УДК 621.315

# ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОАГРЕГАТОМ С ГЕЛИКОИДНЫМ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЕВЫМ ВЕТРОДВИГАТЕЛЕМ И СИНХРОННЫМ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ

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

*Белорусский национальный технический университет*

Целесообразность внедрения геликоидных крышных ветроэнергетических установок в условиях Беларуси обусловлена достаточно высокими среднегодовыми скоростями ветра лишь на естественных и искусственных возвышенностях, какими являются холмы, шахтные терриконы, высокие жилые и промышленные здания. Особенно удачно эти установки вписываются в систему электро- и теплоснабжения зданий благодаря компактности, сбалансированности и низкому уровню шума.

Ветроэнергетическая установка [1, 2] состоит из геликоидного ветродвигателя и соединенного с ним общим валом электрического генератора. Вертикально-осевой геликоидный ветродвигатель (рис. 1) представляет собой вертикально-лопастный ветроротор с геликоидными лопастями желобчатого профиля, периметрическим воздухозаборником-концентратором и дисковой диафрагмой, размещенной над ветроротором. Геликоидный ветродвигатель создает вертикально направленный вихрь, поэтому при создании ветроэлектрической станции требуется значительно меньшая площадка под ветроэлекростанцию по сравнению с традиционной горизонтально-осевой репеллерной конструкцией. Благодаря низкому аэродинамическому шуму геликоидного ветродвигателя возможна установка таких ветродвигателей на крышах зданий.

Для повышения надежности работы такой ветроэнергетической установки (ВЭУ), целесообразно агрегатировать ветродвигатель с прямоприводным синхронным магнитоэлектрическим генератором [3]. Исследование режима работы геликоидной крышной ВЭУ с синхронным магнитоэлектрическим генератором средней мощности и поиск оптимального закона управления нагрузкой генератора выполняется путем разработки математической модели агрегата и ее оптимизации по условиям максимума выработки электроэнергии. Электрогенератор исследуемой геликоидной ВЭУ работает на автономную активную нагрузку или через преобразователь частоты на энергосистему, в зависимости от установленной мощности ветроагрегата, места установки и условий обеспечения потребителей тепловой и электрической энергией.

Известны ВЭУ с магнитоэлектрическими синхронными генераторами для заряда аккумуляторных батарей и питания электронагревателей, а также исследования режимов работы ВЭУ с горизонтально-осевыми репеллерными ветродвигателями без учета возможности несовпадения максимумов КПД генератора и коэффициента использования энергии ветра ветродвигателя. Исследования режимов работы вертикально-осевых геликоидных ВЭУ отсутствуют.

В настоящей работе рассматриваются геликоидные ВЭУ с пространственным концентратором малой и средней мощности (20…150 кВт), которые устанавливаются на высоких строительных сооружениях (крыши цехов и административных зданий, водонапорные башни, крыши жилых многоэтажных домов). При таком подходе к внедрению геликоидных вертикально-осевых ВЭУ имеется возможность исключить строительство трансформаторных подстанций, а электрогенераторы ветроагрегатов возможно включать в местные низковольтные сети.

**Моделирование режимов работы ветроагрегата на автономную активную нагрузку.** Зависимость тока якоря от параметров синхронного магнитоэлектрического

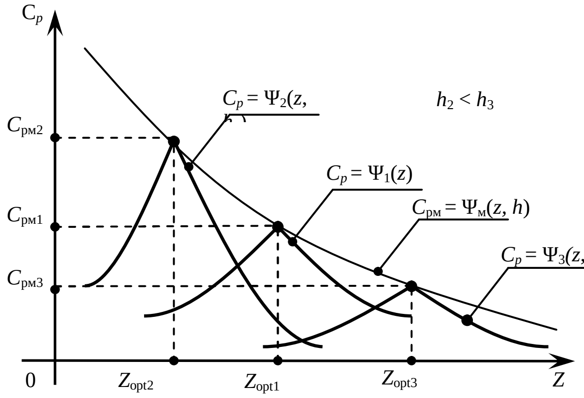


*Рис. 2.* Вид энергетических характеристик вертикально-осевого геликоидного ветродвигателя при изменении высоты установки $h$ дисковой диафрагмы: $C_p$ – коэффициент использования энергии ветра; $Z$ – быстроходность ветродвигателя

генератора на основании векторных диаграмм напряжений явнополюсных магнитоэлектрических синхронных генераторов [4] представляется в виде

$$I_1 = E_0\left((r_{а} + r_{н})^2 + x_d x_q\right)^{-1} \sqrt{(r_{а} + r_{н})^2 + x_q^2}\,, \tag{1}$$

где $r_{а}$, $r_{н}$ – активные сопротивления обмотки якоря генератора и автономной нагрузки соответственно; $x_d$, $x_q$ – полные индуктивные сопротивления обмотки якоря по продольной и поперечной осям соответственно; $E_0$ – ЭДС в обмотке якоря генератора при холостом ходе.

