

УДК 620.91**И.Х. Хайруллин, А.М. Якупов****МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕТРОУСТАНОВКИ
КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА**

Уфимский государственный авиационный технический университет

Разрабатывается математическая модель для новой конструктивной схемы ветроустановки колебательного типа, предполагающей использование паруса и синхронного генератора возвратно-поступательного движения. Данная ветроустановка позволяет извлекать энергию при низких скоростях ветра и независимо от его направления. Представлено описание конструктивной схемы ветроустановки колебательного типа и принятые допущения при разработке математической модели. При разработке математической модели учтено сопротивление воздуха, которое зависит от температуры окружающей среды, упругость пружины, сопротивление ветровому потоку различных форм паруса. Разработанная математическая модель может быть применена при дальнейшей эксплуатации ветроустановки колебательного типа в случае внедрения в производство.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, ветроустановка колебательного типа, ветроэнергетика, математическая модель, синхронный генератор возвратно-поступательного движения.

I. Введение

Важной практической задачей при развитии альтернативной энергетики является повышение КПД современных ветроустановок (ВУ). Одним из путей ее решения является разработка новых конструкций ВУ [1]. В данном случае авторами предлагается применение колебательных ВУ (КВУ), которые представлены на рис. 1. КВУ имеют ряд преимуществ по сравнению с вращающимися ВУ: упрощение конструкции ветряной электростанции, отсутствие редуктора и минимизация потерь энергии.

Для успешного проектирования, строительства и эксплуатации подобных КВУ необходимо точное описание физических процессов в ВУ. Поэтому создание математической и имитационной модели является актуальной научно-технической задачей.

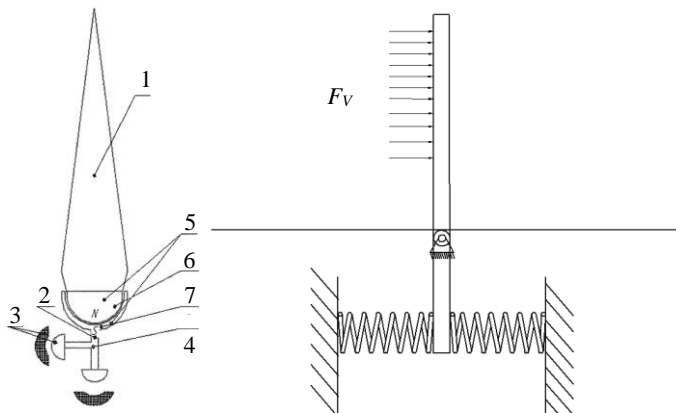


Рис. 1. Расчетная схема КВУ

II. Конструкция КВУ

Рассмотрим элементы предлагаемой конструкции КВУ [2]. Это рабочий орган 1, выполненный в виде упругого элемента, связанного магнитной связью с преобразователем энергии 2, выполненный в виде генератора возвратно-поступательного движения, состоящего из активной системы 3 и стержня 4. Устройство защиты от запредельных ветровых нагрузок 5 (рис. 2) состоит из первого и второго постоянных магнитов сферической формы 6 и 7. Они расположены разноименными полюсами относительно друг друга. Стержень 4 жестко соединен со вторым постоянным магнитом сферической формы 7, а рабочий орган 1, выполненный в виде упругого элемента, жестко соединен с первым постоянным магнитом сферической формы 6, а также пружины 8.

Опишем работу предложенной ветроэнергетической установки. При воздействии потоком текучей среды (жидкости или газа) на рабочий орган 1, он начинает колебаться. Колебания при этом передаются на первый постоянный магнит сферической формы 6, который притянут ко второму постоянному магниту сферической формы 7. За счет этого колебания передаются на стержень 4 преобразователя энергии 2, выполненного в виде генератора возвратно-поступательного движения (ГВПД), который начинает вырабатывать электрическую энергию. Колебания обеспечиваются пружиной 8.

