

Л. А. Климина, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., klimina@imec.msu.ru,
Е. С. Шалимова, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., ekateryna-shalimova@yandex.ru,
НИИ механики МГУ, Москва

Двухпропеллерная ветроэнергетическая установка с дифференциальной планетарной передачей*

Рассматривается математическая модель двухпропеллерной горизонтально-осевой ветроэнергетической установки (ВЭУ). Определяется значение внешнего сопротивления в цепи электрогенератора, при котором механическая мощность установки близка к максимальной. Описываются рабочие режимы ВЭУ, которые могут быть реализованы при таком внешнем сопротивлении. Строится стратегия управления, позволяющая перевести систему в рабочий режим, характеризующийся значением мощности, близким к максимальному. Используется два типа управляющего воздействия: изменение внешнего сопротивления, применение тормоза для остановки любого из колес ДПП.

Ключевые слова: двухпропеллерная ветроэнергетическая установка, дифференциальная планетарная передача, замкнутая динамическая модель, установившиеся режимы, устойчивость, механическая мощность, управление

Обозначения

Oz — ось вращения обоих пропеллеров, всех колес дифференциальной планетарной передачи (ДПП) и ротора генератора;

$\omega_c, \omega_s, \omega_r, \omega_p$ — угловые скорости водила (каре-тки), солнечного колеса, внешнего колеса, каждой из планет ДПП, соответственно ($\omega_s r_s = 2\omega_c r_c - \omega_r r_r$);

r_c, r_s, r_r, r_p — радиусы соответствующих колес ДПП ($r_c = r_s - r_p, r_r = r_c + 2r_p$);

J_c, J_s, J_r, J_p — центральные моменты инерции твердых тел "основной пропеллер + водило", "дополнительный пропеллер + внешнее колесо", "солнечное колесо + ротор генератора", планета;

m_p — масса каждой из планет;

ρ — плотность воздуха;

S — характерная площадь каждого из пропеллеров;

b — радиус основного (переднего) пропеллера;

d — радиус дополнительного (заднего) пропеллера;

a, k — безразмерные геометрические параметры;

A_1, A_2, A_3, J — безразмерные инерционные параметры;

$\tau = It/b$ — безразмерное время;

$(\cdot)'$ — производная по безразмерному времени τ ;

λ — быстроходность основного пропеллера;

η — быстроходность дополнительного пропеллера;

$f_c(\lambda), f_r(\eta)$ — безразмерные функции аэродинамических моментов, действующих на основной и дополнительный пропеллеры;

μ — безразмерная угловая скорость ротора генератора;

c — коэффициент электромеханического взаимодействия;

p — безразмерный коэффициент электромеханического взаимодействия;

r — внутреннее сопротивление генератора;

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ: гранты NN 15-01-06970, 16-31-00374, 17-08-01366.

T_c, T_r — аэродинамические моменты, действующие на основной и дополнительный пропеллеры (относительно оси Oz);

T_s — электромеханический момент, действующий на ротор генератора (относительно оси Oz).

Введение

Эффективность горизонтально-осевых ветроэнергетических установок (ВЭУ) с двумя пропеллерами, вращающимися в противоположных направлениях, подтверждена экспериментальными исследованиями и результатами математического моделирования на основе хорошо разработанных моделей аэродинамики турбин [1–4]. Однако в большинстве работ не обсуждается влияние изменения электрической нагрузки в цепи генератора ВЭУ на динамику установки. В то же время анализ соответствующих эффектов весьма актуален для описания функционирования так называемых малогабаритных ВЭУ, т. е. ветроустановок, обеспечивающих работу локальной электросети. В таких сетях (характерных, например, для индивидуальных домашних хозяйств) подключение/отключение дополнительных потребителей существенно сказывается на режиме работы ВЭУ. В частности, имеет место гистерезис механической мощности ВЭУ на рабочем режиме в зависимости от увеличения/уменьшения электрической нагрузки, характеризующейся внешним сопротивлением в локальной цепи генератора ВЭУ. Для классической (однопропеллерной) горизонтально-осевой ВЭУ эффект гистерезиса описан на основе математического моделирования [5, 6].

