

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ТИПА

И.В. Милосердов, Г.А. Петров

Тамбовское высшее военное авиационное инженерное училище радиоэлектроники
(Военный институт) ТВВАИУРЭ (ВИ); *germpet@mail.ru*

Представлена членом редколлегии профессором Ю.Л. Муромцевым

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

Аннотация: Исследуется система автоматического управления ветроэнергетической установкой колебательного типа с целью обеспечения устойчивости ее работы.

Возможности современной ветроэнергетики позволяют производить электроэнергию, мощность которой сопоставима с продукцией, вырабатываемой традиционными типами электростанций. Для равнинной территории Российской Федерации целесообразно применение ветроэнергетических установок колебательного типа (ВЭУ КТ) [1]. Исследования, проведенные в [2], показали, что на энергоотдачу ВЭУ КТ оказывает влияние угол переключения поворотных лопаток $\varphi_{\text{пер}}$. Система управления ветроустановкой, отслеживающая эту величину, позволяет повысить на 30 % производительность ВЭУ КТ.

Целью работы является исследование качества системы управления и определение параметров, влияющих на ее устойчивость.

Требуемый режим переключения лопаток обеспечивается устройством управления (УУ). В основе его лежит релейный элемент (РЭ) с зоной нечувствительности и отрицательным гистерезисом [3] (рис. 1, а).

При поступлении на вход РЭ сигнала амплитудой c , соответствующего φ – углу отклонения поперечной балки от среднего положения (рис. 1, в), УУ вырабатывает управляющее воздействие, поступающее на исполнительный механизм (рис. 1, б).

Механизм переключения (МП) поворачивает лопатки ВЭУ КТ в диапазоне $\gamma = 0 \dots 90^\circ$ (рис. 1, з). Реальному МП на поворот требуется конечное время. На рис. 1, з оно обозначено как $t_{\text{пер}}$. Эта величина зависит от угловой скорости вращения лопаток $\omega_{\text{пов}}$.

В качестве МП выбран электропривод на основе двигателя постоянного тока с управлением по якорной цепи [4]. Этот вариант в большей степени удовлетворяет условиям работы ВЭУ: малые габариты, относительно небольшой вес. На начальном этапе, когда ветроустановка еще не вошла в рабочий режим, есть возможность использования аккумуляторных батарей.

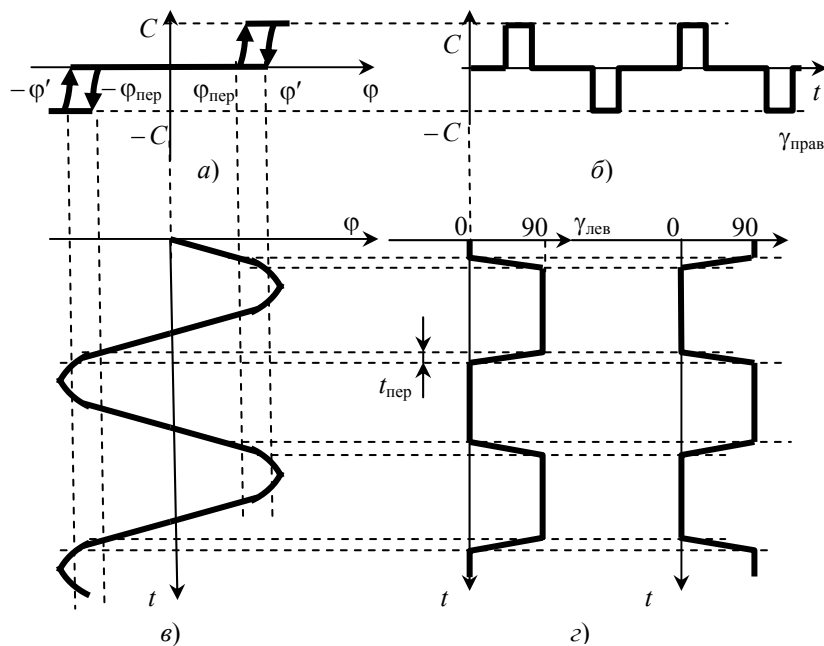


Рис. 1. Временные графики системы управления ветрогенератором колебательного типа:

- а* – характеристика релейного элемента в устройстве управления;
- б* – управляющий сигнал, обеспечивающий работу механизма поворота лопаток;
- в* – график отклонения поперечной балки от среднего положения;
- г* – графики переключения поворотных лопаток

Регулировка электропривода обычно осуществляется с помощью полупроводниковых преобразователей. На рис. 2 приведена принципиальная схема объекта управления: к якорной цепи приложена ЭДС преобразователя $E_{\text{п}}$, в результате чего через обмотку протекает ток $I_{\text{я}}$, а ротор вращается с угловой скоростью $\omega_{\text{р}}$. К обмотке возбуждения приложено напряжение $U_{\text{в}}$, вызывающее в ней ток $I_{\text{в}}$.

