

та- и Амурэнерго, позволило выявить следующие закономерности:

- 1) электропотребление объекта с первым рангом и ранговый коэффициент увеличиваются во времени, что свидетельствует об увеличении разрыва электропотребления между крупными и мелкими элементами системы из-за того, что крупные развиваются быстрее мелких;
- 2) заявленные филиалом ОАО «РЖД» «Энергосбыт» договорные величины электрической энергии по каждой из энергосистем в среднем на 15...20 % завышены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудрин Б.И. Введение в технетику. – Томск: Изд-во ТГУ, 1993. – 552 с.
2. Кудрин Б.И., Жилин Б.В., Лагуткин О.Е., Ошурков М.Г. Ценологическое определение параметров электропотребления многономенклатурных производств. – Тула: Приок. кн. изд-во, 1994. – 122 с.

Прогнозирование по данному методу отличается в лучшую сторону от контрольных прогнозов по наиболее распространённым экстраполяционным методам. Ошибка прогноза – 2...3 % от фактического значения.

Преимущество модели заключается также в том, что она не требует привлечения большого количества данных, как это требуется в многофакторных моделях. Данная методика обеспечивает приемлемую точность необходимую для заключения договоров с энергосистемами и позволяет находить новые пути в решении вопросов энергосбережения.

3. Кистенёв В.К., Лукьянов П.Ю., Яковлев Д.А. Прогнозирование годового электропотребления модернизированным методом наискорейшего спуска // Технические науки, технологии и экономика: Матер. III Межрегион. научно-практ. конф. – Чита: ЧГУ, 2003.

УДК 621.311.45

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ СОГЛАСОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ГРАФИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

В.З. Манусов, А.В. Седельников

Новосибирский государственный технический университет
E-mail: Manusov@merlin.power.nstu.ru

Предлагается методика расчета, учитывающая фактор неопределенности силы ветра, как энергоносителя, являющегося случайным неуправляемым природным процессом, а также предложен системный подход для согласования ветроэнергетических ресурсов с графиком нагрузки и возможности аккумулирования энергии. Принцип оценки ветроиспользования основан на теории нечетких множеств.

Введение

Важнейшим условием повышения технико-экономических показателей ветроэнергетических установок (ВЭУ) является наиболее строгое соответствие характеристик агрегата ветровому режиму – с одной стороны, и с другой – особенностям электропотребителя. В этом смысле главным является нахождение оптимальных расчетных скоростей ветра, определяющих установленную мощность, и скорости потока, при которой вступает в действие система автоматического регулирования, ограничивающая развиваемую ветроколесом мощность. Расчеты балансов поступления энергии от ветроустановки и ее расхода (потребления) за любой период или в любой момент времени являются важнейшей процедурой, позволяющей определить большинство аспектов, характеризующих эффективность ветроиспользования.

Ветроэнергетический агрегат работает по неуправляемому графику, потребитель же часто не допускает перебоев в подаче энергии или продукта

переработки, требует обеспечения его энергией по заданному графику нагрузки [1, 2].

Нечёткая логика наиболее хорошо подходит для решения задач оценки ситуации управления и принятия решений в условиях неопределённости, в тех случаях, когда человеком не могут быть даны точные количественные оценки того или иного параметра, а также, когда нахождение точного решения стандартными методами связано с большими временными, вычислительными затратами, либо требуют для своей реализации больших объёмов памяти. В связи с этим предполагается перспективным применение нечёткого анализа в области ветроэнергетики.

1. Нечеткие переменные

Представим шкалу Бофорта (табл. 1) характерными функциями принадлежности лингвистических переменных ветра [3]: для пограничных интервальных значений скоростей ветра каждой характеристики $\mu=0,5$. При $\mu=1$ значение скорости в каждом диапазоне будет равна $(v_{\max}-v_{\min})/2$.