В данной работе построим замкнутую математическую модель динамики малогабаритной двухпропеллерной ВЭУ. Будем считать, что генератор ВЭУ подключен к локальной электрической цепи. Внешнее сопротивление в цепи генератора будем считать варьируемым параметром модели.

Будем рассматривать ВЭУ, в конструкцию которой входит дифференциальная планетарная передача (ДПП). Каждый пропеллер жестко соединен с одним из колес ДПП, ротор генератора жестко соединен с третьим колесом ДПП. Динамика такой системы существенно отличается от динамики двухпропеллерной ВЭУ, не оснащенной ДПП (когда ротор генератора установлен на оси одного пропеллера, а статор — на оси другого пропеллера). Отметим, что угловая скорость ротора генератора относительно статора при наличии ДПП может быть значительно выше, чем угловая скорость одного пропеллера относительно другого. Другое преимущество ДПП состоит в дополнительных возможностях для управления системой. Некоторые примеры возможностей управления однопропеллерной ВЭУ с ДПП описаны в работе [7], они существенно отличаются от вариантов управления, предлагаемых в данной работе для двухпропеллерной ВЭУ.

Постановка задачи

Описание механической системы

Рассматриваемая механическая система включает в себя два пропеллера: основной пропеллер жестко соединен с водилом ДПП, дополнительный пропеллер жестко соединен с внешним колесом ДПП (рис. 1). Предполагается, что первый пропеллер дает основной вклад в формирование крутящего момента на программном рабочем режиме (на больших оборотах), в то время как дополнительный пропеллер играет ведущую роль на стартовом этапе (создает хороший момент при низкой угловой скорости).

Ротор генератора ВЭУ жестко соединен с солнечным колесом ДПП. Генератор подключен к электрической цепи с переменным внешним сопротивлением R .

Модель внешних сил

Предположим, что на пропеллеры набегает поток со скоростью V , направленный противоположно оси Oz (падение скорости потока за первым про-

пеллером будем учитывать посредством функции $f_c(\eta)$ безразмерного аэродинамического момента, действующего на второй пропеллер, а не посредством изменения модуля скорости потока). Используем квазистационарную модель аэродинамического воздействия для определения аэродинамических моментов T_c , T_r . Для определения электромеханического момента T_s , действующего на ротор генератора, используем модель линейной зависимости электромеханического момента от угловой скорости ротора (аналогично работам [5–7]). Получаем следующие выражения:

$$\begin{aligned} T_c &= 0,5\rho S b V^2 f_c(\lambda), \text{ где } \lambda = b\omega_c V^{-1}; \\ T_r &= 0,5\rho S b V^2 f_r(\eta), \text{ где } \eta = b\omega_r V^{-1}; \\ T_s &= -c^2 \omega_s (R + r)^1. \end{aligned} \quad (1)$$

Функции $f_c(\lambda)$, $f_r(\eta)$ существенно нелинейны. Далее мы используем характерные примеры этих функций, представленные на рис. 2. Конкретные примеры функций $f_c(\lambda)$, $f_r(\eta)$ выбраны здесь для иллюстрации. Дальнейшие рассуждения справедливы для широкого класса функций аэродинамического момента.

Для основного пропеллера произведение $\omega_c T_c$ положительно при $\lambda \in (0, \lambda_1)$ и при $\lambda \in (\lambda_2, \lambda_3)$. Для дополнительного пропеллера произведение $\omega_r T_r$ положительно при $\eta \in (\eta_1, 0)$. Максимальная абсолютная величина аэродинамического момента у основного пропеллера больше, чем у дополнительного. Однако в отсутствие дополнительного пропеллера (или разгонного устройства) основной пропеллер сам не разгоняется до высоких значений быстроходности, если его начальная угловая скорость близка к нулю (ввиду наличия диапазона значений быстроходности, в котором момент отрицателен). Вместе с тем, если бы отсутствовал основной пропеллер, дополнительный в одиночку не мог бы создать настолько же большой по абсолютной величине крутящий момент, как у основного пропеллера.

Рабочие режимы с отрицательными значениями ω_c , как и с положительными значениями ω_r , не являются желательными, однако могут наблюдаться при относительно высоких значениях момента T_s .

