

DOI: 10.17516/1999-494X-0259

УДК 620.91

Risk Assessment of Renewable Energy Generation Systems Projects

**Vladimir A. Tremyasov,
Yana E. Zograf* and Tatyana V. Krivenko**
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 22.03.2020, received in revised form 21.04.2020, accepted 21.05.2020

Abstract. The operation of renewable energy generation systems is associated with various risks. Risk analysis is part of a systematic approach to making technical decisions to prevent or reduce the risk of industrial accidents, damage to property and the environment. When evaluating the effectiveness of investment projects with renewable energy sources, risk assessment is carried out with uncertainty of information about the conditions of project implementation, including associated costs and economic losses. This article proposes a quantitative risk assessment method using cause – consequence diagrams, which are combined event trees and fault trees, on the example of the wind power installation NordWind (Germany).

Keywords: renewable energy generation systems, wind power installation, risk assessment, uncertainty, event tree, fault tree, reliability, cause – consequence diagram, economic losses.

Citation: Tremyasov V.A., Zograf Ya.E., Krivenko T.V. Risk assessment of renewable energy generation systems projects, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(6), 702-711. DOI: 10.17516/1999-494X-0259

Оценка рисков проектов систем генерации с возобновляемыми источниками энергии

В.А. Тремясов, Я.Е. Зограф, Т.В. Кривенко
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Анализ риска систем генерации с возобновляемыми источниками энергии является частью системного подхода к принятию технических решений по предупреждению опасности техногенных аварий, ущерба оборудованию и окружающей среде. При оценке эффективности

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: ezhaky@mail.ru

инвестиционных проектов с возобновляемыми источниками энергии учет рисков производится при неопределенности информации об условиях реализации проекта, в том числе связанных с ними затрат и экономических потерь. В статье предложена количественная методика оценки риска с использованием диаграмм «причина–последствие», представляющих собой комбинацию деревьев событий и деревьев отказов, на примере ветроэнергетической установки NordWind (Германия).

Ключевые слова: системы генерации с возобновляемыми источниками энергии, ветроэнергетическая установка, оценка риска, неопределенность, дерево событий, дерево отказов, надежность, диаграмма «причина–последствие», экономические потери.

Цитирование: Тремясов, В.А. Оценка рисков проектов систем генерации с возобновляемыми источниками энергии / В.А. Тремясов, Я.Е. Зограф, Т.В. Кривенко // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(6). С. 702-711. DOI: 10.17516/1999-494X-0259

Введение

Риски, связанные с эксплуатацией систем генерации с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), можно условно разделить на две категории:

1. Риски, связанные с зависимостью выработки электрической энергии от метеорологических и климатических факторов. Для ветроэнергетических установок (ВЭУ) это отсутствие ветра в период пикового потребления, для солнечной энергетики – облачность и прочие метеорологические факторы. Производительность малых гидроэлектростанций (МГЭС) может снижаться в период засухи летом, а в зимних условиях эксплуатация МГЭС в определенный период времени не представляется возможной. Всем указанным системам генерации ВИЭ требуется резервный источник питания. Эту функцию может взять на себя существующая дизельная электростанция или когенерационная установка.

2. Риски, связанные с выходом из строя отдельных элементов и узлов генерирующего объекта. Современные ВИЭ представляют собой сложные системы, состоящие из множества взаимодействующих друг с другом разнородных элементов, число которых может достигать нескольких тысяч. Вместе с тем ужесточаются требования к эффективности функционирования и качеству производимых ВИЭ. Во многом это связано с риском возникновения опасностей и аварий при эксплуатации таких систем.

Моделирование сложных установок ВИЭ в децентрализованных энергосистемах позволяет исследовать особенности их функционирования в различных условиях, наделять их требуемыми характеристиками и снижать риск возникновения чрезвычайных ситуаций.

Анализ риска является частью системного подхода к принятию технических решений, процедур и практических мер в решении задач предупреждения или уменьшения опасности техногенных аварий для жизни человека, ущерба имуществу и окружающей среде, называемого в нашей стране обеспечением промышленной безопасности, а за рубежом – управлением риском (хеджированием) [1].

