

ВЫВОД

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований сборочного центра с шаговыми электроприводами. Были установлены связи между энергетическими, геометрическими, кинематическими и массовыми характеристиками исполнительных механизмов. Численные исследования различных законов движения исполнительных механизмов позволили определить их влияние на точность отработки траектории. Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть использованы для нахождения оптимальных законов движения рабочего органа сборочного центра с требуемыми энергетическими и механическими характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филонов И. П., Герасимов Ю. Б., Курч Л. В. Моделирование движения и управления манипуляторами в технологических процессах. Ч. 1: Математическое моделирование силовых, скоростных и энергетических связей манипуляторов, способы управления. – Мн.: БГПА, 1993. – 215 с.
2. Сафонов Ю. М. Электроприводы промышленных роботов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
3. Ивоботенко Б. А., Козаченко В. Ф. Шаговый электропривод в робототехнике. – М.: МЭИ, 1984. – 215 с.

Представлена кафедрой
технологии машиностроения

Поступила 14.02.2000

УДК 621.548.6

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**Канд. техн. наук, доц. ОЛЕШКЕВИЧ М. М.,
студ. МАКОСКО Ю. В.**

Белорусская государственная политехническая академия

Роторные ветроэнергетические установки – это ветродвигатели с вращающимися цилиндрическими или коническими роторами Флеттнера, использующие в качестве движущей силу Магнуса. Конструктивно они могут быть выполнены с горизонтальной или вертикальной осями вращения, могут работать уже при слабом ветре и, по мнению некоторых авторов, очень эффективны в использовании ветрового потока.

Ветроколесо с роторами горизонтально-осевой четырехроторной ветроэнергетической установки (ВЭУ) показано на рис. 1.

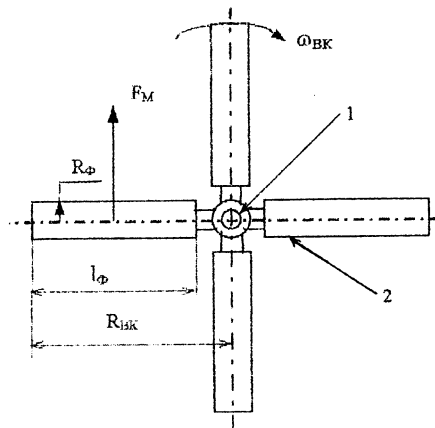


Рис. 1

Вал ветроколеса 1 соединен с электрическим генератором, а вместо лопастей с аэродинамическим профилем установлены вращающиеся цилиндры — роторы Флеттнера 2, приводимые во вращение, например, отдельными асинхронными электродвигателями, питаемыми от того же генератора или энергосистемы. Генератор соединен с энергетической системой.

При работе установки на роторы действуют силы: Магнуса, тяжести, лобового сопротивления, обусловленная движением воздуха, лобового сопротивления, обусловленная собственным движением роторов, гироскопические. Однако однонаправленный вращающий момент относительно оси ветроколеса создается только движущей силой Магнуса (рис. 2).

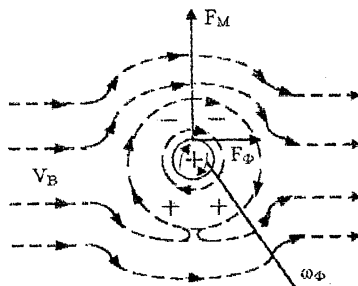


Рис. 2

Сила Магнуса, действующая на вращающийся цилиндрический ротор, расположенный в потоке, движущемся перпендикулярно его оси [1], рассчитывается по формуле

$$F_M = \Gamma \rho V_B, \quad (1)$$

где Γ — циркуляция воздуха по замкнутому контуру вокруг вращающегося цилиндрического ротора, $\text{м}^3/\text{с}$;

$$\Gamma = 2\pi R_\Phi^2 \omega_\Phi l_\Phi; \quad (2)$$

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

V_B – скорость ветра, м/с;

R_Φ и l_Φ – радиус и длина ротора, м;

ω_Φ – угловая частота вращения ротора, 1/с.