Таблица 1. Нечеткая характеристика силы ветра

Скорость ветра, v , м/с	Принадлежность, отн. ед.	Характеристика силы ветра
1,8	0,5	Легкий
2,7	1	
3,6	0,5	
3,6	0,5	Слабый
4,7	1	
5,8	0,5	
5,8	0,5	Умеренный
7,15	1	
8,5	0,5	
8,5	0,5	Свежий
9,75	1	
11	0,5	
11	0,5	Сильный
12,5	1	
14	0,5	
14	0,5	Крепкий
15,5	1	
17	0,5	
17	0,5	Очень крепкий
19	1	
21	0,5	

При рассмотрении функции принадлежности скорости ветра (рис. 1), необходимо учитывать принадлежность на интервале от 0 до 1. Поэтому построим каждое значение нечеткой переменной, основание которой будет иметь значение $\mu=0$, и для наглядности расчетов сделаем сечения в нескольких точках значений $\mu=(0...1)$, где каждое сечение будет характеризовать уровень принадлежности α_j (рис. 2), где $j=0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$.

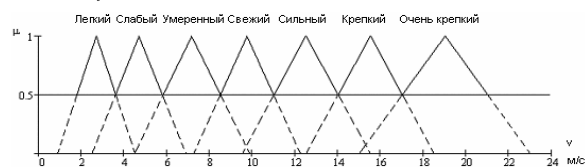


Рис. 1. Нечеткие значения ветра

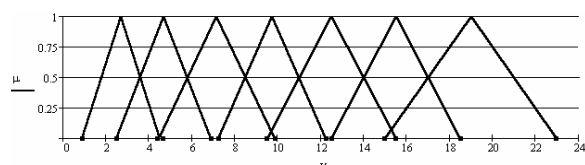


Рис. 2. Характеристика нечетких значений ветра на полном интервале принадлежности

Соответственно, для ветроустановки, технические характеристики которой указаны в табл. 2, найдем значения вырабатываемой мощности, с учетом всех уровней принадлежности. При скорости ветра u_0 и плотности воздуха ρ ветроколесо, ометающее площадь A , развивает мощность:

$$P = C_p A \frac{\rho u_0^3}{2}$$

Здесь C_p – параметр, характеризующий эффективность использования ветроколесом энергии ветрового потока и называемый коэффициентом

мощности. Коэффициент мощности C_p зависит от конструкции ветроколеса и скорости ветра. Найденные значения вырабатываемой мощности сведены в табл. 3.

Таблица 2. Технические характеристики ВЭУ

Номинальная мощность, P , кВт	1000
Диаметр ветроколеса, D , м	35
Число лопастей, k , шт.	3
Коэффициент мощности, C_p	0,38
Частота вращения, n_{min}/n_{max} , об/мин	40
Диапазон рабочих скоростей ветра, U_0 , м/с, min; nom; max	5,5; 17; 25
Номинальное напряжение, U_n , кВ	10
Номинальная частота, f_n , Гц	50
Площадь ометаемой поверхности, A , м ²	963
Высота установки гондолы ВЭУ, H , м	40
Тип генератора	АГ

Таблица 3. Зависимость вырабатываемой мощности от скорости ветра

Уровень принадлежности, отн. ед.	Скорость ветра, м/с		Характеристика скорости ветра	Значение мощности ВЭУ, кВт		Характеристика мощности ВЭУ
	0	0,25		0,5	0,75	
0	0,9	4,5	Легкий	0,146	18,31	Очень малая
	0,25	1,35		0,494	13,35	
	0,5	1,8		1,172	9,377	
	0,75	2,25		2,289	6,282	
	1	2,7		3,956	3,956	
0,25	2,5	6,9	Слабый	3,140	66,03	Малая
	0,25	3,05		5,702	51,46	
	0,5	3,6		9,377	39,21	
	0,75	4,15		14,36	29,08	
	1	4,7		20,86	20,86	
0,5	4,45	9,85	Умеренный	17,71	192,0	Средняя
	0,25	5,13		27,13	155,4	
	0,5	5,8		39,21	123,4	
	0,75	6,48		54,69	96,48	
	1	7,15		73,47	73,47	
0,75	7,25	12,25	Свежий	76,59	369,4	Больше среднего
	0,25	7,88		98,35	316,1	
	0,5	8,5		123,4	267,5	
	0,75	9,13		152,9	224,7	
	1	9,75		186,2	186,2	
1	9,5	15,5	Сильный	172,3	748,4	Большая
	0,25	10,25		216,4	645,0	
	0,5	11		267,5	551,5	
	0,75	11,75		326,0	467,5	
	1	12,5		392,5	392,5	
0	12,5	18,5	Крепкий	392,5	1000	Очень большая
	0,25	13,25		467,5	1000	
	0,5	14		551,5	987,5	
	0,75	14,75		645,0	862,4	
	1	15,5		748,4	748,4	
0,25	15	23	Очень крепкий	678,3	1000	Максимальная
	0,25	16		823,2	1000	
	0,5	17		987,5	1000	
	0,75	18		1000	1000	
	1	19		1000	1000	

