

УДК 62-529 + 621.548

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА

Г.А. Петров

*Тамбовское высшее военное авиационное инженерное училище  
радиоэлектроники (военный институт)*

*Представлена профессором В.И. Павловым и  
членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** ветроэнергетика; оптимальное управление; системы автоматического управления.

**Аннотация:** Исследуется математическая модель ветроэнергетической установки колебательного типа и синтезируется система управления ею с целью повышения энергоотдачи.

---

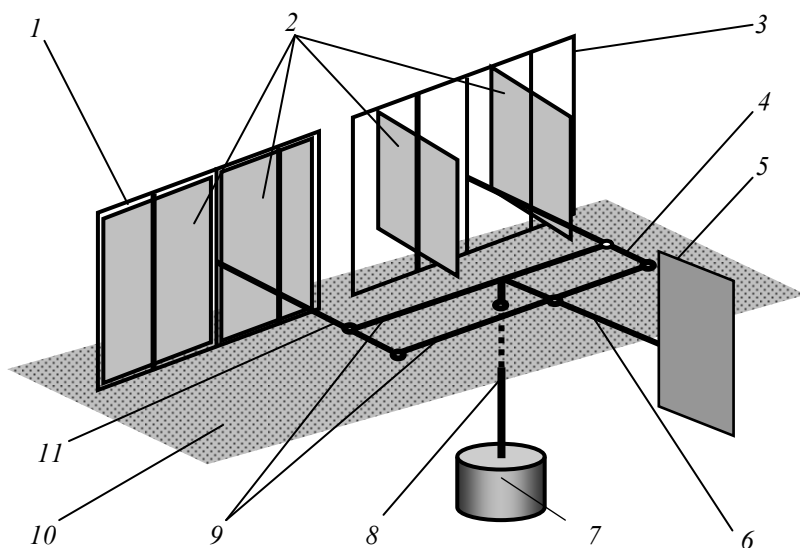
Истощение мировых запасов топливных материалов вызывает стабильный интерес к возобновляемым источникам энергии – источникам на основе постоянно существующих или периодически возникающих в окружающей среде потоков энергии. Наибольших результатов в преобразовании этих потоков для промышленных нужд достигла ветроэнергетика: современные ветроустановки производят электроэнергию, соизмеримую с традиционными типами электростанций, причем доля альтернативных источников в общем производстве электроэнергии ежегодно возрастает [6].

Существует большое разнообразие конструкций ветроэнергетических установок (ВЭУ) [2]. Для Российской Федерации, территория которой является в основном равнинной, пригодны ВЭУ, способные работать в условиях относительно невысоких скоростей воздушного потока. Этому требованию отвечают ветроэнергетические установки колебательного типа (ВЭУ КТ) [5]. В данной статье исследуется одна из подобных конструкций, а также синтезируется система оптимального управления ею с целью повышения энергоотдачи.

На рис. 1 приведена кинематическая схема ВЭУ КТ [4]. Данная установка работает следующим образом: платформа 10 за счет флюгера 5 разворачивается таким образом, что опорные рамы 1 и 3 устанавливаются в положение, перпендикулярное вектору воздушного потока  $\vec{u}$ .

В исходном состоянии поворотные лопасти 2 одной из рам закрыты, другой – открыты. Воздушный поток создает на них различные по величине аэродинамические силы. Вследствие этого опорная рама с закрытыми лопатками вместе с соответствующей боковой балкой (4 или 11) начинает перемещаться назад. Соответственно другие рама и боковая балка перемещаются вперед.

При достижении опорными рамами определенного положения поворотные лопасти переключаются в противоположное состояние. Движение боковых балок



**Рис. 1. Кинематическая схема ВЭУ колебательного типа:**  
 1, 3 – опорные рамы; 2 – поворотные лопатки; 4, 11 – боковые балки;  
 5 – флюгер; 6 – средняя балка; 7 – механизм преобразования вращения;  
 8 – вал; 9 – поперечные тяги; 10 – платформа

замедляется вплоть до полной остановки, затем они начинают двигаться в обратном направлении, и все действия повторяются.

Таким образом, элементы конструкции 4 и 11 совместно с поперечными тягами 9 совершают колебательные движения.