Мощность автономной активной нагрузки, подключенной к трехфазному генератору, на основании зависимости (1)

$$P_{н} = \frac{3}{2}(C\Phi_{м0})^2 \omega_r^2 r_{н} \left( (r_{а} + r_{н})^2 + \left(\frac{x_q p \omega_r}{2\pi f_1}\right)^2 \right) \left( (r_{а} + r_{н})^2 + x_d x_q \left(\frac{p\omega_r}{2\pi f_1}\right)^2 \right)^{-2}, \tag{2}$$

где $C$ – конструктивная постоянная электрогенератора; $\Phi_{м0}$ – магнитный поток холостого хода, создаваемый постоянными магнитами индуктора; $p$

– число полюсов генератора; $f_1$ – номинальная частота генератора; $\omega_r$ – частота вращения ротора электрогенератора.

Механические и добавочные нагрузочные потери можно принять равными $\Delta P_{\text{мех}} \equiv \omega_r^2$, $\Delta P_{\text{д.н}} \equiv \text{const}$, а добавочные потери холостого хода и магнитные потери в стали якоря соответственно $\Delta P_{\text{д.х}} \equiv \omega_r^{1,5}$, $\Delta P_{\text{м1}} \equiv \omega_r^{1,3}$. Потери в обмотке якоря при нагрузке определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{Э1}} = P_{\text{н}} \frac{r_{\text{а}}}{r_{\text{н}}}. \qquad (3)$$

Уравнение мощностей для установившегося режима работы автономного ветроагрегата с прямоприводным синхронным магнтоэлектрическим генератором имеет вид

$$\varphi(\omega_r, r_{\text{н}}) = \left(1 + \frac{r_{\text{а}}}{r_{\text{н}}}\right) f(\omega_r, r_{\text{н}}) + k_1 \omega_r^{1,3} + k_2 \omega_r^{1,5} + k_3 + k_4 \omega_r^2 - M_{\text{вд}} \omega_r = 0, \qquad (4)$$

где функция $f(\omega_r, r_{\text{н}})$ представляет собой мощность активной нагрузки и определяется по уравнению (2); коэффициенты $k_1$ и $k_2$ характеризуют магнитные потери в стали якоря и добавочные потери при холостом ходе соответственно и определяются конструктивными показателями электрогенератора; коэффициент $k_3$ также определяется конструктивными показателями генератора: $k_3 = \Delta P_{\text{д.н}}$; $M_{\text{вд}}$ – момент ветродвигателя.

**Моделирование ветродвигателя**. Вид функции вращающего момента ветродвигателя $M_{\text{вд}}$ определяется числом членов полинома, интерполирующего энергетическую характеристику ветродвигателя. Графоаналитическая обработка результатов испытаний моделей геликоидных вертикально-осевых ветродвигателей показывает, что правую нисходящую ветвь энергетической характеристики с достаточной степенью точности можно интерполировать уравнением прямой, а левую восходящую ветвь – уравнением параболы:

$$\begin{cases} M_{\text{вд}} = \frac{1}{2} S \rho v_{\text{ср}} R_{\text{вд}} \left(a_1 R_{\text{вд}} \omega_r + a_2 v_{\text{ср}}\right), \\ \frac{\omega_r R_{\text{вд}}}{v_{\text{ср}}} \geq Z_{\text{opt}}; \end{cases} \qquad (5)$$

$$\begin{cases} M_{\text{вд}} = \frac{1}{2} S \rho R_{\text{вд}} \left(b_1 R_{\text{вд}}^2 \omega_r^2 + b_2 v_{\text{ср}}\right), \\ \frac{\omega_r R_{\text{вд}}}{v_{\text{ср}}} \langle Z_{\text{opt}}, \end{cases} \qquad (6)$$

где $S$ – площадь поверхности, отметаемой ветровым потоком; $\rho$ – плотность воздуха; $v_{\text{ср}}$ – среднее значение скорости ветра; $R_{\text{вд}}$ – радиус ветродвигателя; $\omega_r$ – угловая скорость вращения веторотора; $Z_{\text{opt}}$ – быстроходность ветродвигателя, при которой имеет место максимум энергетической характеристики ветродвигателя; $a_1$, $a_2$, $b_1$, $b_2$ – коэффициенты функций, интерполирующих энергетическую характеристику ветродвигателя.

