

УДК 620.97

**Математическое моделирование безотказности гибридной
микроэлектростанции на основе возобновляемых источников энергии***Осташенков А.П., Медяков А.А., Ласточкин Д.М., Анисимов П.Н.**Поволжский государственный технологический университет***Аннотация**

В условиях регионов с относительно невысокими солнечным и ветровым потенциалами перерывы электроснабжения потребителей, питающихся от микроэлектростанций на основе ВИЭ, могут быть обусловлены снижением мощности ветроэлектрических установок, фотоэлектрических модулей при недостаточных, соответственно, скорости ветра и инсоляции для обеспечения питания потребителей. Проведено исследование надежности системы, включающей ветроэлектрическую установку, фотоэлектрические модули, гибридный контроллер заряда, накопитель энергии и инвертор, с использованием логико-вероятностного метода. В рамках исследования был проведен анализ структуры системы электроснабжения и режимов ее работы при возникновении различных событий: отказ элементов системы, замена отказавших элементов, диагностирование элементов, снижение мощности ветроэлектрической установки и фотоэлектрических модулей. Определены сочетания событий, приводящие к нарушению питания потребителей, подключенных к гибридной микроэлектростанции. Построено дерево отказов для гибридной микроэлектростанции. Получены выражения для расчета вероятности кратковременных, длительных перерывов электроснабжения, вероятности перерывов электроснабжения, происходящих при возникновении нерасчетных инсоляции и скорости ветра. Проведено математическое моделирование безотказности гибридной микроэлектростанции для условий центральной части Республики Марий Эл. Определено, что вероятность отказа системы определяется, в основном, вероятностью длительных перерывов электроснабжения. При этом надежность системы в целом во многом определяется значениями показателей надежности гибридного контроллера и инвертора.

Ключевые слова: ГИБРИДНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ,
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, БЕЗОТКАЗНОСТЬ,
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКИХ ОБЪЕКТОВ

Введение

Обеспечение электроснабжения сельских объектов в случаях, когда их подключение к централизованной электрической сети экономически невыгодно, возможно за счет использования микроэлектростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Однако их широкое использование в децентрализованных системах электроснабжения сельских объектов ограничивается наличием ряда факторов [1], к которым относятся экономические, нормативно-правовые, географические, технические. К последним относятся вопросы подключения и эксплуатации микроэлектростанции на основе ВИЭ [2]. При этом следует отметить, что опыт эксплуатации таких систем в РФ еще недостаточен. По этой причине оценка надежности систем электроснабжения сельских объектов на основе ВИЭ по данным эксплуатации затруднена. Особую актуальность приобретает данный вопрос при рассмотрении систем электроснабжения без диспетчеризации, зависящих от мощности микроэлектростанции на основе ВИЭ, к которым относятся системы с ветроэлектрическими установками (ВЭУ), фотоэлектрическими модулями.

Интерес к вопросу оценки надежности систем электроснабжения на основе ВИЭ подтверждается наличием большого количества работ. Исследованиям надежности элементов фотоэлектрических солнечных электростанций посвящены работы [3-6], ВЭУ [7-9], надежности систем электроснабжения с фотоэлектрическими модулями [10, 11]. Однако для регионов с относительно невысокими солнечным и ветровым потенциалами необходимо учитывать отказы систем электроснабжения по причине снижения мощности ВЭУ, фотоэлектрических модулей, обусловленные недостаточными, соответственно, скоростью ветра и инсоляцией для обеспечения питания потребителей. В этой связи представляется актуальной задача исследования надежности систем электроснабжения сельских объектов на основе ВИЭ с учетом солнечного и ветрового потенциалов.

Объектом исследования является гибридная микроэлектростанция на основе ВИЭ, предназначенная для сельской электрификации.

Предметом исследования является надежность гибридной микроэлектростанции на основе ВИЭ.

Цель работы – провести математическое моделирование безотказности гибридной

микроэлектростанции с учетом солнечного и ветрового потенциалов в месте ее размещения.