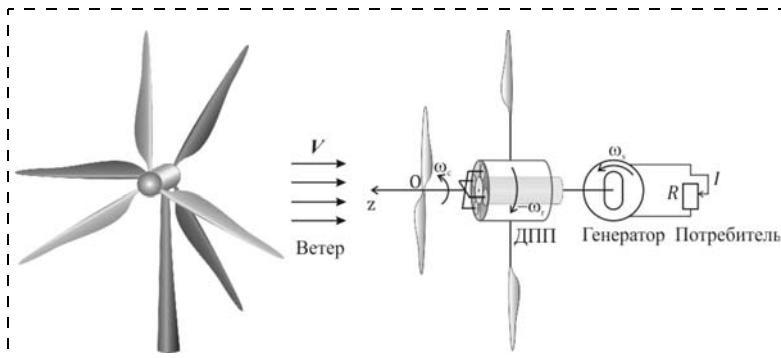


Рис. 1. Общий вид и схема двухпропеллерной ВЭУ с ДПП

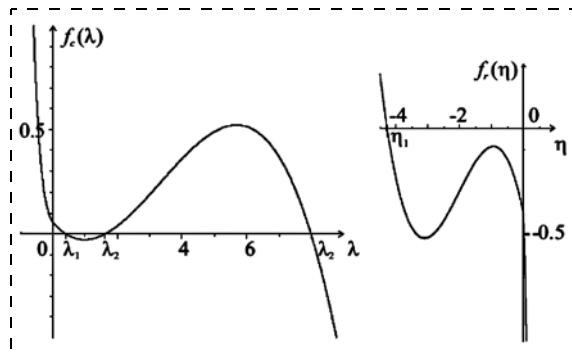


Рис. 2. Безразмерные функции аэродинамических моментов (в одинаковом масштабе)

электрической нагрузки. Чтобы по возможности избежать возникновения таких режимов, зададим функции $f_c(\lambda)$, $f_r(\eta)$ так, чтобы их абсолютные значения быстро возрастали при возрастании абсолютного значения λ в случае отрицательных λ и при возрастании η в случае положительных η , соответственно.

Далее для упрощения задачи предполагаем $b = d$.

Модель динамики системы

Предположим, что отсутствует проскальзывание между элементами ДПП. Тогда рассматриваемая механическая система имеет две степени свободы. С учетом выражений (1) безразмерные уравнения движения системы имеют вид:

$$\begin{cases} \lambda' = a(A_2 + A_3)f_c(\lambda) + kA_3f_r(\eta) - \\ - pa^{-1}A_2\lambda + pk^{-1}A_2\eta; \\ \eta' = kA_3f_c(\lambda) + k^2(a^{-1}A_3 + A_1)f_r(\eta) + \\ + pka^{-1}A_1\lambda - pA_1\eta. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь

$$p = \frac{c^2}{2(R+r)\rho Sb^2 V} - \text{безразмерный коэффициент внешней нагрузки};$$

$$a = \frac{r_s}{4r_c}, k = \frac{a}{1-2a}, A_1, A_2, A_3, J - \text{безразмерные}$$

положительные константы, отвечающие за геометрические и инерционные свойства системы:

$$A_1 = \frac{r_c}{Jr_s} \rho Sb^3 \left(\frac{r_r r_p}{2r_c r_s} J_c + \frac{2r_c r_r r_p}{r_s} m_p - \frac{2r_c r_r}{r_s r_p} J_p \right);$$

$$A_2 = \frac{r_c}{Jr_s} \rho Sb^3 \left(\frac{r_p}{2r_r} J_r + \frac{r_r}{r_p} J_p \right);$$

$$A_3 = \frac{r_c}{Jr_s} \rho Sb^3 \left(\frac{r_r r_p}{2r_s^2} \right) J_s + \frac{r_r}{r_p} J_p;$$

$$\begin{aligned} J = & \frac{r_p r_r J_c J_s}{4r_s^2} + \frac{r_p J_c J_r}{4r_r} + \frac{r_c^2 r_p J_s J_r}{r_s^2 r_r} + \frac{r_r J_c J_p}{r_p} + \\ & + \frac{r_c^2 r_r J_s J_p}{r_s^2 r_p} + \frac{r_c^2 J_r J_p}{r_r r_p} + \frac{r_c^2 r_r J_s m_p r_p^2}{r_s^2 r_p} + \\ & + \frac{r_c^2 J_r m_p r_p^2}{r_r r_p} + \frac{4r_c^2 r_r J_p m_p r_p^2}{r_p^3}. \end{aligned}$$

