

УДК 681.3
ББК 22.18

Олег Иванович Вийтович,
аспирант,
Забайкальский государственный университет
(672039, Россия, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30)
e-mail: *Viytovich-O@mail.ru*

Коэффициент эксплуатационной надёжности как показатель эффективности ветроустановок на стадии проектирования

Рассмотрены во взаимосвязи климатические, технологические и экономические факторы, влияющие на значение коэффициента эксплуатационной надёжности, который является оценивающим показателем эффективности проектируемых ветроустановок при различных вариантах. Показатель коэффициента эксплуатационной надёжности оценки эффективности ветроустановок на стадии проектирования необходим для сравнения вариантов разрабатываемых проектов. Для определения разрабатываемых проектов выявляются необходимые факторы, которые подтверждаются параметрами, имеющими математическое значение.

Ключевые слова: климатические, технологические и экономические факторы; показатель коэффициента эксплуатационной надёжности, ветроустановка, показатель эффективности, сравнение вариантов разрабатываемых проектов, производительность ветроустановки.

Oleg Ivanovich Viytovich,
Postgraduate Student,
Transbaikal State University
(30 Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, Russia, 672039)
e-mail: *Viytovich-O@mail.ru*

Operational Reliability Coefficient as an Indicator of the Effectiveness of Wind Turbines at the Design Stage

The relationship of climatic, technological and economic factors affecting the value of the coefficient of operational reliability, which is assessing the indicator of the efficiency of the designed wind turbines in different variants are considered. Indicator ratio of operational reliability of evaluation of efficiency of wind turbines at the design stage is necessary to compare the options of the developed projects. To determine the developed projects, the relevant factors are identified, which are confirmed by the parameters that have mathematical significance.

Keywords: climatic, technological, and economic factors; the ratio of the coefficient of operational reliability, the wind installation, efficiency indicator, comparison of options developed projects, the performance of wind turbine.

При варьировании проектов ветроустановок выявляются факторы, выраженные параметрами, имеющими математическое значение. При этом анализируются прямые и косвенные связи факторов, влияющие на показатель коэффициента эксплуатационной надёжности, который является качественным результатом при сравнении вариантов проектных разработок ветроустановок (рис. 1).

В эксплуатационный период ветроустановка работает в различных условиях. Одним из них является природно-климатический фактор, который взаимосвязан с воздушными потоками, скоростью их передвижения, безветрием, влияющих на конструктивно-технологические решения описываемые разномасштабными и разноуровневыми параметрами.

Оценку вариантов проектируемых ветроустановок должны осуществлять показателем коэффициента надёжности, который находится в тесной взаимосвязи технологических, природно-климатических, экологических и экономических факторов, и объединяет несколько групп параметров, характеризующих их свойства.

Технологический фактор (Т. Ф.), $T.Ф.=F(Б.Р; Д.В; Р.С.Э; Д.л.)$; где: (Б. р.) – безотказность работы; (Д. в.) – долговечность ветроустановки; (Р. в.) – ремонтпригодность ветроустановки; (С. э.) – сохраняемость элемента; (Д. л.) – диаметр лопасти [4; 5] (рис. 2).

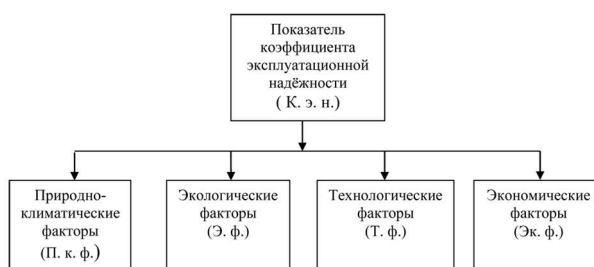


Рис. 1. Взаимосвязь факторов ветроустановок



Рис. 2. Схема технологического фактора

Климатический и экологический факторы (К. Э .Ф.), $К. Э. Ф. = F(П. В; Пр. В.; П. Т.; О. Т.; Я. П.; О. Б.; З. В.)$ (рис. 3).

