
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-50

С. А. КАБАНОВ, Е. С. ПЕТУХОВА

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА

Рассматривается схема ветроэнергетической установки с колебательным рабочим движением. Представлена математическая модель динамики поворотных аэродинамических поверхностей (планов). Для обеспечения минимума выбранного критерия Красовского разработан алгоритм оптимального управления поворотом рабочих поверхностей с использованием модели прогнозирования движения.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, оптимальное управление, модель прогнозирования движения.

В настоящее время такие источники энергии, как солнечная, ветровая, океаническая занимают в мировом производстве энергии лишь малую долю (менее 1 %), хотя являются возобновляемыми и относятся к экологически чистым. Ухудшение экологической обстановки обуславливает необходимость разработки устройств, позволяющих увеличить процент использования этих источников энергии.

До недавнего времени исследования в области ветроэнергетики сводились к изучению ветроэнергетических установок (ВЭУ) с вращательным рабочим режимом. Импеллерами (преобразователями энергии ветрового потока) в таких установках служат ветротурбины с горизонтальными или вертикальными осями [1]. ВЭУ с вращательным рабочим режимом имеют достаточно ограниченное применение. Это обусловлено большой массой, приходящейся на единицу полезной мощности; невысоким коэффициентом использования мощности ветрового потока, проходящего через рабочую площадь турбины; ограниченными рабочим диапазоном скоростей ветра и способностью адаптации к изменению ветрового режима; значительной стоимостью и др. [2]. В целях устранения указанных недостатков А. А. Красовским был предложен новый класс ВЭУ — ветроэнергетические установки с колебательным рабочим режимом (ВЭУК) [1, 2]. В них энергия ветрового потока преобразуется в механическую колебательную энергию посредством импеллеров, совершающих автоколебания. Возбуждение автоколебаний производится как за счет аэродинамических, упругих и инерционных сил, так и с помощью автоматического управления поворотом аэродинамических поверхностей — планов импеллера [1].

В настоящей статье рассматривается задача оптимального управления наземной ветроэнергетической установкой с автоколебательным рабочим режимом.

Установка, схема которой представлена на рис. 1, *a* [3, 4], имеет внешнюю раму 1, не участвующую в колебательном вертикальном движении, и внутреннюю раму 2, подвешенную

во внешней на пружинах 3. Внутренняя рама (секция импеллера) содержит поворотные аэродинамические поверхности 4 (приводы поворота поверхностей на рисунке не показаны). В рабочем режиме рама 2 совершает возвратно-поступательные колебания, а рабочие поверхности 4 — синхронные колебания вокруг своей фиксированной оси при смене направления поступательного движения секции. Преобразование механической энергии возвратно-поступательного движения в электрическую может осуществляться различными способами.