2. Анализ режимов работы ВЭУ

В основу анализа режима работы ВЭУ в нечетко – определенных условиях положен принцип построения нечеткой модели, основанной на бинарных и условных нечетких отношениях [4, 5]. Первое из этих нечетких отношений строится на двух базисных множествах X и Y , а второе – на двух базисных множествах Y и Z . Здесь X – описывает множество характеристик силы ветра, взятые по шкале Бофорта, Y – множество характеристик вырабатываемой мощности, а Z – множество суточных интервалов нагрузки. Нечеткое отношение L – описывает выработку мощности ВЭУ при определенном ветре, а N – покрытие суточного графика нагрузки.

Пусть $X=\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$, $Y=\{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7\}$ и $Z=\{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6\}$. Элементы универсумов имеют следующий содержательный смысл:

1. x_1 – “легкий”, x_2 – “слабый”, x_3 – “умеренный”, x_4 – “свежий”, x_5 – “сильный”, x_6 – “крепкий”, x_7 – “очень крепкий”.
2. y_1 – “очень малая”, y_2 – “малая”, y_3 – “средняя”, y_4 – “больше среднего”, y_5 – “большая”, y_6 – “очень большая”, y_7 – “максимальная”.
3. z_1 – “0–4 ч”, z_2 – “4–8 ч”, z_3 – “8–12 ч”, z_4 – “12–16 ч”, z_5 – “16–20 ч”, z_6 – “20–24 ч”.

В качестве исходных данных принят график нагрузки (рис. 3), значение мощности указано в кВт.

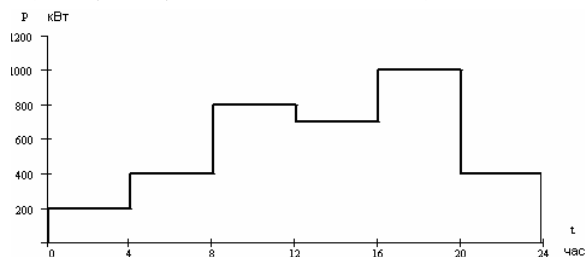


Рис. 3. График нагрузки

Для построения нечеткого отношения N покрытия суточного графика нагрузки (табл. 4) можно воспользоваться понятием условного нечеткого подмножества [5]. Тогда отношение, задающее нечеткое подмножество определится как $\mu(\langle y_i, z_j \rangle) = \max(\min(\mu(y_i/z_j), \mu(y_i)))$.

Таблица 4. Нечеткое отношение N покрытия суточного графика нагрузки, отн. ед.

Нагрузка	Покрытие суточного графика нагрузки					
	0–4	4–8	8–12	12–16	16–20	20–24
Очень малая	0,067	0,033	0,016	0,019	0,013	0,033
Малая	0,25	0,128	0,064	0,073	0,051	0,128
Средняя	0,5	0,308	0,194	0,222	0,155	0,308
Больше среднего	0,931	0,562	0,334	0,382	0,267	0,562
Большая	1	0,981	0,584	0,668	0,5	0,981
Очень большая	1	1	0,935	1	0,75	1
Максимальная	1	1	1	1	1	1

Рассмотрим, каким образом получено одно из значений принадлежности, например первое значение $\mu(\langle y_1, z_1 \rangle) = 0,067$. Вначале, для каждого уровня принадлежности α_j рассчитываем отношения мощ-

ности ВЭУ к мощности нагрузки (мощность нагрузки на интервале 0–4 (рис. 3) равна 200 кВт): $P_{вэу}/200$.