Оценку эффективности инвестиционных проектов с ВИЭ необходимо производить с учетом рисков в условиях неопределенности. Под неопределенностью понимается неполнота или нечеткость информации об условиях реализации проекта, в том числе связанных с ними затрат.

При оценке проектов с ВИЭ наиболее существенными представляются следующие виды неопределенности и, соответственно, инвестиционных рисков:

- неопределенность природно-климатических условий, возможность стихийных бедствий;
- неполнота или неточность информации о динамике технико-экономических показателей, параметрах новой техники и технологии;
- производственно-технологический риск (аварии и отказы оборудования, снижение качества производимой электроэнергии и т. п.);
- риск, связанный с нестабильностью текущей экономической ситуации и условий инвестирования;
- внешнеэкономический риск (возможность введения ограничений на торговлю и поставки оборудования, закрытие границ и т.п.).

Расчет рисков возможен путем оценки ожидаемого эффекта проекта с учетом количественных характеристик неопределенности. Рассматриваются все возможные прибыльные и убыточные сценарии реализации проекта и оценивается эффективность с учетом вероятности их возникновения.

В табл. 1 приведены виды ключевых рисков систем генерации с ВИЭ и предложения по управлению рисками.

В табл. 2 приведены результаты исследований, описанные в работе [2]. Они показывают, что потребление природного газа и ядерной энергии – традиционных видов топлива, используемых для производства электроэнергии, – существенно меньше связано с риском, чем другие способы получения электроэнергии, в том числе с применением ВИЭ.

Таблица 1. Ключевые риски систем генерации с ВИЭ

Table 1. Key risks of renewable energy generation systems

Тип генерации ВИЭ	Ключевые риски	Предложения по управлению рисками
Ветроэнергетика	Длительные этапы проектирования и высокие капитальные затраты. Стохастический характер ветра. Отказы основных узлов оборудования. Пожары. Механические разрушения конструкции. Наличие подводных кабелей при морском базировании ВЭУ	Модели турбин и их производитель. Гарантии производителей. База метеоанных по ветру. Обеспечение надежности функционирования. Оптимизация восстановительных мероприятий. Руководства по эксплуатации
Солнечная энергетика	Отказы элементов (короткое замыкание). Погодные риски (облачность и аварии). Кражи и вандализм	Гарантии на оборудование (25 лет). Унификация и взаимозаменяемость компонентов. Техобслуживание
Малые ГЭС	Затопление. Сезонные изменения водотока. Длительные простои из-за нехватки запчастей и удаленной диспетчеризации	Учет опыта эксплуатации с минимизацией рисков и затрат на техобслуживание и ремонты
Энергия биомассы	Гарантии поставок и стоимость топлива. Экологические вопросы, связанные с доставкой и хранением топлива	Долгосрочные контракты на поставку топлива. Контроль за выбросами

Таблица 2. Оценка числа смертельных случаев, вызванных различными источниками энергии, в расчете на 1 ГВт мощности

Table 2. Estimation of the number of deaths caused by various energy sources per 1 GW

Вид топлива или энергии	Число жертв на 1 ГВт мощности		Суммарное
	профессиональных	населения	
Энергия ветра	20–30	2–40	22–70
Солнечная (фотоэлектрическая)	16–21	1–40	17–61
Гидроэлектрическая	2–4	1–2	3–6
Метанол, биопродукты	110	0	110
Атомная	0,2–1,3	0,04–0,24	0,24–1,54
Уголь	2–10	3–150	5–160
Нефть	0,2–2	1,4–140	1,6–142
Природный газ	0,1–0,4	0	0,1–0,4

Необходимо создание количественных методик для оценки рисков и управления ими, а также моделей ценообразования для природоохранных рисков.

Методика оценки риска с использованием диаграмм «причина–последствие»

Диаграммы «причина–последствие» (ДПП) представляют собой объединенные деревья событий и деревья отказов. Последствия – экономические потери.

