

DOI: 10.18721/ JEST.230101

УДК 621.311.245

В.А. Тремясов, Т.В. Кривенко

МУЛЬТИМАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В автономных системах электроснабжения широко распространено применение комбинированных солнечно-дизельных установок. Необходимый аспект в планировании и проектировании таких систем — оценка их надежности. Однако при анализе надежности энергоустановок на основе возобновляемых источников энергии возникает ряд проблем, связанных со стохастическим характером природных ресурсов. Функционирование фотоэлектрических преобразователей, применяемых в автономных системах электроснабжения, зависит от прихода солнечной радиации. В работе для оценки надежности солнечно-дизельной установки предложен вероятностный мультиматричный метод, позволяющий учитывать изменения солнечной радиации, а также режимы работы и отказы элементов установки. С помощью предложенного вероятностного мультиматричного метода произведен расчет надежности автономной солнечно-дизельной установки, используемой в отдаленном поселке Яйлю Республики Алтай.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ; СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА; НАДЕЖНОСТЬ; МУЛЬТИМАТРИЧНЫЙ МЕТОД; МУЛЬТИСОСТОЯНИЕ.

Ссылка при цитировании:

В. А. Тремясов, Т. В. Кривенко. Мультиматричная модель для оценки надежности автономной энергоустановки на основе фотоэлектрического преобразователя // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 9–17. DOI: 10.18721/ JEST.230101

V.A. Tremyasov, T.V. Krivenko

MULTI-MATRIX MODEL FOR ASSESSING THE RELIABILITY OF AN AUTONOMOUS POWER SYSTEM WITH A PHOTOVOLTAIC CONVERTER

Combined solar-diesel installations are currently extensively used in of autonomous power supply systems. A necessary aspect in the planning and design of such systems is the assessment of their reliability. In this study, for the reliability assessment of solar-diesel installations, it is offered to use the multi-matrix method allowing to take into account the changes in solar radiation, as well as the operating modes and failure of installation elements. Reliability calculation of an autonomous solar-diesel installation used in the remote settlement Yaylyu of Altai Republic has been made.

PHOTOELECTRIC CONVERTER; SOLAR-DIESEL INSTALLATION; RELIABILITY; THE MULTI-MATRIX METHOD; MULTI-STATE.

Citation:

V.A. Tremyasov, T.V. Krivenko, Multi-matrix model for assessing the reliability of an autonomous power system with a photovoltaic converter, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 9–17, DOI: 10.18721/ JEST.230101

Введение

Одним из перспективных направлений развития энергетики России является применение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в автономных системах электроснабжения [1]. Наиболее распространены комбинированные автономные системы, использующие как традиционные агрегаты (дизельные генераторы), так и фотоэлектрические преобразователи (ФЭП). При проектировании и планировании автономных систем генерации на основе ФЭП важная задача — оценить их надежность. Однако при оценке надежности возникают некоторые трудности, связанные с зависимостью функционирования ФЭП от стохастического характера природных ресурсов [2].

Большинство ранее выполненных и опубликованных работ по оценке надежности систем генерации на основе ФЭП [3–7] не учитывают следующее:

- 1) влияние солнечной радиации на надежное функционирование фотоэлектрической установки;
- 2) влияние отказов элементов солнечно-дизельной установки (СДУ) на ее выходную мощность.

Оценка надежности автономных систем электроснабжения на основе ФЭП с учетом этих факторов — актуальная задача, требующая своего решения.

Целью излагаемых исследований была разработка мультиматричного метода для более точного расчета выработки электроэнергии СДУ с учетом прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность, а также надежности элементов, входящих в состав установки (фотоэлектрические преобразователи, дизельный генератор, банк аккумуляторных батарей, инвертор, конвертор).

Мультиматричный метод оценки надежности автономной солнечно-дизельной установки

Стохастический характер солнечной радиации, влияющий на работу ФЭП, в мультиматричном методе учитывается посредством использования актинометрических данных для конкретного местоположения СДУ. Для территории России наиболее полной является спутниковая база данных, созданная Национальным агентством авиации и исследования косми-

ческого пространства США (NASA SSE) [8], на основе которой разработаны отечественная геоинформационная система и база данных по возобновляемым энергоресурсам. При малочисленности или отсутствии актинометрических данных поступление солнечной энергии также может быть изучено прямым методом, основанным на данных измерений, или косвенным с использованием специальной математической модели.