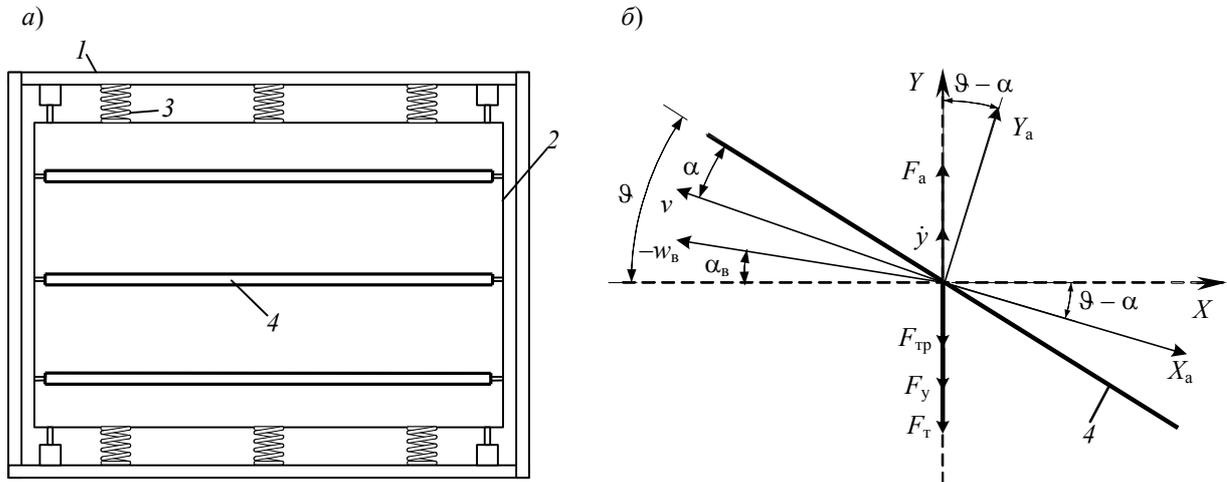


Рис. 1

Математическая модель ВЭУК [1, 3], приведенная на рис. 1, б, может быть представлена системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= \frac{F_a(x_2, x_3) - rx_2 - c_{\text{пр}}x_1 - mg}{m}; \\ \dot{x}_3 &= u. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ — вектор состояния системы со следующими компонентами: $x_1 = y$ — величина перемещения секции импеллера вдоль вертикальной оси; x_2 — скорость перемещения секции импеллера (\dot{y} на рис. 1, б); $x_3 = \alpha$ — угол атаки рабочей поверхности; F_a — сумма проекций аэродинамических сил (X_a, Y_a) на вертикальную ось; $rx_2 = F_{\text{тр}}$, где $F_{\text{тр}}$ — сила трения, r — коэффициент сопротивления; $c_{\text{пр}}x_1 = F_y$, где F_y — сила упругости пружин, $c_{\text{пр}}$ — суммарная жесткость; $mg = F_T$, где F_T — сила тяжести, m — масса конструкции, g — ускорение свободного падения.

Величина F_a определяется следующим образом:

$$F_a = 0,5\rho S_{\text{п}\Sigma} W v [C_Y(x_3) \cos \alpha_b - C_X(x_3) (\sin \alpha_b + x_2/W)],$$

где ρ — плотность воздуха; $S_{\text{п}\Sigma}$ — суммарная площадь рабочих поверхностей секции; W — модуль вектора скорости ветра w_b ; $v = \sqrt{x_2^2 + W^2 - 2x_2W \sin \alpha_b}$ — скорость движения рабочей поверхности относительно невозмущенного потока; α_b — угол, образуемый вектором скорости ветра w_b и нормалью к плоскости секции; $C_Y(x_3)$, $C_X(x_3)$ — аэродинамические характеристики, для аппроксимации которых используются следующие аналитические выражения:

$$C_Y(x_3) = A_Y \sin 2x_3; \quad C_X(x_3) = A_X(1 - \cos x_3) + C_{X0},$$

здесь $A_Y = 3$, $A_X = 0,5A_Y$ — постоянные коэффициенты; $C_{X0} = 0,1$.

Проекции (см. рис. 1, б)

$$Y_a = 0,5\rho v^2 C_Y(x_3) S_{\Pi}, \quad X_a = 0,5\rho v^2 C_X(x_3) S_{\Pi}$$

— подъемная сила и сила лобового сопротивления рабочей поверхности соответственно.

Начальные условия считаются заданными:

$$t_0 = 0, \quad x_1(0) = 0, \quad x_2(0) = 0, \quad x_3(0) = 0.$$

Сигналом управления является скорость изменения угла α : $\dot{x}_3 = \dot{\alpha} = u$.

Угол поворота ϑ рабочей поверхности (см. рис. 1, б) связан с углом α следующим соотношением:

$$\vartheta = \alpha + \arctg\left(\frac{x_2/W + \sin \alpha_{\text{в}}}{\cos \alpha_{\text{в}}}\right).$$

Ограничений на управление не накладывается.

Требуется найти оптимальное управление $u_{\text{опт}}$, обеспечивающее минимум функционала Красовского [5] вида

$$I = I_T + 0,5 \int_t^{t+\Delta t} \frac{u^2 + u_{\text{опт}}^2}{k^2} d\tau, \quad (2)$$

$$I_T = \pm [C_Y(x_3) \cos \alpha_{\text{в}} - C_X(x_3)(\sin \alpha_{\text{в}} + x_2/W)].$$

Здесь I_T — терминальная часть функционала, отражающая полезную составляющую аэродинамической силы; t — момент начала оптимизации движения (принимает различные значения); Δt — интервал оптимизации; k — постоянный коэффициент (его значение выбирается по результатам моделирования управляемого движения исходя из требований к переходному процессу).

В выражении (2) знак минус соответствует повороту рабочей поверхности для получения положительной аэродинамической силы, знак плюс — повороту рабочей поверхности для получения отрицательной аэродинамической силы. Смена знака происходит при изменении направления поступательного движения секции (при смене знака переменной состояния x_2).