Устойчивые неподвижные точки системы (2) соответствуют рабочим режимам ВЭУ. Характеристики неподвижных точек и, соответственно, рабочих режимов, естественно зависят от параметров модели, в частности от параметра p , значение которого в процессе работы ВЭУ может изменяться как за счет изменения скорости ветра, так и за

счет изменения внешнего сопротивления в цепи генератора (так, если цепь разомкнута, p равен нулю). Остальные параметры модели для конкретной ВЭУ не изменяются.

Задача состоит в описании рабочих режимов и построении управления, позволяющего перевести систему на рабочий режим, характеризующийся максимальным значением механической мощности.

Рабочие режимы

Неподвижная точка $\{\lambda^*, \eta^*\}$ системы (2) удовлетворяет следующим уравнениям:

$$\begin{cases} \lambda' = a(A_2 + A_3)f_c(\lambda^*) + kA_3f_r(\eta^*) - \\ - pa^{-1}A_2\lambda^* + pk^{-1}A_2\eta^* = 0; \\ \eta' = kA_3f_c(\lambda^*) + k^2(a^{-1}A_3 + A_1)f_r(\eta^*) + \\ + pka^{-1}A_1\lambda^* - pA_1\eta^* = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения (3) определяют на плоскости $\{\lambda, \eta\}$ две кривые: $\lambda' = 0$ и $\eta' = 0$. Эти кривые разбивают плоскость $\{\lambda, \eta\}$ на области, внутри которых λ' и η' определены. Таким образом, внутри каждой области известно направление траекторий $(\lambda(\tau), \eta(\tau))$. Построение на плоскости $\{\lambda, \eta\}$ кривых (3) позволяет найти неподвижные точки системы (2), и более того, оказывается, что направления фазовых скоростей в указанных областях позволяют сделать выводы об устойчивости/неустойчивости неподвижных точек.

Пример анализа направлений фазовых траекторий представлен на рис. 3. Кривая "1" соответствует уравнению $\{\lambda' = 0\}$, кривая "2" — уравнению $\{\eta' = 0\}$; стрелками качественно показаны направления траекторий в соответствующих областях; закрашенные кружки соответствуют притягивающим стационарным движениям, белые кружки — отталкивающим стационарным движениям. Кривые $\{\lambda' = 0\}$, $\{\eta' = 0\}$, представленные на рис. 3, получены численно при следующих значениях параметров сис-

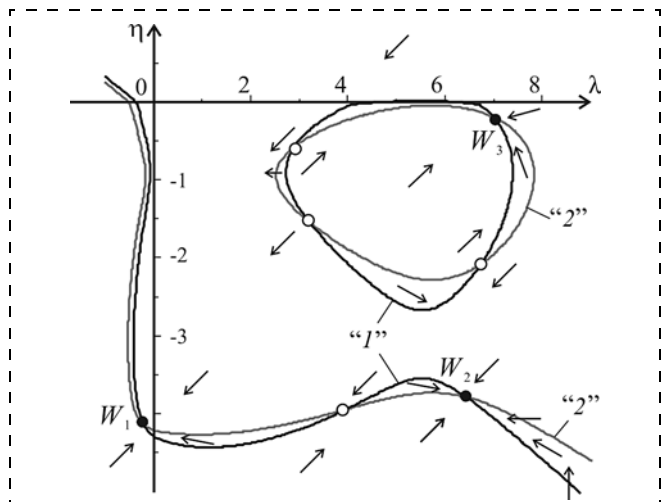


Рис. 3. Пример расположения неподвижных точек и распределения фазовых скоростей на плоскости $\{\lambda, \eta\}$ при $p = p^*$

темы: $a = 0,125$, $A_1 = 3,7$, $A_2 = 2,8$, $A_3 = 3,4$ и $p = p^* = 0,0008$.

В примере, проиллюстрированном на рис. 3, система (2) обладает тремя устойчивыми неподвижными точками: W_i , $i = 1, 2, 3$.