Таким образом, предлагаемая конструктивная схема позволяет расширить функциональные возможности благодаря введению восприятия потока среды во всех координатных плоскостях и минимизации потерь энергии за счет использования магнитного устройства защиты от запредельных ветровых нагрузок.

В результате повышается коэффициент полезного действия и энергетическая эффективность ветроэнергетической установки. Реальная модель КВУ представлена в виде расчетной схемы (рис. 1). Сила, воспринимаемая предлагаемой ветроустановкой F_B , определяется выражением [2]:

$$F_B = C_x \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} (V_K^2 - V_H^2) \cdot \cos \beta, \quad (1)$$

где C_x – коэффициент сопротивления тела ветровому потоку в зависимости от формы тела, ρ – плотность воздуха, S – площадь паруса, V_K – конечная скорость ветра, V_H – начальная скорость ветра, β – угол атаки ветра на парус.

III. Математическая модель КВУ

При решении данной задачи вводятся следующие допущения:

- парус отклоняется на малые углы;
- ветровое течение имеет ламинарный характер;
- магнитная проницаемость немагнитного рабочего зазора ГВПД равна проницаемости вакуума μ_0 , магнитная проницаемость постоянных магнитов $\mu_0 = \text{const}$;
- потоки рассеяния не учитываются;
- тангенциальная составляющая магнитного поля не учитывается ввиду того, что она практически не участвует в преобразовании механической энергии в электрическую;
- между соседними активными элементами ГВПД отсутствуют взаимодействия магнитного поля;
- стержни абсолютно упругие, то есть отклонения от нулевого положения отсутствуют.

Далее будет рассматриваться описание выражения динамики ветроэнергетической установки (ВЭУ) колебательного типа по одной оси. При использовании ГВПД решающее значение имеет изменение силы ветрового потока, который через парус воздействует на стержни ГВПД. Поэтому в расчетной формуле воздействия ветрового потока присутствует изменение силы, выражение (1).

Согласно закону Гука [3], отклонение паруса определяется в виде:

$$\Delta F_r = -k \cdot x, \quad (2)$$

где k – коэффициент упругости, x – отклонение пластины от начального положения.

Сопротивление воздуха определяется выражением [4]:

$$F_{\text{сопр.воз.}} = \frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\delta}{2}} b \cdot a \cdot \frac{dx}{dt}}{\delta}, \quad (3)$$

где C – постоянная Сазерленда, T_0 – температура воздуха в воздушном зазоре в момент запуска, T – температура воздуха в момент времени, γ_0 – кинематическая вязкость воздуха, δ – ширина воздушного зазора, b – ширина постоянных магнитов, a – длина постоянных магнитов.

Сила, обусловленная постоянными магнитами в пространстве [5]:

$$F_M = C_M \cdot x, \quad (4)$$

где C_M – конструктивный коэффициент, который равен:

$$C_M = k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a}, \quad (5)$$

где k_m – коэффициент упругости, k_μ – коэффициент насыщения магнитной среды, F_m – МДС постоянных магнитов, l – рабочая длина магнитов, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Тогда уравнение динамики запишется в следующем виде:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = \Delta F_\Gamma + \Delta F_B - F_{\text{сопр.воз.}} - F_M. \quad (6)$$

С учетом выражений (1-4), уравнение (5) записывается в виде:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = -k \cdot x + C_x \cdot \frac{p \cdot S}{2} (V_K^2 - V_H^2) \cos \beta - \frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\delta}{2}} b \cdot a \cdot \frac{dx}{dt}}{\delta} - k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a}. \quad (7)$$

Амплитудное значение отклонения x определяется в максимально отклоненном положении А. Для данного положения:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 0; \frac{dx}{dt} = 0.$$

Поэтому уравнение (6) запишется в виде:

$$0 = -k \cdot x + C_x \cdot \frac{p \cdot S}{2} \cdot (V_K^2 - V_H^2) \cdot \cos \beta - k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a}. \quad (8)$$

Решением данного уравнения будет:

$$A = \frac{C_x \cdot \frac{p \cdot S}{2} \cdot (V_K^2 - V_H^2) \cdot \cos \beta - k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a}}{k}. \quad (9)$$

Из выражения (8) видно, что первым необходимым критерием выбора жесткости пружины и параметров постоянных магнитов является максимальное отклонение A . Должны быть выбраны такие параметры, чтобы обеспечить минимально необходимое отклонение x_{\min} при среднегодовой скорости ветра. x_{\min} – это минимальное расстояние, необходимое для отклонения постоянных магнитов от обмотки.