Задачи:

- провести анализ структурной схемы гибридной микроэлектростанции на основе ВИЭ;
- построить дерево отказов для рассматриваемой схемы гибридной микроэлектростанции;
- составить расчетное выражение для определения вероятности отказа системы;
- провести математическое моделирование безотказности гибридной микроэлектростанции с использованием данных о надежности ее элементов, а также солнечного и ветрового потенциалов в месте ее размещения.

Материалы и методы

В рамках работы рассматривалась гибридная микроэлектростанция с ВЭУ, фотоэлектрическими модулями и накопителем энергии. Применение нескольких источников электрической энергии с разными технологиями производства электроэнергии позволяет повысить надежность электроснабжения [12]. Это обусловлено возможностью перераспределения электрической нагрузки между преобразователями различных видов ВИЭ при снижении интенсивности потока возобновляемой энергии одного вида (солнечной или ветровой). Функциональная схема системы для питания нагрузки переменного тока представлена на рис. 1.

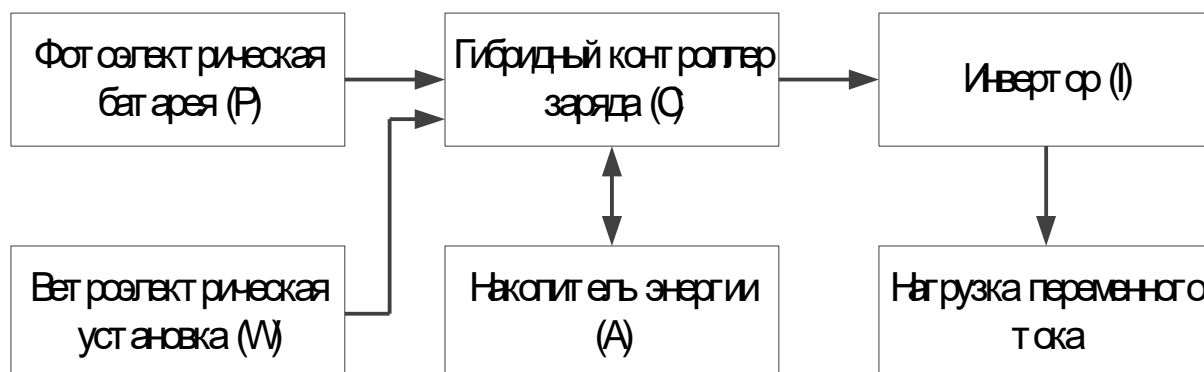


Рис. 1. Функциональная схема системы для питания нагрузки переменного тока

Рассматриваемая в работе система является структурно-сложной. С целью

упрощения математической модели были выделены элементы, оказывающие наибольшее влияние на безотказность [13]. Расчетная схема системы представлена на рис. 2.

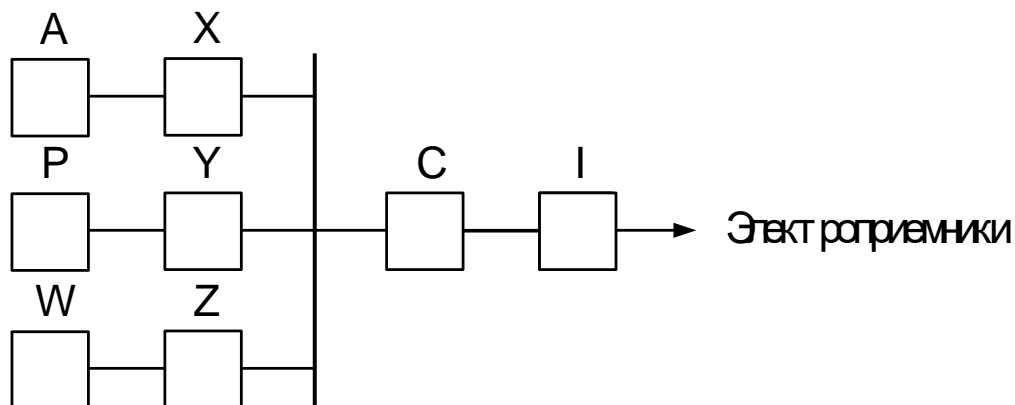


Рис. 2. Расчетная схема системы

Примечания: X, Y, Z – выключатели постоянного тока; W, P, A, C, I – элементы системы в соответствии с рис. 1.

