



DOI 10.5862/JEST.243.5

УДК 621.311.245

*О.А. Григорьева, Т.В. Кривенко, В.А. Тремясов*

## **АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ АВТОНОМНОГО ВЕТРОДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

*О.А. Grigorieva, T.V. Krivenko, V.A. Tremyasov*

### **RELIABILITY ANALYSIS OF AN AUTONOMOUS WIND-DIESEL COMPLEX**

Использование ветродизельных комплексов в автономных системах электроснабжения позволяет заместить часть дорогостоящего дизельного топлива возобновляемым источником энергии. Основным недостатком возобновляемых источников энергии – нестабильность, зависимость их функционирования от природных ресурсов, что влияет на надежность работы системы электроснабжения. Актуален анализ надежности работы систем генерации на основе возобновляемых источников энергии. В работе предложен логико-вероятностный метод для оценки надежности автономного ветродизельного комплекса, учитывающий его особенности и условия функционирования. Произведен расчет надежности ветродизельного комплекса, расположенного на севере Красноярского края.

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ; ВЕТРОДИЗЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС;  
НАДЕЖНОСТЬ; ДЕРЕВО ОТКАЗОВ; ОТКАЗ; ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ**

Using wind-diesel complexes in autonomous electricity supply systems allows to substitute the expensive part of diesel fuel by renewable energy sources. The renewable energy sources, however, are unstable energy sources whose behavior differs much from the conventional ones. They rely in their functioning on nature resources, which affects the stable operation of the electric supply system. Therefore, analyzing the reliability of generation systems based on renewable energy sources is of immediate interest. The logical and probabilistic method has been suggested for evaluating the reliability of an autonomous wind-diesel complex considering the specifics and conditions of its functioning. The reliability of a wind-diesel complex located at the north of the Krasnoyarsk Krai is computed.

**RENEWABLE ENERGY SOURCE; WIND-DIESEL COMPLEX; RELIABILITY; FAULT TREE;  
FAILURE; RELIABILITY INDICATORS.**

Большая часть обширной территории России с малой плотностью населения до сих пор не присоединена к централизованным энергетическим системам: по статистическим данным не подключены к электрическим сетям около 10 млн населения, живущего на Северных территориях, Дальнем Востоке и в некоторых других регионах. Население этих регионов получает энергию в основном от дизельных генераторов (ДГ). Однако электроснабжение от ДГ децентрализованных областей обладает рядом недостатков. К ним относят малый ресурс и высокий износ энергооборудования, загрязнение окружающей

среды. Кроме того, необходимое топливо для ДГ завозится в отдаленные населенные пункты по зимникам, водными путями, а иногда даже авиацией, что делает производство электроэнергии очень дорогим [1]. Решением этой проблемы является применение автономных ветродизельных комплексов (ВДК). Применение в децентрализованных областях ветроэнергетических установок (ВЭУ) совместно с ДГ позволяет частично заменить дорогостоящее дизельное топливо возобновляемым источником энергии (ВИЭ).

Однако ВИЭ – это источники, мощность которых зависит от потенциала природных ре-

сурсов. Так, функционирование ВЭУ определяется режимом поступающего ветрового потока и зависит от его энергетических характеристик. Основными энергетическими характеристиками ветрового потока являются скорость ветра и годовой ход среднемесячных скоростей ветра [2]. Из-за изменчивости скорости ветра нестабильность выработки электроэнергии такими установками влияет на надежность системы электропитания. Анализ надежности систем генерации на основе ВИЭ – новая и актуальная задача.

Цель нашей работы – развитие логико-вероятностного метода на основе дерева отказов (ДО) для анализа надежности автономного ветродизельного комплекса (ВДК).

Для анализа надежности ВИЭ применяются различные методы [3–9]: аналитические; метод пространства состояний (марковские процессы); метод статистического моделирования (метод Монте-Карло).

Однако эти методы имеют недостатки применительно к оценке показателей надежности систем генерации на основе ВИЭ. Аналитические методы не учитывают стохастический характер природных ресурсов. Основная сложность при использовании метода пространства состояний связана с высокой размерностью математической модели. В общем случае число  $R$  возможных состояний, в которых может находиться система, равно

$$R = \sum_{i=1}^k M_i^{N_i},$$

где  $k$  – число групп с различными возможными состояниями элементов;  $M_i$  – число возможных состояний элементов  $k$ -й группы;  $N_i$  – число элементов в  $k$ -й группе. Поэтому при анализе надежности систем генерации с большим количеством элементов применение данного метода требует составления сложного графа с большим количеством состояний, что существенно усложняет процедуру анализа.

