

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 площадь под ветроэлектростанцию 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 можно включать в местные низковольтные сети.

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

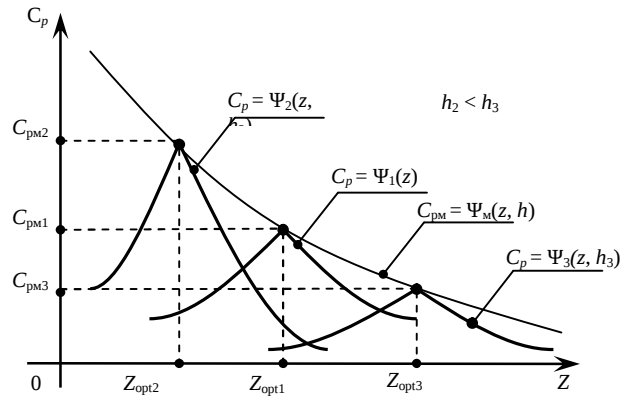


Рис. 2. Вид энергетических характеристик вертикально-осевого геликоидного ветродвигателя при изменении высоты установки h дисковой диафрагмы: C_p – коэффициент использования энергии ветра; Z – быстроходность ветродвигателя

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

$$I_1 = E_0 \left((r_a + r_n)^2 + x_d x_q \right)^{-1} \sqrt{(r_a + r_n)^2 + x_q^2}, \quad (1)$$

где r_a , r_n – 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)

$$P_n = \frac{3}{2} (C \Phi_{m0})^2 \omega_r^2 r_n \left((r_a + r_n)^2 + \left(\frac{x_q p \omega_r}{2\pi f_1} \right)^2 \right) \left((r_a + r_n)^2 + x_d x_q \left(\frac{p \omega_r}{2\pi f_1} \right)^2 \right)^{-2}, \quad (2)$$

где C – конструктивная постоянная электрогенератора; Φ_{m0} – магнитный поток холостого хода, создаваемый постоянными магнитами индуктора; p

– число полюсов генератора; f_1 – номинальная частота генератора; ω_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

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

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

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

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. Графо-аналитическая 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:

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

$$\begin{cases} M_{\text{вд}} = \frac{1}{2} S \rho R_{\text{вд}} (b_1 R_{\text{вд}}^2 \omega_r^2 + b_2 v_{\text{ср}}), \\ \frac{\omega_r R_{\text{вд}}}{v_{\text{ср}}} < Z_{\text{опт}}, \end{cases} \quad (6)$$

где S – площадь поверхности, отмечаемой ветровым потоком; ρ – плотность воздуха; $v_{\text{ср}}$ – среднее значение скорости ветра; $R_{\text{вд}}$ – радиус ветродвигателя; ω_r – угловая скорость вращения ветроротора; $Z_{\text{опт}}$ – быстроход-

ность 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:

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

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

где $C_1(h), C_2(h), C_3(h), C_4(h), Z_{opt}(h)$ – 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

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

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:

$$C_p(\omega_r, v_{cp}) = K_5(V_{cp})\omega_r M_{вд}(\omega_r, v_{cp}); \quad (10)$$

$$z_r(\omega_r, r_n) = \frac{f(\omega_r, r_n)}{f(\omega_r, r_n) + \sum \Delta P_r(\omega_r, r_n)}, \quad (11)$$

коэффициент $K_5(v_{cp})$ равен

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

где $\sum \Delta P_r(\omega_r, r_n)$ – сумма всех потерь в электрогенераторе согласно (4).

Искомая функция экстремума имеет вид

$$F(\omega_r, r_n, v_{cp}) = \frac{K_5(v_{cp})\omega_r M_{вд}(\omega_r, v_{cp})f(\omega_r, r_n)}{f(\omega_r, r_n) + \sum \Delta P_r(\omega_r, r_n)}. \quad (13)$$

С учетом (4) функция экстремума упрощается

$$F(\omega_r, r_n, v_{cp}) = C_p \eta_r = K_5(v_{cp})f(\omega_r, r_n). \quad (14)$$

Для нахождения экстремума образуется вспомогательная функция

$$\Phi(\omega_r, r_n, v_{cp}) = F(\omega_r, r_n, v_{cp}) + \lambda \varphi(\omega_r, r_n, v_{cp}), \quad (15)$$

где λ – некоторая константа.