Как было отмечено выше, опыт эксплуатации микроэлектростанций на основе ВИЭ, предназначенных для сельской электрификации, в РФ еще недостаточен, и оценка надежности систем электроснабжения сельских объектов на основе ВИЭ по данным эксплуатации затруднена. Однако для отдельных элементов фотоэлектрических солнечных электростанций, ВЭУ, значения показателей надежности могут быть оценены в результате анализа известных работ. Это позволяет с использованием заданных значений показателей надежности элементов определить надежностные показатели для системы в целом.

При исследовании надежности рассматриваемой гибридной микроэлектростанции был использован логико-вероятностный метод. В рамках исследования был проведен анализ структуры системы электроснабжения и режимов ее работы при возникновении различных событий: отказ элементов системы, замена отказавших элементов, диагностирование элементов, снижение мощности ВЭУ и фотоэлектрических модулей при уменьшении скорости ветра и инсоляции, соответственно. Затем были определены сочетания событий, приводящие к нарушению питания потребителей, подключенных к гибридной микроэлектростанции. При этом было определено, что некоторые сочетания событий обуславливают длительные перерывы электроснабжения на время проведения ремонтно-восстановительных работ, другие сочетания событий обуславливают кратковременные перерывы электроснабжения на время, необходимое для выполнения

переключений. Возникновение длительных перерывов электроснабжения обусловлено отказами инвертора или гибридного контроллера заряда, совпадениями проведения диагностирования ВЭУ или фотоэлектрических модулей с отказами других элементов системы. При этом одновременный отказ ВЭУ и фотоэлектрических модулей не учитывался из-за низкой вероятности такого события. Возникновение кратковременных перерывов электроснабжения связано с отказами выключателей. В отдельную группу были выделены перерывы электроснабжения, происходящие при возникновении нерасчетных инсоляции и скорости ветра, обуславливающих снижение мощности, соответственно, фотоэлектрических модулей и ВЭУ. Деревья отказов для вышеприведенных групп событий представлены на рис. 3–5.

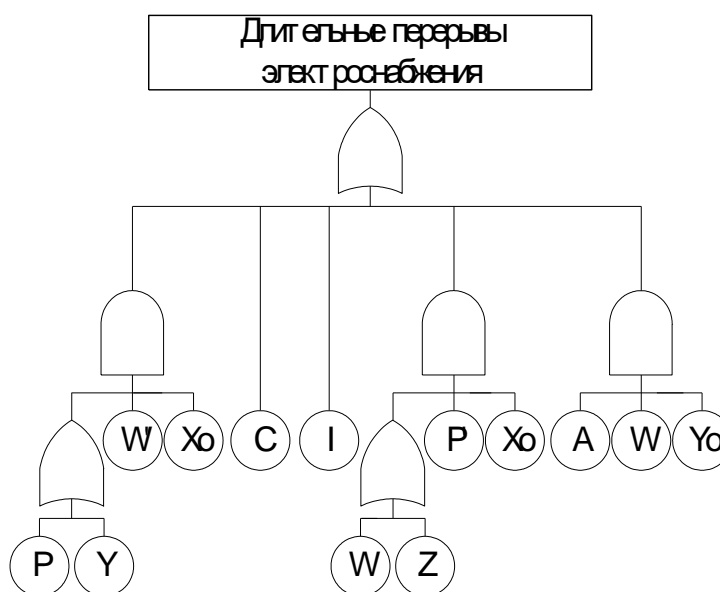


Рис. 3. Дерево отказов (длительные перерывы электроснабжения)

На рис. 3 событие S (V) представляет собой простой фотоэлектрических модулей (ВЭУ) по причине возникновения нерасчетной инсоляции (скорости ветра). Условные события Qp (Qw) – события, учитывающие возникновение нерасчетной инсоляции (скорости ветра). Вероятности возникновения этих событий определяются с использованием данных об инсоляции и скорости ветра в месте размещения гибридной микроэлектростанции путем определения части времени в течение рассматриваемого периода, когда имеют место, соответственно, инсоляция и скорость ветра, недостаточные для обеспечения питания потребителей.