Метод статистического моделирования (метод Монте-Карло) требует специального программного обеспечения. В большинстве случаев этот метод может быть использован в качестве эталонного.

Логико-вероятностный метод расчета надежности с использованием ДО является дедуктив-

ным методом и применяется в тех случаях, когда число различных видов отказов системы невелико [10]. Метод заключается в построении логической блок-схемы (дерево отказов), в которой используются элементы, подразделяющие и связывающие большое число событий и условий: логические символы и символы событий. События и условия формулируются специалистами на основе технического проекта системы генерации с помощью анализа ее поведения (при возникновении различных отказов и режимов) и записи в виде конъюнкций ( $\cap \equiv \cdot$ ) и дизъюнкций ( $\cup \equiv +$ ).

Количественная оценка показателей надежности систем генерации на основе ВИЭ с помощью ДО может быть произведена различными способами. Для анализа надежности ВДК предлагается использовать логико-вероятностную модель на основе формирования логической функции отказа (ФО). Модель учитывает восстановление и профилактику элементов системы [10].

Метод ДО на основе формирования логической ФО позволяет дифференцировать отказы на кратковременные и длительные. Кратковременные отказы (КО) – это кратковременное отключение на время оперативных переключений, а длительные отказы (ДО) – это отключение на время аварийного ремонта или замены оборудования. К кратковременным отключениям приводят отказы коммутационных аппаратов (КА), отходящих линий и элементов, которые могут быть отсоединены от распределительного устройства (РУ) с помощью рубильников и разъединителей. К длительным отключениям приводят отказы генерирующего оборудования, преобразовательных и аккумулирующих установок, коммутационной аппаратуры, а также элементов, не имеющих разъединителей или рубильников между ними и РУ.

Метод ДО учитывает элементарные события, приводящие к отказу ВДК, а также такие сложные события, как отказ одного элемента во время аварийного ремонта другого или отказ элемента при аварийном ремонте другого и события отказа в срабатывании коммутационного аппарата.

С помощью предложенного метода учитываются ветровые условия, влияющие на работу ВДК. При построении ДО для ВДК учитываются

ся состояния, когда наблюдается расчетная скорость ветра  $v_{\min} < v < v_{\max}$ , при которой ВЭУ развивает мощность от нуля до номинальной, и случаи нерасчетной скорости ветра  $v_{\max} \leq v$ ;  $v \leq v_{\min}$ , при которой установка остановлена и не вырабатывает электроэнергию. Отказы по причине ветровых условий обозначаются символом ( $V$ ).

Чтобы получить выражение ФО для конечного события необходимо построить ДО. Формирование ФО происходит путем выполнения указанных в ДО операций логического сложения («или») и умножения («и») над символами первичных элементарных событий и состояний начиная с нижнего уровня. В результате ФО для конечного события будет представлена логической суммой (дизъюнкцией) конъюнкций первого порядка (элементарные события), конъюнкций второго порядка (произведение события отказа и события отказа в срабатывании, произведения события и состояния отказа) и конъюнкций третьего порядка (произведение состояний, событий отказов и событий отказов в срабатывании):

$$\text{ФО} = \bigcup_i y_i \bigcup_k (y_i \cap x_{ock}) \bigcup_{ij} (y_i \cap \tilde{y}_j) \bigcup_{ij} (y_j \cap \tilde{y}_i) \times \bigcup_{ijk} (y_i \cap \tilde{y}_j \cap x_{ock}),$$

где  $y_i, y_k, y_j$  – элементарные события (отказы элементов  $i, j, k$ );  $x_{ock}$  – события отказов в срабатывании КА, устройств релейной защиты и автоматики (РЗИА) для элемента  $k$ ;  $\tilde{y}_i, \tilde{y}_j$  – состояние элементов (аварийные ремонты), в обозначении которых используется тильда («волна») над буквой.

