

УДК 531.36

# РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ВЕТРОМОБИЛЯ

**А.П. Голуб***НИИ механики МГУ*

Россия, 119192, Москва, Мичуринский просп., 1  
*Белорусский государственный университет*  
Республика Беларусь, Минск, пр. Независимости, 4  
E-mail: [holub.imech@gmail.com](mailto:holub.imech@gmail.com)

**Л.А. Климина***НИИ механики МГУ*

Россия, 119192, Москва, Мичуринский просп., 1  
E-mail: [klimina@imec.msu.ru](mailto:klimina@imec.msu.ru)

**А.А. Мастерова***НИИ механики МГУ*

Россия, 119192, Москва, Мичуринский просп., 1  
E-mail: [masterovaanya@yandex.ru](mailto:masterovaanya@yandex.ru)

**Sh.-Sh. Hwang***Chien Hsin University of Science and Technology*

Taiwan, 32097, Zhongli Dist., Taoyuan City, Jianxing Rd., 229  
E-mail: [stanhwang@uch.edu.tw](mailto:stanhwang@uch.edu.tw)

**Ch.-H. Lin***Chien Hsin University of Science and Technology*

Taiwan, 32097, Zhongli Dist., Taoyuan City, Jianxing Rd., 229  
E-mail: [chlin@gapps.uch.edu.tw](mailto:chlin@gapps.uch.edu.tw)

**Ключевые слова:** ветромобиль, кривошипно-шатунная ветроустановка, установившееся движение, орбитальная устойчивость, стратегия управления.

**Аннотация:** Рассматривается ветромобиль, перемещающийся при помощи кривошипно-шатунной ветроустановки. На шатуне ветроустановки закреплена лопасть. Ось кривошипа соединена с осью ведущих колес ветромобиля посредством понижающей передачи. Предполагается, что проскальзывание ведущих колес отсутствует. Программный режим движения ветромобиля – установившееся движение против ветра. Построена динамическая модель системы. Для описания воздействия потока использована квазистационарная модель. Программному движению отвечает периодическое решение динамической системы. Достаточные условия существования и орбитальной устойчивости такого решения получены численно-аналитическим итерационным методом. Построена зависимость средней по времени скорости корпуса ветромобиля на программном движении от коэффициента аэродинамического сопротивления корпуса. Предложена стратегия управления, обеспечивающая переход на программное движение, характеризующееся высоким значением средней скорости корпуса ветромобиля.

## 1. Введение

На фоне сложной экологической ситуации актуальность применения энергии потока для перемещения аппаратов постоянно растет. Несколько типов ветромобилей, которые способны перемещаться против ветра, используя энергию ветра, описаны при помощи динамических моделей ([1-3]).

В НИИ механики МГУ был разработан новый тип ветроустановки, в основе конструкции которой – кривошипно-шатунный механизм ([4]). Показано, что ветроустановка такого типа может быть использована в качестве привода ветромобиля ([2]). В настоящей работе мы модифицируем модель [2] следующим образом: добавляем в конструкцию системы понижающую передачу, связывающую между собой ось кривошипа и ось ведущего колеса; учитываем аэродинамическое сопротивление корпуса ветромобиля; снимаем предположение о малости неконсервативных воздействий на систему.

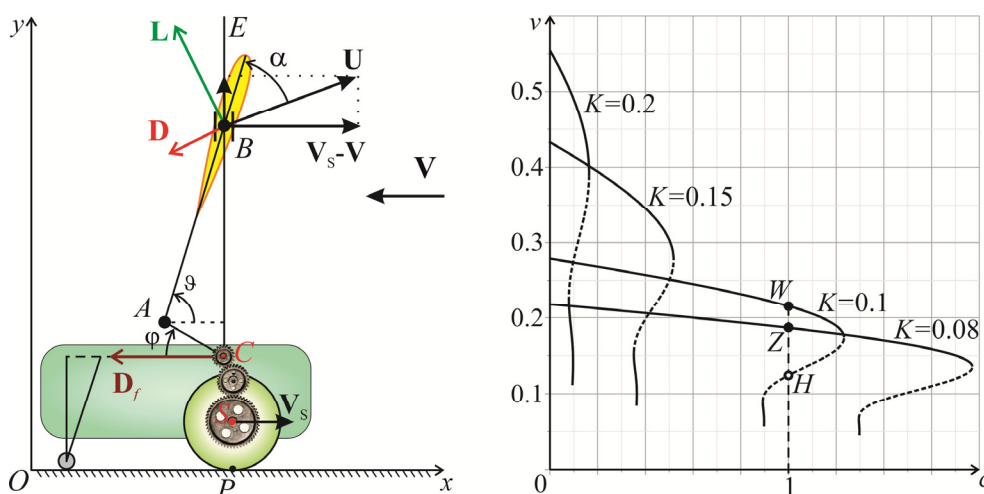
Понижающий коэффициент передачи предполагаем варьируемым параметром модели. Его требуется изменять таким образом, чтобы перевести устройство на высокоскоростной режим движения. Подобная стратегия управления была ранее разработана для перевода ветроустановок на программные режимы работы: [5, 6], в качестве управляемого параметра рассматривался коэффициент внешней нагрузки.