Методика оценки риска ВИЭ предполагает несколько стадий:

Стадия 1: предварительный анализ опасностей (ПАО). Необходимо выявить подсистемы, которые могут вызвать опасные состояния ВИЭ. Предварительный анализ опасностей – это процедура с включением в рассмотрение последовательности событий, превращающих опасность в происшествие, а также корректирующих мероприятий для устранения последствий происшествия.

В целом ПАО представляет собой первую попытку выявить оборудование системы генерации ВИЭ (в принятом варианте компоновки) и отдельные события, которые могут привести к возникновению опасностей. Детальный анализ возможных событий обычно проводится с помощью метода дерева отказов [3] после того, как система полностью определена.

Стадия 2: выявление последовательности опасных ситуаций, построение дерева событий и деревьев отказов. Стадия 2 анализа обычно начинается после того, как выбрано оборудование и определена конфигурация системы. Применяют два аналитических метода, созданных на основе дерева событий (ДС) и дерева отказов (ДО). Логика, используемая при построении ДС [2], часто называется индуктивной логикой; в то же время логика, используемая при анализе с помощью ДО, является дедуктивной.

Стадия 3: анализ последствий. На конечной стадии изучения риска производят: определение вероятностей событий, подсчет ущерба для каждого варианта развития аварии; отслеживают распространение, например, фронта пожара; дают оценку воздействию на окружающую среду и повреждению оборудования; определяют общую оценку риска.

Составление ДПП начинают с выбора критического события. Критические события выбирают таким образом, чтобы они служили удобными отправными точками для анализа, причем

большинство аварийных ситуаций развивается за критическим событием в виде цепи отдельных событий. Процедура построения ДПП состоит из выбора первого инициирующего события, за которым следуют другие события, определенные на данном этапе работы.

При анализе «причин–последствий» предлагается использовать комбинированные методы дерева отказов (выявить причины, оценить их вероятность) и дерева событий (определить экономические потери).

Типичными критическими событиями, ведущими к аварийным ситуациям, могут быть возмущения основных параметров технологического процесса или, например, пожар в мотогондоле ВЭУ – событие, которое приводит в действие систему обеспечения безопасности (рис. 1).

«Выявление последствий», служащее частью анализа «причин–последствий», начинается с выбора первичного события с последующим рассмотрением всей цепи вызываемых в ВЭУ событий. На различных ступенях цепи могут разветвляться и развиваться по двум направлениям в зависимости от различных условий. Например, распространение пожара в мотогондоле ВЭУ может привести к двум цепям событий: постепенному уничтожению всей ВЭУ или к срабатыванию пожарной сигнализации с вызовом пожарной команды и локализации пожара.

Обзор и сравнение различных методов оценки риска показал, что анализ видов отказов и их последствий с помощью ДО является методом достаточно разработанным и обеспеченным программными продуктами [4]. Сказанное относится также к анализу с помощью дерева событий, хотя основные приемы для выполнения анализа этого типа не установлены достаточно строго.

Цель данной работы – развитие методики для количественной оценки риска пожара на примере автономной ВЭУ NordWind (Германия) (рис. 2).

В ветроэнергетических установках NordWind [5] реализована система гидравлического преобразования вращающей энергии лопастей во вращающую энергию ротора с поддержива-

