

напряжения, которые не должны превышать допускаемые для стали Ст3, равные 65 МПа.

Таблица 2. Результаты расчетов обечайки в зависимости от толщины.

Толщина листа обечайки, мм	σ_x , Па	σ_θ , Па	σ_M , Па	Общая деформация, м
3	$-93.878 \cdot 10^6$	$-37.733 \cdot 10^6$	$83.351 \cdot 10^6$	0.00476
4	$-60.963 \cdot 10^6$	$-24.918 \cdot 10^6$	$53.199 \cdot 10^6$	0.00213
5	$-45.754 \cdot 10^6$	$-19.894 \cdot 10^6$	$39.803 \cdot 10^6$	0.00135
6	$-37.037 \cdot 10^6$	$-17.796 \cdot 10^6$	$32.913 \cdot 10^6$	0.00101

Выводы:

1. Сравнение аналитического расчета для цилиндрического бака теорией пластин и оболочек, и, численного расчета в Ansys, показало согласованные результаты. Для описания поведения засыпного материала предложен определенный тип конечного элемента по типу FLUID 80.

2. Согласно результатам, приведенным в таблице 2, рекомендованная толщина обечайки составляет 4 мм.

Список литературы:

1. Погорелов В.И. Строительная механика тонкостенных конструкций. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 528 с.
2. Светашков А.А., Куприянов Н.А., Манабаев К.К. Эффективные по времени вязкоупругие модули типа Хашина-Штрикмана. // Физическая мезомеханика, 2013. – Т. 16. – № 2. – С. 33–39.
3. Светашков А.А., Куприянов Н.А., Манабаев К.К. Приближенный алгоритм решения задач линейной вязкоупругости // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5. – № 3. – С. 292–299.
4. Рекач В.Г. Руководство по решению задач по теории упругости. – М.: Высшая школа, 1966. – 229 с.

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКЕ

*К.Н. Радюк, аспирант,
С.В. Голдаев, д.ф.-м.н., профессор
Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,
E-mail: radyuk@tpu.ru*

Повышение цен на органическое топливо, освоение северных регионов, интенсификация сельскохозяйственного производства, стимулируют использование

в системах тепло- и электроснабжения автономных объектов ветроэнергетических установок (ВЭУ). Успешное развитие ветроэнергетики зависит от решения следующих проблем: выявления энергетической ценности ветра в рассматриваемом регионе и наиболее благоприятных мест для установки ВЭУ, создания высокоэффективных ВЭУ, определения их функций в энергетике региона [1].

Влияние отмеченных факторов следует проанализировать на стадии проектирования, применяя методику прогнозирования характеристик ВЭУ. В работе [2] рассмотрена достаточно простая методика, однако не сказано, каким образом она была реализована, хотя в ней использовались специальные функции, трансцендентные уравнения. Опишем вариант усовершенствованной методики, в которой привлечены численные методы и их автоматизация на Турбо Паскале.

В зависимости от скорости ветра, электрическая мощность, вырабатываемая ВЭУ с номинальной мощностью, равна

$$N(U) = N_{nm} \phi(U), \quad (1)$$

где $\phi(U)$ – рабочая характеристика ВЭУ. Для установок с постоянной частотой вращения ветроколеса в номинальном режиме применима аппроксимация

$$\phi(U) = \begin{cases} 0, & U < U_0 \\ (U / U_0)^3, & U_0 < U \leq U_{nm} \\ 1, & U_{nm} < U \leq U_{mx} \\ 0, & U > U_{mx}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь U_0 – начальная скорость, при которой ветроколесо приводится во вращение; U_{nm} – номинальная скорость ВЭУ; U_{mx} – максимальная скорость, при которой ВЭУ выводится из рабочего режима. Например, в работе [3] использовалась ВЭУ Wincon-200. Среднегодовая скорость ветра на площадке на высоте оси ветроколеса ВЭУ составляла около 6,0 м/с. При достижении U_0 значения 4,5 м/с и сохранении этой скорости в течение более минуты управляющий контролер подавал сигнал на пуск ВЭУ. Максимальная мощность установки достигалась при $U=14$ м/с. Когда $U_{mx} > 25$ м/с ВЭУ автоматически останавливалась во избежание поломки. Если $U < 20$ м/с снова происходил пуск ВЭУ.