Здесь каждая комбинация символов в дизъюнкции представляет собой сечение отказов или условие его возникновения в виде конъюнкции первого, второго или третьего (и более высоких) порядков.

Полученная ФО подвергается сокращению по правилам алгебры логики. Так сокращаются одинаковые конъюнкции и конъюнкции, содержащие в себе конъюнкции более низкого порядка. Сокращаются также конъюнкции четвертого и пятого порядка, если в ФО содержатся конъюнкции третьего, второго и первого порядков.

Логическая ФО позволяет получить выражения для аналитического расчета частоты  $\Lambda$  и вероятности  $q$  отказа системы по известным частотам и вероятностям отказов ее элементов. Для перехода от логической ФО к выражениям для расчета частоты и относительной длительности отказа, необходимо заменить знаки логического умножения  $\cap$  и сложения  $\cup$  на знаки умножения ( $\cdot$ ) и суммирования ( $+$ ) соответственно, а символы событий  $y$  заменить символами частоты  $\lambda(y)$ , символы событий  $x_{ock}$  – символами условной вероятности  $Q(x_{ock})$ , символы состояний  $\tilde{y}$  – символами вероятности состояний  $q(\tilde{y})$ . При этом вероятность состояния простоя элемента системы равна

$$q(\tilde{y}) = \lambda(y) \tau(\tilde{y}),$$

где  $\lambda(y)$  – интенсивность отказа элемента системы;  $\tau(\tilde{y})$  – среднее время восстановления функционирования элемента системы.

Выражение для оценки частоты отказа имеет вид

$$\Lambda_{\text{ВДК}} = \sum_i \lambda(y_i) + \sum_k \lambda(y_k) Q(x_{ock}) + \sum_{ij} \lambda(y_i) q(\tilde{y}_j) + \sum_{ji} \lambda(y_j) q(\tilde{y}_i) + \sum_{ijk} \lambda(y_i) q(\tilde{y}_j) Q(x_{ock})$$

где  $i, j, k$  – элементы системы;  $\lambda(y_i), \lambda(y_k)$ ,  $\lambda(y_j)$  – интенсивность отказов элементов системы;  $Q(x_{ock})$  – условная вероятность отказа срабатывания КА и устройств РЗИА.

Выражение для оценки вероятности (относительная длительность) состояния отказа имеет вид

$$q_{\text{ВДК}} = \sum_i \lambda(y_i) \tau(\tilde{y}_i) + \sum_k \lambda(y_k) Q(x_{ock}) \tau(y_k \cap x_{ock}) + \sum_{ij} \lambda(y_i) q(\tilde{y}_j) \tau(y_i \cap \tilde{y}_j) + \sum_{ji} \lambda(y_j) q(\tilde{y}_i) \tau(y_j \cap \tilde{y}_i) + \sum_{ijk} \lambda(y_i) q(\tilde{y}_j) Q(x_{ock}) \tau(\tilde{y}_i),$$

где  $\tau(y_k \cap x_{ock})$  – среднее время восстановления функционирования при отказе в отключении повреждения на присоединении;  $\tau(y_i \cap \tilde{y}_j)$  – среднее время восстановления функционирования при совпадении отказа одного элемента системы с аварийным ремонтом другого элемента.

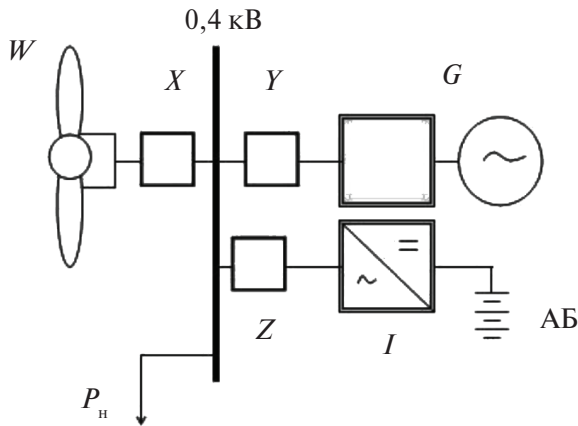


Рис. 1. Расчетная схема автономного ветродизельного комплекса:  
 $W$  – ветроэнергетическая установка;  $G$  – дизельный генератор;  $I$  – инвертор; АБ – аккумуляторная батарея;  $X, Y, Z$  – выключатели;  $P_n$  – нагрузка

В качестве примера применения предложенного метода рассмотрим схему ВДК (рис.1), функционирующего в северных районах Красноярского края, с учетом характеристик ветра [2].