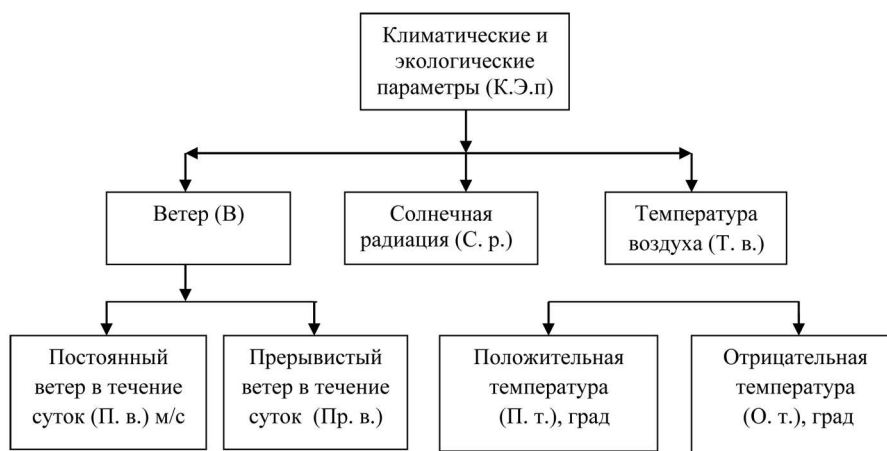


Рис. 3. Схема климатического и экологического факторов

Экономический фактор (Э. Ф.), Э. Ф. = F(П. В.; СВ). Для определения производительности ветроустановки разработана схема экономического фактора (Пр) = F(Д. л.; Пост. в.; Пр. в., Иск. п. в.) (рис. 4).

Выявленные признаки рассматриваемых факторов, обладающих прямыми связями, дают возможность разработать модель множественной регрессии. Разработана сводная схема взаимосвязи параметров технологического, климатического, экологического, экономического факторов (рис 5.)