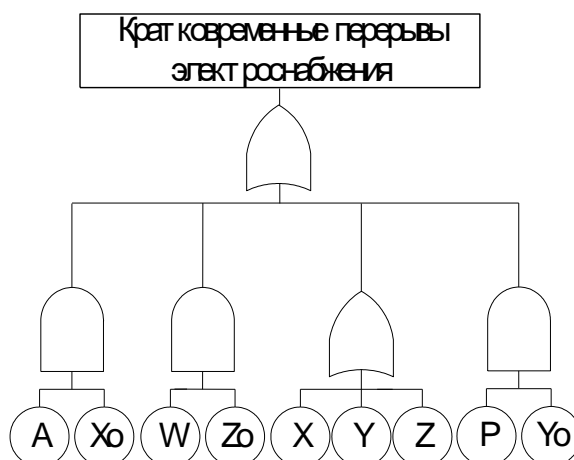


Рис. 4. Дерево отказов (кратковременные перерывы электроснабжения)

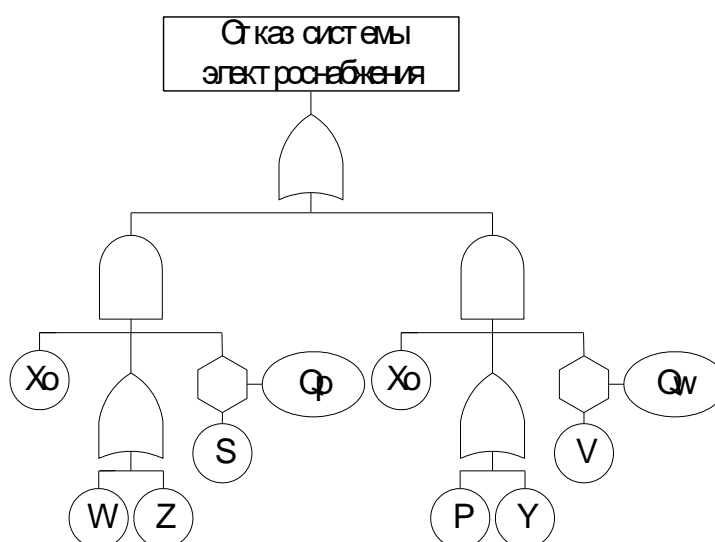


Рис. 5. Дерево отказов (нерасчетные инсоляция или скорость ветра)

Примечания: A, I, P, C, W, X, Y, Z – отказы элементов в соответствии с рис. 2; P', W' – простой при диагностировании или замене отказавших элементов; Xo – отказ срабатывания выключателя.

С использованием построенных деревьев отказов были составлены выражения для расчета вероятности кратковременных перерывов электроснабжения q_{STS} , длительных перерывов электроснабжения q_{LTS} , перерывов электроснабжения, происходящих при возникновении нерасчетных инсоляции и скорости ветра q_{LF} , суммарной вероятности отказа системы q :

$$q_{STS} = \lambda_A \cdot \tau_A \cdot q_{o.X} + \lambda_W \cdot \tau_W \cdot q_{o.Z} + \lambda_X \cdot \tau_X + \lambda_Y \cdot \tau_Y + \lambda_Z \cdot \tau_Z + \lambda_P \cdot \tau_P \cdot q_{o.Y};$$

$$q_{LTS} = (\lambda_P \cdot \tau_P + \lambda_Y \cdot \tau_Y) \cdot q_W \cdot q_{o.X} + \lambda_C \cdot \tau_C + \lambda_I \cdot \tau_I + (\lambda_W \cdot \tau_W + \lambda_Z \cdot \tau_Z) \cdot q_P \cdot q_{o.X} + \lambda_A \cdot \tau_A \cdot \lambda_W \cdot \tau_W \cdot q_{o.Y};$$

