ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 98 1960 г.

К ВОПРОСУ О НАИВЫГОДНЕЙШЕМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ (ВЭС)

В. М. ОСИПОВ

(Представлено проф. докт. техн. наук И. Д. Кутявиным)

Под наивыгоднейшим аэродинамическим режимом ВЭС понимают установление таких чисел оборотов ветроколеса, при которых годовая выработка электроэнергии будет максимальной. В настоящее время этот вопрос решают путем сравнения различных вариантов расчета, что существенно усложняет анализ и делает такие расчеты весьма трудоемкими. Ниже излагается методика непосредственного определения параметров наивыгоднейшего режима.

Рассмотрим идеальную ВЭС, не имеющую потерь при преобразовании механической энергии в электрическую. Будем считать, что характеристика ветродвигателя задана. Предположим также, что мощность ВЭС ограничивается ее установленным (расчетным) значением. Мощность ВЭС будет равна [2]:

$$P = C_0 D^2 v^3 \xi = \varphi (v_{окр}, v), \ квт. \tag{1}$$

Уравнение кривой по продолжительности (убывающей интегральной кривой распределения) получим [2], если к выражению мощности добавим соотношение

$$t = T \int_{v}^{\infty} f(v)\, dv. \tag{2}$$

В режиме с переменной скоростью вращения, когда $v_{окр} = z_n v$, а $\xi = \xi_m$, площадь под кривой имеет максимально возможное значение. В режиме работы с постоянной скоростью вращения, задаваясь различными значениями $v_{окр}$, можно получить семейство кривых по продолжительности. На каждой из этих кривых имеется единственная точка, в которой $\xi = \xi_m$ и, следовательно,

$$P|_{v_{окр} = \text{const}} = P|_{v_{окр} = v_{ач}}.$$

Это равенство имеет место при скорости ветра $v = v_к = \frac{v_{окр}}{z_n}$; в любых других точках (т. е. при любой другой скорости ветра) будем иметь неравенство

$$P|_{v_{окр} = \text{const}} < P|_{v_{окр} = v_{ач}}.$$

Очевидно, общая точка может быть только точкой касания и, следовательно, кривая по продолжительности при $v_{окр} = v_{ar}$ является огибающей семейства кривых при $v_{окр} = \mathrm{const}$. Нам надлежит найти наивыгоднейшее значение окружной скорости, т. е. из всего семейства выбрать кривую, которая ограничивала бы максимальную площадь. Этой кривой будет соответствовать совершенно определенная точка касания и, следовательно, задача может быть сведена к нахождению этой точки. В этом состоит идея метода, который мы и применим. Представим уравнение кривых в виде

$$t = \Phi(p).$$

Раскладывая эту функцию в степенной ряд при $p = p_к$, получим

$$t = t_к + \Phi'(p_к)\frac{p - p_к}{1} + \Phi''(p_к)\frac{(p - p_к)^2}{1 \cdot 2} + \ldots, \qquad (3)$$

где $t_к$ и $p_к$ — координаты точки касания, в которой $\xi = \xi_m$. Так как функция $\Phi(p)$ непрерывна, то полученный ряд будет равномерно сходиться. Абсолютное значение членов ряда будет убывать, стремясь к нулю, следовательно, ряд будет абсолютно сходящимся. Годовая выработка энергии будет равна

$$A = \int\limits_o^{p_p} t\,dp = \int\limits_o^{p_p} t\,d(p - p_к) \quad \textit{квтч}, \qquad (4)$$

Имея в виду разложение (3) и произведя интегрирование, получим

$$A = t_к(p - p_к) + \Phi'(p_к)\frac{(p - p_к)^2}{1 \cdot 2} + \Phi''(p_к)\frac{(p - p_к)^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} + \ldots\Big|_o^{p_p} \qquad (5)$$

Осуществляя высказанную выше идею, возьмем производную по $p_к$ и приравняем ее нулю, тогда после преобразований получим

$$\frac{p - p_к}{p_к} = \sqrt{\frac{1 - \alpha(p_к)\dfrac{p_к}{3} + \ldots}{1 + \alpha(p_к)\dfrac{p_p - p_к}{3} + \ldots}}, \qquad (6)$$