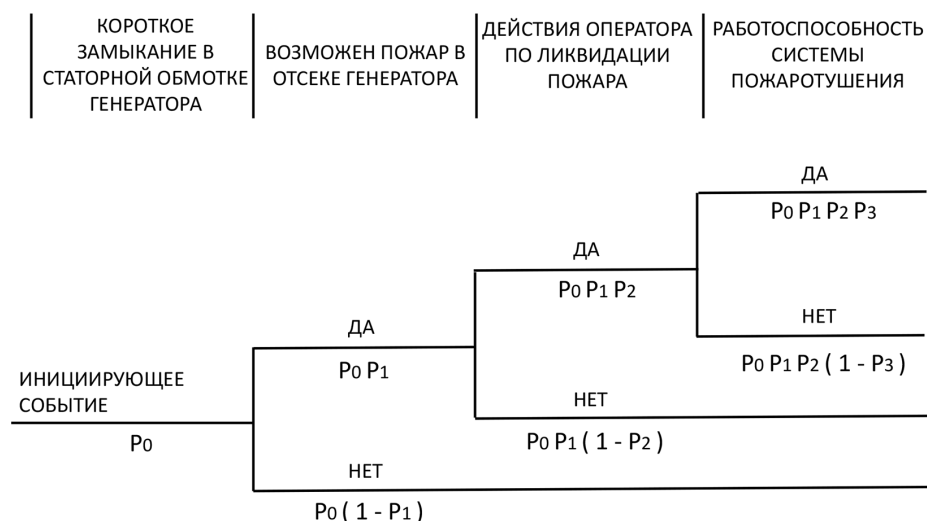


Рис. 1. Дерево событий при пожаре на ВЭУ

Fig. 1. Event tree during a wind power installation fire

емым постоянным числом оборотов. Ротор ВЭУ сначала превращает кинетическую энергию воздушной массы, движимой ветром, в механическую энергию. Энергия подводится непосредственно к гидронасосу и превращается им в гидравлическую энергию потока. После передачи жидкостной энергии следует ее обратное превращение с помощью гидравлического двигателя в механическую энергию привода, которая превращается электрогенератором в электрическую энергию.

Для оптимальной адаптации аэродинамических характеристик ротора к тем или иным условиям эксплуатации, особенно к конкретной скорости ветра в данный момент, ВЭУ работает с изменяемым числом оборотов. При этом, вследствие отсутствия геометрического замыкания при передаче усилия между ротором и генератором, сохраняется постоянное число оборотов генератора, требуемое для сохранения напряжения при подаче его в сеть, и абсолютно не зависит от числа оборотов ротора ветроколеса. Поэтому генератор можно непосредственно соединять с сетью или с автономными потребителями. Применение синхронного генератора позволило увеличить производительность ВЭУ за счет более высокого КПД синхронных машин.

Помимо перечисленных особенностей ВЭУ NordWind обладают возможностью производства тепловой энергии совместно с электрической энергией. Тепловая энергия является побочным продуктом, возникающим при производстве электроэнергии в основном за счет тепловых потерь в гидравлическом преобразователе.

Блок управления и электротехническое оборудование размещены в мотогондоле и башне и защищены от воздействия окружающей среды. Отсюда производится автоматическое управ-

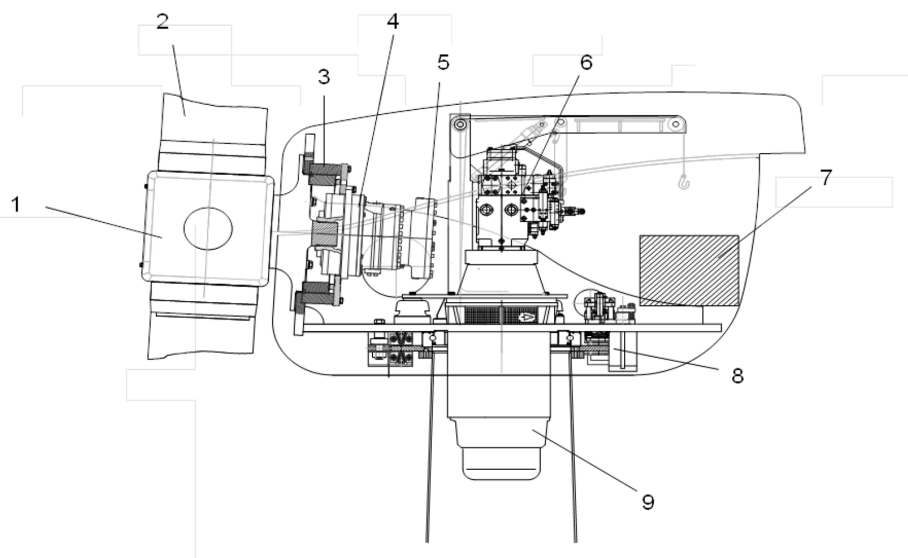


Рис. 2. Компонка ветроэнергетической установки NordWind (вид мотогондолы сбоку): 1 – ступица; 2 – лопасть ротора; 3 – подшипник ротора; 4 – насос; 5 – аварийный тормоз; 6 – гидравлический двигатель; 7 – блок управления; 8 – тормоз по азимуту; 9 – генератор

