмы, обеспечивающие расхолаживание реактора. Именно об обеспечении потребителей этой группы и идет речь в данной работе.

Рассмотрим функцию изменения остаточного тепловыделения (ОТ) от времени. В табл. 1 приводятся значения ОТ, определенные по формулам Вэя-Вигнера, Уинтермайера-Уэлса [10] и взятые из альбома нейтронно-физических характеристик блока АЭС с ВВЭР-1000. Расчетный режим: четырехлетняя кампания топлива, на мощности 3000 МВт реактор работает 286 суток, а затем на мощностном эффекте реактивности при мощности 2500 МВт работает в течение 24 суток, длительность ППР 55 суток. Аппроксимация данных

альбома нейтронно-физических характеристик (НФХ) степенной функцией дала следующее уравнение (величина достоверности аппроксимации $R^2=0,9943$):

$$Q_{\beta\gamma} = 413,08 \cdot t^{-0,279}, \text{МВт} \quad (2)$$

где t — время после остановки реактора, с.

Для определения количества энергии, которую надо отвести от активной зоны за трое суток, проинтегрируем функцию (2). Полученный результат совпал с результатом численного интегрирования: 1272,46 МВт·ч. Система энергоснабжения ответственных потребителей от дизель-генератора должна принять нагрузку через 15 с. Подача питания от аккумуляторов может быть практически мгновенна, принято также 15 с. Через 15 с после останова реактора мощность остаточного тепловыделения равна 194,05 МВт (табл. 1). В этот момент времени мощность насосов составит 1,75 МВт (800+800+150 кВт). С течением времени мощность насосов будет уменьшаться с уменьшением мощности остаточного тепловыделения. Необходимое количество энергии для привода насосов определится из пропорции:

$$194,05 \text{ МВт} — 1272,46 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$1,75 \text{ МВт} — E_{\text{зсут}}$$

Откуда требуемая емкость аккумуляторов составит $E_{\text{зсут}}=11,475 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$. Для аккумуляирования этого количества энергии потребуется $11475/2,4=4782$ аккумулятора.

Таблица 1. Функция изменения остаточного тепловыделения со временем, МВт

Время после остановки	По формуле Взя-Винера	По формуле Уинтермайера-Уэлса	По альбому НФХ	Расчетное знач. по (1)
15	90,7	123,35		194,05
30	78,47	111,56		159,93
60	67,81	98,9	117	131,80
100	60,86	89,67		114,30
300	48,09	71,39	85	84,12
600	41,37	61,35	73	69,33
1000	36,98	54,69		60,12
1800	32,45	47,79	55	51,03
3600	27,75	40,6	45	42,06
7200	23,66	34,32		34,66
10800	21,52	31,03	31	30,95
21600	18,23	25,98	26	25,51
36000	16,09	22,68		22,12
43200	15,38	21,58	21	21,02
86400	12,88	17,75	17	17,33
172800	10,71	14,41		14,28
259200	9,56	12,65		12,75
432000	8,24	10,63	10,5	11,06

Определение характеристик поля гелиоколлекторов. Примем, что необходимая площадь ФЭП должна обеспечить суточную потребность электропитания насосов. Аналогично предыдущему разделу, количество энергии, выделившееся в реакторе в течение суток, определится интегрированием выражения (2) на участке времени от 15 до 86400 с (1 сутки) и будет равно 575,68 МВт·ч. Количество электроэнергии для привода насосов, необходимых для отвода этого количества остаточного тепловыделения, определится из пропорции:

$$194,05 \text{ МВт} - 575,68 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

$$1,75 \text{ МВт} — Q_{\text{сут}}$$

Отсюда количество энергии, которое должна произвести ПЭС за сутки, равна $Q_{\text{сут}}=5,191 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$. Для производства такого количества электроэнергии суммарная площадь ФЭП должна быть равна:

$$F_{\text{ФЭП}} = Q_{\text{сут}} \cdot 1,2 / q_{\text{мод}} = 5191 \cdot 1,2 / 0,928 = 6712,5 \text{ м}^2,$$

где 1,2 — коэффициент, учитывающий потери.

Это соответствует пиковой мощности СЭС $6712,5 \text{ м}^2 \cdot 260 \text{ Вт} / 1,681 \text{ м}^2 = 1038221 \text{ Вт} = 1,038 \text{ МВт}$.