В состав автономного энергокомплекса входят ветроэнергетическая установка и дизельный генератор. Также в ВДК включена аккумуляторная батарея (АБ), которая позволяет сглаживать

возможные колебания мощности ВЭУ, связанные с переменным характером скорости ветра. ДО для оценки надежности электроснабжения ВДК приведено на рис. 2. ДО построено для конечного события – отказа функционирования всей системы ВЭУ–ДГ–АБ.

При расчетной скорости ветра формулируются элементарные события, которые приводят к отказу системы в зависимости от того, какой отказ (длительный или кратковременный), а также сложные события (отказ одного элемента во время аварийного ремонта другого и при учете отказа в срабатывании КА).

Как указывалось выше, при анализе надежности ВИЭ необходимо учитывать зависимость их функционирования от поступления природных ресурсов. В ДО (рис. 2) отражено влияние ветровых условий на работу ветроустановки посредством логического знака «запрет» (шестиугольник). Применение в ДО логического знака «запрет» позволяет учесть событие, которое происходит с какой-то определенной вероятностью [10]. На рис. 2 входным событием  $V$ , помещенным под знаком «запрет», является простой ВЭУ по причине ветровых условий (отсутствие ветра, ураган и др.). Условное событие  $Q$ , расположен-

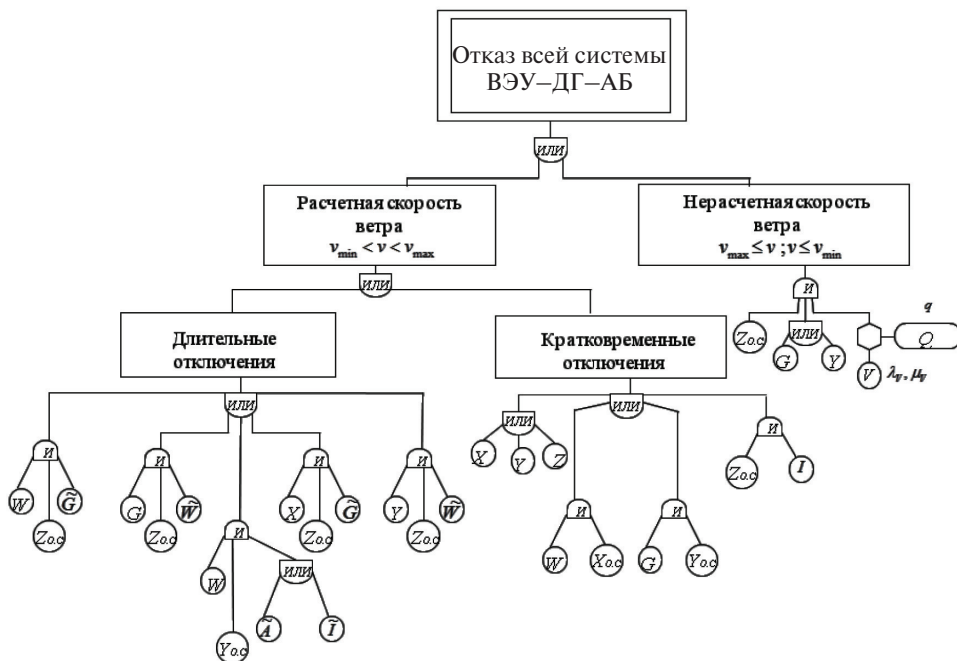


Рис. 2. Дерево отказов для оценки надежности автономного ВДК

ное на рис. 2 сбоку от логического знака, — это ограничительное условие, которое представляет собой вероятностный весовой фактор. Ограничительное условие характеризуется величиной  $q$  условной вероятности нерасчетной скорости ветра. Величина вероятности нерасчетной скорости ветра определяется с помощью гистограммы распределения скоростей ветра в месте расположения ВДК. Гистограмма распределения скоростей ветра характеризует повторяемости скоростей ветра за исследуемый период [2]. Она показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода ветер имел определенную скорость.