Fig. 2. The layout of the NordWind wind power installation (side view of the engine nacelle): 1 – nave; 2 – rotor blade; 3 – rotor bearing; 4 – pump; 5 – emergency brake; 6 – hydraulic motor; 7 – control unit; 8 – brake in azimuth; 9 – generator

Таблица 3. Технические характеристики ВЭУ NordWind

Table 3. Technical characteristics of wind power installation NordWind

Тип ВЭУ	NW 24-120 HY-D	NW 28-150 HY-D
Номинальная скорость ветра, м/с	10,6	10,2
Номинальная электрическая мощность, кВт	120	150
Номинальная тепловая мощность, кВт	21,9	26,7
Высота башни, м	35	42
Диаметр ротора, м	24,1	28,1
Рабочее напряжение, кВ	0,4	0,4
Частота напряжения, Гц	50	50
Себестоимость производимой энергии, €/кВт·ч	0,10	0,08
Цена установки, тыс. евро	39,0	45,6

ление эксплуатацией установки, а также контролируются различные функции безопасности. Дистанционное обслуживание и контроль ВЭУ возложены на операторов одного или нескольких пунктов управления.

Технические характеристики ветрогенераторов NordWind мощностью 120 и 150 кВт приведены в табл. 3 [5].

В этом примере при оценке риска инициирующим событием является короткое замыкание (КЗ) в генераторе, приводящее к пожару, вероятность которого определяет анализ ДО, при этом различные последствия (экономические потери) зависят от действий оператора и работоспособности противопожарных устройств.

Рассмотрим диаграмму «причина–последствие», представленную на рис. 3. Значения показателей надежности для событий отказов элементов и систем ВЭУ приведены в табл. 4.

Значение вероятности инициирующего события «КЗ в генераторе, приводящее к пожару», численно равно коэффициенту простоя для системы, выделенной пунктиром в правом нижнем блоке на рис. 3. Коэффициент простоя генератора определяют по характеристикам минимальных сечений отказов (МСО) [3]. Исходными данными для расчета надежности являются интенсивность отказов λ_j и интенсивность восстановления μ_j элементов ВЭУ, а также вся совокупность МСО.

Коэффициент простоя для j -го элемента.

$$q_j = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} \left[1 - e^{-(\lambda_j + \mu_j)t} \right].$$

Тогда для вычисления вероятности существования i -го МСО запишем выражение

$$q_i^* = \prod_{j=1}^n q_j.$$

На основе вышеприведенных формул можно определить коэффициент простоя или вероятность появления инициирующего события:

$$q_C \approx \sum_{i=1}^{N_C} q_i^*.$$

В результате проведенного расчета конечному событию «КЗ в генераторе, приводящее к пожару» соответствует вероятность $P_0 = 4,0 \cdot 10^{-3}$.

Вероятность того, что короткое замыкание вызовет пожар, равна $P_1 = 2,0 \cdot 10^{-2}$, а того, что оператор не справится с пожаром, – $P_2 = 1,0 \cdot 10^{-1}$ [2].