где

$$\alpha(p_к) = \frac{\dfrac{d\Phi''(p_к)}{dp_к} - \Phi'''(p_к)}{\dfrac{d\Phi'(p_к)}{dp_к} - \Phi''(p_к)}. \qquad (7)$$

Наибольшее отклонение окружной скорости от наивыгоднейшей (оптимальной) в пределах $\pm 10\%$ не приводит к заметному уменьшению годовой выработки [1]. Этим определяется зона наивыгоднейшего аэродинамического режима. Величина окружной скорости окажется в указанной зоне, если подкоренное выражение будет изменяться в весьма широком интервале от 0,22 до 2,7. В силу этого обстоятельства условие максимума годовой выработки приближенно можно представить в виде

$$\frac{p_p}{p_\kappa}=\frac{2}{\left(1+\frac{\alpha}{6}-\frac{\alpha^2}{9}\right)^3}\,. \tag{8}$$

Откуда учитывая, что $p_\kappa = c_0 D^2 v_\kappa^3 \xi_m$, найдем скорость ветра, при которой коэффициент использования энергии ветра достигает максимального значения

$$v_\kappa=\left(1+\frac{\alpha}{6}-\frac{\alpha^2}{9}\right)\cdot\sqrt[3]{\frac{p_p}{2\,c_0 D^2 \xi_m}} \tag{9}$$

и, следовательно, оптимальная окружная скорость будет равна

$$v_{окр.\,опт.}=\left(1+\frac{\alpha}{6}-\frac{\alpha^2}{9}\right) z_n \sqrt[3]{\frac{p_p}{2\,c_0 D^2 \xi_m}}\,. \tag{10}$$

При изменении α в пределах от $-0{,}4$ до $+0{,}7$ величина $v_{окр.\,опт.}$ изменяется всего на 6—8 %, поэтому при ориентировочных расчетах можно считать

$$v_{окр.\,опт.}=z_n\sqrt[3]{\frac{p_p}{2\,c_0 D^2 \xi_m}} \tag{11}$$

и

$$v_\kappa = v_1=\sqrt[3]{\frac{p_p}{2\,c_0 D^2 \xi_m}}\,. \tag{12}$$

Таким образом, наивыгоднейшая окружная скорость вращения ветроколеса определяется быстроходностью ветродвигателя, расчетной мощностью, диаметром ветроколеса и максимальным значением коэффициента использования энергии ветра и весьма мало зависит от функции распределения скорости ветра (повторяемости ветра). Последнее обстоятельство особенно важно, так как позволяет довольно точно определять наивыгоднейшую скорость вращения, не имея данных о повторяемости ветра. Более точное значение $v_{окр.\,опт}$. может быть найдено, если учтем зависимость α от v_κ. Вычисляя последовательно производные по уравнению интегральной кривой в параметрической форме (т. е. по уравнению (1) и (2) и подставляя их значение в равенство (7), а также учитывая, что $\alpha=\alpha(p_\kappa)\frac{p_\kappa}{3}$), получим при распределении скорости ветра по нормальному закону

$$\alpha=-\frac{2\,(v_\kappa-v_{cp})\,v_\kappa}{9\,\sigma^2}+\frac{2\,z_n^2}{9\,(z_0-z_n)^2}\,. \tag{13}$$

Для распределения Гуллена находим [2]:

$$\alpha=\frac{2\,[a\,v_\kappa-3\,a\,v_\kappa\,\mathrm{tg}\,(a\,v_\kappa)]}{9\,\mathrm{tg}\,(a\,v_\kappa)}+\frac{2\,z_n^2}{9\,(z_0-z_n)^2}\,. \tag{14}$$

Если подставить эти значения α в (9), то получим довольно сложное уравнение, решить которое будет затруднительно. Можно поступить иначе и практически без ущерба для точности. Поскольку $v_к$ весьма мало отличается от v_1, то можно подсчитывать α при $v_к = v_1$ и это значение подставлять в (9) или (10). Зная окружную скорость, легко получить значения начальной (v_0) и расчетной (v_p) скоростей ветра. В нашем случае, когда потери отсутствуют

$$v_0 = \frac{v_{окр}}{z_0},$$

где z_0 — синхронная модульность.