Стратегия выбора коэффициента передачи

Уравнения (3) можно привести к следующему виду:

$$\begin{cases} f_r(\eta^*) = -(1 - 2a)f_c(\lambda^*); \\ p(\lambda^* - (1 - 2a)\eta^*) = a^2 f_c(\lambda^*). \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, каждому значению λ^* отвечают одно, два (в вырожденном случае) или три значения η^* (по числу корней соответствующего уравнения $f_r(\eta^*) = \text{const}$), которые реализуются при различных p . Каждой паре $(\lambda^*, \eta^*(\lambda^*))$ при $\lambda^* \neq (1 - 2a)\eta^*$ отвечает ровно одно значение коэффициента p электромеханического взаимодействия, при котором существует стационарное движение с данными значениями быстроходности пропеллеров. При некотором значении a возможен случай $\lambda^* = (1 - 2a)\eta^*$, $f_c(\lambda^*) = 0$, при котором солнечное колесо ДПП остается неподвижным ($\mu^* = p a^{-1}(\lambda^* - (1 - 2a)\eta^*) = 0$) и, соответственно, p произвольно.

Отметим, что, введя новые обозначения, уравнения (4) можно представить в том же виде, который имеют уравнения стационарных движений двухпропеллерной ВЭУ без ДПП (когда ротор генератора закреплен на оси одного пропеллера, а статор — на оси другого):

$$\begin{cases} F_r(\zeta^*) = f_c(\lambda^*); \\ c = \frac{f_c(\lambda^*)}{\lambda^* - \zeta^*}. \end{cases}$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \zeta^* &= (1 - 2a)\eta^*, \\ F_r(\zeta^*) &= f_r(\eta^*)(1 - 2a)^{-1}, \\ c &= p a^{-2}. \end{aligned}$$

Итак, можно сказать, что наличие ДПП изменяет "эффективные" значения функций аэродинамического момента и коэффициента электромеханического взаимодействия по сравнению с ВЭУ без ДПП. Это существенно, когда функции $\{f_c(\lambda), f_r(\eta)\}$, описывающие аэродинамические характеристики пропеллеров, различны. В частности, при некотором значении $a = a_{opt}$ коэффициента передачи может существовать установившееся движение, при котором каждый из пропеллеров имеет быстроходность $\{\lambda_{opt}^*, \eta_{opt}^*\}$, соответственно, отвечающую максимальному значению механической мощности. На таком режиме движения механическая мощность $(\omega_c T_c + \omega_r T_r)$ двухпропеллерной ВЭУ будет максимальна.

Значение a_{opt} определяется следующей формулой:

$$a_{opt} = \frac{f_c(\lambda_{opt}^*) + f_r(\eta_{opt}^*)}{2f_c(\lambda_{opt}^*)},$$

$$\lambda_{opt}^* = \text{argmax}(\lambda f_c(\lambda)), \quad \eta_{opt}^* = \text{argmax}(\eta f_r(\eta)).$$

В частности, для ВЭУ с пропеллерами, характеристики которых представлены на рис. 2, получаем, что при $a = 1/8$: $F_r(\zeta^*) \approx -f_c(\lambda^*)$. Таким образом, при $a = 0,125$ пропеллеры с заданными характеристиками могут совместно работать на таком режиме, на котором каждый из них вырабатывает механическую мощность, близкую к максимально возможной для него. Далее будем считать конфигурацию ДПП, соответствующую значению $a = 0,125$, близкой к оптимальной для данных (см. рис. 2) аэродинамических характеристик пропеллеров (с точки зрения максимизации механической мощности), и рассмотрим эту конфигурацию подробно.

При $a = 0,125$ на режиме, отвечающем точке $W_2 = \{\lambda^* = 6,4, \eta^* = -3,7\}$ (рис. 3), оба пропеллера вырабатывают механическую мощность, близкую к максимальной, которая для них возможна. Отметим, что в данном случае указанный режим устойчив. Будем считать предпочтительными (программным) режим, отвечающий точке W_2 , и значение $p = p^* = 0,0008$, при котором он реализуется.