Экспериментальные данные по скорости ветра обобщены с использованием функции распределения Вейбулла–Гнеденко [2], предложенной для описания отказов механических систем в начальный период эксплуатации, расчета их долговечности [4]:

$$F(U) = 1 - \exp\left[-(U/c)^k\right], \quad (3)$$

где k – параметр формы, а c – параметр, близкий к средней скорости ветра U_c , значение которой можно найти по формуле

$$U_c = c\Gamma(1+1/k). \quad (4)$$

Средняя удельная мощность ветрового потока (мощность, отнесенная к единице площади ветроколеса)

$$P_{0c} = 0,5\rho c^3\Gamma(1+3/k), \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха, равная 1,2 кг/м³; $\Gamma(x)$ – гамма-функция [5].

С целью обеспечения реализации описанного алгоритма на Турбо Паскале для вычисления $\Gamma(x)$ выбрано интерполяционное выражение из [5]. Такой подход был

реализован в ходе автоматизации расчета показателей надежности объектов, подчиняющихся распределению Вейбулла-Гнеденко [6].

Номинальная мощность выбранной ВЭУ оценивается по формуле

$$P_{nm} \approx \eta_p \cdot \eta_g \cdot C_p \cdot S \cdot P_{0c}, \quad (6)$$

где S – площадь ветроколеса; $\eta_p = 0,9$ – КПД ротора ветроколеса; $\eta_g = 0,95$ – КПД электрогенератора; $C_p = 0,45$ – коэффициент мощности, учитывающей долю получаемой ветродвигателем мощности ветрового потока.

Метеослужбы регистрируют параметры ветра на стандартной высоте флюгера $h_f = 10$ м. Оси ветроколес современных ВЭУ находятся на высоте от 10 до 100 м [2, 3]. Для определения средней скорости ветра на этих высотах используется формула [2]

$$U_{hc} = U_{fc} \left(h/h_f \right)^b, \quad (7)$$

где U_{fc} – средняя скорость ветра на высоте h_f ; параметр $b = 0,144$ для открытых мест.

Средняя производительность ВЭУ за период времени T составляет

$$W_c = \varphi_c N_{nm} T, \quad (8)$$

где φ_c – среднее значение рабочей характеристики, (коэффициент располагаемой мощности ВЭУ). При использовании функции распределения Вейбулла-Гнеденко [2]

$$\varphi_c = (c/U_{nm})^3 [\gamma(a, U_{nm}) - \gamma(a, U_0)] + \exp[-(U_{nm}/c)^3] - \exp[-(U_{mx}/c)^3]. \quad (9)$$

Здесь $a = 1 + 3/k$, $\gamma(a, x)$ – неполная гамма-функция [5].

Для нахождения значений $\gamma(a, x)$ в настоящей работе применялся численный метод интегрирования по формуле Уэддла, обеспечивающий высокую точность [7].

Анализ производительности ВЭУ сводится к расчету φ_c , т.е. к статистической оценке параметров функции Вейбулла – Гнеденко k и c при заданных скоростях U_0 , U_{nm} и U_{mx} .

Результаты многолетних измерений U в данной местности для каждого месяца и в целом за год приводятся в справочнике в виде таблиц, в которых даются относительные частоты попадания скорости в данный интервал, выраженные в процентах.

При обработке статистических данных, выборочные средняя скорость ветра и дисперсия вычисляются по известным формулам [2], [5]:

$$U_{bc} = \sum_{i=1}^m w_i U_i, \quad D_b = \sum_{i=1}^m w_i (U_i - U_{bc})^2. \quad (10)$$

где m – число интервалов для U ; $n = 100$ – число измерений U за данный период; n_i – частота попадания U в i -ый интервал; $w_i = n_i/n$ – относительная частота.

Приравняв U_{bc} и D_b из (9) математическому ожиданию и дисперсии распределения Вейбулла-Гнеденко, получено трансцендентное уравнение относительно параметра k [2]

$$f(k) = \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) / \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) - \frac{D_b}{U_{bc}^2} - 1 = 0. \quad (11)$$

Решение его было осуществлено методом бисекции. Затем вычислялся параметр c .

$$c = U_{bc} / \Gamma(1 + 1/k). \quad (12)$$

С помощью критерия согласия χ^2 осуществляется проверка гипотезы о том, что результаты измерения U описываются функцией распределения Вейбулла–Гнеденко.