С помощью вала 8 эти колебания передаются устройству отбора мощности 7, основу которого представляет электрический генератор. Для обеспечения возможности применения стандартных электрогенераторов колебательные движения ветроустановки необходимо преобразовать в однонаправленное вращение. На рис. 2 приведен вариант конструкции такого механизма.

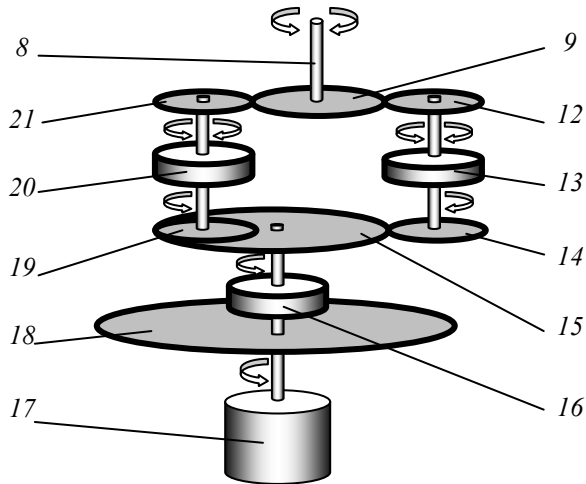
Входной вал 8 воспринимает колебательные движения от ветроустановки и с помощью зубчатых колес 9, 12 и 21 передает двунаправленное вращение храповым муфтам 13 и 20. Направление зацепления этих муфт различное. Благодаря этому вращение зубчатых колес 14 и 19 однонаправленное, но противоположное друг другу.

Зубчатое колесо 15 также вращается в одном направлении и получает энергию в течение всего периода колебания ВЭУ за счет внутреннего зацепления с колесом 19 и внешнего – с колесом 14. Однонаправленное вращение колеса 15 передается через храповую муфту 16 и маховик 18 ротору генератора 17, вырабатывающему электроэнергию.

Рассмотрим рис. 3, представляющий собой вид сверху на ветроустановку.

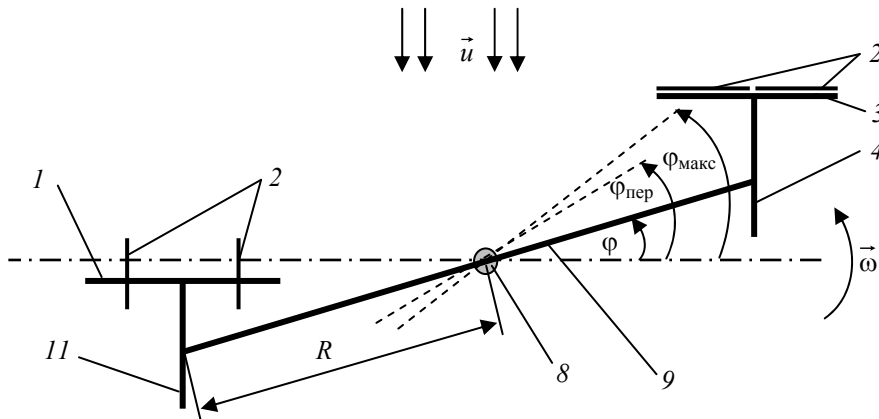
Для построения математической модели ВЭУ КТ условно разделим всю конструкцию на две части. Одну из них, объединяющую маховик 18 и электрогенератор 17 (см. рис. 2), будем считать нагрузкой. Другую, состоящую из элементов 1 – 6, 8 – 15, 19 – 21, назовем собственно ветроустановкой. Соединение этих частей производится с помощью храповой муфты 16. Таким образом, конструкция является системой с переменной структурой.