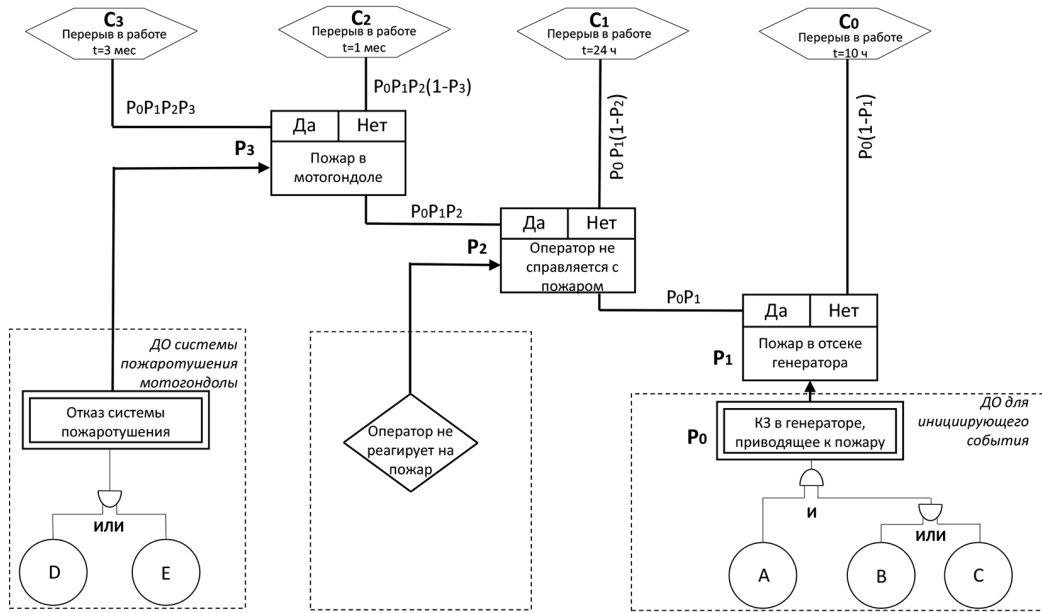


Рис. 3. Диаграмма «причина–последствие» для ВЭУ: А – повреждение изоляции генератора с КЗ; В – отказ релейной защиты в отключении КЗ; С – отказ в срабатывании генераторного выключателя; D – отсутствие сигнала управления системой пожаротушения; E – отказ системы пожаротушения

Fig. 3. The diagram cause – consequence for wind power installation: A – generator insulation damage with short circuit; B – failure of relay protection in short circuit disconnection; C – failure to operate the generator circuit breaker; D – no fire extinguishing system control signal; E – fire extinguishing system failure

Таблица 4. Показатели надежности элементов и систем ВЭУ

Table 4. Reliability indicators of elements and systems of wind power installations

Событие	Обозначение	Интенсивность отказов λ_j , 1/год	Время восстановления (период испытания) τ , год	Вероятность события отказа, q_j
Повреждение изоляции генератора с КЗ	A	0,5	$32 \cdot 10^{-4}$	–
Отказ релейной защиты в отключении КЗ	B	–	–	$0,2 \cdot 10^{-2}$
Отказ в срабатывании генераторного выключателя	C	–	–	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Отказ аппаратуры противопожарной сигнализации	D	$9 \cdot 10^{-2}$	0,25	–
Отказ системы пожаротушения	E	$9 \cdot 10^{-2}$	0,5	–

Аналогичные расчеты выполнены и для ДО системы пожаротушения, выделенной пунктиром в левом нижнем блоке на рис. 3. Вероятность события «Отказ системы пожаротушения» равна $P_3 = 4,8 \cdot 10^{-2}$.

Значения вероятностей событий, рассмотренных в ДПП на рис. 3, приведены в табл. 5.

Таблица 5. Значения вероятностей событий

Table 5. The probabilities of the events

Обозначение вероятности события	Численное значение параметра
P_0	$4,0 \cdot 10^{-3}$
P_1	$2,0 \cdot 10^{-2}$
P_2	$1,0 \cdot 10^{-1}$
P_3	$4,8 \cdot 10^{-2}$

Определим вероятности событий перерывов в работе ВЭУ с различными продолжительностями и экономическими потерями.

Событие C_0 : $P[C_0] = P_0(1 - P_1) = 3,92 \cdot 10^{-3}$.

Событие C_1 : $P[C_1] = P_0P_1(1 - P_2) = 7,90 \cdot 10^{-5}$.

Событие C_2 : $P[C_2] = P_0P_1P_2(1 - P_3) = 7,62 \cdot 10^{-7}$.

Событие C_3 : $P[C_3] = P_0P_1P_2P_3 = 3,84 \cdot 10^{-7}$.