Функция отказа для события «Отказ системы ВЭУ–ДГ–АБ» имеет следующий вид:

$$\Phi O(\text{ВДК})_{\text{ДО}} = W\tilde{G}Z_{\text{OC}} + G\tilde{W}Z_{\text{OC}} + X\tilde{G}Z_{\text{OC}} + Y\tilde{W}Z_{\text{OC}} + W(\tilde{A} + \tilde{I})Y_{\text{OC}};$$

$$\Phi O(\text{ВДК})_{\text{КО}} = X + Y + Z + WX_{\text{OC}} + GY_{\text{OC}} + IZ_{\text{OC}};$$

$$\Phi O(\text{ВДК})_V = (G + Y)VZ_{\text{OC}},$$

где  $G, W, A, I$  — коды отказавшего элемента в соответствии со схемой ВДК;  $\tilde{G}, \tilde{W}, \tilde{A}, \tilde{I}$  — коды элемента, находящегося в аварийном ремонте;  $X, Y, Z$  — отказ автоматических выключателей;  $X_{\text{OC}}, Y_{\text{OC}}, Z_{\text{OC}}$  — отказ выключателей системы при появлении заявки на срабатывание;  $V$  — отказ ветроустановки по причине ветровых условий.

Для учета отказа ветроустановки по причине ветровых условий необходимо определить вероятность

$$q_V^* = q_V q,$$

где  $q_V$  — коэффициент простоя ВЭУ по причине погодных условий;  $q$  — условная вероятность появления нерасчетной скорости ветра.

Коэффициент простоя ВЭУ по причине погодных условий определяется по формуле

$$q_V = \frac{\lambda_V}{\lambda_V + \mu_V} \left[ 1 - e^{-(\lambda_V + \mu_V)t} \right],$$

где  $\lambda_V = 1/T_0$ , год<sup>-1</sup>, — интенсивность появления нерасчетной скорости ветра;  $\mu_V = 1/T_N$ , год<sup>-1</sup>, — интенсивность восстановления расчетной скорости ветра [11];  $T_0$  и  $T_N$  — периоды погоды соответственно с нерасчетной и расчетной скоростью ветра [2].

По ФО составлены расчетные выражения для показателей надежности:

для частоты отказов ВДК

$$\Lambda(\text{ВДК})_{\text{ДО}} = \lambda_W q_G Q_{\text{OCZ}} + \lambda_G q_W Q_{\text{OCZ}} + \lambda_X q_G Q_{\text{OCZ}} + \lambda_Y q_W Q_{\text{OCZ}} + \lambda_W (q_A + q_I) Q_{\text{OCY}};$$

$$\Lambda(\text{ВДК})_{\text{КО}} = \lambda_X + \lambda_Y + \lambda_Z + \lambda_W Q_{\text{OCX}} + \lambda_G Q_{\text{OCY}} + \lambda_I Q_{\text{OCZ}};$$

$$\Lambda(\text{ВДК})_V = (\lambda_G + \lambda_Y) q_V^* Q_{\text{OCZ}};$$

для относительной длительности отказов ВДК

$$q(\text{ВДК})_{\text{ДО}} = \lambda_W \tau_W q_G Q_{\text{OCZ}} + \lambda_G \tau_G q_W Q_{\text{OCZ}} + \lambda_X \tau_X q_G Q_{\text{OCZ}} + \lambda_Y \tau_Y q_W Q_{\text{OCZ}} + \lambda_W \tau_W (q_A + q_I) Q_{\text{OCY}};$$

$$q(\text{ВДК})_{\text{КО}} = \lambda_X \tau_X + \lambda_Y \tau_Y + \lambda_Z \tau_Z + \lambda_W \tau_W Q_{\text{OCX}} + \lambda_G \tau_G Q_{\text{OCY}} + \lambda_I \tau_I Q_{\text{OCZ}};$$

$$q(\text{ВДК})_V = (\lambda_G \tau_G + \lambda_Y \tau_Y) q_V^* Q_{\text{OCZ}}.$$