В периоды времени, когда угловая скорость вращения опорных рам меньше, чем угловая скорость вращения маховика, собственно ветрогенератор механиче-



**Рис. 2. Механизм преобразования вращения:**

8 – входной вал; 9, 12, 14, 15, 19, 21 – передаточные зубчатые колеса;  
13, 16, 20 – храповые муфты; 17 – генератор; 18 – маховик



**Рис. 3. ВЭУ колебательного типа: вид сверху**  
(цифровые обозначения совпадают с рис. 1):

$\vec{\omega}$  – угловая частота вращения элементов конструкции;  
 $R$  – половина длины поперечной балки 9

ски не связан с нагрузкой за счет проскальзывания храповой муфты 16 (см. рис. 2). Следовательно, в этот момент каждая ВЭУ КТ описывается системой уравнений

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{\text{ВЭУ}} = \frac{1}{J_{\text{ВЭУ}}} M_{\text{ВЭУ}}, \\ \dot{\omega}_{\text{нагр}} = \frac{1}{J_{\text{нагр}}} M_{\text{нагр}}, \\ \dot{\varphi} = \omega_{\text{ВЭУ}}. \end{cases} \quad (1)$$

В периоды времени, когда угловая скорость вращения элементов ветроустановки  $\omega_{ВЭУ}$  достигает значения, равного угловой скорости вращения маховика  $\omega_{нагр}$ , храповая муфта 16 соединяет части ВЭУ, обеспечивая равенство  $\omega_{нагр}$  и  $\omega_{ВЭУ}$ .

В этот период состояние ветрогенератора описывается следующей системой

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{ВЭУ} = \frac{1}{J_{ВЭУ} + J_{нагр}} M_{\Sigma}, \\ \dot{\varphi} = \omega_{ВЭУ}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $M_{\Sigma}$  – результирующий момент сил, действующий на ВЭУ.

При решении систем уравнений (1) и (2) предварительно были определены  $M_{ВЭУ}$ ,  $M_{нагр}$  и  $M_{\Sigma}$  – моменты сил, действующие на ветрогенератор.

На опорных рамах за счет набегающего воздушного потока  $\vec{v}$  возникают аэродинамические силы [1]

$$\vec{F} = C_x \rho S \vec{v}^2 / 2, \quad (3)$$

где  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления опорной рамы;  $\rho$  – плотность воздуха;  $S$  – суммарная площадь поверхности рамы;  $\vec{v}$  – линейная скорость перемещения лопаток относительно воздушного потока.

Крутящий момент, создаваемый этой силой, вычисляется по формуле

$$\vec{M} = \vec{F} R. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) математическая модель ВЭУ колебательного типа, описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{ВЭУ} = \frac{\rho R \cos \varphi (K_3 (u - \omega_{ВЭУ} R \cos \varphi)^2 - K_0 (u + \omega_{ВЭУ} R \cos \varphi)^2) - \mu M_{нагр}}{2(J_{ВЭУ} + \mu J_{нагр})} \\ \dot{\varphi} = \omega_{ВЭУ} \\ \dot{\omega}_{нагр} = \frac{1 - \mu}{J_{нагр}} M_{нагр} + \mu \dot{\omega}_{нагр}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $K = C_x S$  – коэффициент, учитывающий лобовое сопротивление поверхностей площадью  $S$ , нижние индексы у этого коэффициента (0, 3) указывают на отношение к опорным рамам с открытыми или закрытыми поворотными лопатками;  $\mu$  – коэффициент сцепления

$$\mu = \begin{cases} 0, \omega_{ВЭУ} < \omega_{нагр}; \\ 1, \omega_{ВЭУ} = \omega_{нагр}. \end{cases} \quad (6)$$

При решении систем уравнений (5) и (6) применен метод Рунге–Кутты четвертого порядка [3].

По результатам расчетов построены графики изменений коэффициента сцепления  $\mu$ , угла отклонения продольной балки 9 от среднего положения –  $\varphi$  (см. рис. 3), угловых скоростей вращения этой балки  $\omega_{ВЭУ}$  и маховика  $\omega_{нагр}$ . Они изображены на рис. 4.