Как известно, описание уравнения движения в колебательных механических системах с пружинами осуществляется следующим выражением [3]:

$$x = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \cdot e^{-\lambda t}, \quad (10)$$

где ω – частота колебаний, φ – начальная фаза колебаний паруса, λ – декремент затухания, t – время от начала возмущения.

Для нахождения частоты колебаний и определения декремента затухания записывается уравнение (6) в следующем виде и при замене

$$\frac{dx}{dt} = x':$$

$$m \cdot x'' + \frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\delta}{2}} \cdot b \cdot a \cdot \frac{dx}{dt}}{\delta} \cdot x' + (k + k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a}) \cdot x = \quad (11)$$

$$= C_x \cdot \frac{p \cdot S}{2} \cdot (V_K^2 - V_H^2) \cdot \cos \beta.$$

Данное уравнение является линейным однородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Разделив уравнение (10) на m , получаем:

$$x'' + \frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\delta}{2}} \cdot b \cdot a}{m \cdot \delta} \cdot x' + \frac{(k + k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a})}{m} \cdot x = \frac{C_x \cdot \frac{P \cdot S}{2} \cdot (V_K^2 - V_H^2) \cdot \cos \beta}{m}. \quad (12)$$

Дифференциальное уравнение затухающих гармонических колебаний описывается следующим образом [3]:

$$x'' + 2 \cdot \beta \cdot x' + \omega_0^2 \cdot x = 0, \quad (13)$$

где β – коэффициент затухания, ω_0 – собственная частота колебаний незатухающего осциллятора.

Исходя из уравнений (11) и (12), собственная частота колебаний индуктора будет равна:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(k + k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a})}{m}}. \quad (14)$$

Как видно из выражения (12), частота колебаний индуктора определяется не только жесткостью пружин, но и параметрами постоянных магнитов. Из уравнений (11) и (12) коэффициент затухания определяется по выражению:

$$\beta = \frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\delta}{2}} \cdot b \cdot a}{2 \cdot m \cdot \delta}. \quad (15)$$

Как видно из выражения (13), затухание колебаний полностью обусловлено сопротивлением воздуха.

Уравнение (11) переписывается в следующем виде:

$$x'' + 2 \cdot \beta \cdot x' + \omega_0^2 \cdot x = \Delta F_B. \quad (16)$$

Для решения линейного однородного уравнения второго порядка, описанного в (12), вводится функция:

$$x(t) = A \cdot e^{\lambda t}. \quad (17)$$

Тогда:

$$x'(t) = A \cdot \lambda \cdot e^{\lambda t} \quad (18)$$

и

$$x''(t) = A \cdot \lambda^2 \cdot e^{\lambda t}. \quad (19)$$

Подставив (16-18) в (12):

$$A \cdot \lambda^2 \cdot e^{\lambda t} + 2 \cdot \beta \cdot A \cdot \lambda \cdot e^{\lambda t} + \omega_0^2 \cdot A \cdot e^{\lambda t} = 0. \quad (20)$$

Получится следующее характеристическое уравнение:

$$\lambda^2 + 2 \cdot \beta \cdot \lambda + \omega_0^2 = 0. \quad (21)$$

Решением данного уравнения будет:

$$\lambda_{1,2} = \frac{-2 \cdot \beta \pm \sqrt{4 \cdot \beta^2 - 4 \cdot \omega_0^2}}{2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}. \quad (22)$$