Наблюдаемое значение критерия согласия Пирсона вычисляется по формуле [2], [4]

$$\chi_n^2 = n \sum_{i=1}^m (w_i - p_i)^2 / p_i, \quad (13)$$

где p_i – вероятность попадания скорости ветра в i -ый интервал [2], [8]:

$$p_i = \begin{cases} F(U_{2i}) - F(U_{1i}), & i = 1, 2, \dots, m-1 \\ 1 - F(U_{1i}), & i = m. \end{cases} \quad (14)$$

При использовании критерия Пирсона число степеней свободы подсчитывается по формуле $k_c = s - 1 - r$, где s и r – число разрядов и параметров, оцениваемых по выборке [5].

Число степеней свободы r распределения χ^2 равно числу разрядов k минус число наложенных связей: $\sum_{i=1}^8 p_i = 1$; 2) $m = m_x$.

Для обеспечения автоматизации проверки гипотезы в работе [9] вместо табличных значений критических точек [4] распределения χ_p^2 была использована упрощенная аппроксимация Корниша–Фишера, обладающая достаточной точностью и справедливая для произвольного значения числа степеней свободы [10]

$$\chi_p^2(k) = k + u_p \sqrt{2k} + 2u_p(u_p - 1)/3 + u_p(u_p - 7)/(9\sqrt{2k}). \quad (15)$$

Квантиль уровня стандартного нормального распределения u_p находился по формуле [10]

$$u_p = 4,91[(1 - p)^{0,14} - p^{0,14}], \quad (16)$$

с относительной погрешностью менее 0,03%.

В публикации [11] описана автоматизированная методика рационального выбора ВЭУ малой мощности для систем автономного электроснабжения, позволяющая удовлетворить потребителя по отношению цена/качество. В ней отсутствует блок проверки статистической гипотезы о применимости распределения Вейбулла–Гнеденко, поэтому для расчета параметров k и c не привлекается трансцендентное уравнение, содержащее гамма-функцию.

В таблице 1 приведены результаты расчетов по разработанной программе (вторая строка) и представленные в работе [2] (третья строка).

Таблица 1. Результаты расчетов.

U_{bc}	D_b	k	c	χ_n^2	χ_p^2
10,452	59,09	1,38	11,442	7,73	26,09
10,453	43,63	1,62	11,672	2,57	26,22

Различие в значениях выборочной дисперсии и χ_n^2 , обусловлено, вероятно, небрежностью проведения расчетов, допущенной в работе [2]. Несущественное отличие в значениях χ_p^2 подтверждает применимость аппроксимаций (7) и (8).

Поскольку выполняется неравенство $\chi_n^2 < \chi_p^2$, следовательно, функция Вейбулла–Гнеденко может быть использована для описания рассмотренных характеристик ветра.

Расчет для высоты $h = 40$ м показал следующее: $U_c = 12,74$ м/с; $c = 14,23$ м/с;

$U_c = 23,35$ м/с. Тогда условия эффективной ВЭУ приняли вид [3]:

$$\begin{cases} U_0 < 12,74 \text{ м/с}; 12,74 \text{ м/с} < U_n \leq 23,35 \text{ м/с}; \\ U_{mx} > U_{nm}; P_{nm} \approx 0,18d^2U_{nm}^3. \end{cases}$$

Для оценки выбраны параметры, характерные для современных ВЭУ: $U_0 = 3$ м/с; $U_{nm} = 16$ м/с; $U_{mx} = 25$ м/с; $d = 50$ м [2]. Тогда $P_{nm} = 1,84$ МВт, а $\varphi_c = 0,505$, т.е. при использовании данной ВЭУ можно за год получить 50,5% от ее установленной мощности [2]. Расчет с помощью разработанной программы показал, что $\varphi_c = 0,270$, следовательно, и средняя производительность ВЭУ за период времени T будет примерно в два раза меньше, чем в [2]. В этой работе отсутствует информация о том, как вычислялись полная и неполная гамма-функции.