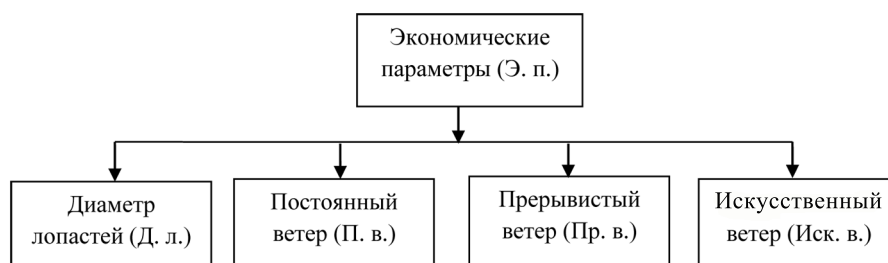


Рис. 4. Схема экономического фактора

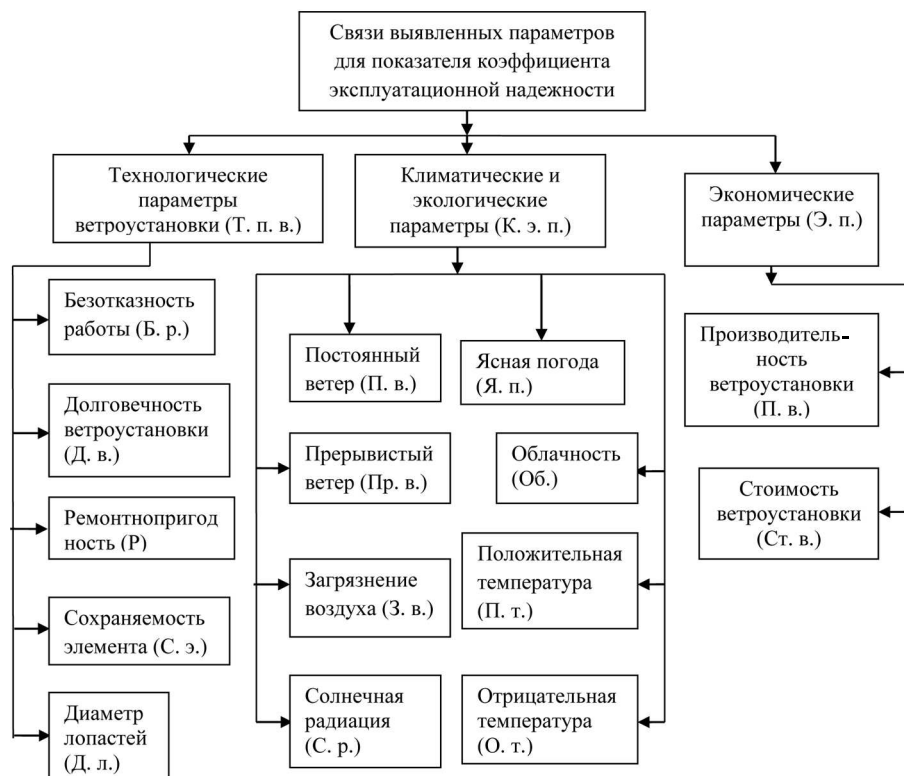


Рис. 5. Сводная схема взаимосвязи выявленных признаков в факторах

Прямые связи параметров способствуют варьированию конструктивных решений и стоимости ветроустановок при определении их производительности. Использование энергии ветра связано со многими факторами, связанные непостоянством скорости и направлением ветрового потока, а также малой концентрацией воздушного потока на единицу площади. Плотность ветрового потока невелика, и поэтому необходимо предусмотреть как диаметр, так и количество лопастей рабочего колеса.

Для определения скорости ветрового потока, при которой рабочее ветровое колесо должно развивать заданную мощность, вначале необходимо рассчитать массу воздуха [4; 5]. Обозначим через

массу m воздуха, протекающего через поперечное сечение площадью A со скоростью u . Определим массу воздуха по формуле:

$$m \equiv \rho Av \quad (1)$$

где: ρ – плотность воздуха, кг/м^3 ; A – площадь поперечного сечения лопасти ветрового колеса, м^2 ; v – скорость ветрового потока, м/с ; Кинетическая энергия ветра равна $mU^2/2$. Подставив значение получим T , получим:

$$mU^2/2 = \rho Av^3/2; \quad (2)$$

Мощность N ветроколеса определяется произведением силы F ветра на его скорость u [4; 5]. На тело произвольной формы действует сила:

$$F = C_x \rho v^2/2. \quad (3)$$

C_x – аэродинамический коэффициент,
 A – площадь миделевого сечения.

Обозначим через u скорость перемещения поверхности лопастей ветроколеса, тогда относительная скорость набегающего ветра будет $U - u$, а силу ветра определим по формуле:

$$F_x = C_x \rho A (U - u)^2/2. \quad (4)$$

Отсюда определим мощность ветроколеса по формуле [4; 5]:

$$N = C_x \rho A (U - u)^2 u/2. \quad (5)$$

Отношение работы, развиваемой движущейся поверхностью площадью сечения A , к энергии ветрового потока $\rho A U^3/2$, площадь поперечного сечения которого равна площади сечения этой поверхности, определяет значение коэффициента использования ветра по формуле:

$$C_x \rho A (U - u)^2 u/2 \quad (6)$$

$$\epsilon = (C_x \rho A (U - u)^2 u/2) / (\rho A U^3/2). \quad (7)$$

Тогда мощность рассчитаем по формуле:

$$N = v^3 \epsilon/2. \quad (8)$$

Обозначим через D диаметр ветроколеса. Для воздуха при температуре $t_b = 15$ С и давлении $P = 1,013 - 105$ (Па) мощность ветродвигателя, кВт, определим по формуле:

$$N = 0,481 D^2 v^3 \epsilon \times 10^3. \quad (9)$$

В таком случае диаметр ветроколеса определим по формуле, м:

$$D = \sqrt{2080/v^3 \epsilon} \quad (10)$$

Для других значений:

$$N_x = NP(273 + 15)/[P_1(273 + t_b)]. \quad (11)$$

Соответственно диаметр ветроколеса определим по формуле (11):

$$D = \sqrt{2080/v^3 \epsilon} \times \sqrt{P_1(273 + t_b)/P(273 + 15)}. \quad (12)$$