Для минимизации функционала Красовского используем следующую модель прогнозирования движения при $u(t) = 0$ [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= \frac{F_a(x_2, x_3) - rx_2 - c_{\text{пр}}x_1 - mg}{m}; \\ \dot{x}_3 &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Гамильтониан системы имеет вид

$$H = H_M + p_3 u + 0,5 \frac{u^2 + u_{\text{опт}}^2}{k^2}.$$

Обозначим $f(x_1, x_2, x_3) = \frac{F_a(x_2, x_3) - rx_2 - c_{\text{пр}}x_1 - mg}{m}$, тогда

$$H_M = p_1 x_2 + p_2 f(x_1, x_2, x_3).$$

Здесь $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)^T$ — вектор сопряженных переменных (множителей Лагранжа).

Оптимальное управление определяется из условия $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$ как $u_{\text{опт}} = -k^2 p_3$. Система уравнений для сопряженных переменных имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{p}_1 &= -\frac{\partial H_M}{\partial x_1} = -p_2 \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_1}; \\ \dot{p}_2 &= -\frac{\partial H_M}{\partial x_2} = -p_1 - p_2 \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_2}; \\ \dot{p}_3 &= -\frac{\partial H_M}{\partial x_3} = -p_2 \frac{\partial f(x_1, x_2, x_3)}{\partial x_3} \end{aligned} \right\}$$

при граничных условиях

$$\mathbf{p}^T(t + \Delta t) = \frac{\partial I_T}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{t + \Delta t}.$$

Отсюда для отрицательных аэродинамических сил получим

$$\left. \begin{aligned} p_1(t + \Delta t) &= \frac{\partial I_T}{\partial x_1} \Big|_{t + \Delta t} = 0; \\ p_2(t + \Delta t) &= \frac{\partial I_T}{\partial x_2} \Big|_{t + \Delta t} = \frac{-C_X(x_3)}{W}; \\ p_3(t + \Delta t) &= \frac{\partial I_T}{\partial x_3} \Big|_{t + \Delta t} = \left[\frac{\partial C_Y(x_3)}{\partial x_3} \cos \alpha_B - \frac{\partial C_X(x_3)}{\partial x_3} \left(\sin \alpha_B + \frac{x_2}{W} \right) \right], \end{aligned} \right\}$$

для положительных аэродинамических сил —

$$\left. \begin{aligned} p_1(t + \Delta t) &= \frac{\partial I_T}{\partial x_1} \Big|_{t + \Delta t} = 0; \\ p_2(t + \Delta t) &= \frac{\partial I_T}{\partial x_2} \Big|_{t + \Delta t} = \frac{C_X(x_3)}{W}, \\ p_3(t + \Delta t) &= \frac{\partial I_T}{\partial x_3} \Big|_{t + \Delta t} = \left[-\frac{\partial C_Y(x_3)}{\partial x_3} \cos \alpha_B + \frac{\partial C_X(x_3)}{\partial x_3} \left(\sin \alpha_B + \frac{x_2}{W} \right) \right]. \end{aligned} \right\}$$

Поскольку задача является нетерминальной (момент окончания процесса заранее не назначается), используется скользящий интервал оптимизации, величина которого определяется по результатам моделирования.

Математическое моделирование управляемого движения ВЭУК производилось при следующих значениях параметров системы и внешней среды: $m = 5$ кг, $\alpha_B = 0$, $c_{\text{пр}} = 100$ Н/м, $W = 5$ м/с, $r = 38$ Н·с/м, $S_{\text{пс}} = 1$ м², $\rho = 1,29$ кг/м³, $k = 3,5$, $\Delta t = 0,1$ с, шаг интегрирования 0,001 с. Результаты моделирования в виде зависимостей величины перемещения x_1 секции импеллера, угла поворота ϑ этой секции и угла атаки α от времени представлены на рис. 2—4.

Итак, рассмотрено решение нетерминальной задачи оптимального управления ветроэнергетической установкой с автоколебательным рабочим режимом на основе алгоритма,

использующего модель прогнозирования движения. Как показали результаты моделирования, применение этого алгоритма позволяет решить задачу оптимального управления, обеспечивая при этом требуемое качество переходных процессов.