$$v_p = \frac{v_{окр}}{z_p}.$$

Однако z_p неизвестно. Из (6) с учетом соотношения $\frac{v_к}{v_p} = \frac{z_p}{z_n}$ находим

$$\xi_p = \xi(z_p) = \frac{2\,\xi_m}{\left(1 + \frac{\alpha}{6} - \frac{\alpha^2}{9}\right)^3} \left(\frac{z_p}{z_n}\right)^3.$$

Точка пересечения этой кривой с характеристикой ветродвигателя $\xi(z)$ определит ξ_p и z_p. Займемся теперь вопросом об определении годовой выработки ВЭС в наивыгоднейшем аэродинамическом режиме. Из рассмотрения кривых по продолжительности видно, что с увеличением среднегодовой скорости ветра кривизна кривых уменьшается приближаясь к нулю, затем знак кривизны для начальной части кривой меняется на обратный, однако сама кривая мало отличается от прямой. Это наблюдается для обоих теоретических распределений. При достаточно высоких среднегодовых скоростях ветра замена кривых прямыми внесет сравнительно небольшую погрешность в определение годовой выработки. Такая замена равносильна взятию двух первых членов ряда (3). Если же взять четыре члена, то будем иметь высокую точность практически, во всех случаях. Таким образом, можно считать, что $t = \Phi(p)$ есть полином третьей степени и, следовательно, к интегралу (4) применима теорема, согласно которой

$$A = \int_o^{p_p} \Phi(p)\,dp = \frac{p_p}{6}\left[\Phi(o) + 4\,\Phi\left(\frac{p_p}{2}\right) + \Phi(p_p)\right]$$

или

$$A = \frac{p_p}{6}\left[t_0 + 4\,t_1 + t_p\right] \; квтч, \tag{15}$$

где t_0, t_1 и t_p — продолжительности, соответствующие скоростям ветра v_0, v_1 и v_p, которые могут быть определены по формуле (2) или кривым [2].

Можно получить гораздо более простую, но менее точную формулу для определения годовой выработки. В разложении (5) при $p_к = \frac{p_p}{2}$ главную роль будет играть первый член, т. е.

$$A \cong p_p\,t_1 \; квтч, \tag{16}$$

что равносильно замене кривой по продолжительности прямой, являющейся касательной в точке $\left(\frac{p_p}{2}, t_1\right)$. Формула пригодна для ориентировочных расчетов.

Приведенные формулы остаются справедливыми и в случае, когда общий к. п. д. ВЭС не зависит от скорости ветра, только определение начальной скорости v_0 должно быть произведено с учетом потерь. В случае переменных потерь задача существенно усложняется, однако предлагаемая методика в принципе применима и в этом случае. Анализ этого вопроса показывает, что наивыгоднейшая окружная скорость несколько увеличивается, причем тем больше, чем больше отношение номинального суммарного к. п. д. ВЭС к значению к. п. д. при $v = v_к$.

Выводы

1. Наивыгоднейшая окружная скорость вращения ветроколеса практически мало зависит от вида функции распределения скорости ветра и ее параметров, а определяется быстроходностью ветродвигателя, расчетной мощностью и величиной максимального коэффициента использования энергии ветра.

2. Предлагаемый графоаналитический метод расчета параметров наивыгоднейшего аэродинамического режима ВЭС позволяет практически с той же точностью, что и прежняя методика, но гораздо быстрее провести расчет и выявить влияние различных факторов на этом режиме. Полученные соотношения с успехом могут быть использованы для расчета режима, отличного от наивыгоднейшего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Покатаев А. И. Вопросы параллельной работы ВЭС с быстроходными ветродвигателями стабилизаторного типа через синхронный генератор на сеть. Диссертация. М., 1952.
2. Осипов В. М. Некоторые вопросы ветроэнергетических расчетов. Известия Томского политехнического института, том 94, ГЭИ, 1958.