Вращающий момент ветроколеса, Н·м, определяется как

$$M_{BK} = F_M \frac{R_{BK}}{2} m, \quad (3)$$

где R_{BK} – радиус ветроколеса, м;

m – количество роторов.

Мощность, развиваемая ветроколесом, Вт, находится по

$$P_{BK} = M_{BK} \omega_{BK}, \quad (4)$$

где ω_{BK} – угловая частота вращения ротора ветроколеса, 1/с.

Мощность ветрового потока [2]

$$P_B = \rho S V_B^3 / 2, \quad (5)$$

где S – площадь, ометаемая ветроколесом, м²,

$$S = \pi R_{BK}^2. \quad (6)$$

Рассмотрим соотношения для горизонтально-осевого ветроколеса.

Условный коэффициент использования мощности ветрового потока ветроколесом без учета мощности на привод роторов при $l_\Phi = R_{BK}$ составляет

$$C'_p = \frac{P_{BK}}{P_B} = \frac{2\pi R_\Phi^2 \omega_\Phi l_\Phi \rho V_B \frac{R_{BK}}{2} m \omega_{BK}}{\rho \pi R_{BK}^2 V_B^2 / 2} = 2mz \frac{V_\Phi R_\Phi}{V_B R_{BK}}, \quad (7)$$

где $z = V_{BK}/V_B$ – быстроходность ветроколеса; ее оптимальное значение [3]

$$z_{opt} \approx 4\pi / m. \quad (8)$$

Сила сопротивления циркуляции воздуха по замкнутому контуру вокруг ротора равна

$$F_\Phi = \Gamma \rho V_\Phi. \quad (9)$$

Она обусловлена аэродинамическим сопротивлением ротора и противодействует его вращению.

Вращающий момент, создаваемый этой силой, рассчитывается

$$M_\Phi = F_\Phi R_\Phi. \quad (10)$$

Мощность вращения всех роторов (мощность собственных нужд роторной ветроэнергетической установки)

$$P_{\Phi} = m M_{\Phi} \omega_{\Phi} = m \Gamma \rho V_{\Phi}^2. \quad (11)$$

Отношение мощности собственных нужд к мощности ветроколеса в установившемся режиме

$$K_{\text{сн}} = \frac{P_{\Phi}}{P_{\text{БК}}} = \frac{2}{z} \frac{V_{\Phi}^2}{V_{\text{В}}^2}. \quad (12)$$

Действительный коэффициент использования мощности ветрового потока роторной установки

$$C_p = \frac{P_{\text{БК}} - P_{\Phi}}{P_{\text{В}}} = \frac{P_{\text{БК}} - K_{\text{сн}} P_{\text{БК}}}{P_{\text{В}}} = \frac{P_{\text{БК}}}{P_{\text{В}}} (1 - K_{\text{сн}}) = C'_p (1 - K_{\text{сн}}). \quad (13)$$

Максимальное значение действительного коэффициента использования мощности ветрового потока

$$C_{p \text{ max}} = 0,544 m z^{3/2} \frac{R_{\Phi}}{R_{\text{БК}}} \quad (14)$$

находится из условия $dC_p / d(V_{\Phi}/V_{\text{В}}) = 0$, и ему соответствует отношение скоростей

$$V_{\Phi} / V_{\text{В}} = 0,408 z^{1/2}. \quad (15)$$

Условный коэффициент использования мощности ветрового потока на основании (7) и (15) находится по формуле

$$C'_{p \text{ max}} = 0,816 m z^{3/2} \left(\frac{R_{\Phi}}{R_{\text{БК}}} \right), \quad (16)$$

и отношение мощности собственных нужд к мощности ветроколеса на основании (13), (14), (16)

$$K_{\text{сн}} = 0,33 \quad (17)$$

соответствует максимальному значению коэффициента C_p и не зависит от числа роторов и быстроходности.