Суммарная частота отказов ВДК

$$\Lambda(\text{ВДК}) = \Lambda_{\text{ДО}} + \Lambda_{\text{КО}} + \Lambda_V.$$

Суммарная относительная длительность состояния отказа ВДК

$$q(\text{ВДК}) = q_{\text{ДО}} + q_{\text{КО}} + q_V.$$

Чтобы получить численное значение показателей надежности ВДК, необходимо в полученные формулы подставить исходные данные для ВДК, представленные в табл. 1, 2 [10, 12]. Необходимые данные для учета в ДО влияния ветровых условий на работу ВДК для северных районов Красноярского края следующие:

$q$ .....	0,05
$T_0$ .....	0,42
$T_N$ .....	0,58
$\lambda_V$ , 1/год .....	2,38
$\mu_V$ , 1/год .....	1,72
$q_V$ .....	0,57
$q_V^*$ .....	0,0285

Результаты расчета показателей надежности

по вышеприведенным формулам:

$$\Lambda(\text{ВДК})_{\text{ДО}} = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ 1/год};$$

$$\Lambda(\text{ВДК})_{\text{КО}} = 3,59 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год};$$

$$\Lambda(\text{ВДК})_V = 3,14 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год};$$

$$q(\text{ВДК})_{\text{ДО}} = 1,49 \cdot 10^{-9};$$

$$q(\text{ВДК})_{\text{КО}} = 2,51 \cdot 10^{-6};$$

$$q(\text{ВДК})_V = 5,7 \cdot 10^{-9}.$$

Окончательно получаем

$$\Lambda(\text{ВДК}) = 3,62 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год};$$

$$q(\text{ВДК}) = 2,52 \cdot 10^{-6}.$$



Таблица 1

**Показатели надежности элементов ВДК**

Код элементов	Элементы ВДК	Значения показателей надежности		
		$\lambda(y)$ , 1/год	$\tau(\tilde{Y})$ , год	$q(\tilde{y})$
<i>W</i>	Ветроустановка Vestas V27 225 кВт	1,1	$3,28 \cdot 10^{-3}$	$3,61 \cdot 10^{-3}$
<i>G</i>	Дизельный генератор	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$
<i>I</i>	Инвертор	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-2}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
<i>A</i>	Аккумуляторная батарея	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$
<i>X, Y, Z</i>	Автоматический выключатель	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2

**Условная вероятность отказа срабатывания элементов**

Код элемента	Элемент ВДК	Отказы автоматических выключателей:	Условная вероятность отказа срабатывания ( $Q_{оск}$ )
<i>X, Y, Z</i>	Автоматический выключатель	В отключении КЗ Во включении	$(5 \pm 2) \cdot 10^{-4}$ $(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$

**Выводы**

Предложен логико-вероятностный метод дерева отказов для анализа надежности ВДК, который позволяет учесть особенности функционирования комплекса и погодные условия.

Сформулирована целесообразность дифференциации отказов ВДК на кратковременные, длительные и отказы по причине изменения ветровых условий.

Метод учитывает такие сложные события, происходящие в ВДК, как отказ одного элемента энергокомплекса во время аварийного ремонта другого с учетом отказа в срабатывании КА.

Надежность ВДК определяется с помощью следующих показателей: интенсивности отказа ( $\lambda$ ) и относительной длительности отказа ( $q$ ). Эти показатели могут быть использованы при выборе оптимального варианта структуры ВДК.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Куликова Л.В., Меновщиков Ю.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2005. 365 с.
2. Старков А.Н., Ландберг Л., Безруких П.П., Борисенко М.М. Атлас ветров России. М.: Можайск-Терра, 2000. 560 с.
3. Abouzahr I., Ramakumar R. Loss of power supply probability of stand-alone wind electric conversion systems: A closed form solution approach // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1990. Vol. 5, № 3. P. 445–451.
4. Abouzahr I., Ramakumar R. An approach to assess the performance of utility-interactive wind electric conversion systems // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1991. Vol. 6, № 4. P. 627–638.
5. Bakirtzis A.G. A probabilistic method for the evaluation of the reliability of stand-alone wind energy systems // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1992. Vol. 7, № 1. P. 99–107.
6. Leite A.P., Borges C.L.T., Falcao D.M. Probabilistic wind farms generation model for reliability studies applied to Brazilian sites // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006. Vol. 21, № 4. P. 493–501.
7. Billinton R., Bagen, Cue Yu. Reliability evaluation of small stand-alone wind energy conversion systems using a time series simulation model. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*. 2003. Vol. 150, № 1. P. 96–100.
8. Billinton R., Bagen B. A sequential simulation method for the generating capacity adequacy evaluation of small stand-alone wind energy conversion systems //

IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering CCECE. 2002. Vol. 1. P. 72–77.