Стратегия управления и обсуждение результатов

Ставится следующая задача: перевести систему из начального состояния $\{\lambda = 0, \eta = 0\}$ в окрестность точки W_2 , соответствующей программному рабочему режиму. Для классической ВЭУ с одним пропеллером задача выхода на рабочий режим с высоким значением мощности может быть решена путем отключения потребителей на этапе разгона турбины [5]. Потребителей следует подключить к сети ВЭУ после того, как достигнута достаточно высокая угловая скорость турбины (система находится в области притяжения высокоскоростного, а не низкоскоростного режима). Такой подход подразумевает, что функция аэродинамического момента турбины имеет качественный вид, подобный виду функции f_r (см. рис. 2), а именно: функция аэродинамического момента имеет только один корень, соответствующий большому значению быстроходности. Однако, если единственный пропеллер ВЭУ имеет аэродинамические характеристики, которые качественно соответствуют виду функции f_c (см. рис. 2), то чтобы перевести систему на высокоскоростные режимы, потребуется дополнительное разгоняющее устройство [6].

В случае рассматриваемой здесь двухпропеллерной ВЭУ предполагается, что дополнительный пропеллер может быть использован для того, чтобы разогнать основной пропеллер до высокой угловой скорости. Из рис. 3 видно, однако, что точка $\{0, 0\}$ (начальное состояние) не принадлежит об-

ласти притяжения точки W_2 , отвечающей программному режиму.

Опишем стратегию управления, позволяющую с помощью дополнительного пропеллера перевести систему на программный рабочий режим.

Шаг 1. Сделаем нулевым коэффициент внешней нагрузки p , т. е. отключим всех потребителей от электрогенератора ВЭУ. Этот шаг повторяет метод разгона однопропеллерной ВЭУ. Тогда система перейдет на стационарный режим с небольшим значением λ и относительно большим значением η (рис. 4). Отметим, что все параметры модели при построении рис. 3 и рис. 4 одинаковы, кроме параметра p . Таким образом, рис. 4 описывает свойства динамики той же ВЭУ в случае отсутствия внешней электрической нагрузки.

Начальная точка $\{0, 0\}$ оказывается в области притяжения неподвижной точки W_{01} (в нашем примере она имеет координаты $\{0,4, -4,3\}$). Следовательно, постепенно изображающая точка перейдет в сколь угодно малую окрестность точки W_{01} . Однако, если после этого мы просто изменим значение коэффициента электрической нагрузки на программное значение ($p = p^*$), это не даст желаемого результата, поскольку точка W_{01} при $p = p^*$ находится вне области притяжения программного положения W_2 (она находится в области притяжения точки W_{01}). В связи с этим требуется дополнительный (по сравнению с однопропеллерной турбиной) шаг стратегии управления.

Шаг 2. Пусть $p = 0$ и пусть система находится в состоянии, отвечающем точке W_{01} (т. е. первый этап перехода завершен). Приложим к внешнему колесу ДПП тормозящий момент (остановим внешнее колесо с помощью тормоза). Предполагается, что с помощью тормоза возможно в произвольный момент достаточно быстро остановить любое из колес ДПП (и даже одновременно любые два колеса). Дополнительно предположим, что отношение момента инерции солнечного колеса к моменту инерции каретки достаточно велико, так что при остановке внешнего колеса угловая скорость ω_s солнечного колеса в первый момент почти не изменяется, а угловая скорость ω_c каретки меняется. Пренебрегая небольшими изменениями величины ω_s , запишем кинематические связи до и после остановки внешнего колеса:

$$\begin{cases} \omega_{s01}r_s = 2\omega_{c01}r_c - \omega_{r01}r_r; \\ \omega_{s01}r_s = 2\omega_{c03}r_c. \end{cases} \quad (5)$$

Из уравнений (5) получаем, что угловая скорость каретки после остановки внешнего колеса станет равной $\omega_{c03} = \omega_{c01} - 0,5\omega_{r01}\frac{r_r}{r_c}$. В нашем случае $\frac{r_r}{r_c} = 2$.