Скорость ветра, при котором ветроколесо должно развивает заданную мощность, определим по формуле [4; 5]:

$$w \equiv 2\pi N \times D/2; \text{ (кВт)}; \quad (13)$$

где: N – частота вращения ветроколеса – 600 об/мин;
 $\frac{D}{2}$ – радиус ветроколеса – 2 м; 4 м; 6 м; 8 м; 10 м;
 V – скорость ветрового потока, (выбираем 3 м/с).

Так как для определённой местности средняя скорость относительно постоянна, то мощность ветроустановок можно повысить за счёт увеличения площади сечения лопасти ветроколеса, через которое проходит ветровой поток по формуле [4; 5]:

$$A = \pi D^2/4. \tag{14}$$

Экономический эффект от использования энергии ветра определяется, главным образом, её количественными и качественными показателями [9; 11; 12] табл. 1

Таблица 1

Диаметр ветроколеса D(м)	Площадь сечения трёхлопастного ветроколеса A(m ²)	Мощность ветроустановки W (кВт/ч)	Скорость ветрового потока V(м/с)
2,0	3,14	0,602	6,0
4,0	12,56	1,076	7,0
6,0	28,26	1,413	8,0
8,0	50,4	1,674	9,0
10,0	78,5	1884	10,0

Для начала рассчитаем коэффициент, определяемый отношением традиционному диаметру лопастей к предлагаемому 2 м; 4 м; 6 м; 8 м; 10 м; при мощности ветроустановки 2 кВт/ч, 6 кВт/ч, 10 кВт/ч, (январь, апрель, июль, октябрь) за период 1999 г, 2000 г, 2008 г.

T – число месяца;

Y – производительность ветроустановки, кВт/ч;

X1 – коэффициент определяемый отношением традиционного диаметра лопастей (Д. т.) к предлагаемому (Д. п.), где: K2=Д. т. / Д. п.; где: (Д. т. = 1 м).

X2 – коэффициент, определяемый отношением времени продолжительности ветрового потока (тд. в. п.) к суточному времени (tc), где: K2= тд. в. п./tc. в × 100 %;

X3 – коэффициент, определяемый отношением времени прерывистого ветрового потока воздуха (тп. в. п.) к суточному времени, где: K3 = тп. в. п./ tc. в. × 100 %;

X4 – коэффициент, определяемый отношением времени искусственного ветрового потока воздуха (ти.в.п.в.) к продолжительности суточного времени (tc), где : K4 = ти.в.п.в. /tc.в. × 100 %;

X5 – диаметр лопастей (Д. л.); где: K = 5(от 1 м до 10 м);

X6 – V – скорость ветрового потока, м/с;

X7 – Y – производительность ветроустановки, кВт/ч;

Расчётные данные по расчёту множественной регрессии приведены в табл. 2.

Таблица 2

Число месяца	Коэф-т, определяемый отношением традиционного диаметра лопастей к предлагаемому	Коэф-т, определяемый отношением времени продолжительности ветрового потока к суточному времени	Коэф-т, определяемый отношением времени прерывистого ветрового потока воздуха к суточному времени	Коэф-т определяемый отношением времени искусственного потока воздуха к продолжительности суточного времени	Диаметр лопастей ветроустановки (м)	Скорость ветрового потока (м/с)V	Производительность ветроустановки кВт/ч Y
T	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
1	100,0	91,7	1,13	8,3	1,0	2,1	2,0
2	66,66	79,0	2,5	21,0	1,5	2,6	2,0
...	12,5	88,4	2,92	11,6	8,0	2,8	2,0
30	25,0	58,4	0,92	41,6	4,0	3,1	2,0

Вывод итогов, дисперсионный анализ приведены в табл. 3.