Таблица 5. Распределение мощности ветроустановки, отн. ед.

Уровень принадлежности	Значение мощности ВЭУ, кВт		Покрытие графика нагрузки	
	0	0,25	0,5	0,75
0	0,146	18,31	0,0007	0,0915
0,25	0,494	13,35	0,0024	0,067
0,5	1,172	9,377	0,0058	0,0468
0,75	2,289	6,282	0,0114	0,0314
1,0	3,956	3,956	0,0197	0,0197

Находим минимальные значения принадлежности, а именно $\min\{0, 0,0007\} = 0$, $\min\{0,25, 0,0024\} = 0,0024$, $\min\{0,5, 0,0058\} = 0,0058$, $\min\{0,75, 0,0114\} = 0,0114$, $\min\{1, 0,0197\} = 0,0197$, $\min\{0, 0,0915\} = 0$, $\min\{0,25, 0,0667\} = 0,067$, $\min\{0,5, 0,0468\} = 0,0468$, $\min\{0,75, 0,0314\} = 0,0314$.

Затем, максимальное значение из полученных будет являться искомым значением принадлежности $\mu(z)$. $\mu(z) = \max\{0, 0,0024, 0,0058, 0,0114, 0,0197, 0, 0,067, 0,0468, 0,0314\} = 0,067$.

Для построения нечеткого отношения L выработки мощности ВЭУ при заданной скорости ветра, отношение, задающее нечеткое подмножество определится как $\mu(\langle y_i, z_j \rangle) = \max(\min(\mu(y_i/z_j), \mu(y_i)))$, табл. 5. Процедура построения матрицы нечетких отношений аналогична предыдущей, за исключением того, что характеристика мощности ветра задана функцией принадлежности, которая соответственно зависит от функции принадлежности скорости ветра. Поэтому для каждого уровня принадлежности α_j , при построении искомой матрицы, необходимо учитывать каждое нечеткое значение мощности ВЭУ.

Таблица 6. Отношение выработки мощности ВЭУ, отн. ед.

Ветер	Очень малая	Малая	Средняя	Больше среднего	Большая	Очень большая	Макс.
Легкий	1	0,250	0,085	0,042	0,020	0,013	0,013
Слабый	1	1	0,317	0,162	0,079	0,051	0,051
Умеренный	1	1	1	0,461	0,241	0,155	0,155
Свежий	1	1	1	1	0,485	0,271	0,267
Сильный	1	1	1	1	1	0,542	0,500
Крепкий	1	1	1	1	1	1	0,750
Очень крепкий	1	1	1	1	1	1	1

Результат операции нечеткой композиции отношений табл. 5 и 6 может быть представлен в виде нечеткого отношения табл. 7:

Таблица 7. Покрытие суточного графика

Ветер	Время суток, ч.					
	0–4	4–8	8–12	12–16	16–20	20–24
Легкий	0,250	0,128	0,086	0,086	0,086	0,128
Слабый	0,318	0,308	0,194	0,222	0,163	0,308
Умеренный	0,500	0,461	0,334	0,382	0,267	0,461
Свежий	0,931	0,562	0,485	0,485	0,485	0,562
Сильный	1	0,981	0,584	0,668	0,542	0,981
Крепкий	1	1	0,935	1	0,750	1
Очень крепкий	1	1	1	1	1	1

3. Анализ режимов, связанных с аккумулярованием энергии

При решении вопросов, связанных с аккумулярованием энергии, производимой ветроустановкой, необходимо также учитывать, что источник энергии обладает большой изменчивостью и его режимы заранее предсказать с большой точностью трудно, а задачи разработки соответствующих методов и эффективных устройств являются одними из важнейших и сложных проблем ветроэнергетики.

В основе анализа режимов, связанных с аккумулярованием энергии, производимой ветроустановкой, рассматривается построение модели, содержащей информацию о недоиспользованной вырабатываемой мощности, с учетом покрытия графика нагрузки.