Большой объем данных о солнечной радиации затрудняет выполнение практических исследований по оценке надежности, поэтому полученные актинометрические данные для конкретного местоположения СДУ необходимо сгруппировать. Эта процедура выполняется путем объединения близко лежащих среднесуточных значений солнечной радиации по месяцам года и получения их среднего значения. В результате получим мультимодель солнечной радиации с несколькими состояниями в течение года $T_1, T_2, T_3, \dots, T_p$ ($p = 1, 2, 3, \dots, l$).

Для каждого состояния T_p ожидаемая выработка электроэнергии ФЭП с учетом прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность — $W_{\text{ФЭП}}^{\text{ож}(T)}$, кВт·ч — определяется по выражению [9]

$$W_{\text{ФЭП}}^{\text{ож}(T)} = E^{(T)} \eta_1 \eta_2 S_{\text{ФЭП}} N_{\text{ФЭП}} (T_{pd} - T_{pbs}), \quad (1)$$

где $E^{(T)}$ — усредненное для каждого состояния T_p суточное удельное значение падающей солнечной радиации, кВт·ч/м²; η_1 — КПД фотоэлектрического преобразователя, о. е.; η_2 — КПД инвертора, о. е.; $S_{\text{ФЭП}}$ — площадь одного фотоэлектрического преобразователя, м²; $N_{\text{ФЭП}}$ — количество ФЭП в составе СДУ, шт.; T_{pd} — количество дней в рассматриваемом состоянии; T_{pbs} — усредненное количество бессолнечных дней в состоянии T_p .

Ожидаемая выработка, кВт·ч, электроэнергии СДУ для каждого состояния T_p определяется по формуле

$$W_{\text{СДУ}}^{\text{ож}(T)} = W_{\text{ФЭП}}^{\text{ож}(T)} + W_{\text{ДГ}}^{\text{ож}(T)}, \quad (2)$$

где $W_{\text{ДГ}}^{\text{ож}(T)}$ — ожидаемая выработка электроэнергии дизельным генератором (ДГ), кВт·ч.

Ожидаемая выработка электроэнергии ДГ в состоянии T_p определяется в соответствии с суточным графиком нагрузки и зависит от времени суток, времени года, погодных условий (сол-

нечный или пасмурный день). ДГ включается в работу в случае дефицита вырабатываемой энергии от ФЭП и запасенной энергии в аккумуляторной батарее (АБ).

Ожидаемая выработка электроэнергии СДУ $r \geq [r]$ может отличаться от реально произведенной электроэнергии. Это связано с невыработкой электроэнергии СДУ из-за отказов элементов установки. Таким образом, реальная вырабатываемая электроэнергия СДУ, кВт·ч, для каждого мультисостояния T_p определяется по формуле

$$W_{\text{СДУ}}^{\text{P(T)}} = W_{\text{СДУ}}^{\text{ож(T)}} - \Delta W_{\text{СДУ}}^{\text{(T)}}, \quad (3)$$

где $\Delta W_{\text{СДУ}}^{\text{(T)}}$ — невыработка электрической энергии СДУ в мультисостоянии T_p по причине отказов элементов установки, кВт·ч.

Невыработка электроэнергии СДУ из-за отказов элементов установки определяется для каждого мультисостояния T_p . В этом случае исходными данными служат интенсивность отказов λ_i и среднее время τ_i восстановления элементов СДУ.