Результаты параметрического анализа показали следующее.

Варьирование U_0 в диапазоне возможных скоростей (1-5 м/с), практически не влияет на значения φ_c и P_c . Напротив, повышение U_{mx} от 21 до 29 м/с привело к увеличению φ_c от 0,232 до 0,296, а P_c от 0,43 до 0,55 МВт.

Таким образом, усовершенствована и реализована на Турбо Паскале методика расчета производительности ветроэнергетической установки большой мощности, позволяющая проводить параметрический анализ. В ней с помощью критерия Пирсона проводится проверка статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности скоростей воздуха по закону Вейбулла-Гнеденко, находятся параметры распределения путем численного решения трансцендентного уравнения с определением значений гамма-функции по интерполяционной формуле; в ходе определения среднего значения рабочей характеристики значения неполной гаммы-функции находятся численным интегрированием по формуле Уэддля. Вся методика или ее части могут быть использованы в проектных организациях и учебном процессе.

Список литературы:

1. Минин В.А., Степанов И.Р. Ветроэнергетический кадастр Европейского Севера СССР // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1983. – №1. – С. 106-114.
2. Константинов В.Н., Абдрахманов Р.С. Выбор ветроэнергетической установки и оценка ее производительности // Изв. вузов: Проблемы энергетики. – 2005. – № 11-12. – С. 48-52.
3. Минин В.А., Дмитриев Г.С. Опыт монтажа и эксплуатации сетевой ветроэнергетической установки около г. Мурманска // Электрические станции. – 2004. – №2. – С.71-73.
4. Голдаев С.В. Примеры и задачи по надежности систем теплоэнергоснабжения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 172 с.
5. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. – М.: Наука, 1979. – 818 с.
6. Голдаев С.В., Коровина А.М., Радюк К.Н. Автоматизация расчета показателей надежности объектов, подчиняющихся распределению Вейбулла-Гнеденко // Материалы шестнадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд. ТПУ, 2011– С. 333-335.
7. Голдаев С.В. Математическое моделирование и расчеты теплотехнических систем на ЭВМ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011 – 188 с.

8. Константинов В.Н., Абдрахманов Р.С. Оценка производительности ветроэнергетической установки с помощью функции распределения Вейбулла // Известия вузов: Проблемы энергетики. – 2006 – №11-12. – С. 76-79.

9. Голдаев С.В., Радюк К.Н. Проверка с помощью критерия Пирсона статистической гипотезы о распределении генеральной совокупности по закону Вейбулла-Гнеденко // Материалы двадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд. ТПУ, 2014. – С. 127-130.

10. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

11. Обухов С.Г., Сурков М.А., Хошнау З.П. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности // Электро. – 2011. – №2. – С. 25-30.

БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛИ ГИБКОГО ПРОЦЕССА

М.Н. Рудометкина, аспирант,

П.А. Каковкин, магистрант гр. 8ВМ41

Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30,

E-mail: mn.rud@inbox.ru

Интеллектуальный анализ процессов (process mining) предназначен для построения моделей информационных процессов преобразования ресурсов [1; 5-7; 1-14]. Исходными данными для анализа являются записи о выполнении процессов, представленные в виде файлов – логов событий. Такие логи содержат сведения о последовательности произошедших событий в некоторой информационной системе с обязательными метками времени. Логи событий могут фиксировать выполнение различных составляющих (активностей) технологических процессов, равно как и бизнес-процессов или поведения пользователей в социальных сетях. Методы process mining базируются на интеллектуальном анализе данных и позволяют строить графо-вые модели для типовых процессов с жесткой структурой. В то же время сегодня серьезное внимание в данной области уделяется гибким процессам, структура которых может изменяться как на этапе конфигурирования, так и во время выполнения.

Структура процессов может изменяться вследствие влияния следующих основных факторов:

- скрытые неформализованные знания о выполнении процесса, влияющие на последовательность его активностей;
- опыт исполнителей процесса, приводящий к изменению внутренней структуры активностей и, следовательно, изменяющий их результат;
- порядок взаимодействия (часто неформальный) исполнителей – людей либо организаций при выполнении процесса;
- территориальная распределенность процесса, влияющая на порядок взаимодействия между его составляющими.