$$q_{LF} = q_{o.X} \cdot (\lambda_W \cdot \tau_W + \lambda_Z \cdot \tau_Z) \cdot q_S \cdot \frac{\lambda_S}{\lambda_S + \mu_S} (1 - e^{-(\lambda_S + \mu_S)t}) + q_{o.X} \cdot (\lambda_P \cdot \tau_P + \lambda_Y \cdot \tau_Y) \cdot q_V \cdot \frac{\lambda_V}{\lambda_V + \mu_V} (1 - e^{-(\lambda_V + \mu_V)t});$$

$$q = q_{STS} + q_{LTS} + q_{LF},$$

где: $\lambda_A, \lambda_P, \lambda_C, \lambda_W, \lambda_I, \lambda_X, \lambda_Y, \lambda_Z$ – интенсивности отказов элементов в соответствии с рис. 2; $\tau_A, \tau_P, \tau_C, \tau_W, \tau_I, \tau_X, \tau_Y, \tau_Z$ – средние времена до восстановления элементов; $q_{o.X}, q_{o.Z}, q_{o.Y}$ – вероятности отказов срабатывания выключателей; q_W, q_P – вероятности простоев элементов (при замене или диагностировании); q_V, q_S – условные вероятности возникновения нерасчетных скорости ветра и инсоляции, соответственно; λ_V, λ_S – интенсивности возникновения нерасчетных скорости ветра и инсоляции; μ_V, μ_S – интенсивности восстановления нерасчетных скорости ветра и инсоляции.

Результаты исследований

С использованием вышеприведённых выражений, данных о надёжности элементов гибридной микроэлектростанции, а также солнечного и ветрового потенциалов в месте размещения (центральная часть Республики Марий Эл, $q_V = 0,15$; $q_S = 0,1$; $\lambda_V = 2,38$; $\lambda_S = 2,17$; $\mu_V = 1,72$; $\mu_S = 1,85$) было проведено математическое моделирование безотказности гибридной микроэлектростанции. Значения показателей надёжности элементов системы представлены в таблице 1 [3, 4, 7].

Результаты расчета: вероятность кратковременных перерывов электроснабжения $q_{STS} = 1,05 \cdot 10^{-6}$, вероятность длительных перерывов электроснабжения $q_{LTS} = 8,13 \cdot 10^{-5}$, вероятность перерывов электроснабжения, происходящих при возникновении нерасчетных инсоляции и скорости ветра $q_{LF} = 5,04 \cdot 10^{-12}$, вероятности отказа системы $q = 8,23 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, суммарная вероятность отказа системы определяется, в основном, вероятностью длительных перерывов электроснабжения. При этом надёжные показатели системы в целом во многом определяются значениями показателей надёжности гибридного контроллера и инвертора. Для рассматриваемой схемы гибридной микроэлектростанции вероятность нарушения электроснабжения по причине возникновения нерасчетной инсоляции или скорости ветра относительно двух других

групп событий (кратковременные и длительные перерывы электроснабжения) низка, что обусловлено применением нескольких источников электрической энергии с разными технологиями ее производства.