В случае, когда $\beta > \omega_0$, будет происходить сильное затухание. В случае, когда $\beta = \omega_0$, будет происходить гармоническое затухание. В случае, когда $\beta < \omega_0$, будут происходить затухающие колебания. Необходимым для эффективной работы генератора является режим колебаний, поэтому должно соблюдаться условие:

$$\frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\delta}{2}} \cdot b \cdot a}{2 \cdot m \cdot \delta} < \sqrt{\frac{(k + k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a})}{m}}. \quad (23)$$

Жесткость пружины и характеристики применяемых магнитов должны определяться из выражения (22) таким образом, чтобы создавался режим колебаний. При этом необходимо руководствоваться климатическим фактором и вязкостью текучей среды, это видно по выражению (22). Таким образом, определены два критерия для параметров пружины и постоянных магнитов (выражения (8) и (22)), исходя из климатических факторов.

Общее решение характеристического уравнения (12) запишется в виде:

$$x(t) = e^{-\beta t} \cdot (C_1 \cdot \cos(\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}) + C_2 \cdot \sin(\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2})). \quad (24)$$

Собственная частота колебаний будет равна:

$$\omega = (\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}). \quad (25)$$

С учетом (13) и (14):

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot b \cdot a}{2 \cdot m \cdot \delta} \right)^2 - \left(\frac{(k + k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a})}{m} \right)^2}. \quad (26)$$

Уравнение движения индуктора (23) переписывается в общем виде:

$$x(t) = A \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos(\omega t + \varphi). \quad (27)$$

Уравнение движения индуктора (23) переписывается в общем виде:

$$x(t) = \frac{C_x \cdot \frac{P \cdot S}{2} \cdot (V_K^2 - V_H^2) \cdot \cos \beta - k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a}}{k} \cdot e^{-\frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot b \cdot a}{2 \cdot m \cdot \delta} \cdot t}. \quad (28)$$

$$\cdot \cos \left[\left(\frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot b \cdot a}{2 \cdot m \cdot \delta} \right)^2 - \frac{(k + k_m \cdot x) \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a}}{m} \cdot t + \varphi \right].$$

Таким образом, было получено выражение (27), описывающее движение индуктора в зависимости от изменения скорости ветра.

Далее рассмотрены уравнения напряжений и электродвижущей силы (ЭДС) в ТКЭП. Эквивалентная электрическая схема замещения генератора приведена на рис. 3.

ЭДС генератора ТКЭП определяется выражением [5]:

$$E_V = \frac{w_\phi \cdot k_{об} \cdot B \cdot S_M}{\sqrt{2}} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (29)$$

где w_ϕ – количество витков обмотки, $k_{об}$ – обмоточный коэффициент, B – остаточная индукция постоянных магнитов, S_M – площадь магнитов.

С учетом (27), (28) запишется в виде:

$$E_V = - \frac{w_\phi \cdot k_{об} \cdot B \cdot S_M}{\sqrt{2}} \cdot \frac{C_x \cdot \frac{P \cdot S}{2} \cdot (V_K^2 - V_H^2) \cdot \cos \beta - k_m \cdot x \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a} \cdot e^{\frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot b \cdot a}{2 \cdot m \cdot \delta}}}{k} \cdot \left[\left(\frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot b \cdot a}{2 \cdot m \cdot \delta} \right)^2 - \frac{(k + k_m \cdot x) \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a}}{m} \cdot \frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot b \cdot a}{2 \cdot m \cdot \delta} \right] \cdot \sin \left[\left(\frac{\gamma_0 \cdot \frac{T_0 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot b \cdot a}{2 \cdot m \cdot \delta} \right)^2 - \frac{(k + k_m \cdot x) \cdot \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot l \cdot F_m^2}{\pi \cdot k_\mu \cdot a}}{m} \cdot t + \varphi \right]. \quad (30)$$