При регулировании мощности ветродвигателя посредством дисковой диафрагмы, функция момента ветродвигателя усложняется. При перемещении дисковой диафрагмы максимум энергетической характеристики ветродвигателя смещается и имеет место при другом значении быстроходности ветродвигателя (рис. 2).

Тогда уравнения вращающего момента ветродвигателя могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} M_{\text{вд}} = \frac{1}{2} S \rho v_{\text{ср}} R_{\text{вд}} \left( C_1(h) R_{\text{вд}} \omega_r + C_2(h) v_{\text{ср}} \right), \\ \frac{\omega_r R_{\text{вд}}}{v_{\text{ср}}} \geq Z_{\text{opt}}(h); \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} M_{\text{вд}} = \frac{1}{2} S \rho R_{\text{вд}} \left( C_3(h) R_{\text{вд}}{}^2 \omega_r + C_4(h) v_{\text{ср}}{}^2 \right), \\ \frac{\omega_r R_{\text{вд}}}{v_{\text{ср}}} \langle Z_{\text{opt}}(h), \end{cases} \tag{8}$$

где $C_1(h)$, $C_2(h)$, $C_3(h)$, $C_4(h)$, $Z_{\text{opt}}(h)$ – коэффициенты, зависящие от высоты расположения $h$ дисковой диафрагмы над ветроротором.

Математическая модель вращающего момента ветродвигателя может быть получена заданием функции изменения максимального значения коэффициента использования энергии ветра ветродвигателя

$$C_{pm} = \psi(h,\ Z). \tag{9}$$

Функция (9) в общем случае интерполируется полиномом второй–третьей степени. Таким образом, система уравнений (1)…(9) представляет собой математическую модель ветроагрегата на основе вертикально-осевого геликоидного ветродвигателя и синхронного магнитоэлектрического генератора с автономной активной нагрузкой.

**Оптимизация режима работы.** Для успешного численного поиска максимума функции мощности автономной активной нагрузки учитывался весь диапазон изменения коэффициента полезного действия электрогенератора и коэффициента использования энергии ветра ветродвигателя, что позволило учесть возможное несовпадение максимумов этих коэффициентов. Функция экстремума определялась как функция произведения коэффициента полезного действия генератора и коэффициента использования энергии ветра ветродвигателя. Коэффициент использования энергии ветра ветродвигателя и функция КПД электрогенератора определяются следующим образом:

$$C_p(\omega_r, v_{\text{ср}}) = K_5(V_{\text{ср}})\omega_r M_{\text{вд}}(\omega_r, v_{\text{ср}}); \tag{10}$$

$$з_{\text{г}}(\omega_r, r_{\text{н}}) = \frac{f(\omega_r, r_{\text{н}})}{f(\omega_r, r_{\text{н}}) + \sum \Delta P_{\text{г}}(\omega_r, r_{\text{н}})}\ , \tag{11}$$

коэффициент $K_5(v_{\text{ср}})$ равен

$$K_5(v_{\text{ср}}) = \left(\frac{1}{2}\rho S v_{\text{ср}}^3\right)^{-1}, \tag{12}$$

где $\sum \Delta P_{\text{г}}(\omega_r, r_{\text{н}})$ – сумма всех потерь в электрогенераторе согласно (4).

Искомая функция экстремума имеет вид

$$F(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}}) = \frac{K_5(v_{\text{ср}})\omega_r M_{\text{вд}}(\omega_r, v_{\text{ср}}) f(\omega_r, r_{\text{н}})}{f(\omega_r, r_{\text{н}}) + \sum \Delta P_{\text{г}}(\omega_r, r_{\text{н}})}\ . \tag{13}$$

С учетом (4) функция экстремума упрощается

$$F(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}}) = C_p \eta_{\text{г}} = K_5\ (v_{\text{ср}}) f(\omega_r, r_{\text{н}}). \tag{14}$$

Для нахождения экстремума образуется вспомогательная функция

$$\Phi(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}}) = F(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}}) + \lambda\varphi(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}})\ , \tag{15}$$

где λ – некоторая константа.