Для оценки размеров поля ФЭП укажем, что это площадь квадрата со стороной 81,93 м (без учета площади для проходов между панелями).

Определение технико-экономических показателей ПЭС. В табл. 2 приведены результаты расчета оценочной стоимости ПЭС.

Удельные капиталовложения равны $4,013 \cdot 10^6 / 1038 = 3866 \text{ \$/кВт}$.

Годовая выработка электроэнергии:

$$0,928 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{сут}) \cdot 5191 \text{ м}^2 \cdot 365 \text{ сут}$$

$$= 2,273 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Отпуск электроэнергии:

$$2,273 \cdot 10^6 - 11475 = 2,262 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

При этих данных коэффициент использования установленной мощности ПЭС будет равен:

$$\text{КИУМ} = 2,273 \cdot 10^6 / (0,1546 \text{ кВт} / \text{м}^2 \cdot 6712,5 \text{ м}^2 \cdot 8760 \text{ ч/год}) = 0,25.$$

Таблица 2. Оценочная стоимость ПЭС

Название оборудования или работ	Количество	Стоим. един., \$	Общая стоимость, \$	Стоим., %
ФЭП	6712,5 м ²	180,96 \$/м ²	1,214 · 10 ⁶	30,26
Аккумуляторы	4782 шт.	455 \$/шт.	2,176 · 10 ⁶	58,77
Инвертор	1,038 МВтп	0,1 \$/Втп	0,104 · 10 ⁶	2,80
Средства контроля	1,038 МВтп	0,2 \$/Втп	0,208 · 10 ⁶	5,61
Строительная часть и монтаж	1,038 МВт	300 \$/кВт	0,311 · 10 ⁶	7,76
Итого :			4,013 · 10 ⁶	100,00

Затраты на производство электроэнергии складываются из следующих статей (с учетом дополнительных затрат на аккумуляторы и инвертор):

- амортизация (15 % стоимости ПСЭС): $0,612 \cdot 10^6$ \$;

- зарплата 10 чел. персонала по 4400 \$/год: 44000 \$;

- общестанционные расходы (13 % от суммы амортизационных затрат и затрат на зарплату): $0,084 \cdot 10^6$ \$;

Итого $0,730 \cdot 10^6$ \$.

Себестоимость электроэнергии будет равна $0,730 \cdot 10^6 / 2,262 \cdot 10^6 = 0,32$ \$/кВт ч.

Зеленый тариф на электроэнергию, производимую солнечными электростанциями, с 1.01.2015 года равен 1,84 грн/кВт ч = 0,084 \$/кВт ч, т.е. не покрывает затраты на производство.

Таким образом, при нынешнем соотношении цен использование ПСЭС оказывается нерентабельным, т.е. себестоимость не покрывается доходами.

Выбор типа аккумуляторов и, соответственно, цены вопрос не однозначный. Строящиеся солнечные электростанции не комплектуются аккумуляторами. Без учета стоимости аккумуляторов экономические показатели будут выглядеть следующим образом:

- стоимость ПСЭС 1,837 млн \$;

- удельные капиталовложения 1770 \$/кВт;

- себестоимость 0,17 \$/кВт ч.

То есть, по результатам расчета можно сделать вывод, что ПСЭС при принятых ценах на оборудование и тарифе на электроэнергию нерентабельна. Следует также отметить устойчивую тенденцию снижения цены и увеличения КПД солнечных модулей, что может существенно улучшить экономические показатели использования ПСЭС.

Чтобы сделать окончательный вывод, сравним показатели использования ПСЭС и ДГ в качестве источника надежного питания. Стоимость АСД-5600 оценивается в 950000 \$. Часовой расход топлива 1340 кг. Это при теплоте сгорания дизельного топлива соответствует электрическому КПД 35,8 %. Топливо хранится в двух баках: расходном 10 м^3 и промежуточном 100 м^3 . Стоимость этого топлива $110 \text{ м}^3 \cdot 828 \text{ $/м}^3 = 91100$ \$. Сопоставление экономиче-

ских показателей приводится в табл. 3.