Максимальный теоретически возможный коэффициент использования мощности ветрового потока идеального ветроколеса произвольной конструкции [4] равен 0,59. Поэтому условный коэффициент использования мощности роторной ветроустановки не превышает $C'_{p \text{ max}} = 0,59$. При $K_{\text{сн}} = 0,33$ по (13) находим максимальное значение действительного коэффициента $C_{p \text{ max}} \approx 0,4$ и по (16) определяем отношение радиусов $R_{\Phi} / R_{\text{БК}}$.

Расчетные значения коэффициентов для роторных ветроэнергетических установок с максимальным использованием мощности ветрового потока и с различными числами роторов приведены в табл. 1.

m	2	3	4	6
$Z = Z_{\text{опт}}$	6	4	3	2
V_{Φ} / V_B	1	0,82	0,71	0,58
$K_{\text{сн}}$	0,33	0,33	0,33	0,33
$C'_{\text{рmax}}$	0,59	0,59	0,59	0,59
$C_{\text{рmax}}$	0,4	0,4	0,4	0,4
$R_{\Phi} / R_{\text{вк}}$	0,025	0,03	0,035	0,043

Таким образом, при значительной мощности собственных нужд (33 %) и достаточно большом радиусе роторов максимальное использование мощности ветрового потока составляет 40 %, что не выше, чем у пропеллерных ветродвигателей. При такой большой мощности собственных нужд размеры, масса и стоимость генератора ветроустановки также возрастут, поскольку собственные нужды питаются от генератора. Увеличение радиуса роторов не приведет к росту коэффициента использования мощности ветрового потока и сделает установку конструктивно невыполнимой из-за слишком большой массы и момента инерции роторов. На рис. 3 показана зависимость коэффициентов использования мощности C_p и C'_p от относительной мощности собственных нужд для четырехроторной установки при оптимальной быстроходности $Z_{\text{опт}} = 3$. Из графиков видно, что коэффициент C'_p в некоторых случаях превышает величину 0,59. Это объясняется тем, что мощность к установке подводится не только со стороны ветрового потока, но и от энергетической системы для вращения роторов (рис. 4). В этом режиме ($C'_p > 0,59$; $K_{\text{сн}} > 0,33$) роторная ветроустановка из генераторного режима переходит в двигательный. Рабочими участками характеристик роторной ВЭУ являются участки на интервале $0 < K_{\text{сн}} \leq 0,33$.