Уравнения напряжений для схемы, приведенной на рис. 3, запишутся в следующем виде [5]:

$$(L_{\Gamma} + L_{\text{H}}) \cdot \frac{di}{dt} + (R_{\Gamma} + R_{\text{H}}) \cdot i = E_{\text{V}}. \quad (31)$$

Напряжение нагрузки будет равно:

$$U_{\Gamma} = L_{\Gamma} \cdot \frac{di}{dt} + R_{\Gamma} \cdot i. \quad (32)$$

Необходимо рассмотреть динамику изменения тока в цепи. Для этого принимается, что в начальный момент времени $i(-0) = i(+0) = 0$. Также записывается уравнение ЭДС в упрощенной форме, и начальная фаза колебаний принимается равной нулю:

$$E_{\text{V}} = -w_{\phi} \cdot k_{\text{об}} \cdot B \cdot S_{\text{M}} \cdot \frac{\Delta F_{\text{B}} - F_{\text{M}}}{k} \cdot e^{-\beta t} \cdot \omega \cdot \beta \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi). \quad (33)$$

Принимается:

$$E_{\text{Vmax}} = w_{\phi} \cdot k_{\text{об}} \cdot B \cdot S_{\text{M}} \cdot \frac{\Delta F_{\text{B}} - F_{\text{M}}}{k} \cdot \omega \cdot \beta. \quad (34)$$

Тогда (33) запишется в виде:

$$E_{\text{V}} = -E_{\text{Vmax}} \cdot e^{-\beta t} \cdot \omega \cdot \beta \cdot \sin(\omega t + \varphi) = -E_{\text{Vmax}} \cdot e^{-\beta t} \cdot e^{j \cdot \varphi}. \quad (35)$$

Характеристическое уравнение, исходя из (31), будет выглядеть следующим образом:

$$(L_{\Gamma} + L_{\text{H}}) \cdot p + (R_{\Gamma} + R_{\text{H}}) = 0, \quad (36)$$

где p – дифференциальный оператор. Решение характеристического уравнения:

$$p = \frac{(R_{\Gamma} + R_{\text{H}})}{(L_{\Gamma} + L_{\text{H}})}. \quad (37)$$

Тогда принужденная составляющая тока будет равна:

$$i_{\text{пр}} = \frac{-E_{V\text{max}} \cdot e^{-\beta t} \cdot e^{j\varphi}}{R_{\Gamma} + R_{\text{H}} + j \cdot \omega \cdot (L_{\Gamma} + L_{\text{H}})}. \quad (38)$$

Свободная составляющая тока равна:

$$i_{\text{св}} = i_{+0} - i_{\text{пр}} = \frac{E_{V\text{max}} \cdot e^{-\beta t} \cdot e^{j\varphi}}{R_{\Gamma} + R_{\text{H}} + j \cdot \omega \cdot (L_{\Gamma} + L_{\text{H}}) \cdot p}. \quad (39)$$

Тогда мгновенное значение тока после коммутации равно:

$$i_{\text{св}} = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}} \cdot e^{pt} = \frac{w_{\phi} \cdot k_{\text{об}} \cdot B \cdot S_{\text{M}} \cdot \frac{\Delta F_{\text{B}} - F_{\text{M}}}{k} \cdot \omega \cdot \beta \cdot e^{-\beta t} \cdot e^{j\varphi}}{R_{\Gamma} + R_{\text{H}} + j \cdot \omega \cdot (L_{\Gamma} + L_{\text{H}})} \cdot (e^{-\frac{(R_{\Gamma} + R_{\text{H}}) \cdot t}{(L_{\Gamma} + L_{\text{H}})}} - 1). \quad (40)$$

Выходное напряжение генератора определяется исходя из (32) и (40). Уравнения для других осей аналогичны.