Все элементы СДУ — фотоэлектрические преобразователи, инверторы, конвертор, банк аккумуляторных батарей, дизельный генератор — получают номера $i = 1, 2, \dots, n$. Для каждого из рассматриваемых мультисостояний ($T_1, T_2, T_3, \dots, T_p$) назначаются ремонтные и эксплуатационные режимы работы установки ($j = 0, 1, \dots, m$), отличающиеся составом и вероятностью повреждения оборудования. При этом рассматривается такая стратегия восстановления элементов СДУ, когда имеются запасные элементы, ремонтный инструмент и квалифицированные специалисты для восстановления любого элемента СДУ. Относительная длительность ремонтных режимов определяется по формуле

$$q_j = \lambda_{ij} \tau_{ij} \frac{T_p}{8760}, \quad (4)$$

где $j = 1, 2, 3, \dots, m$. Режиму нормальной работы установки присваивается номер $j = 0$, относительная длительность нормального режима рассчитывается по выражению

$$q_0 = \frac{T_p}{8760} \left(1 - \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \tau_{ij} \right). \quad (5)$$

Последствия отказов элементов установки в различных режимах проявляются как аварии

с определенной степенью нарушения работоспособности СДУ: потерей фотоэлектрических преобразователей, дизельного генератора, банка аккумуляторных батарей, инвертора, конвертора и т. д. Все возможные аварии получают свой код — $k = 1, 2, 3, \dots, l$.

Для каждого состояния T_p формируется матрица расчетных логических связей отказов, режимов и аварий, фиксирующая какие отказы к какой аварии приводят в каждом из режимов. В этой матрице на пересечении столбца j и строки i возможно появление аварии с кодом k . Таким образом, можно сформировать массив конъюнкций $\{j \cap i\}$, а затем идентифицировать каждую конъюнкцию как аварию k -го вида. На рис. 1 представлены матрицы расчетных связей для мультисостояний T_1, T_2, \dots, T_p .

Вывод расчетных выражений для частоты и длительности аварий основан на последовательном применении формулы полной вероятности при рассмотрении множества возможных конъюнкций [10]. В предположении безотказной работы релейной защиты, автоматики и правильных действий персонала расчет частоты аварий k -го вида осуществляется по формуле

$$\Lambda(k) = \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n q_i \lambda_{ji} L(j, i, k), \quad (6)$$

где $L(j, i, k) = \begin{cases} 1, & \text{если } j \cap i = k; \\ 0, & \text{если } j \cup i \neq k. \end{cases}$

Среднее время восстановления нормального режима работы СДУ (выдача мощности для электроснабжения потребителей) после аварии

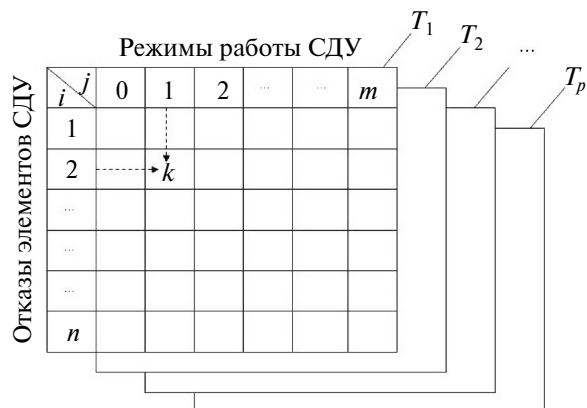


Рис. 1. Матрицы расчетных связей для мультисостояний T_p

k -го вида определяется как математическое ожидание по всей совокупности соответствующих конъюнкций согласно выражению

$$\tau(k) = \frac{1}{\Lambda(k)} \left(\sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n q_i \lambda_{ji} \tau(j, i, k) L(j, i, k) \right), \quad (7)$$

где $\tau(j, i, k)$, час., — время восстановления нормального функционирования установки после аварии k -го вида в j -м режиме при отказе i -го элемента.

Среднее значение аварийного недоотпуска энергии, кВт·ч, установкой в течение длительности состояния T_p вычисляется по формуле

$$\Delta W_{\text{СДУ}}^{(T)} = T_p \sum_k \Lambda(k) \tau(k) \Delta N(k), \quad (8)$$

где $\Delta N(k)$ — величины аварийных снижений мощности, кВт, при авариях k -го вида с длительностью их существования $\tau(k)$. Для каждого состояния T_p определяется реальное значение выработки электроэнергии СДУ, кВт·ч, в течение года:

$$W_{\text{СДУ}}^P = \sum_{p=1}^l \left(W_{\text{СДУ}}^{\text{ож}(T)} - \Delta W_{\text{СДУ}}^{(T)} \right). \quad (9)$$