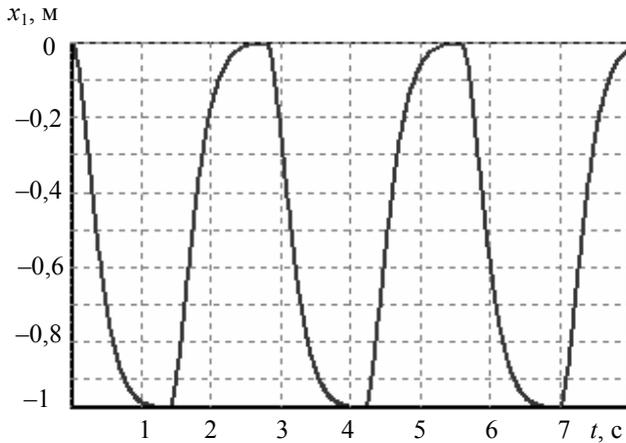


Рис. 2

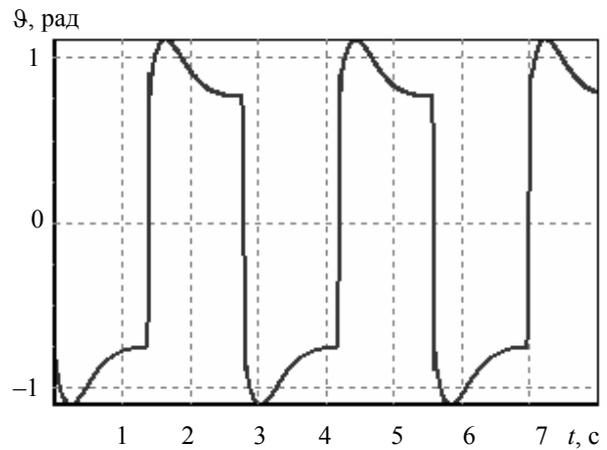


Рис. 3

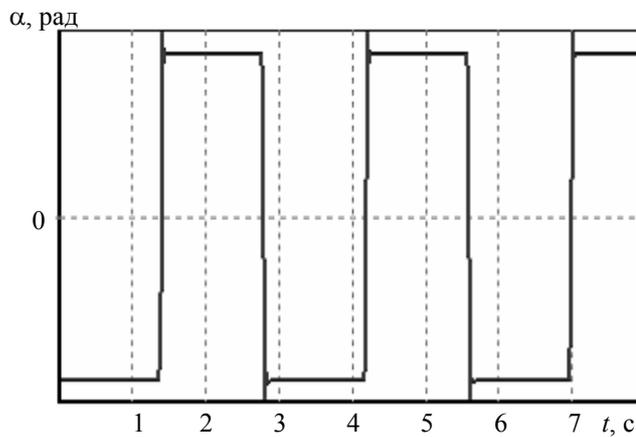


Рис. 4

При решении задачи были определены возможные направления дальнейших исследований. Моделирование в среде „Fluent“ процесса обтекания профиля поверхности ВЭУК невязким газом показывает, что предельное значение скорости изменения угла атаки ограничено. Поэтому при синтезе установки следует ввести ограничение на управление. Также в системе (1) следует учесть инерционность динамики рабочей поверхности при ее повороте на оптимальный угол. Кроме того, при разработке конструкции ВЭУК должны быть предусмотрены возможности экстренного торможения, снабжения системой антиобледенения и системой контроля уровня вибраций. Решение этих вопросов позволит создать экономичные и экологически чистые системы энергообеспечения.

Исследования, описанные в настоящей статье, выполнены по гранту Российского фонда фундаментальных исследований, № 09-08-00829.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красовский А. А. Синтез автоколебательных систем с приложением к ветроэнергетической установке нового класса // Изв. РАН. Сер. Техн. кибернетика. 1994. № 6. С. 5—15.
2. Красовский А. А. Синтез цилиндроэллиптических аттракторов с приложением к ветроэнергетической установке нового класса // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 1996. № 2. С. 21—30.

3. Красовский А. А. Модульные ветроэнергетические установки с управляемым колебательным рабочим движением — путь решения энергетических проблем // Там же. 2001. № 6. С. 145—151.
4. Красовский А. А. Синтез полиномиальных автоколебательных систем пятой—седьмой степени // Автоматика и телемеханика. 2002. № 10. С. 44—57.
5. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987.
6. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997.

Сведения об авторах**Сергей Александрович Кабанов**

- д-р техн. наук, профессор; Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра систем обработки информации и управления, Санкт-Петербург;
E-mail: kabanov@bstu.spb.su

Елена Сергеевна Петухова

- инженер; Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра систем обработки информации и управления, Санкт-Петербург; E-mail: helpet@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
систем обработки информации
и управления

Поступила в редакцию
07.12.07 г.