

УДК 621.311

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПРИ РАБОТЕ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВОК
В ОБЩЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРИОДА
ИХ ПЛАНОВОГО КОНТРОЛЯ**

Докт. инж. наук, доц. РОЛИК Ю. А., канд. техн. наук ГОРНОСТАЙ А. В.

*Институт транспорта и связи (Латвия),
Белорусский национальный технический университет*

Существующие традиционные производители электрической энергии, использующие в своей работе различное топливо, продуктами сгорания которого являются экологически вредные вещества, значительно загрязняют окружающую среду и ухудшают экологическую ситуацию. Нехватка собственных источников электроэнергии и использование, как правило, завозимого топлива создают предпосылки зависимости от импортеров электроэнергии. Для уменьшения этой зависимости необходимо постоянное наращивание мощностей упомянутых производителей, которое в свою очередь приводит к возникновению и усилению вредного парникового эффекта. В этих условиях дальнейшее развитие таких производителей бесперспективно и нецелесообразно.

Одним из путей сокращения импорта электроэнергии и тем самым обеспечения энергетической независимости при одновременном улучшении сложившейся экологической ситуации могло бы стать внедрение альтернативных источников энергии. При этом в качестве указанных производителей электроэнергии целесообразно использовать экологически чистые источники энергии – ветроэлектроустановки (ВЭУ) [1]. Такие источники перспективны и привлекательны не только с точки зрения использования имеющегося в регионе ветроэнергетического потенциала, но и с позиций обеспечения защиты окружающей среды. При этом ВЭУ не занимают больших земельных угодий, производят экологически чистую электроэнергию и главное не вызывают вредного парникового эффекта, присущего некоторым другим производителям энергии, что полностью соответствует требованиям Международного Киотского Протокола.

В случае использования ВЭУ в качестве источников электроэнергии наиболее приемлемыми являются схемы параллельной работы установок с общей сетью [2]. В настоящее время установленная на территории Латвии мощность производителей электрической энергии, использующих в своей работе энергию ветра, составляет 28,5 МВт. Данный показатель был достигнут в течение последних пяти лет благодаря реализации ряда проектов подключения ВЭУ к общей энергосистеме в качестве экологически чистых и независимых производителей электроэнергии (табл. 1).

Представленная в таблице информация наглядно демонстрирует, что число производителей электроэнергии, использующих в своей работе энергию ветра, в настоящее время еще достаточно мало, не соответствует имеющемуся ветровому потенциалу [3] и в дальнейшем, несомненно, будет расти. В этих условиях актуальной становится задача повышения надежности и бесперебойности электроснабжения, особенно при работе ВЭУ в составе общей энергосистемы.

Таблица 1

Независимые производители электроэнергии

Пункт монтажа	Тип WTG	Мощность, кВт	Кол-во	Производитель WTG	Компания – владелец WTG	Год ввода в эксплуатацию
Ainazi	TW 600	650	2	TACKE	A/s «LATVENERGO»	1995
Liepaja	GW 150	150	1	GeWind	A/s «KURSA»	1997
Uzava	N54	1000	1	NORDEX	SIA «IMPAKT»	1999
F.e.z. Liepaja	E-66	1500	1	ENERCON	SIA «BK-Energija»	2002
Alsunga	N54	1000	2	NORDEX	SIA BALTNORVENT	2002
Medze	E-40	600	33	ENERCON	SIA «Vēju parks 1-11»	2002
Nica	V52/850	850	1	VESTAS	SIA «Seteri»	2002
Medze	D8.2	2000	1	DeWind	Composite Technology Corp.	2008

Оценка надежности и работы ВЭУ. Известно [4], что надежность и бесперебойность электроснабжения источников электроэнергии, работающих параллельно с сетью, в большой степени зависит от безотказной работы непосредственно самих источников, т. е. от безотказной работы ВЭУ. Поэтому и возникает необходимость обеспечения заданного уровня надежности работы ВЭУ и ее элементов.

С позиций теории надежности можно выделить четыре основных состояния, в которые периодически переходит элемент ВЭУ в течение всего времени его эксплуатации:

1) рабочее состояние, когда элемент несет функциональную нагрузку или находится в нагруженном резерве;

2) пребывание в ненагруженном резерве, когда исправный элемент не несет никакой нагрузки;

3) состояние профилактики или планового ремонта, в течение которого проводится техническое обслуживание элемента; сюда же по характеру простоев относятся кратковременные отключения ВЭУ при производстве оперативных переключений;

4) аварийное состояние, когда элемент в связи с его повреждением не способен выполнять предназначенные ему функции.