Исследование надежности автономной СДУ в п. Яйлю республики Алтай

В качестве примера применения предложенного метода произведем оценку надежности СДУ, расположенной в отдаленном пункте Яйлю

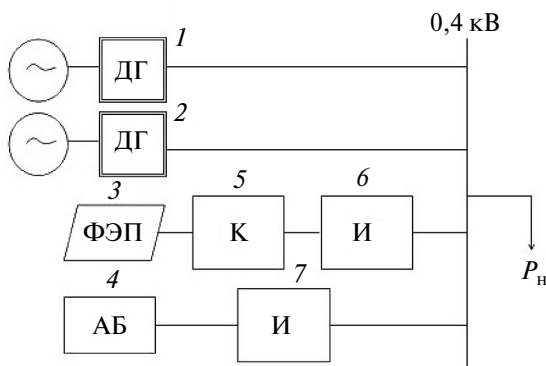


Рис. 2. Структурная схема автономной СДУ в п. Яйлю:

ДГ — дизельный генератор; ФЭП — фотоэлектрический преобразователь; АБ — банк аккумуляторных батарей; И — инвертор; К — конвертор; P_n — нагрузка; 1–7 — номера элементов схемы

Республики Алтай (рис. 2) [11]. Автономная солнечно-дизельная энергоустановка включает в себя четыре источника питания: микроморфные тонкопленочные фотоэлектрические преобразователи с площадью 1,43 м² в количестве 496 штук с КПД = 0,15 и пиковой мощностью 115 Вт, способные выдавать до 60 кВт; 2 ДГ фирмы «YANMAR» японского производства номинальной мощностью по 40 кВт каждый (один основной и дополнительный резервный), а также банк аккумуляторных батарей китайского производства с запасенной энергией 144 кВт·ч. Кроме того, в состав автономной установки входят инверторы напряжения с КПД = 0,9, а также конвертор, который служит для согласования различного уровня напряжения с ФЭП и ДГ и для обеспечения оптимального выходного напряжения от ФЭП при работе в режиме отдачи максимальной мощности. Все дополнительное оборудование поставлено фирмой «SMA» (Германия).

Если для питания нагрузки недостаточно солнечной энергии, включается дизельный генератор. Для аварийного резерва используется банк аккумуляторных батарей.

Для получения необходимых актинометрических данных для СДУ в пункте Яйлю предлагается использовать базу данных NASA SSE [8] (рис. 3). Объединяя полученные актинометрические данные для п. Яйлю, получим мультимодель солнечной радиации с пятью состояниями (табл. 1). Для каждого из полученных мультисостояний T_p из [12] определим количество бессолнечных дней и по формуле (1) получим ожидаемую выработку электроэнергии ФЭП:

$$W_{\text{ФЭП}}^{\text{ож}(T^1)} = 43313,8 \text{ кВт·ч};$$

$$W_{\text{ФЭП}}^{\text{ож}(T^2)} = 21106,8 \text{ кВт·ч};$$

$$W_{\text{ФЭП}}^{\text{ож}(T^3)} = 13596,9 \text{ кВт·ч};$$

$$W_{\text{ФЭП}}^{\text{ож}(T^4)} = 7109,6 \text{ кВт·ч};$$

$$W_{\text{ФЭП}}^{\text{ож}(T^5)} = 6161,7 \text{ кВт·ч}.$$

Кроме того, необходимо определить ожидаемую выработку электроэнергии ДГ — $W_{\text{ДГ}}^{\text{ож}(T)}$ — в соответствии с суточным графиком нагрузки (рис. 4). В каждом мультисостоянии T_p необходимо учитывать суточный график покрытия