Условия экстремума

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi(\omega_r, r_n, v_{cp})}{\partial \omega_r} = 0; \\ \frac{\partial \Phi(\omega_r, r_n, v_{cp})}{\partial r_n} = 0; \\ \varphi(\omega_r, r_n, v_{cp}) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

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

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi(\omega_r, r_n, v_{cp})}{\partial \omega_r} \frac{\partial f(\omega_r, r_n)}{\partial r_n} = \frac{\partial \varphi(\omega_r, r_n, v_{cp})}{\partial r_n} \frac{\partial f(\omega_r, r_n)}{\partial \omega_r}; \\ \varphi(\omega_r, r_n, v_{cp}) = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Численный поиск экстремума выполняется на основании специально разработанного программного обеспечения в математической системе MatLab, позволяющего сначала находить зависимость скорости вращения

ротора ω_r от величины сопротивления r_n . Затем согласно разработанной математической модели находятся зависимость потерь в электрогенераторе, его КПД и коэффициента использования энергии ветра ветродвигателя от величины сопротивления нагрузки r_n . 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

$$I_1 = \frac{\sqrt{\left((E_0 - U_q)X_q \frac{p\psi_r}{2pf_1} - U_d r_a\right)^2 + \left((E_0 - U_q)r_a - U_d X_d \frac{p\psi_r}{2pf_1}\right)^2}}{r_a^2 + X_d X_q \frac{(p\psi_r)^2}{(2pf_1)^2}}$$

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

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

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

θ – угол нагрузки синхронного генератора; U_c – действующее значение напряжения энергосистемы:

$$U_c = E_0 \left(\frac{\cos \theta - \sin \theta \frac{r_a - X_d \frac{p\psi_r}{2pf_1} \operatorname{tg}(\theta + \varphi_p)}{r_a \operatorname{tg}(\theta + \varphi_p) - X_q \frac{p\psi_r}{2pf_1}}}{\cos \theta - \sin \theta \frac{r_a - X_d \frac{p\psi_r}{2pf_1} \operatorname{tg}(\theta + \varphi_p)}{r_a \operatorname{tg}(\theta + \varphi_p) - X_q \frac{p\psi_r}{2pf_1}}} \right)^{-1}; \quad (21)$$

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

ЭДС синхронного генератора

$$E_0 = C \Phi_{M0} \omega_r. \quad (22)$$

Активная мощность, выдаваемая в энергосистему:

$$P_{\text{эс}} = 3I_1 U_c \cos \varphi_p = f(\omega_r, \theta, \varphi_p). \quad (23)$$

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

$$\Delta P_a = 3I_1^2 r_a. \quad (24)$$

На основании зависимостей (21) и (22)

$$\Delta P_a = \frac{r_a}{3 \cos^2 \varphi_p} U_c^{-2}(\omega_r, \theta, \varphi_p) f^2(\omega_r, \theta, \varphi_p), \quad (25)$$

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

$$\begin{aligned} \varphi(\omega_r, \theta, \varphi_p, v_{\text{ср}}) = f(\omega_r, \theta, \varphi_p) & \left(1 + \frac{r_a}{3 \cos^2 \varphi_p} U_c^{-2}(\omega_r, \theta, \varphi_p) f^2(\omega_r, \theta, \varphi_p) \right) + \Delta P_a(\beta_1, \gamma) + \\ & + k_1 \omega_r^{1,3} + k_2 \omega_r^{1,5} + k_3 + k_4 \omega_r^2 - \omega_r M_{\text{вд}}(\omega_r, v_{\text{ср}}) = 0, \end{aligned} \quad (26)$$

где величина $\Delta P_a(\beta_1, \gamma)$ представляет собой дополнительные потери в обмотке якоря от высших гармоник, вызванные коммутацией фаз генератора при работе через преобразователь частоты и определяемые углом регулирования β_1 и коммутации вентиля γ преобразователя частоты. Потери $\Delta P_a(\beta_1, \gamma)$ равны 5...8 % основных потерь в обмотке якоря. Ветроагрегат 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 $\varphi(\omega_r, \theta, \varphi_p, v_{\text{ср}}) = 0$. 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 $r_a = 0,1$ Ом. Механические потери $\Delta P_{\text{мех}} = 7,46 \omega_r^2$ Вт. Добавочные нагрузочные потери $\Delta P_{\text{д.н}} = 375$ 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.

Ветродвижитель был спроектирован согласно модели вертикально-осевого геликоидного ветроротора с концентратором. Радиус ветроротора $R_{вд} = 5$ м, высота $H = 7,5$ м. Площадь сечения концентратора $S = 300 \text{ м}^2$, оптимальная быстроходность $Z_{опт} = 2$, соответствующий ей оптимальный коэффициент использования энергии ветра $C_{рmax} = 0,4$. 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 ветроагрегатом. 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 нагрузки	Активная мощность, отдаваемая ветроагрегатом при оптимальной	Коэффициент использования энергии ветра C_p ,	КПД генератора η_g , %
---------------------------	--	--	---	-----------------------------

ветра v_{cp} , 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, $v_{cp} \leq 10$ м/с, $\cos\varphi = 1$

Значение средней скорости ветра v_{cp} , 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 η_g , 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. – Оpubл. 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. Шифранский 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