Для полной количественной характеристики основных сторон надежности ВЭУ используются определенные критерии, которые разбиваются на несколько групп [5]. К числу наиболее известных и широко применяемых критериев надежности относятся:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- вероятность появления отказа $Q(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя наработка до 1-го отказа T .

Под характеристикой надежности ВЭУ в дальнейшем будем понимать количественное значение критерия надежности. С точки зрения критериев, характеризующих надежность, ВЭУ относятся к восстанавливаемым системам. Это означает, что в течение эксплуатации установки допускают ремонт (восстановление).

В данном случае процесс восстановления так же, как и процесс возникновения отказов, является вероятностным. Причем в качестве случайной величины здесь выступает время восстановления, а под вероятностью восстановления понимается вероятность того, что ВЭУ будет восстановлена после отказа за заданное время, т. е. время восстановления при этом будет меньше заданного. Вероятность восстановления – это вероятность того, что произойдет событие по восстановлению установки, т. е. устранение отказа.

В случае распределения времени восстановления по экспоненциальному закону вероятность восстановления определяется по формуле

$$S(t) = 1 - e^{-\mu t}. \quad (1)$$

При этом вероятность невозможности восстановления

$$G(t) = e^{-\mu t}. \quad (2)$$

Здесь μ – интенсивность восстановления, которая в общем случае определяется как отношение количества восстановлений в единицу времени к числу элементов, оставшихся еще не восстановленными, к данному моменту времени. При экспоненциальном законе справедливо выражение

$$\mu = \frac{1}{T_B}, \quad (3)$$

где T_B – время восстановления, которое можно определить как

$$T_B = \int_0^{\infty} G(t) dt. \quad (4)$$

Статистическое определение времени восстановления следующее:

$$T_B^* = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{vi}}{n}, \quad (5)$$

где τ_{vi} – время, затрачиваемое на устранение i -го отказа; n – число отказов.

Величина T_B^* показывает, сколько в среднем затрачивается времени на обнаружение и устранение одного отказа при заданных условиях обслуживания, т. е. эта величина характеризует ремонтпригодность элементов ВЭУ.

Находящиеся в аварийном состоянии элементы ВЭУ подвергаются ремонту, восстанавливающему их исходные параметры, или заменяются новыми идентичными им элементами. Эти восстановительные работы требуют определенных затрат времени, поэтому восстановление работоспособности элемента ВЭУ с позиций теории надежности можно рассматривать как процесс с конечным временем восстановления. При этом вероятность того, что бесперебойность электроснабжения не будет нарушена из-за ненадежности установки, определяется по формуле

$$P_B(t) = P_0 P(t) + (1 - P_0) S(\tau) P(t - \tau), \quad (6)$$

где P_0 – вероятность исправного состояния ВЭУ в начальный момент; $P(t)$ – то же безотказной работы ВЭУ за заданное время t ; $S(\tau)$ – то же восстановления и проверки установки к моменту $\tau < t$; $P(t - \tau)$ – то же безотказной работы установки за оставшееся время $(t - \tau)$.

Если $T > \tau$, то

$$P(t) = \frac{T}{T + T_B} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (7)$$

В этом выражении величину $\frac{T}{T + T_B}$ принято называть коэффициентом готовности установки K_r , т. е. стационарной вероятностью того, что ВЭУ будет находиться в рабочем состоянии в произвольный момент времени. При этом

$$K_r = \lim K_r(t). \quad (8)$$

Выражение (7) можно переписать в виде

$$P(t) = K_r e^{-\frac{t}{T}} = K_{or}(t). \quad (9)$$

Здесь $K_{or}(t)$ – коэффициент оперативной готовности, т. е. вероятность того, что ВЭУ будет работоспособна в произвольный момент времени и безотказно проработает заданное время.

Для определения значения коэффициента оперативной готовности используется следующая статистическая оценка:

$$K_{or}^*(t) = \frac{N_t}{N_0}, \quad (10)$$

где N_0 – общее число ВЭУ в момент времени $t = 0$; N_t – число ВЭУ, находящихся в исправном состоянии в момент времени t .