нагрузки для зимнего и летнего периода. В результате для рассматриваемых мультисостояний ожидаемая выработка ДГ:

$$W_{\text{ДГ}}^{\text{ож}(T1)} = 25737 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$W_{\text{ДГ}}^{\text{ож}(T2)} = 17065 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$W_{\text{ДГ}}^{\text{ож}(T3)} = 17065 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$W_{\text{ДГ}}^{\text{ож}(T4)} = 26130 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$W_{\text{ДГ}}^{\text{ож}(T5)} = 40066 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Ожидаемая выработка электроэнергии СДУ для каждого мультисостояния (2):

$$W_{\text{СДУ}}^{\text{ож}(T1)} = 69051 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$W_{\text{СДУ}}^{\text{ож}(T2)} = 38172 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$W_{\text{СДУ}}^{\text{ож}(T3)} = 30662 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$W_{\text{СДУ}}^{\text{ож}(T4)} = 33240 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$W_{\text{СДУ}}^{\text{ож}(T5)} = 46228 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

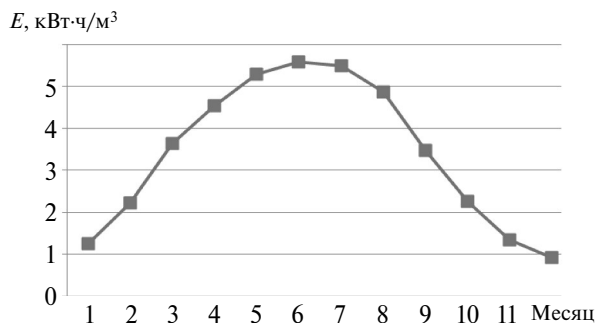


Рис. 3. Среднесуточное значение солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность, в п. Яйлю Республики Алтай для каждого месяца года

Таблица 1

Таблица актинометрических данных для мультимодели состояний

Месяц	E , кВт·ч/м ²	E , кВт·ч/м ²	T_p	T_{pd} , дней (час.)	T_{pbs} , дней
Январь Ноябрь Декабрь	1,25 1,34 0,92	1,17	T_5	92 (2208 ч)	37
Февраль Октябрь	2,22 2,27	2,25	T_4	60 (1440 ч)	27
Март Сентябрь	3,63 3,48	3,55	T_3	61 (1464 ч)	21
Апрель Август	4,53 4,86	4,69	T_2	61 (1464 ч)	14
Май Июнь Июль	5,28 5,58 5,49	5,45	T_1	92 (2208 ч)	9

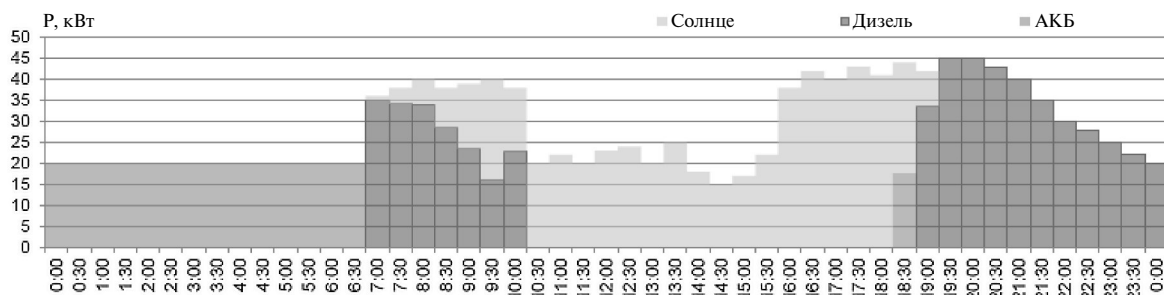


Рис. 4. Суточный график покрытия нагрузки в п. Яйлю (летний день) для состояния T_1

Таблица 2

Показатели надежности элементов СДУ

Элемент СДУ	Номер элемента в схеме	Интенсивность отказов λ , 1/год	Среднее время восстановления τ , год
Фотоэлектрический преобразователь (ФЭП)	3	$2,28 \cdot 10^{-2}$	$6,67 \cdot 10^{-2}$
Дизельный генератор (ДГ): рабочий резервный	1	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$
	2	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$
Банк аккумуляторных батарей (АБ)	4	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$
Инвертор (И)	6, 7	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-2}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$
Конвертор (К)	5	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-2}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$

В целом ожидаемая выработка электроэнергии СДУ за год составила $W_{СДУ}^{ож} = 217353$ кВт·ч.

Для оценки недоотпуска электроэнергии СДУ из-за отказов элементов была использована вероятностная модель надежности структурной схемы СДУ. Показатели надежности элементов исследуемой системы, взятые из [10,13], приведены в табл. 2.