В настоящей работе для описания установившихся движений системы, исследования их устойчивости и построения стратегии управления использован метод [7].

## 2. Описание системы

### 2.1. Геометрические и инерционные характеристики

Механическая система состоит из кривошипно-шатунной ветротурбины [4], корпуса машины, передаточного механизма, колес (рис. 1). Механизм совершает плоско-параллельное движение в вертикальной плоскости  $Oxy$ . На шатуне  $AB$  закреплена лопасть, профиль лопасти симметричен относительно  $AB$ . Ползун  $B$  перемещается вдоль вертикальной направляющей  $CE$ . Центр масс твердого тела «шатун  $AB$  + лопасть» совпадает с точкой  $A$ . Центр масс кривошипа  $CA$  совпадает с точкой  $C$ . Понижающая передача передает вращение оси  $C$  кривошипа на ось  $S$  ведущего колеса. Колесо считаем невесомым. Отсутствует проскальзывание между колесом и поверхностью дороги.



**Рис. 1.** Схема механической системы. Средняя нормированная скорость корпуса в зависимости от параметров модели.

Обозначим  $\varphi$  – угол поворота кривошипа  $CA$ ,  $\dot{\varphi}$  – угловая скорость кривошипа;  $CA = r$ ,  $AB = l$ ,  $SP = R$ ;  $k$  – передаточное число (угловая скорость колеса равна  $k\dot{\varphi}$ );  $m$  – масса тела «шатун  $AB$  + лопасть»,  $M$  – суммарная масса корпуса и кривошипа.  $J_1$  – центральный момент инерции тела «шатун  $AB$  + лопасть»,  $J$  – центральный момент инерции кривошипа.

## 2.2. Внешние неконсервативные силы

Механизм расположен в потоке воздуха постоянной скорости  $\mathbf{V}$ . Предполагаем, что аэродинамическое воздействие на лопасть приводится к подъемной силе  $\mathbf{L}$  и силе сопротивления  $\mathbf{D}$ , приложенным в точке  $B$ . Аэродинамическое воздействие на корпус представлено силой сопротивления  $\mathbf{D}_f$ . Используем квазистационарную модель воздействия потока ([8, 9]):

$$(1) \quad \begin{aligned} L_x &= 0.5\rho SV^2 u \sqrt{s^2 + u^2} C_l(\alpha), & D_x &= 0.5\rho SV^2 s \sqrt{s^2 + u^2} C_d(\alpha), \\ L_y &= 0.5\rho SV^2 s \sqrt{s^2 + u^2} C_l(\alpha), & D_y &= -0.5\rho SV^2 u \sqrt{s^2 + u^2} C_d(\alpha), \\ D_f &= 0.5\rho \sigma V^2 s^2 C_{Df}, & \alpha &= -\arctan\left(\frac{u}{s}\right) + \varphi, \\ u &= \frac{V_{By}}{V} = \frac{r\omega \sin(\vartheta + \varphi)}{V \sin \varphi}, & s &= \frac{V_{Bx}}{V} = \frac{V + V_s}{V} = \left(1 + \frac{kR\omega}{V}\right). \end{aligned}$$

Здесь  $\rho$  – плотность среды,  $S$  – характерная площадь лопасти,  $\sigma$  – характерная площадь корпуса;  $C_{Df}$  – безразмерный коэффициент сопротивления корпуса;  $\alpha$  – безразмерный угол атаки – угол между воздушной скоростью точки  $B$  и  $AB$ ;  $u$  и  $s$  – безразмерные компоненты воздушной скорости точки  $B$ ;  $C_l(\alpha)$ ,  $C_d(\alpha)$  – безразмерные коэффициенты подъемной силы и силы сопротивления лопасти. Используем данные из [10].