Таблица 3. Расчет экономических показателей использования ПСЭС и дизель-генератора в качестве источника надежного питания, \$

Наименование показателя	ПСЭС	АСД-5600
Стоимость оборудования	$4,013 \cdot 10^6$	$0,95 \cdot 10^6$
Стоимость топлива	-	91100
Годовые затраты (включая):	$0,730 \cdot 10^6$	180913
- амортизация	$0,602 \cdot 10^6$	142500
- зарплата	44000	17600
- общестанционные расходы	$0,084 \cdot 10^6$	20813
Доход за год	$0,190 \cdot 10^6$	-
Затраты в течение 30 лет	$16,2 \cdot 10^6$	$5,518 \cdot 10^6$

Выводы

1. Рассмотрена экономическая целесообразность использования полупроводниковой солнечной электростанции, обеспечивающей зарядку и поддержание в рабочем состоянии аккумуляторных батарей, в качестве одного из источников надежного питания ответственных потребителей реакторного отделения. Энергообеспечение насосов, участвующих в расхолаживании реактора при обесточивании осуществляется от аккумуляторов.

2. Определены технические характеристики основного оборудования полупроводниковой солнечной электростанции, обеспечивающей аварийную работу насосов мощностью 1,75 МВт с частотным регулированием:

- площадь солнечных модулей при КПД 15,4 % должна быть равна $6712,5 \text{ м}^2$, пиковая мощность ПСЭС равна 1,038 МВт,

- емкость аккумуляторных батарей для обеспечения трехсуточной работы необходимых насосов должна равняться $11,475 \text{ МВт} \cdot \text{ч} = 0,956 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{ч}$ (при напряжении 12 В).

3. С экономической точки зрения при зеленом тарифе 0,084 \$/кВт ч ПСЭС оказывается нерентабельной. Более того, содержание и обслуживание РДЭС оказывается почти в три раза дешевле, чем обеспечение работы солнечной электростанции, выполняющей те же функции.

Список использованной литературы

1. Погосов А. Ю. Физико-технический анализ латентных факторов развития аварийных процессов в энергоблоках АЭС Фукусима-1 / А. Ю. Погосов, В. П. Кравченко // Ядерная та радіаційна безпека. — 2011. — № 3. — С. 15—19.
2. Громов Г. В. Результаты экспертной оценки стресс-тестов действующих энергоблоков АЭС Украины с учетом уроков аварии на АЭС “Фукусима-1” в Японии / Г. В. Громов, А. М. Дыбач, О. В. Зеленый и др. // Ядерная та радіаційна безпека. — 2012. — № 1 (53). — С. 3—9.
3. НП 306.2.141-2008 Загальні положення безпеки атомних станцій (ЗПБ-2008). — К.: Державний комітет ядерного регулювання України, 2008. — 41 с.
4. Учебное пособие РДЭС АСД-5600 (QV). Часть 1. 00.УЦРО.Пс.510. — УТЦ ОП “ЗАЭС”, 2006. — 109 с.
5. Электронный ресурс. — Режим доступа — Последний солнца свет — история Крымской солнечной электростанции /

- <http://www.frontier.net.ua/2009/12/crimea-ses/>
6. *Королев А. В.* Использование инжекторов в системе САОЗ для повышения ее функциональной надежности. — Ядерная и радиационная безопасность. — Т. 12. — Вып. 2. — 2009. — С. 38-39.
 7. *Деревянко О. В.* Роторные элементы комбинированных турбонасосных агрегатов для автоматизированной системы аварийной подпитки тепломассообменного оборудования АЭС / О. В. Деревянко, А. В. Королёв, А. Ю. Погосов // Ядерна та радіаційна безпека.— 2014. — № 4(63). — С. 8-11.
 8. *Верхивкер Г. П.* Теплоснабжение от атомных электростанций / Г. П. Верхивкер, В. П. Кравченко, В. А. Дубковский. — Одесса: ВМВ, 2010.— 410 с.
 9. Электронный ресурс. — Режим доступа — Солнечная батарея монокристаллическая Sunearth 260 W
[//http://ecoist.com.ua/solnechnaja-batareja-monokristallicheskaja-sunearth-260w.htm](http://ecoist.com.ua/solnechnaja-batareja-monokristallicheskaja-sunearth-260w.htm)
 10. *Овчинников Ф. Я.* Эксплуатационные режимы водородных энергетических реакторов / Ф. Я. Овчинников, В. В. Семенов// — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 359 с.
 11. Электронный ресурс. — Режим доступа — Аккумулятор Leoch DJM 12200 // http://vostok.dp.ua/catalog/products/service/battery_accum/product.html?id=303.

Получено 28.08.2015