Таким образом, получаем: $\lambda_{03} = \lambda_{01} - \eta_{01} \approx 0,4 + 4,3 = 4,7$. Отметим, что $\lambda \approx 4,7$ относится к диапазону быстроходности, на котором аэродинамиче-

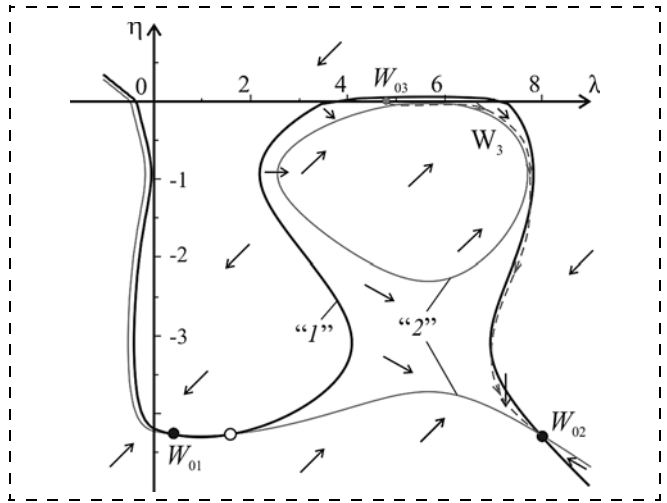


Рис. 4. Пример расположения неподвижных точек и распределения фазовых скоростей для случая $p = 0$. Штриховой линией показан пример траектории

ский момент, действующий на основной пропеллер, является разгоняющим, и при $\eta = 0$ аэродинамический момент, действующий на дополнительный пропеллер, является разгоняющим (относительно желаемого направления вращения пропеллеров).

При $p = 0$ точка $W_{03} = \{\lambda_{03}; 0\} = \{4,7; 0\}$ находится в области притяжения точки $W_{02} = \{8; -4,3\}$ (рис. 4). Итак, после перехода системы в состояние, отвечающее малой окрестности точки $W_{03} = \{\lambda_{03}, 0\}$, следует отключить тормоз, препятствующий вращению внешнего колеса ДПП. Тогда система постепенно перейдет из состояния, отвечающего точке W_{03} , в состояние, отвечающее малой окрестности точки W_{02} (штриховая кривая на рис. 4 иллюстрирует соответствующий переходный процесс).

Шаг 3. Итак, теперь состояние системы отвечает точке W_{02} . Подключим потребителей электроэнергии к локальной цепи генератора, т. е. перейдем к программному значению $p = p^*$ от $p = 0$. При $p = p^*$ точка W_{02} находится в области притяжения программной неподвижной точки W_2 . Таким образом, задача управления выполнена.

Отметим, что для случая двухпропеллерной ветроустановки, не оснащенной ДПП, у которой ротор генератора установлен на оси одного пропеллера, а статор — на оси другого, задача разгона одного пропеллера с помощью другого не обладает подобным простым решением. В последнем случае отсутствует опция за счет искусственного торможения одной из осей преобразовать энергию вращения одного пропеллера в энергию противоположно направленного вращения второго.

Таким образом, подтверждается одно из преимуществ ДПП: наличие дополнительных возможностей управления для перехода на программный режим.

Рассмотрена замкнутая динамическая модель двухпропеллерной ВЭУ, оснащенной ДПП. Рабочие режимы ВЭУ исследованы для случая конкретной геометрической конфигурации системы, при которой может быть реализован рабочий режим с механической мощностью, близкой к максимальной. Такой режим выбран в качестве программного. Построена стратегия управления, позволяющая перевести систему на этот рабочий режим при условии, что в начальный момент угловые скорости обоих пропеллеров нулевые. Предложенное управление подразумевает выполнение следующих шагов: отключение/подключение потребителей, а также включение/выключение тормоза, останавливающего внешнее колесо ДПП.