Условия экстремума

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \Phi(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}})}{\partial \omega_r} = 0; \\ \dfrac{\partial \Phi(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}})}{\partial r_{\text{н}}} = 0; \\ \varphi(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}}) = 0. \end{cases} \tag{16}$$

После ряда преобразований получены условия экстремума, выраженные через функцию мощности автономной активной нагрузки и уравнение связи:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \varphi(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}})}{\partial \omega_r} \dfrac{\partial f(\omega_r, r_{\text{н}})}{\partial r_{\text{н}}} = \dfrac{\partial \varphi(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}})}{\partial r_{\text{н}}} \dfrac{\partial f(\omega_r, r_{\text{н}})}{\partial \omega_r}; \\ \varphi(\omega_r, r_{\text{н}}, v_{\text{ср}}) = 0. \end{cases} \tag{17}$$

Численный поиск экстремума выполняется на основании специально разработанного программного обеспечения в математической системе MatLab, позволяющего сначала находить зависимость скорости вращения ротора $\omega_r$ от величины сопротивления $r_н$. Затем согласно разработанной математической модели находятся зависимость потерь в электрогенераторе, его КПД и коэффициента использования энергии ветра ветродвигателя от величины сопротивления нагрузки $r_н$. На основании полученных зависимостей строится функция произведения коэффициентов использования энергии ветра ветродвигателя и коэффициента полезного действия электрогенератора и находится ее экстремум. Полученные условия экстремума (17) демонстрируют возможность разработанного алгоритма численного поиска экстремума функции мощности автономной активной нагрузки.

**Моделирование и оптимизация режимов работы ветроагрегата на энергосистему через преобразователь частоты.** При работе ветроэнергетической установки на электроэнергетическую систему генератор не синхронизируется с системой, а также как и в случае режима автономной нагрузки работает при переменной частоте вращения, что позволяет оптимизировать режим его работы выбором соответствующей нагрузки. В этом случае уравнение действующего значения тока якоря имеет вид

$$I_1 = \frac{\sqrt{\left((E_0 - U_q)X_q \frac{p\omega_r}{2\pi f_1} - U_d r_a\right)^2 + \left((E_0 - U_q)r_a - U_d X_d \frac{p\omega_r}{2\pi f_1}\right)^2}}{r_a^2 + X_d X_q \frac{(p\omega_r)^2}{(2\pi f_1)^2}}$$

где $E_0$ – ЭДС в обмотке якоря генератора при холостом ходе; $U_d$, $U_q$ – составляющие напряжения генератора по осям:

$$U_d = U_c \sin\theta; \quad (19)$$

$$U_q = U_c \cos\theta, \quad (20)$$

$\theta$ – угол нагрузки синхронного генератора; $U_с$ – действующее значение напряжения энергосистемы:

$$U_c = E_0 \left( \cos\theta - \sin\theta \frac{r_a - X_d \frac{p\omega_r}{2\pi f_1} \operatorname{tg}(\theta + \varphi_p)}{r_a \operatorname{tg}(\theta + \varphi_p) - X_q \frac{p\omega_r}{2\pi f_1}} \right)^{-1}; \quad (21)$$

$\varphi_p$ – угол между действующими значениями тока и напряжения генератора, характеризующий генерацию реактивной мощности, определяется заданием коэффициента мощности генератора $\cos\varphi_p$.

ЭДС синхронного генератора

$$E_0 = C\Phi_{М0}\omega_r. \quad (22)$$

Активная мощность, выдаваемая в энергосистему:

$$P_{эс} = 3I_1U_с\cos\varphi_p = f(\omega_r, \theta, \varphi_p). \tag{23}$$

Основные потери в обмотке якоря генератора при нагрузке пропорциональны квадрату тока якоря и его сопротивлению

$$\Delta P_а = 3I_1^2 r_a. \tag{24}$$

На основании зависимостей (21) и (22)

$$\Delta P_а = \frac{r_a}{3\cos^2\varphi_p} U_с^{-2}(\omega_r, \theta, \varphi_p) f^2(\omega_r, \theta, \varphi_p), \tag{25}$$