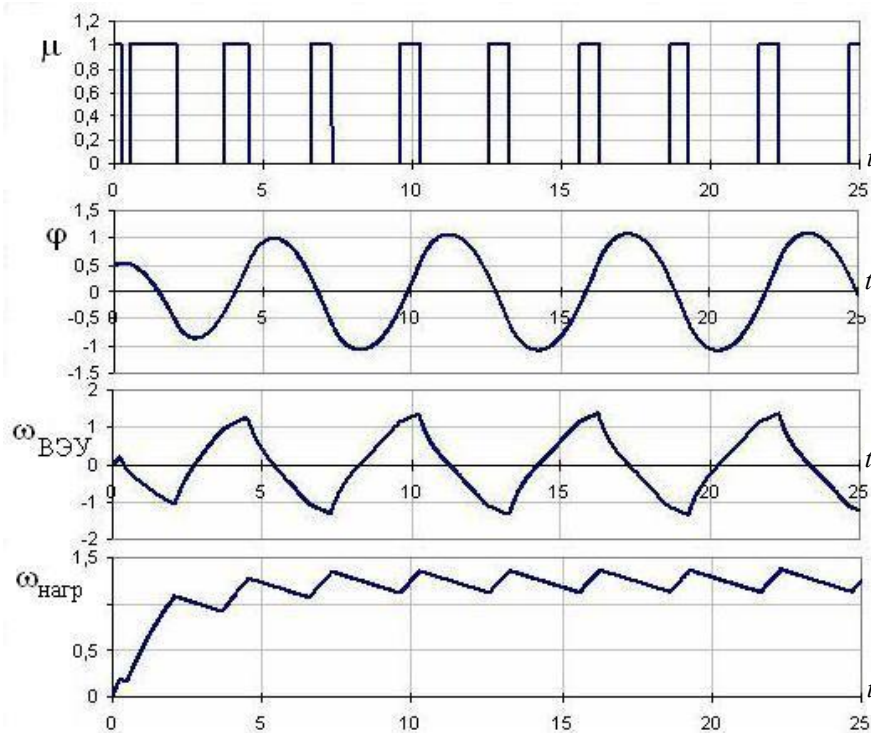


Рис. 4. Графики изменения параметров ВЭУ

Эти графики демонстрируют следующее: в течение 5...10 с ветроустановка колебательного типа работает в режиме разгона:  $\mu$ ,  $\omega_{\text{ВЭУ}}$  и  $\omega_{\text{нагр}}$  постепенно увеличиваются до значений, соответствующих установившемуся режиму. Изменение коэффициента сцепления  $\mu$  в течение этого времени также происходит с непостоянным периодом. Управление параметрами ВЭУ в течение указанного времени нецелесообразно.

При исследовании математической модели (5) и (6) в установившемся режиме при различных скоростях ветра  $\vec{u}$  и моменте  $M_{\text{нагр}}$  определялось значение мгновенной мощности, измеряемой на нагрузке, по формуле