Вывод итогов

Регрессионная статистика	
Множественный R	0,94
R-квадрат	0,89
Нормированный R-квадрат	0,88
Стандартная ошибка	0,10
Анализ	30

	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	2	2,154134	1,077067	108,16111	1,29E-13
Остаток	17	0,268866	0,009958		
Итого	29	2,43			

	Коэф-т	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение	Нижние 95 %	Верхние 95 %	Нижние 95,0 %	Верхние 95,0 %
Y пересечение	2,093	0,160127	12,07072	3,43E-13	1,764426	2,421535	1,764426	2,421535
Переменная X1	0,071	0,117278	0,602476	0,551884	-0,16998	0,311293	-0,16998	0,311293
Переменная X2	0,021	0,001442	14,51139	2,86E-14	0,017966	0,023884	0,017966	0,023884

Определение мощности по данным расчёта множественной регрессии ветроустановки в течение месяца.

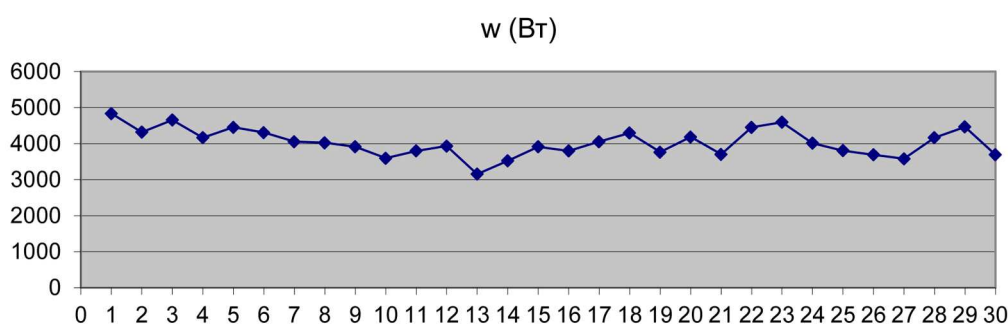


Рис. 6. График мощности ветроустановки в течение месяца

При проектировании ветроустановок необходимо использовать только те параметры факториальных признаков, которые тесно связаны между собой, зависят и влияют на результирующий показатель, находящиеся в прямой зависимости друг от друга (рис. 7).

$X-7 - Y$ – производительность ветроустановки, кВт/ч;

Множественная регрессия дает возможность прогнозировать значения одной переменной Y на основе значений двух или нескольких независимых переменных X_1, X_2, \dots, X_m . Уравнение линейной множественной регрессии имеет вид:

$$Y_{ij} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m, \quad (15)$$

где: Y_{ij} – теоретические значения результирующего значения, полученные путём постановки соответствующих значений факторных признаков; $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$ – параметры уравнения (коэффициент регрессии).

При определении параметров модели методом наименьших квадратов минимизируется сумма квадратов остатков.

$$Q_{\text{ост}} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x_1 - b_2x_2 - \dots - b_mx_m)^2 \rightarrow \min. \quad (16)$$

Рассматривая $Q_{\text{ост}}$ в качестве функции параметров b_1 и выполняя математическое преобразование (дифференцирование), получаем систему уравнений с m неизвестными (числу параметров b_i).

солнечной энергии, поступающей на горизонтальную поверхность Земли, температуру воздуха и скорость ветрового потока в данный период времени.

На стадии проектирования ветроустановок показатель коэффициента эксплуатационной надёжности служит критерием оценки эффективности ветроустановок. При значении $K_{н.в.} > 1$ ветроустановка вырабатывает максимальное количество электрической энергии для потребителей. Повышение её эффективности может быть достигнуто за счёт оптимизации конструктивных решений, связанных с применением компрессорного оборудования, а также изменения площади лопасти ветрового колеса.

Варьирование проектных решений ветроустановок осуществляется до получения значения показателя коэффициента эксплуатационной надёжности $K_{н.в.} > 1$.