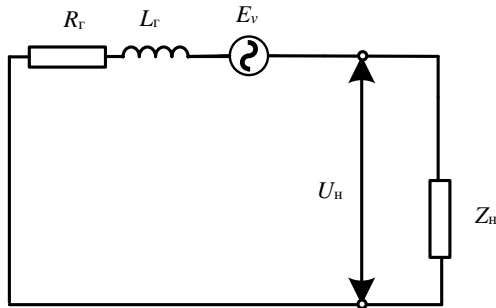


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема замещения генератора

IV. Результаты и выводы

Разработана математическая модель новой ветроустановки колебательного типа, позволяющей извлекать энергию ветра при низких скоростях ветра.

Библиографический список

- [1] Вавилов В.Е., Якупов А.М. Колебательная ветроустановка // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 6-2 (128). С. 61-66.
- [2] Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Якупов А.М. Ветроэнергетическая установка, Пат. 2528793 РФ, заявл. 17.09.13; опубл. 20.09.14. – Бюл. №5.
- [3] Энергия ветра или на чем основаны расчеты. [Электронный ресурс]. URL: <https://skootsone.yolasite.com/wind-pow-01.php> (дата обращения 01.10.2018).
- [4] Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики: В 2-х т. СПб.: Лань, 2008. – 729 с.
- [5] Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Кудинов С.И. Новый метод определения высокотемпературной кинематической вязкости моторных масел // Двигателестроение. 2009. № 2 (236). С. 53-54.
- [6] Хитерер М.Я., Овчинников И.Е. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. СПб.: КОРОНА-принт, 2008. – 368 с.
- [7] Якупов А.М. Исследование методики краткосрочного прогнозирования выработки СЭС // Интеллектуальная электротехника. 2018. № 3 (3). С. 44-53.

I.H. Khayrullin, A.M. Yakupov

**RESEARCH OF METHOD OF SHORT-TERM
FORECASTING OF PRODUCTION
OF SOLAR POWER PLANTS**

Ufa State Aviation Technical University,
Ufa, Russia

Abstract. In this article, the authors develop a mathematical model for a new structural design of wind turbine oscillating type. A new structural design of wind turbine oscillating type involves the use of a sail and a synchronous generator of reciprocating motion. This wind plant allows you to extract wind energy at low wind speeds, regardless of wind direction. Article describes the design of the oscillating type wind turbine and the accepted assumptions for developing a mathematical model. At developing a mathematical model, air resistance is taken into account, which depends on the ambient temperature, spring elasticity, and resistance to wind flow of various forms of sail. The developed mathematical model can be applied in the further operation of an oscillating type wind turbine in case of its introduction into production.

Keywords: alternative energy, mathematical model, reciprocating synchronous generator, wind energy, wind turbine oscillating type.

References

- [1] V.E. Vavilov and A.M. Yakupov, «Oscillating wind turbines», *Alternativnaya Energetika i Ekologiya*, vol. 6-2, no. 128, pp. 61-66, 2013.
- [2] I.H. Khayrullin, F.R. Ismagilov, V.E. Vavilov and Yakupov A.M., «Vetroehnergeticheskaya ustanovka», R.F. Patent 2528793, Sept. 20, 2014.
- [3] «Energiya vetra ili na chem osnovany raschety». [Online]. Available at: <https://skootsone.yolasite.com/wind-pow-01.php> (in Russian).
- [4] N.V. Butenin, J.L. Lunts and D.R. Merkin, *Kurs teoreticheskoy mekhaniki*. St. Petersburg: LAN, 2008 (in Russian).
- [5] A.Yu. Shabanov, A.B. Zaitsev and S.I. Kudinov, «New method of determination of lube oil high-temperature viscosity», *Dvigatelistroyeniye (Engines construction)*, vol. 2, no. 236, pp. 53-54, 2009.
- [6] M.Ya. Khiterer and I.Ye. Ovchinnikov, *Sinkhronnyye elektricheskiye mashiny vozvratno – postupatel'nogo dvizheniya*. St. Petersburg: CORONA – print, 2008 (in Russia).
- [7] A.M. Yakupov, «Method of short-term forecasting of solar power plants production», *Smart Electrical Engineering*, vol. 3, no 3, pp. 44-53, Sep. 2018.