$$P = M_{\text{нагр}} \omega_{\text{нагр}}. \quad (7)$$

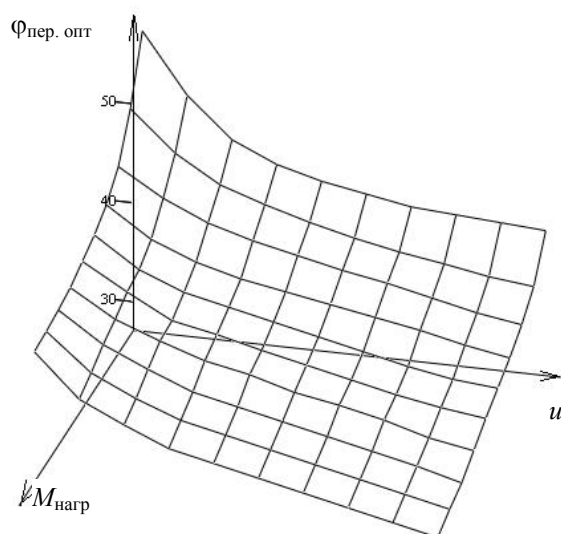
Затем проводилось интегрирование

$$P = \int_{t_0}^{t_k} dP dt, \quad (8)$$

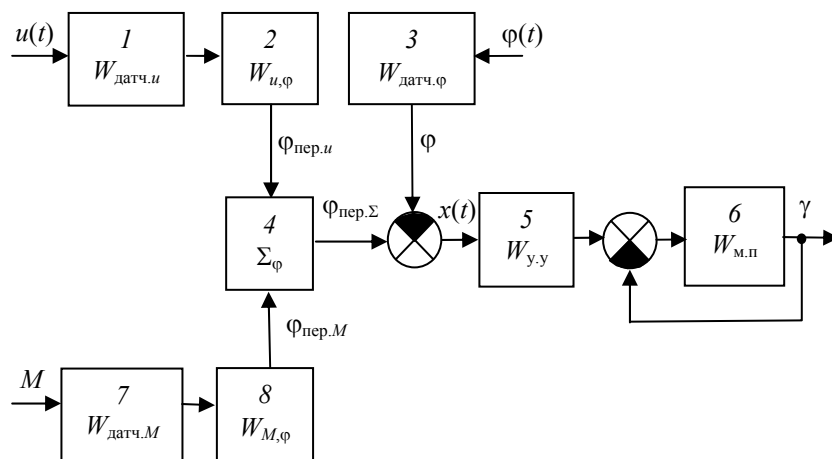
где  $t_0$  – начало установившегося режима;  $t_k$  – конечное время интегрирования (выбиралось в диапазоне от 20...300 с).

По максимальному значению  $P$  для каждого значения  $\vec{u}$  и  $M_{\text{нагр}}$  определялся оптимальный угол переключения поворотных лопаток  $\varphi_{\text{пер. опт}}$ . По этим данным построен график оптимального управления изменением угла переключения поворотных лопаток  $\gamma$  (рис. 5).

Исходя из этого анализа математической модели для достижения максимальной энергоотдачи система управления ВЭУ КТ должна иметь структуру, изображенную на рис. 6.



**Рис. 5. График зависимости оптимального угла переключения поворотных лопаток от нагрузки  $M_{нагр}$  и скорости воздушного потока  $u$**



**Рис. 6. Структурная схема системы оптимального управления ВЭУ КТ:**  
 1, 3, 7 – датчики скорости ветра, угла поворота поперечной балки и нагрузки  
 с передаточными характеристиками  $W_{датч. u}$ ,  $W_{датч. \varphi}$ ,  $W_{датч. M}$ ; 2, 4, 8 – вычислители  
 оптимального угла переключения  $\varphi_{пер}$  с передаточными характеристиками  $W_{u, \varphi}$ ,  $W_{M, \varphi}$ ,  $\Sigma_{\varphi}$ ;  
 5 – устройство управления ( $W_{y, y}$ ); 6 – механизм переключения поворотных лопаток ( $W_{м.п}$ )

### Список литературы

1. Бундас, В.В. Расчеты при проектировании электроснабжения. Таблицы и графики / В.В. Бундас. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 155 с.
2. Ветроэнергетика : пер. с англ. / под ред. Д. де Рензо.– М. : Энергоатомиздат, 1982. – 271 с.
3. Гловацкая, А.П. Методы и алгоритмы вычислительной математики / А.П. Гловацкая. – М. : Радио и связь, 1999. – 408 с.

4. Пат. 2173791 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 03 D 3/06. Ветровая энергетическая установка / Милошевич В.Р., Карапетян Р.М., Конюхов М.И., Петров Г.А. ; заявитель и патентообладатель Тамбовский ВАИИ. – № 99120251/06; заявл. 23.09.1999 ; опубл. 20.09.2001, Бюл. № 26. – 3 с.

5. Проценко, А.Н. Энергетика сегодня и завтра / А.Н. Проценко. – М. : Молодая гвардия, 1987. – 219 с.

6. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии : пер. с англ. / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.

---

## **System of Control over Wind-Driven Electric Plant of Vibratory Type**

**G.A. Petrov**

*Tambov Higher Military Aviation Engineering College of Radio-Electronics*

**Key words and phrases:** automated control systems; optimal control; wind-power engineering.

**Abstract:** Mathematical model of wind-driven electric plant of vibratory type is examined; the system of its control is synthesized in order to improve the energy effect.

---

## **Steuersystem von der windenergetischen Anlage des Schwingungstyps**

**Zusammenfassung:** Es wird das mathematische Modell der windenergetischen Anlage des Schwingungstyps untersucht und es wird ihres Steuersystem mit dem Ziel der Erhöhung der Energieabgabe systematisiert.

---

## **Système de la commande de l'installation éolienne énergétique du type oscillatoire**

**Résumé:** Est examiné le modèle mathématique de l'installation éolienne énergétique du type oscillatoire; est synthésé le système de sa commande dans le but de l'augmentation du rendement énergétique.

---