Таблица 1. Исходные данные для расчета

Элементы	Показатели надежности	Значения
ВЭУ	$\lambda_W, \text{год}^{-1}$	$4 \cdot 10^{-2}$
	q_W	$1,32 \cdot 10^{-4}$
	$\tau_W, \text{год}$	$3,31 \cdot 10^{-3}$
Фотоэлектрические модули	$\lambda_P, \text{год}^{-1}$	$6,24 \cdot 10^{-3}$
	q_P	$8,56 \cdot 10^{-5}$
	$\tau_P, \text{год}$	$1,37 \cdot 10^{-2}$
Инвертор	$\lambda_I, \text{год}^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$
	q_I	$1 \cdot 10^{-5}$
	$\tau_I, \text{год}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Контроллер	$\lambda_C, \text{год}^{-1}$	$6,24 \cdot 10^{-2}$
	q_C	$7,13 \cdot 10^{-5}$
	$\tau_C, \text{год}$	$1,14 \cdot 10^{-3}$
Аккумуляторная батарея	$\lambda_A, \text{год}^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	q_A	$2 \cdot 10^{-6}$
	$\tau_A, \text{год}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Выключатель	$\lambda_X = \lambda_Y = \lambda_Z, \text{год}^{-1}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$
	$q_{o.X} = q_{o.Y} = q_{o.Z}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$
	$\tau_X = \tau_Y = \tau_Z, \text{год}$	$2 \cdot 10^{-4}$

Выводы

Построено дерево отказов для гибридной микроэлектростанции с ВЭУ, фотоэлектрическими модулями и накопителем энергии. Получены выражения для расчета вероятности кратковременных, длительных перерывов электроснабжения, вероятности перерывов электроснабжения, происходящих при возникновении нерасчетных инсоляции и скорости ветра. Проведено математическое моделирование безотказности гибридной микроэлектростанции для условий центральной части Республики Марий Эл. Вероятность отказа системы составила $8,23 \cdot 10^{-5}$.

Список использованных источников

1. Воронин С.М. Формирование автономных систем энергоснабжения

сельскохозяйственных объектов на основе возобновляемых источников энергии: дис. ... д-р. техн. наук: 05.20.02. – Зерноград. – 2009. – С. 5.

2. Ufa R., Vasilev A., Malkova Y. Analysis of the factors constraining the development of renewable energy in Russia // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2135. – P. 2.

3. Baschel S., Koubli E., Roy J., Gottschalg R. Impact of component reliability on large scale photovoltaic systems' performance // Energies. – 2018. – Vol. 11. – P. 5-6.

4. Sayed A., El-Shimy M., El-Metwally M., Elshahed M. Reliability, availability, and maintainability analysis for grid-connected solar photovoltaic systems // Energies. – 2019. – Vol. 12. – P. 7.

5. Colli A. Failure mode and effect analysis for photovoltaic systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 50. – P. 804-809.

6. Ahadi A.; Ghadimi N.; Mirabbasi D. Reliability assessment for components of large-scale photovoltaic systems // Journal of Power Sources. – 2014. – Vol. 264. – P. 211-219.

7. Григорьева О.А., Кривенко Т.В., Тремясов В.А. Анализ надежности автономного ветродизельного комплекса // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2016. – № 2. – С. 45-52.

8. Billinton R., Bagen, Cui Y 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. – P. 96-100.

9. Li Yao Research and Development of the Wind Turbine Reliability // International Journal of Mechanical Engineering and Applications. – 2018. – Vol. 6. – P. 35.

10. Zini G., Mangeant C., Merten J. Reliability of large-scale grid-connected photovoltaic systems // Renewable Energy. – 2011. – Vol. 36. – P. 2334-2340.

11. Mahdi I., Chalah S., Nadji B. Reliability study of a system dedicated to renewable energies by using stochastic petri nets: application to photovoltaic (PV) system // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 136. – P. 513-520.

12. ГОСТ Р 56124.1-2014 Возобновляемая энергетика. Гибридные электростанции на основе возобновляемых источников энергии, предназначенные для сельской электрификации. Рекомендации. Часть 1. Общее введение для сельской электрификации. – М.: Стандартинформ, 2015. – 11 с.

13. Шуханов С.Н., Кузьмин А.В., Болоев П.А. Надежность работы машинно-тракторного агрегата // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30. – № 1. – С. 8-20.

Цитирование:

Осташенков А.П., Медяков А.А., Ласточкин Д.М., Анисимов П.Н. Математическое моделирование безотказности гибридной микроэлектростанции на основе возобновляемых источников энергии [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – №5. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/5/st_504.pdf. DOI: <https://doi.org/10.51419/20215504>.