Возможные режимы установки j для каждого мультисостояния: $j = 0$ — нормальный режим работы СДУ; $j = 1$ — аварийный ремонт рабочего ДГ; $j = 2$ — аварийный ремонт ФЭП; $j = 3$ — аварийный ремонт АБ; $j = 4$ — аварийный ремонт конвертора; $j = 5$ — аварийный ремонт инвертора ФЭП, $j = 6$ — аварийный ремонт ин-

вертора АБ. Отказы и режимы работы резервного ДГ в расчетах не учитываются. Относительная длительность режимов работы элементов СДУ для мультисостояния T_1 : $q_1 = 0,5041 \cdot 10^{-4}$; $q_2 = 0,4 \cdot 10^{-3}$; $q_3 = 0,5 \cdot 10^{-6}$; $q_4 = 2,521 \cdot 10^{-6}$; $q_5 = 2,521 \cdot 10^{-6}$; $q_6 = 2,5 \cdot 10^{-6}$; $q_0 = 0,25$.

Расчетные аварии (k) при нарушении нормального режима работы СДУ: 1 — отказ рабочего ДГ; 2 — потеря рабочего ДГ и ФЭП; 3 — потеря рабочего ДГ и АБ; 4 — потеря ФЭП; 5 — потеря ФЭП и АБ; 6 — потеря АБ. Для мультисостояния T_1 приведена матрица расчетных логических связей (рис. 5). В этой матрице для каждой аварии k -го вида указана величина аварийного снижения мощности $\Delta N(k)$.

Режим j Номер отказавшего элемента, i	0	1	2	3	4	5	6
1	(1) 40	—	(2) 100	(3) 58	(2) 100	(2) 100	(3) 58
3	(4) 60	(2) 100	—	(5) 78	—	—	(5) 78
4	(6) 18	(3) 58	(5) 78	—	(5) 78	(5) 78	—
5	(4) 60	(2) 100	—	(5) 78	—	—	(5) 78
6	(4) 60	(2) 100	—	(5) 78	—	—	(5) 78
7	(6) 60	(3) 58	(5) 78	—	(5) 78	(5) 78	—

Рис. 5. Матрица логических связей для мультисостояния T_1 (указаны: код аварии k (в скобках) и величина аварийного снижения мощности $N(k)$, кВт·ч)

Определим частоту возникновения аварий $\Lambda(k)$ и среднюю длительность ее ликвидации $\tau(k)$ по формулам (6), (7). Например, для мультисостояния T_1 получим:

$$\Lambda(1) = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год}, \quad \tau(1) = 1 \cdot 10^{-2} \text{ год};$$

$$\Lambda(2) = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год}, \quad \tau(2) = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ год};$$

$$\Lambda(3) = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}, \quad \tau(3) = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ год};$$

$$\Lambda(4) = 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ 1/год}, \quad \tau(4) = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ год};$$

$$\Lambda(5) = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год}, \quad \tau(5) = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ год};$$

$$\Lambda(6) = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ 1/год}, \quad \tau(6) = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ год}.$$

С помощью полученных показателей по выражению (8) определим среднее значение аварийного недоотпуска энергии установкой в течение длительности состояния T_1 : $\Delta W_{\text{СДУ}}^{T_1} = 55,95 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Аналогично рассчитываются необходимые показатели надежности СДУ для каждого мультисостояния T_p .

Недоотпуск энергии солнечно-дизельной установкой из-за отказов элементов для других мультисостояний составил: $\Delta W_{\text{СДУ}}^{T_2} = 24,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$; $\Delta W_{\text{СДУ}}^{T_3} = 24,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$; $\Delta W_{\text{СДУ}}^{T_4} = 23,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$; $\Delta W_{\text{СДУ}}^{T_5} = 55,92 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Суммарный недоотпуск электроэнергии СДУ в течение года из-за отказов элементов установки равен $\Delta W_{\text{СДУ}} = 184,9 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Реальное значение выработки электроэнергии СДУ в год, определенное по выражению (9), составляет $W_{\text{СДУ}}^P = 217168,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

При проведении расчетов использовалась компьютерная программа в среде MathCAD.