## 3. Основные результаты

### 3.1. Уравнения движения

Уравнения движения системы представим в безразмерной форме:

$$(2) \quad \begin{cases} \varphi' = \frac{p}{T(\varphi)}; \\ p' = \frac{T'(\varphi)}{2T^2(\varphi)} p^2 - b \cos \varphi + (Q(\varphi, p) - Kcs^2), \end{cases}$$

$$Q(\varphi, p) = a \frac{T(\varphi) \sqrt{s^2 + u^2}}{p} \left( u (sC_l(\alpha) - uC_d(\alpha)) - \frac{Kp}{T(\varphi)} (uC_l(\alpha) + sC_d(\alpha)) \right);$$

$$p = T(\varphi)\omega; \quad T(\varphi) = 1 + K^2 \frac{Mr^2}{J} + \frac{mr^2}{J} (1 + K^2 + 2K \sin \varphi) + \frac{J_1}{J} \frac{r^2 \sin^2 \varphi}{l^2 \sin^2 \vartheta};$$

$$a = \frac{\rho Sr^3}{2J}, \quad b = \frac{mgr^3}{JV^2}, \quad c = C_{Df} \frac{\sigma}{S}, \quad K = k \frac{R}{r}.$$

Здесь штрихом обозначена производная по безразмерному времени  $\tau = Vt/r$ .  $\omega = r\dot{\varphi}/V$  – безразмерная угловая скорость кривошипа,  $K$  – коэффициент редукции.

### 3.2. Метод описания стационарных движений

В настоящей работе программным движением считаем установившийся притягивающий режим, при котором корпус машины движется против ветра. Такому режиму отвечает орбитально устойчивая  $2\pi$ -периодическая по  $\varphi$  траектория  $p = \tilde{z}(\varphi; p_0)$  системы (2). Здесь  $p_0 = \tilde{z}(0; p_0)$ . Требуется установить достаточные условия существования такого режима и, если он существует, оценить среднее (по времени) значение  $v$  скорости корпуса на этом режиме, отнесенное к скорости ветра:

$$v(p_0) = 2\pi K \left( \int_0^{2\pi} \omega^{-1}(\varphi, \tilde{z}(\varphi; p_0)) d\varphi \right)^{-1}.$$

Для отыскания периодических решений (2) воспользуемся методом [7]. Периодическую траекторию  $p = \tilde{z}(\varphi; p_0)$  ищем как предел последовательности  $z_n(\varphi; p_0)$  вида:

$$\begin{aligned} z_0(\varphi; p_0) &= \sqrt{2(h_0 - b \sin \varphi)}, \quad h_0 = \frac{p_0^2}{2}, \\ c_0(p_0) &= \frac{1}{2\pi\omega_0} \int_0^{2\pi} Q(\varphi, z_0(\varphi; p_0)) d\varphi, \\ z_n(\varphi; p_0) &= \operatorname{Re} \sqrt{2 \left( h_0 - b \sin \varphi + a \int_0^\varphi (Q(\vartheta, z_{n-1}(\vartheta)) - Kc_{n-1}s^2(\vartheta, z_{n-1}(\vartheta))) d\vartheta \right)}, \\ c_n(p_0) &= \left( \int_0^{2\pi} z_n(\varphi; p_0) d\varphi \right)^{-1} \int_0^{2\pi} Q(\varphi, z_n(\varphi; p_0)) d\varphi, \quad n \geq 1. \end{aligned}$$

Если последовательность  $z_n(\varphi; p_0)$  сходится при всех  $\varphi$  к положительному пределу, то при соответствующем  $c = \tilde{c}(p_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} c_n(p_0)$  в системе (2) существует периодическая траектория  $\tilde{z}(\varphi; p_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} z_n(\varphi; p_0)$ , отвечающая установившемуся движению ветромобиля против ветра, и она орбитально устойчива, если  $d\tilde{c}(p_0)/dp_0 < 0$  ([7]). Варьируя значение  $p_0$  находим периодические траектории, существующие при различных  $c$ .