Для определения значения $k_{ог}^*$ отдельной ВЭУ используется следующая статистическая оценка [3]:

$$k_{ог}^* = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{vi}}, \quad (11)$$

где t_i – i -й интервал времени исправной работы отдельной ВЭУ; t_{vi} – i -й интервал времени восстановления ВЭУ; n – число отказов ВЭУ.

Оперативное восстановление ВЭУ после появления отказов является одним из основных методов повышения надежности электроснабжения. Действия, направленные на восстановление отказавшей ВЭУ, представляют собой элемент технического обслуживания. При этом эффективность восстановления ВЭУ определяется ремонтопригодностью ее элементов, количеством обслуживающего персонала, его обученностью, наличием контрольно-измерительных средств, организацией процесса восстановления и т. д.

В этих условиях особенно актуальным является определение оптимального периода планового контроля ВЭУ и проведение технического обслуживания именно в этот оптимальный период.

Методика определения оптимального периода контроля ВЭУ. Допустим, что при периодическом выявлении неисправностей суммарное время неработоспособного состояния ВЭУ $t_{нр\Sigma}$ будет включать в себя следующие составляющие:

$$t_{нр\Sigma} = t_{к\Sigma} + nT_v + t_{нр\Sigma}, \quad (12)$$

где $t_{к\Sigma}$ – время, затрачиваемое на контроль состояния элементов ВЭУ за период эксплуатации T_3 ; n – среднее число неисправностей за тот же период; T_v – среднее время устранения одной неисправности; $t_{нр\Sigma}$ – среднее время неисправного состояния элемента ВЭУ в промежутках между проверками, обусловленное тем, что неисправности выявляются только при проверке.

Пусть t_k – среднее время, затрачиваемое на один цикл контроля; N – число проверок за период эксплуатации T_3 ; T_k – период контроля.

Тогда

$$t_{к\Sigma} = Nt_k; \quad (13)$$

$$N = \frac{T_3}{T_k}. \quad (14)$$

Среднее число неисправностей, возникающих в элементах ВЭУ в течение времени T_3 :

$$n = \lambda(T_3 - Nt_k) + \lambda_k Nt_k, \quad (15)$$

где λ_k – интенсивность отказов в режиме контроля.

Тогда суммарное время восстановления за период эксплуатации T_3

$$t_{в\Sigma} = nT_в = [\lambda(T_3 - Nt_к) + \lambda_к Nt_к]T_в. \quad (16)$$

Время неисправного состояния в промежутке между двумя соседними проверками можно определить как разность между периодом контроля и средним временем исправного состояния за этот период

$$t_к = T_к - \int_0^{T_к} e^{-\lambda t} dt = T_к - \frac{1}{\lambda}(1 - e^{-\lambda T_к}). \quad (17)$$

Если в течение времени T_3 производится N проверок, то это время

$$t_{к\Sigma} = Nt_к. \quad (18)$$

Для получения оптимального периода контроля воспользуемся коэффициентом вынужденного простоя ВЭУ, который равен отношению времени затрат на проверки и устранение неисправностей с учетом возможного нахождения установки в неисправном состоянии между проверками к общему времени работы.

Получим

$$K_n = \frac{Nt_к + T_в [\lambda(T_3 - Nt_к) + \lambda_к Nt_к] + N \left[T_к - \frac{1}{\lambda}(1 - e^{-\lambda T_к}) \right]}{T_3}. \quad (19)$$

Далее, разделив числитель и знаменатель (19) на N , получим

$$K_n = \frac{t_к + T_в [\lambda T_к + (\lambda_к - \lambda)t_к] + T_к - \frac{1}{\lambda}(1 - e^{-\lambda T_к})}{T_к}. \quad (20)$$

Оптимальное значение периода контроля может быть получено путем дифференцирования выражения (20) по длительности периода контроля $T_к$

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_n}{\partial T_к} = & -\frac{t_к}{T_к^2} - \frac{T_в}{T_к^2} [\lambda T_к + (\lambda_к - \lambda)t_к] + \\ & + \frac{T_в}{T_к} \lambda + \frac{1}{\lambda T_к^2} (1 - e^{-\lambda T_к}) - \frac{1}{T_к} e^{-\lambda T_к}. \end{aligned} \quad (21)$$