1. Shen W. Z., Zakkam V. A. K., Sorensen J. N., Appa K. Analysis of counter-rotating wind turbines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2007. Vol. 75, Iss. 1, P. 9.
2. Farthing S. P. Robustly Optimal Contra-Rotating HAWT // *Wind engineering*. 2010. Vol. 34, Iss. 6. P. 733–742.
3. Lee S., Kim H., Son E., Lee S. Effects of design parameters on aerodynamic performance of a counter-rotating wind turbine // *Renewable Energy*. 2012. Vol. 42. P. 140–144.
4. Ozbay A., Tian W., Hu H. Experimental investigation on the wake characteristics and aeromechanics of dual-rotor wind turbines // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2016. Vol. 138, Iss. 4. P. 042602.
5. Досаев М. З., Самсонов В. А., Селюцкий Ю. Д. О динамике малой ветроэлектростанции // *Доклады Академии наук*. 2007. Т. 416, № 1. С. 50–53.
6. Досаев М. З., Линь Ч.-Х., Лю В.-Л., Самсонов В. А., Селюцкий Ю. Д. Качественный анализ стационарных режимов малых ветровых электростанций // *Прикладная математика и механика*. 2009. Т. 73, № 3. С. 368–374.
7. Климина Л. А., Голуб А. П. Регулирование рабочих режимов ВЭУ с помощью дифференциальной планетарной передачи // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 4. С. 24–32.

Dual-Propeller Wind Turbine with a Differential Planetary Gear

L. A. Klimina, klimina@imec.msu.ru✉, E. S. Shalimova, ekaterina-shalimova@yandex.ru,
Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russian Federation

Corresponding author: Klimina Ljubov A., Ph. D., Senior Scientific Researcher,
Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russian Federation,
e-mail: klimina@imec.msu.ru

Received on March 24, 2017

Accepted on April 14, 2017

The topic of the article is construction and study of the closed mathematical model of a dual-propeller horizontal axis wind turbine (HAWT). One propeller is rigidly connected to the carrier of a differential planetary gear (DPG), the other propeller is rigidly joined to the external gear of the DPG, the rotor of the generator is rigidly joined to the sun gear. The generator is connected to a local electric circuit. The external resistance in the circuit is a varied parameter of the model. The aerodynamic forces acting upon the propellers are modeled using a quasi-steady approach. The electromagnetic torque acting upon the rotor of the generator is supposed to be a linear function of the angular speed of this rotor. Equations of the steady motions of a HAWT are derived. The optimal value of a gear ratio is calculated depending on the aerodynamic characteristics of the propellers. The external resistance, for which the mechanical power of the turbine is close to its maximum, is found. The operating modes for this external resistance and their domains of attraction are described. A possibility of acceleration of one propeller by means of the other propeller is discussed. The control strategy, which transfers the system to the program operating mode, is constructed. Two types of control are used: variation of the external resistance in the local circuit of the generator and application of a brake to one of the rings of the DPG.

Keywords: dual-rotor wind turbine, differential planetary gear, closed dynamical model, steady motions, stability, mechanical power, control

Acknowledgements: This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research, projects NN 15-01-06970, 16-31-00374, 17-08-01366.

For citation:

Klimina L. A., Shalimova E. S. Dual-Propeller Wind Turbine with a Differential Planetary Gear, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 10, pp. 679–684.

DOI: 10.17587/mau.18.679-684

References

1. Shen W. Z., Zakkam V. A. K., Sorensen J. N., Appa K. Analysis of counter-rotating wind turbines, *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, vol. 75, no. 1, p. 9.
2. Farthing S. P. Robustly Optimal Contra-Rotating HAWT, *Wind engineering*. 2010, vol. 34, no. 6, pp. 733–742.

3. Lee S., Kim H., Son E., Lee S. Effects of design parameters on aerodynamic performance of a counter-rotating wind turbine, *Renewable Energy*, 2012, vol. 42, pp. 140–144.
4. Ozbay A., Tian W., Hu H. Experimental investigation on the wake characteristics and aeromechanics of dual-rotor wind turbines, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, vol. 138, no. 4, pp. 042602.
5. Dosaev M. Z., Samsonov V. A., Seliutski Y. D. On the dynamics of a small-scale wind power generator, *Doklady Physics*, 2007, vol. 52, no. 9, pp. 493–495 (in Russian).
6. Dosaev M. Z., Lin Ch.-H., Lu W.-L., Samsonov V. A., Seliutskii Yu. D. A qualitative analysis of the steady modes of operation of small wind power generators, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2009, vol. 73, no. 3, pp. 259–263 (in Russian).
7. Holub A. P., Klimina L. A. Control of operation modes of a wind power station by differential planet gear, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 4, pp. 24–32 (in Russian).