Обсуждение результатов

В отличие от традиционных генерирующих источников энергии, надежность которых моделируется с помощью двух состояний (рабочее состояние и состояние отказа), для фотоэлектрических преобразователей необходимо использовать мультимодель состояний в зависимости от изменяющейся в течение года величины солнечной радиации. Это обстоятельство потребовало разработки мультиматричного метода для оценки надежности солнечно-дизельной установки в системе автономного электроснабжения.

Использование большого количества мультисостояний затрудняет выполнение исследований. Для практических вычислений необходимо упрощение модели с уменьшением количества рассматриваемых мультисостояний. Поэтому для оценки надежности функционирования СДУ в поселке Яйлю учитывались пять состояний солнечной радиации в течение года.

Анализ величины недоотпуска электроэнергии из-за аварий в структурной схеме установки осуществлялся с помощью формирования матриц логических связей отказов ее элементов с ремонтными и эксплуатационными режимами. Полученный массив конъюнкций указанных условий позволил идентифицировать расчетные аварии и вычислить оценки их частоты и длительности.

Значение величины выработки электроэнергии СДУ $W_{\text{СДУ}}^P = 217168,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$ в значительной степени зависит от прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность. Недоотпуск электроэнергии СДУ в течение года из-за отказов элементов установки составляет $\Delta W_{\text{СДУ}} = 184,9 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$. Это характеризует высокий уровень надежности автономной СДУ, расположенной в п. Яйлю.

Таким образом, разработанный вероятностный мультиматричный метод позволяет оценить надежность автономной СДУ с учетом ряда состояний солнечного излучения и отказов ее элементов.

Выводы

Сформулирована целесообразность дифференциации величин поступления солнечной энергии в течение года на пять состояний, для каждого из которых могут быть выполнены расчеты ожидаемого количества вырабатываемой электроэнергии ФЭП.

Предложен вероятностный мультиматричный метод для анализа надежности СДУ, который позволяет учитывать два основных фактора, влияющих на функционирование СДУ, стохастический характер солнечной радиации и надежность элементов установки.

На примере СДУ в населенном пункте Яйлю Республики Алтай выполнена оценка реальной величины вырабатываемой этой установкой электроэнергии в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григораш О.В., Стрелков Ю.И. Нетрадиционные автономные источники электроэнергии // Промышленная энергетика. 2001. № 4. С. 37–40.
2. Юрченко А.В., Волгин А.В., Козлов А.В. Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов // Известия Томского политехнического университета. 2009. № 4 (314). С. 142–148.
3. Collins E., Dvorack M., Mahn J., Mundt M., Quintana M. Reliability and availability analysis of a fielded photovoltaic system // Photovoltaic specialists conference (PVSC). 34th IEEE. 2009. P. 2316–2321.
4. Pregelj A., Begovic M., Rohatgi A. Impact of inverter configuration on PV system reliability and energy production // Photovoltaic specialists conference. Conference record of the twenty-ninth IEEE. 2002. P. 1388–1391.
5. Karki R., Billinton R. Reliability/cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2001. Vol. 16. No 4. P. 368–373.
6. Li Z., Yuan Y., Li F. Evaluating the reliability of islanded microgrid in an emergency mode // Universities power engineering conference (UPEC). 2010. 45th international. 2010. P. 1–5.
7. Park J., Wu L., Choi J., El-Keib A.A., Shahidehpour M., Billinton R. A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/ photovoltaic cell generator // Power and energy society general meeting. 2009. P. 1–6.
8. NASA Surface meteorology and Solar Energy // Atmospheric science data center [электронный ресурс] URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (дата обращения: 10.10.2016).
9. Бобыль А.В., Киселева С.В., Кочаков В.Д., Орехов Д.Л., Тарасенко А.Б., Терукова Е.Е. Техничко-экономические аспекты сетевой солнечной энергетики в России // Журнал технической физики. 2014. № 4(84). С. 85–92.
10. Васильев А.П., Гук Ю.Б., Карпов В.В. Надежность электроэнергетических установок и систем. Теория и практика. СПб.: Изд-во ГУ Ленгосэнергонадзор, 2000. 413 с.
11. Им Е.Т. Электроснабжение поселка Яйло от автономной солнечно-дизельной электростанции // XIX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии» С. 46–47
12. Cai B., Liu Y., Ma Y., Huang L., Liu Z. A framework for the reliability evaluation of grid-connected photovoltaic systems in the presence of intermittent faults // Energy. 2015. Vol. 93. P. 1308–1320.
13. Pogoda360 [электронный ресурс] URL: <http://russia.pogoda360.ru/407383/avg/> (дата обращения: 27.10.2016).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТРЕМЯСОВ Владимир Анатольевич — кандидат технических наук профессор Сибирского федерального университета. 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: emf_tva@mail.ru