где действующее значение напряжения сети $U_с(\omega_r, \theta, \varphi_p)$ определяется согласно уравнению (20). При работе ветрогенератора на энергосистему через преобразователь частоты уравнение мощностей (3) имеет вид:

$$\varphi(\omega_r, \theta, \varphi_p, v_{ср}) = f(\omega_r, \theta, \varphi_p)\left(1 + \frac{r_a}{3\cos^2\varphi_p} U_с^{-2}(\omega_r, \theta, \varphi_p) f(\omega_r, \theta, \varphi_p)\right) + \Delta P_a(\beta_1, \gamma) + k_1\omega_r^{1,3} + k_2\omega_r^{1,5} + k_3 + k_4\omega_r^2 - \omega_r M_{ВД}(\omega_r, v_{ср}) = 0, \tag{26}$$

где величина $\Delta P_а$ ($\beta_1$, γ) представляет собой дополнительные потери в обмотке якоря от высших гармоник, вызванные коммутацией фаз генератора при работе через преобразователь частоты и определяемые углом регулирования $\beta_1$ и коммутации вентилей γ преобразователя частоты. Потери $\Delta P_а$ ($\beta_1$, γ) равны 5…8 % основных потерь в обмотке якоря. Ветродвигатель в рассматриваемом режиме работы ветроагрегата также моделируется согласно (5)…(9). Тогда, системы уравнений (5)…(9) и (18)…(26) представляет математическую модель ветроагрегата, работающего на энергосистему через преобразователь частоты.

Оптимизация рассматриваемого режима работы должна обеспечить максимальную выработку электроэнергии ветроагрегатом. Для этого определяется максимум функции активной мощности, генерируемой в энергосистему $f(\omega_r, \theta, \varphi_p)$ с учетом уравнения связи $\varphi(\omega_r, \theta, \varphi_p, v_{ср}) = 0$. Построение функции экстремума и численный поиск ее максимума проводятся аналогично рассмотренной выше оптимизации работы ветроагрегата на автономную активную нагрузку.

Для проведения вычислительных экспериментов в качестве модели был принят синхронный генератор с тангенциально намагниченными постоянными магнитами номинальной мощностью 60 кВт, номинальным напряжением 220/380 В, числом пар полюсов $2p = 60$ и номинальной частотой 19 Гц. Номинальная частота генератора выбиралась на основе анализа потерь в стали и размеров зубцов якоря.

Параметры генератора оценивались согласно [5]. Полные индуктивные сопротивления генератора $x_d = 0{,}53$ Ом, $x_q = 1{,}1$ Ом. Активное сопротивление обмотки якоря $r_а = 0{,}1$ Ом. Механические потери $\Delta P_{мех} = 7{,}46\ \omega_r^2$ Вт. Добавочные нагрузочные потери $\Delta P_{д.н} = 375$ Вт. Магнитные потери в стали якоря $\Delta P_{м1}$ = 149 $\omega_r^{1,3}$, Вт. Добавочные потери холостого хода $\Delta P_{д.х}$ = 121 $\omega_r^{1,5}$ Вт.

Ветродвигатель был спроектирован согласно модели вертикально-осевого геликоидного ветроротора с концентратором. Радиус ветроротора $R_{вд}$ = 5 м, высота $H$ = 7,5 м. Площадь сечения концентратора $S$ = 300 м$^2$, оптимальная быстроходность $Z_{opt}$ = 2, соответствующий ей оптимальный коэффициент использования энергии ветра $C_{p\max}$ = 0,4. Коэффициенты интерполирующих полиномов согласно уравнениям (4)…(8): $a_1$ = –0,117; $a_2$ = 0,41; $b_1$ = 0,82; $b_2$ = –3,1. Диапазон рабочих скоростей ветра при отсутствии регулирования площади концентратора составляет 4…10 м/с. Вычислительные эксперименты проводились в математической системе MatLab согласно разработанной математической модели и методике расчета. Результаты расчетов представлены в табл. 1, 2.

В табл. 1 представлены результаты экспериментов для режима работы ВЭУ на автономную активную нагрузку. В зависимости от скорости ветра определены значения оптимальной нагрузки, величина активной мощности, отдаваемой ВЭУ при такой нагрузке, а также значения коэффициента использования энергии ветра и КПД генератора. Установлено, что при оптимальном управлении нагрузкой при скоростях ветра 7…10 м/с коэффициент использования энергии ветра $C_p$ = 0,326…0,336 и КПД генератора 90,0…92,46 % , что превосходит показатели даже горизонтально-осевых рипеллерных ВЭУ.