Модель может быть представлена такими нечеткими отношениями, как возможность использования “избыточной” энергии в определенный период и характеристикой силы ветра. Здесь, X – описывает множество характеристик силы ветра, взятые по шкале Бофорта, Y – множество характеристик вырабатываемой мощности, Z – множество суточных интервалов нагрузки, нечеткое отношение L – описывает выработку мощности ВЭУ при определенном ветре, N – покрытие суточного графика нагрузки, а M – недоиспользованная вырабатываемая мощность, с учетом покрытия графика нагрузки в заданный период времени.

Для построения нечеткого отношения M (табл. 8) можно также воспользоваться понятием условного нечеткого подмножества. Тогда, аналогично алгоритму нахождения нечеткого отношения N покрытия суточного графика нагрузки (табл. 4), отношение, задающее нечеткое подмножество определится как $\mu(\langle y, k_j \rangle) = \max(\min(\mu(y//k), \mu(y)), \mu(y))$, где $k_j = (P_{вэу} - P_{нагр}) / P_{вэу}$.

Если значение коэффициента k_j отрицательно, значит электрическая нагрузка покрывается не полностью и возможности аккумулярования нет. В этом случае коэффициенту присваивается нулевое значение.

Результат операции maxmin-ой композиции отношений табл. 5 и 7 может быть представлен в виде нечеткого отношения (табл. 9). При построении данной модели необходимо учесть тот фактор, что при недостаточной для покрытия нагрузки скорости ветра, аккумулярование энергии не происходит. В предыдущем отношении этот фактор учиты-

вается коэффициентом k_j , а в данном случае требуется обратиться к значениям принадлежности покрытия нагрузки (табл. 6).

Если $\mu_{L \otimes N}(\langle x_i, z_i \rangle) < 1$, то $\mu_{L \otimes N}(\langle x_i, z_i \rangle) = 0$.

Если $\mu_{L \otimes N}(\langle x_i, z_i \rangle) = 1$, то $\mu_{L \otimes N}(\langle x_i, z_i \rangle) \neq 0$, т.е. ветроустановка вырабатывает резервную мощность.

Где \otimes – композиция нечетких отношений, при помощи maxmin-ой процедуры.

Таблица 8. Недоиспользованная мощность установки, отн. ед.

Уровень использования мощности	Время суток, ч					
	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
Очень малый	0	0	0	0	0	0
Малый	0	0	0	0	0	0
Средний	0	0	0	0	0	0
Больше среднего	0,250	0	0	0	0	0
Большой	0,570	0,270	0	0	0	0,270
Очень большой	0,750	0,570	0,200	0,290	0	0,540
Максимальный	0,800	0,600	0,200	0,300	0	0,600

Таблица 9. Недоиспользованная вырабатываемая мощность, с учетом покрытия графика нагрузки, отн. ед.

Уровень использования мощности	Время суток, ч					
	0-4	4-8	8-12	12-16	16-20	20-24
Очень малый	0	0	0	0	0	0
Малый	0	0	0	0	0	0
Средний	0	0	0	0	0	0
Больше среднего	0	0	0	0	0	0
Большой	0,57	0	0	0	0	0
Очень большой	0,75	0,53	0	0,29	0	0,53
Максимальный	0,80	0,60	0,20	0,30	0	0,60

Заключение

Показано, что лингвистическая переменная ветра может быть представлена упорядоченным терм множеством нечетких переменных. Данный подход позволяет предсказать возможную выработку электрической энергии с помощью ВЭУ.

Используя методику построения нечетких отношений, представлена возможность сопоставления вырабатываемой мощности с графиком нагрузки, на основании чего можно сделать вывод об использовании или аккумуляровании электрической энергии.

Простота, наглядность и прозрачность данного подхода также создает предпосылку для нечеткого управления, что требует дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
2. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Под ред. П.П. Безруких. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.
3. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Пер. с англ.

- Н.И. Ринго. Под ред. Н.Н. Моисеева и С.А. Орловского. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
4. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Под ред. Р.Р. Ягера. – М.: Радио и связь, 1986. – 408 с.
5. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.