Список литературы

1. Энергетика и охрана окружающей среды / под ред. Н. Г. Залогина и др. М.: Энергия, 1986. 352 с.
2. Надёжность и эффективность в технике: справ. в 10 т. Т. 5. Проектный анализ надёжности. М.: Машиностроение, 1988. 320 с.
3. Надёжность электроснабжения: сб. статей / под ред. И. А. Сыромятникова. М.-Л.: Энергия, 1967. 272 с.
4. Литвиненко А. М. Пособие по изготовлению ветрогенераторов. М.: Энергия, 1996. 120 с.
5. Агапов В. А., Карасева А. А. Ветро двигатели // Нефть. Газ. Промышленность. М., 2003. 320 с.
6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып. 23. Бурятская АССР, Читинская область. Л.: Гидрометеиздат, 1989.
7. Смирнова Н. С., Солдатова Г. А. Климат Читы. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 246 с.
8. Энергетика и охрана окружающей среды / под ред. Н. Г. Залогина [и др.]. М.: Энергия, 1986. 352 с.
9. Малышев Е. А. Приоритеты инновационного развития энергетики Забайкальского края: монография. Чита: ЗабГУ, 2012. 130 с.
10. Коровин Г. Б., Малышев Е. А. Прогнозирование развития региональных энергетических систем // Экономика региона. 2011. № 2 (26). С. 184–188.
11. Экологическая гидрология: учебник / под ред. А. П. Белоусова М.: Академкнига, 2007. 397 с.
12. Экология и экономика природопользования: учебник / под ред. Э. В. Гирусова. М.: Юнити-Дана, 2005. 591 с.
13. Экология и безопасность жизнедеятельности: учеб. пособие для вузов / под ред. Л. А. Муравья. М.: Юнити-Дана, 2000. 448 с.

References

1. Jenergetika i ohrana okruzhajushhej sredy / pod red. N. G. Zalogina i dr. M.: Jenergija, 1986. 352 s.
2. Nadjozhnost' i jeffektivnost' v tehnikе: Sprav. v 10 t. T. 5. Proektnyj analiz nadjozhnosti. M.: Mashinostroenie, 1988. 320 s.
3. Nadezhnost' jelektrosnabzhenija: sb. statej / pod red. I. A. Syromjatnikova. M.-L.: Jenergija, 1967. 272 s.
4. Litvinenko A.M. Posobie po izgotovleniju vetrogeneratorov. M.: Jenergija, 1996. 120 s.
5. Agapov V. A., Karaseva A. A. Vetrodvigateli // Neft'.Gaz. Promyshlennost'. M., 2003. 320 s.
6. Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR. Vyp. 23. Burjatskaja ASSR, Chitinskaja oblast'. L.: Gidrometeoizdat, 1989.

7. Smirnova N. S., Soldatova G. A. Klimat Chity. L.: Gidrometeoizdat, 1982. 246 s.
8. Jenergetika i ohrana okruzhajushhej sredy / pod red. N. G. Zalogina [i dr.]. M.: Jenergija, 1986. 352 s.
9. Malyshev E. A. Prioritety innovacionnogo razvitija jenergetiki Zabajkal'skogo kraja: monografija. Chita: ZabGU, 2012. 130 s.
10. Korovin G. B., Malyshev E. A. Prognozirovanie razvitija regional'nyh jenergeticheskikh sistem // Jekonomika regiona. 2011. № 2 (26). S. 184–188.
11. Jekologicheskaja gidrologija: uchebnik / pod red. A. P. Belousova M.: Akademkniga, 2007. 397 s.
12. Jekologija i jekonomika prirodnopol'zovanija: uchebnik / pod red. Je. V. Girusova. M.: Juniti -Dana, 2005. 591 s.
13. Jekologija i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti: ucheb. posobie dlja vuzov / pod red. L. A. Murav'ja. M.: Juniti -Dana, 2000. 448 s.

Статья поступила в редакцию 10.05.2014