Приравняв первую производную в (21) к нулю, получаем

$$-\frac{t_к}{T_к^2} - \frac{T_в}{T_к^2} [\lambda T_к + (\lambda_к - \lambda)t_к] + \frac{T_в}{T_к} \lambda + \frac{1}{\lambda T_к^2} (1 - e^{-\lambda T_к}) - \frac{1}{T_к} e^{-\lambda T_к} = 0. \quad (22)$$

Откуда оптимальный период контроля определяется по формуле

$$T_{к,opt} = \sqrt{\frac{2t_к [1 + T_в (\lambda_к - \lambda)]}{\lambda}} \quad (23)$$

и, наконец, допустив, что $\lambda_к T_в \ll 1$, получаем

$$T_{к,opt} \approx \sqrt{\frac{2t_к}{\lambda}}. \quad (24)$$

Полученное в результате выражение (24) предлагается использовать для определения оптимального периода контроля (технического обслуживания) ВЭУ.

Пример. Далее с использованием полученных аналитических результатов и имеющихся статистических данных, зафиксированных за период эксплуатации трех ВЭУ типа N54 (табл. 1), произведем определение оптимального периода контроля их технического состояния.

В настоящее время в соответствии с действующей Инструкцией по эксплуатации, обслуживанию и ремонту [6] для ВЭУ N54 предусмотрены следующие интервалы и типы обслуживания:

- тип 2: осмотр и смазка (промежуточное обслуживание) – один раз в год;
- тип 3: главный осмотр (главное обслуживание) после 100–500 ч работы плюс каждый год.

Кроме того, после истечения срока гарантии ВЭУ, а также после пяти лет эксплуатации, а затем каждые следующие пять лет согласно этой же Инструкции [6] на установке дополнительно производится Инспекционный осмотр – тип 4.

Таким образом, в настоящее время на ВЭУ N54 плановое обслуживание выполняется два раза в год, т. е. существует система полугодового технического обслуживания. При этом каждый тип обслуживания оформляется в виде отчета, составленного в трех экземплярах, в каждом из которых делаются все необходимые записи. Отчет оформляется и подписывается персоналом, выполнившим обслуживание, и визируется представителем производителя ВЭУ, причем один экземпляр отчета всегда предоставляется владельцу установки.

Текущие отказы элементов ВЭУ, а также кратковременные отключения установок при производстве оперативных переключений в высоковольтных сетях, происходившие в период эксплуатации ВЭУ, фиксировались в журналах оперативного контроля установок. Указанные журналы хранятся непосредственно на рабочих местах у операторов ВЭУ. При этом сообщения о неисправностях с указанием отказавшего элемента, времени наступления отказа, времени нахождения ВЭУ в неработоспособном состоянии, а также времени устранения отказа, ежеквартально представляются владельцу установки.

Анализ отчетов обслуживания [7] ВЭУ N54 (серийные номера 9154, 9131 и 9132) показал, что за период с начала эксплуатации и по настоящее время на этих установках выполнено следующее количество различных видов обслуживания:

- тип 2 – 12 раз;
- тип 3 – 12 раз;
- тип 4 – 1 раз.

Определение показателей надежности элементов ВЭУ и исследование законов распределения их отказов и длительностей восстановления проводились по статистическим данным об отказах, выявленных в ходе планового контроля, изложенным в отчетах обслуживания, а также сведениям о текущих отказах, зафиксированным в журналах оперативного контроля установок в течение последних девять лет. При этом за рассматриваемый период эксплуатации были выявлены и устранены следующие представленные в табл. 2 отказы различных элементов ВЭУ.

Таблица 2

Наработка до первого отказа контролируемых элементов ВЭУ

Наименование отказавшего элемента ВЭУ	Время работы до 1-го отказа T , ч
Азимутальный датчик разворота гондолы	3336
Пропорциональный вентиль	8256
Анемоскоп (левый)	9552
Микросхема компьютера управления	17784
Анемоскоп (правый)	25080
Двигатель насоса гидравлической системы	28800
Магнитный пускатель гидравлической системы	28848
Система крепления воздушных тормозов	28896
Выключатель малого генератора	32904
Главный выключатель (ВІРАS)	34992
Двигатель масляного насоса	35184
Устройство гарантированного питания	37959
Гидравлический аккумулятор, 20 бар	41609
Гидравлический аккумулятор, 40 бар	41705
Гидравлический насос	44825
Регулируемый конец лопасти	51365
Датчик скорости ветра	55695
Датчик направления ветра	59247
Обводной выключатель (ВІРАS)	67719
Силовой кабель генератора	67863

Анализ статистических зависимостей интенсивностей отказов $\lambda(t)$ от длительности эксплуатации ВЭУ показывает, что параметр $\lambda(t)$ с увеличением длительности работы ВЭУ проявляет тенденцию к снижению (рис. 1).