Последствиями пожара являются экономические потери, обозначенные K_0, K_1, K_2, K_3 для всех событий $C_0 - C_3$. Они составят 1 000 €, если будет повреждено оборудование при КЗ без пожара (с вероятностью $P_0(1 - P_1)$), и до 30 000 €, если полностью сгорит мотогондол и лопасти ВЭУ (вероятность равна $P_0P_1P_2P_3$). Последствия при замене поврежденных деталей и узлов K_i в денежном эквиваленте определены на основе экспертных оценок.

В работе применяется упрощенный метод вычислений ущерба от недоотпуска энергии ВЭУ. Тариф за 1 кВт·ч выработанной ВЭУ электрической или тепловой энергии составит $c = 0,20$ €/кВт·ч. Тогда ущерб от простоя в течение 1 ч при электрической мощности ВЭУ $P_{ВЭУ} = 150$ кВт и тепловой – $Q_{ВЭУ} = 26,7$ кВт в равен $U = (150 + 26,7) \cdot 0,20 \cdot 1 = 35,34$ €.

Оценка риска эксплуатации ВЭУ за три месяца года определена по выражению

$$R = \sum_{i=0}^3 [K_i + c \cdot t_i \cdot (P_{ВЭУ} + Q_{ВЭУ})] \cdot P(C_i), \quad i = (0, 1, 2, 3),$$

где t_i – длительность перерывов в работе ВЭУ, ч.

Результаты расчетов отражены в табл. 6.

Риски экономических потерь в результате пожара на ВЭУ определяются величинами вероятностей отказов элементов и подсистем ВЭУ. Величина экономических потерь зависит также от длительности периода простоя ВЭУ.

Таблица 6. Вычисление риска аварийных событий

Table 6. Calculation of the risk of emergency events

Событие	Перерыв в работе t_i , ч	$K + U$, €	Вероятность события перерыва в работе ВЭУ $P(C_i)$, о. е.	Риск R , €
C_0	10	1 353,4	$3,92 \cdot 10^{-3}$	5,303
C_1	24	10 848	$7,90 \cdot 10^{-5}$	0,869
C_2	720	45 445	$7,62 \cdot 10^{-6}$	0,346
C_3	2 160	106 334	$3,84 \cdot 10^{-7}$	0,041
Величина риска за 3 месяца				6,559

Заключение

Предложена методика для количественной оценки риска в случае пожара на автономной ветроэнергетической установке с применением диаграммы «причина–последствия», являющейся комбинацией методов дерева событий и дерева отказов. Показано применение методики для оценки риска экономических последствий пожара на ВЭУ типа NordWind 28-150 HY-D.

Список литературы / References

- [1] Лесных В.В. Анализ риска и механизмов возмещения ущерба от аварий на объектах энергетики. Новосибирск: Наука, 1999. 251 с. [Lesnykh V. V. *Analysis of risk and mechanisms for compensation for damage from accidents at energy facilities*. Novosibirsk, Science, 1999. 251 p. (in Russian)]
- [2] Хенли Э.Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984. 528 с. [Henley E.J., Kumamoto H. *Reliability of technical systems and risk assessment*. M., Mechanical Engineering, 1984. 528 p. (in Russian)]
- [3] Гук Ю.Б., Синенко М.М., Тремясов В.А. Расчет надежности схем электроснабжения. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. 208 с. [Guk Yu.B., Sinenko M.M., Tremyasov V.A. *Calculation of the reliability of power supply schemes*. L., Energoatomizdat, Leningrad. Department, 1990. 208 p. (in Russian)]
- [4] Tremyasov V.A., Krivenko T.V. Reliability Evaluation Method of the Wind-Diesel Installation with Application of Dynamic Fault Tree. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2017, 10(3), 414–425.
- [5] Бобров А.В., Тремясов В.А. Ветродизельные комплексы в децентрализованном электроснабжении. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 216 с. [Bobrov A.V., Tremyasov V.A. *Wind-diesel complexes in decentralized power supply*. Krasnoyarsk, Sib. Feder. Univ., 2012. 216 p. (in Russian)]