### 3.3. Регулирование скорости корпуса

Геометрические и инерционные параметры модели предполагаем заданными. Для примера рассмотрим случай:  $J_1 J^{-1} = 0.2$ ,  $M/m = 3.5$ ,  $mr^2 J^{-1} = 0.5$ ,  $rl^{-1} = 0.4$ ,  $a = 1$ ,  $b = 0.5$ . Используя описанную выше процедуру, построим зависимость средней нормированной скорости  $v$  корпуса от коэффициента сопротивления  $c$  корпуса при различных значениях коэффициента  $K$  редукции: рис. 1. На рисунке сплошные линии отвечают притягивающим периодическим решениям, пунктирные – отталкивающим.

Пусть управление осуществляется путем изменения коэффициента  $K$ . Как правило, высокие значения скорости  $v$  достигаются при таком значении  $K$ , при котором область притяжения предпочтительного режима ограничена неустойчивым режимом. Далее для примера, считаем  $c = 1$ . Обозначим  $W$  точку диаграммы, отвечающую желаемому режиму движения. Соответствующее программное значение  $K$  составляет  $K = 0.1$ . Область притяжения режима, отвечающего точке  $W$ , при  $K = 0.1$  ограничена неустойчивым режимом, отвечающим точке  $H$  диаграммы. Для перехода на режим  $W$  эффективна следующая стратегия: в начальный момент установить такое значение  $K$ , что для заданного  $c$  существует единственный притягивающий режим движения с положительным значением  $v$ , расположенный «выше» неустойчивого режима  $H$ . Например, при

$K = 0.08$  это режим  $Z$ . Отметим, что для перехода на режим  $Z$  может потребоваться обеспечить начальное значение угла  $\varphi$  поворота кривошипа из некоторого диапазона. После перехода системы в окрестность режима  $Z$  меняем значение коэффициента  $K$  на  $K = 0.1$ . В результате система переходит в окрестность программного режима  $W$ .

## 4. Заключение

Рассмотрена динамическая модель ветромобиля, перемещающегося посредством кривошипно-шатунной ветроустановки. Описаны установившиеся режимы движения ветромобиля против ветра. Построены оценки средней скорости корпуса в зависимости от параметров модели. Предложена стратегия управления для перехода на желаемый режим движения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-31-20029).

## Список литературы

1. Sørensen, J.N. General momentum theory for horizontal axis wind turbines (Vol. 4). Switzerland: Springer. 2016. 194 p.
2. Климина Л.А., Самсонов В.А., Hwang Sh.-Sh., Lin K.-H., Lin Ch.-H. Применение метода Пуанкаре-Понтрягина для описания динамики ветромобиля // Материалы XIII Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого). М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2016. С. 191-193.
3. Selyutskiy, Y.D., Klimina, L.A., Masterova, A.A., Hwang, S.S., Lin, C.H. Savonius rotor as a part of complex systems // Journal of Sound and Vibration. 2019. Vol. 442. P. 1–10.
4. Голуб А.П., Досаев М.З., Климина Л.А., Локшин Б.Я., Меснянкин С.Ю., Самсонов В.А., Селюцкий Ю.Д., Симоненко М.М. Устройство для преобразования возобновляемой энергии // Официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатент). Изобретения. Полезные модели. Т. 2. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 2018. Патент № 2641176.
5. Климина Л.А., Досаев М.З., Селюцкий Ю.Д. О динамике ветроэнергетической установки с рабочим элементом на основе механизма антипараллелограмма // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 8. С. 536-540.
6. Климина Л.А., Шалимова Е.С. Двухпропеллерная ветроэнергетическая установка с дифференциальной планетарной передачей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 10. С. 679-684.
7. Klimina L.A. Iterative method of construction of a bifurcation diagram of autorotation motions for a system with one degree of freedom // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1959, No. 1. P. 030011.
8. Досаев М.З., Самсонов В.А., Селюцкий Ю.Д. О динамике малой ветроэлектростанции // Доклады Академии наук. 2007. Т. 416, № 1. С. 50-53.
9. 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.
10. Табачников В.Г. Стационарные характеристики крыльев на малых скоростях во всем диапазоне углов атаки // Труды ЦАГИ. 1974. Вып. 1621. С. 79-93.