В табл. 2 представлены результаты экспериментов для режима работы ВЭУ на энергосистему через преобразователь частоты при переменной скорости вращения ветродвигателя в зависимости от скорости ветра. Для каждой скорости ветра рассчитаны оптимальные значения частоты и напряжения на входе управляемого выпрямителя, что обеспечивает максимальную выработку электроэнергии ветрагрегатом. Таким образом, в зависимости от места внедрения геликоидной ВЭУ и ее режима работы может быть осуществлен соответствующий закон управления, полученный на основании разработанных математических моделей и программного обеспечения. Такой закон управления позволяет обеспечить максимальную выработку электроэнергии во всем диапазоне расчетных скоростей ветра, обеспечить устойчивость работы ветроагрегата и осуществляется посредством задания оптимального значения автономной активной нагрузки или заданием оптимальных значений частоты и напряжения на входе управляемого выпрямителя при работе ветрогенератора на энергосистему.

В результате вычислительных экспериментов также установлено, что целесообразно проектировать генератор на номинальное напряжение 380/660 В с тем, чтобы получить на выходе инвертора ток частотой 50 Гц и напряжение 220/380 В. Такой подход к проектированию электрогенератора геликоидного ветроагрегата не требует наличия силового повышающего трансформатора для включения ВЭУ в местные низковольтные сети.

*Таблица 1*

**Результаты вычислительных экспериментов для режима работы ветроагрегата на автономную активную нагрузку**

| Значение средней скорости | Значение оптимальной автономной нагруз- | Активная мощность, отдаваемая ветроагрегатом при оптимальной | Коэффициент использования энергии ветра $C_p$, | КПД генератора $\eta_г$, % |
|---|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ветра $v_{ср}$, м/с | ки $r_{opt}$, Ом | нагрузке $P_{opt. н.}$, кВт | о. е. | |
| 7 | 3,0 | 20,50 | 0,332 | 90,0 |
| 8 | 2,5 | 31,120 | 0,336 | 91,17 |
| 9 | 2,3 | 43,560 | 0,326 | 92,46 |
| 10 | 2,0 | 60,0 | 0,329 | 91,08 |

*Таблица 2*

**Результаты вычислительных экспериментов для режима работы ветроагрегата на энергосистему через преобразователь частоты, $v_{ср} \le 10$ м/с, cosφ = 1**

| Значение средней скорости ветра $v_{ср}$, м/с | Оптимальное задаваемое значение частоты $f_1$, Гц | Оптимальное задаваемое значение напряжения $U_1$, В | Мощность генерируемая в ЭС $P_{эс}$, кВт | КПД генератора $\eta_г$, о.е. | Функция экстремума $F$, о. е. | Коэффициент использования энергии ветра $C_p$, о. е. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | 6,96 | 104,0 | 3,43 | 0,79 | 0,28 | 0,354 |
| 5 | 8,02 | 199,5 | 7,36 | 0,87 | 0,31 | 0,356 |
| 6 | 9,88 | 145,0 | 13,20 | 0,90 | 0,32 | 0,355 |
| 7 | 11,65 | 175,46 | 21,36 | 0,919 | 0,32 | 0,348 |
| 8 | 13,7 | 204,27 | 32,24 | 0,928 | 0,33 | 0,355 |
| 9 | 15,0 | 234,0 | 46,20 | 0,936 | 0,333 | 0,355 |
| 10 | 16,9 | 267,0 | 63,70 | 0,94 | 0,335 | 0,356 |

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны математическая модель и программное обеспечение для исследования и оптимизации выработки электроэнергии ветроагрегатом с геликоидным вертикально-осевым ветродвигателем и синхронным магнитоэлектрическим генератором.

2. Разработана методика построения закона управления ветроагрегатом с геликоидным вертикально-осевым ветродвигателем и синхронным магнитоэлектрическим генератором для обеспечения максимальной выработки электроэнергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2178830 РФ, МКИ С 2 7F 03 D 3/00. Ветроэнергетическая установка / Н. А. Лаврентьев. – Опубл. 27.01.2002 // Бюл. – 2002. – № 3.

2. Заявка на изобретение № 20030243 от 18.03.2003. Ветроэнергетическая установка / Н. А. Лаврентьев, Ю. Н. Лаврентьева, Ю. В. Макоско, В. И. Васильченко.

3. Заявка на изобретение № 20030828 от 27.08.2003. Синхронная машина с постоянными магнитами / М. М. Олешкевич, В. М. Олешкевич, Ю. В. Макоско.

4. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

5. Шафранский В. И. Реакция якоря синхронной машины с тангенциально намагниченными магнитами // Энергетика… (Изв. высш. учебн. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2004. – № 1.

Предоставлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 11.11.2004