9. **Li W.Y., Bagen B.** Reliability evaluation of integrated wind/diesel/storage systems for remote locations // *IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*. 2010. P. 791–795.

10. **Гук Ю.Б., Синенко М.М., Тремясов В.А.** Расчет надежности схем электроснабжения. Л.: Энер-

гоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. 208 с.

11. **Бобров А.В., Тремясов В.А.** Ветро дизельные комплексы в децентрализованном электроснабжении. Красноярск: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2012. 216 с.

12. Sienergy [Электронный ресурс] // URL: <http://www.sienergy.co.uk/WT/downloads/Reliability-and-Condition-Monitoring-of-Wind-Turbines.pdf> (дата обращения 07.02.2016).

## REFERENCES

1. **Kulikova L.V., Menovshchikov Yu.A.** Netraditsionnye i vozobnovlyayemye istochniki energii [Nonconventional and renewable energy sources] / Altai state technical university name of I. I. Polzunov. Barnaul: ASU Publ., 2005. 365 s. (rus)

2. **Starkov A.N., Landberg L., Bezrukikh P.P., Borisenko M.M.** Atlas ветров России [Wind atlas of Russia] Moscow: Mozhaik-Terra, 2000. 560 s. (rus)

3. **Abouzahr I., Ramakumar R.** Loss of power supply probability of stand-alone wind electric conversion systems: A closed form solution approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1990. Vol. 5, № 3. P. 445–451.

4. **Abouzahr I., Ramakumar R.** An approach to assess the performance of utility-interactive wind electric conversion systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1991. Vol. 6, № 4. P. 627–638.

5. **Bakirtzis A.G.** A probabilistic method for the evaluation of the reliability of stand-alone wind energy systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1992. Vol. 7, № 1. P. 99–107.

6. **Leite A.P., Borges C.L.T., Falcao D.M.** Probabilistic wind farms generation model for reliability studies applied to Brazilian sites. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006. Vol. 21, № 4. P. 493–501.

7. **Billinton R., Bagen, Cue Yu.** Reliability evaluation of small stand-alone wind energy conversion systems using a time series simulation model. *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 2003. Vol. 150, № 1. P. 96–100.

8. **Billinton R., Bagen B.** A sequential simulation method for the generating capacity adequacy evaluation of small stand-alone wind energy conversion systems, *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering CCECE*. 2002. Vol. 1. P. 72–77.

9. **Li W.Y., Bagen B.** Reliability evaluation of integrated wind/diesel/storage systems for remote locations. *IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 2010. P. 791–795.

10. **Guk Yu. B., Sinenko M.M., Tremyasov V.A.** Raschet nadezhnosti skhem elektrosnabzheniia [Reliability calculation of schemes power supply]. Leningrad: Energoatomizdat, 1990. 208 s. (rus)

11. **Bobrov A.V., Tremyasov V.A.** Vetrodizelnye komplekсы v detsentralizovannom elektrosnabzhenii [Wind-diesel complexes in the decentralized power supply]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2012. 216 s. (rus)

12. Sienergy. Available: <http://www.sienergy.co.uk/WT/downloads/Reliability-and-Condition-Monitoring-of-Wind-Turbines.pdf> (Accessed 07.02.2016)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ГРИГОРЬЕВА Ольга Анатольевна** – кандидат технических наук доцент, начальник управления аспирантуры, докторантуры и АНПК Сибирского федерального университета. 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: Grigorieva.00@mail.ru

**GRIGORIEVA Olga A.** – Siberian Federal University. 79, Svobodny Prospect, Krasnoyarsk, Russia, 660041. E-mail: Grigorieva.00@mail.ru

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

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

**ТРЕМЯСОВ Владимир Анатольевич** – кандидат технических наук профессор Сибирского федерального университета.

660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

E-mail: emf\_tva@mail.ru

**TREMYASOV Vladimir A.** – Siberian Federal University.

79, Svobodny Prospect, Krasnoyarsk, Russia, 660041.

E-mail: emf\_tva@mail.ru