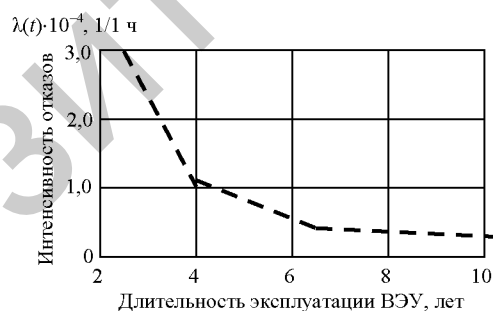


Рис. 1. Статистическая зависимость интенсивности отказов ВЭУ 9154 от длительности эксплуатации

Далее с использованием полученных данных мы можем определить оптимальный период планового контроля или интервал проведения технического обслуживания ВЭУ. Для этого на первом этапе необходимо определить величину среднего времени, затрачиваемого на один цикл контроля, t_k . При этом для ВЭУ N54 в соответствии с проведенным количеством и типами обслуживания эта величина, полученная по имеющимся данным, изложенным в отчетах обслуживания [7], составляет 67 ч. Затем для вы-

числения значения интенсивности отказов $\lambda(t)$ необходимо воспользоваться связью этого параметра со средней наработкой до первого отказа T [5]:

$$T = \frac{1}{\lambda(t)}; \quad \lambda(t) = \frac{1}{T},$$

при этом величину T определяем по имеющимся в табл. 2 данным.

Таким образом, если $T = 36081$ ч, то $\lambda = 0,277 \cdot 10^{-4}$ 1/1 ч, а при значении $t_k = 67$ ч с использованием (24) получим

$$T_{\text{к.опт}} \approx \sqrt{\frac{2t_k}{\lambda}} \approx \sqrt{\frac{2 \cdot 67}{0,277 \cdot 10^{-4}}} \approx 2199 \text{ ч.}$$

Последнее означает, что оптимальным периодом контроля или проведения технического обслуживания для ВЭУ типа N54 является интервал в 2199 ч, что составляет немногим более трех месяцев.

ВЫВОДЫ

1. Представлена методика определения оптимального периода контроля ВЭУ.
2. Получена аналитическая зависимость, показывающая, что оптимальный период контроля прямо пропорционален удвоенному времени контроля и обратно пропорционален интенсивности отказов.
3. Для обеспечения вероятности безотказной работы ВЭУ типа NORDEX N54/1000, близкой к единице, необходимо обязательное проведение планового ежеквартального технического обслуживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Удалов, С. Н. Возобновляемые источники энергии / С. Н. Удалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 432 с.
2. Roliķis, J. Effect of Wind Conditions of Site Location of Wind Turbine Generators Caused on Profitability of the Commercial Wind Energy projects / J. Roliķis. – Proceeding of the 8th International Conf. «Reliability and Statistics in Transportation and Communication», October 15–18. – Riga, 2008. – P. 265–272.
3. Installation of wind Farms in Latvia with BRC 40–500 wind turbines / J. Roliķis [et al.]. – Proceedings of the International Seminar «Wind energy in Baltic». – Riga: LATVENERGO, 1996. – P. 36–40.
4. Анищенко, В. А. Надежность систем электроснабжения / В. А. Анищенко. – УП «Технопринт», 2001. – 160 с.
5. Острейковский, В. А. Теория надежности / В. А. Острейковский. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
6. NORDEX N54/1000 kW–Mk3. Service manual. – Nordex Balcke-Dürr GmbH, Svinbaek, Denmark, 1998. – 39 p.
7. NORDEX N54 – Mk3. WTG No.: 9154, 9131, 9132 Service Report No.:1–25. – NORDEX Energy GmbH, Rostock, Germany, 1999–2008. – 253 p.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 30.10.2009