КРИВЕНКО Татьяна Витальевна — аспирант Сибирского федерального университета. 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: tanya-1991mir@mail.ru

REFERENCES

1. Grigorash O.V., Strelkov Yu.I. Netraditsionnyye avtonomnyye istochniki elektroenergii. *Industrial energy*. 2001. No 4. P. 37–40. (rus).
2. Yurchenko A.V., Volgin A.V., Kozlov A.V. Statisticheskaya model kremniyevykh solnechnykh batarey, rabotayushchikh pod vozdeystviyem prirodnykh i apparatnykh faktorov. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2009. № 4(314). S. 142–148. (rus).
3. Collins E., Dvorack M., Mahn J., Mundt M., Quintana M. Reliability and availability analysis of a fielded photovoltaic system. *Photovoltaic specialists conference (PVSC). 34th IEEE*. 2009. P. 2316–2321.
4. Pregelj A., Begovic M., Rohatgi A. Impact of inverter configuration on PV system reliability and energy production. *Photovoltaic specialists conference. Conference record of the twenty-ninth IEEE*. 2002. P. 1388–1391.
5. Karki R., Billinton R. Reliability/cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2001. Vol.16. No 4. P. 368–373.
6. Li Z., Yuan Y., Li F. Evaluating the reliability of islanded microgrid in an emergency mode. *Universities power engineering conference (UPEC). 2010 45th, international*. 2010. P. 1–5.
7. Park J., Wu L., Choi J., El-Keib A.A., Shahidehpour M., Billinton R. A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/ photovoltaic cell generator. *Power and energy society general meeting*. 2009. P. 1–6.
8. NASA Surface meteorology and Solar Energy. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/> (Accessed 10.10.2016).

9. **Bobyl A.V., Kiseleva S.V., Kochakov V.D., Orekhov D.L., Tarasenko A.B., Terukova Ye.Ye.** Tekhniko-ekonomicheskiye aspekty setevoy solnechnoy energetiki v Rossii. *Journal of technical physics*. 2014. № 4(84). S. 85–92. (rus).

10. **Vasilyev A.P., Guk Yu.B., Karpov V.V.** Nadezhnost elektroenergeticheskikh ustanovok i sistem. Teoriya i praktika. SPb.: Izd-vo GU Langselector, 2000. 413 s. (rus)

11. **Im Ye.T.** Elektrosnabzheniye poselka Yaylyu ot avtonomnoy solnechno-dizelnoy elektrostantsii [Power supply

of the settlement of Yaylyu from autonomous solar-diesel power plant] / *XIX international scientific and practical conference «Modern technique and technology»*. S. 46–47. (rus).

12. **Cai B., Liu Y., Ma Y., Huang L., Liu Z.** A framework for the reliability evaluation of grid-connected photovoltaic systems in the presence of intermittent faults. *Energy*. 2015. Vol. 93. P. 1308–1320.

13. Pogoda360, Available: <http://russia.pogoda360.ru/407383/avg/> (Accessed 27.10.2016). (rus)

AUTHORS

TREMYASOV Vladimir A. — *Siberian Federal University*. 79, Svobodny Prospect, Krasnoyarsk, Russia, 660041. E-mail: emf_tva@mail.ru

KRIVENKO Tatiana V. — *Siberian Federal University*. 79, Svobodny Prospect, Krasnoyarsk, Russia, 660041. E-mail: tanya-1991mir@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 29.10.2016.