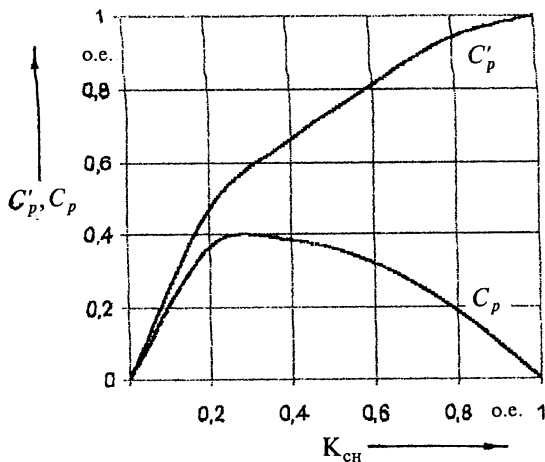


Рис. 3

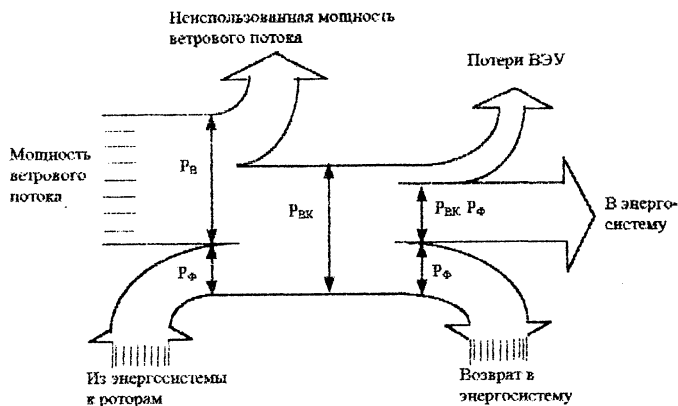


Рис. 4. Преобразование мощности в роторной ветроэнергетической установке

Потребление мощности на собственные нужды приводит к значительному завышению расчетной мощности генератора роторной ветроустановки, его размеров и стоимости. Необходимость регулирования частоты вращения роторов для поддержания оптимального значения коэффициента использования мощности потока требует применения приводных электродвигателей с регулируемой частотой вращения, устанавливаемых на подвижной части установки, работающих при больших вибрациях. Даже при использовании короткозамкнутых асинхронных двигателей их надежность совместно с электронным блоком управления в этих условиях окажется низкой. Цилиндрические или конические роторы установки даже при минимальном диаметре и использовании самых легких из прочных материалов будут обладать достаточно большим моментом инерции, большими потерями в переходных режимах и сложностью управления. Сложности могут возникнуть также при ориентировании установки по ветру из-за гироскопического эффекта вращающихся роторов. Вследствие возникновения гироскопического эффекта роторная ветроэнергетическая установка не может работать при больших скоростях ветра порядка 15–25 м/с, при которых пропеллерная ветроустановка работоспособна.

Еще более сложными будут переходные процессы в вертикально-осевой роторной ветроэнергетической установке в связи с частым реверсированием роторов – дважды за один оборот ветроколеса и пульсирующим моментом, из-за которого вся установка подвергается постоянным дополнительным вибрациям.

Использование номинальной мощности роторной ВЭУ также не отличается от других типов установок. Независимо от типа ветродвигателя коэффициент использования номинальной мощности, равный отношению действительной или расчетной годовой выработки электроэнергии к электроэнергии, которая могла бы быть выработана, если бы в течение всего года ветродвигатель развивал номинальную мощность, определяется как [2]

$$K_i = \sum_{V_{\min}}^{V_p} V_i^3 * \Delta t_i * + \sum_{V_p}^{V_{\max}} \Delta t_i *, \quad (18)$$

где V_p – расчетная скорость ветра, при которой ВЭУ развивает номинальную мощность;

V_{\min} , V_{\max} – соответственно минимальная и максимальная рабочие скорости ветра;

$V_{i*} = V_i / V_p$ – относительная скорость ветра;

Δt_{i*} – временной интервал в относительных единицах по отношению к 8760 часам (год), в течение которого скорость ветра равна V_i .

Таким образом видно, что коэффициент использования номинальной мощности зависит не от параметров ветроустановки, а от минимальной и максимальной рабочих скоростей ветра и их вероятностного распределения в течение года, а также от определяемой этими величинами годовой выработки электроэнергии.

ВЫВОД

Показатели использования мощности ветрового потока роторных ВЭУ не лучшие, чем у пропеллерных. В расчетах коэффициента использования потока необходимо учитывать мощность собственных нужд (привода роторов), так как она значительна.

Использование номинальной мощности роторных ветроэнергетических установок зависит от среднегодовой скорости ветра в данной местности, вероятностного распределения скоростей ветра в течение года и определяемой этими величинами годовой выработки электроэнергии. Коэффициенты использования номинальных мощностей роторных и пропеллерных установок одинаковы.

Роторные ветроэнергетические установки сложнее пропеллерных по конструкции и менее надежны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрелков С. П. Механика. – М.: Наука, 1975. – 559 с.
2. О л е ш к е в и ч М. М. Перспективы ветроэнергетики в Беларуси // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1999. – № 1. – С. 12–18.
3. Т в а й д е л л Д ж., У э й р А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
4. Ш е ф т е р Я. И. Ветроэнергетические агрегаты. – М.: Машиностроение, 1972. – 352 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 30.03.2000