Дифференциальные уравнения, описывающие процессы в МП, имеют вид [5]:

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = \frac{1}{T} \left[\frac{1}{R_{\text{з}}} (E_{\text{дв}} - K_{\text{дв}} \omega_{\text{пов}}) - I_{\text{я}} \right]; \\ \frac{d\omega_{\text{пов}}}{dt} = \frac{1}{J_{\text{пр}}} [K_{\text{дв}} (I_{\text{я}} - I_{\text{н}})], \end{cases}$$

где $T = L_{\text{з}}/R_{\text{з}}$ – электромагнитная постоянная двигателя; $L_{\text{з}}$ и $R_{\text{з}}$ – эквивалентные индуктивность и сопротивление в цепи электропривода соответственно; $K_{\text{дв}}$ – коэффициент передачи двигателя; $I_{\text{н}}$ – ток нагрузки; $E_{\text{дв}}$ – ЭДС двигателя; $J_{\text{пр}}$ – приведенный к валу момент инерции двигателя.

Для перехода к операторной форме уравнений применено преобразование Лапласа и произведена замена $\frac{d}{dt} \rightarrow s$.

По полученным уравнениям построена структурная схема объекта управления (рис. 3).

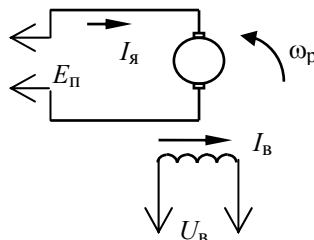


Рис. 2. Принципиальная схема механизма переключения

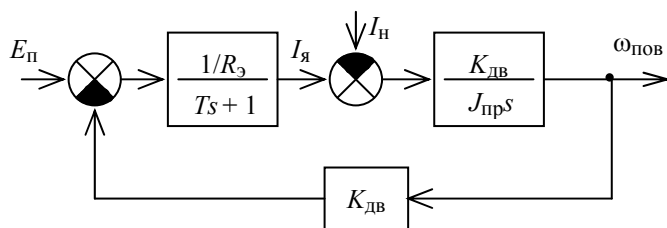


Рис. 3. Структурная схема механизма переключения

Линеаризованную модель механизма переключения лопаток ВЭУ можно представить с помощью уравнения, описывающего изменение переменных состояния вектора $\mathbf{x}(t)$ при изменении управляющих $\mathbf{u}(t)$ и возмущающих $\mathbf{f}(t)$ воздействий:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t) + \mathbf{C}\mathbf{f}(t). \quad (1)$$

В этом уравнении векторы:

$$\mathbf{x}(t) = [I_{я} \quad \omega_{пов}]^T; \quad \mathbf{u}(t) = [E_{\pi}]; \quad \mathbf{f}(t) = [I_{н}];$$

и матрицы:

$$\mathbf{A}(2 \times 2) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T} & -\frac{K_{дв}}{TR_э} \\ \frac{K_{дв}}{J_{пр}} & 0 \end{bmatrix} \text{ – матрица состояния;}$$

$$\mathbf{G}(2 \times 1) = \begin{bmatrix} 1 \\ TR_э \\ 0 \end{bmatrix} \text{ – матрица управления;}$$

$$\mathbf{C}(2 \times 1) = \begin{bmatrix} 0 \\ K_{дв} \\ -J_{пр} \end{bmatrix} \text{ – матрица возмущения.}$$

Оценку качества системы управления ВЭУ КТ [2] выполним с помощью интегрального критерия Летова–Калмана [6]:

$$I = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{B} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt, \quad (2)$$

где \mathbf{B} – матрица весовых коэффициентов, характеризующая качество переходного процесса и удовлетворяющая признакам положительной определенности Сильвестра [7]. Она задается в виде симметрической матрицы ($n \times n$). Путем задания значений весовых коэффициентов b_{ij} квадратичной формы можно влиять на меру чувствительности оценки (2) к характеру изменения отдельных фазовых координат x_i , $i = 1, \dots, n$, исследуемой системы. Матрица \mathbf{R} – диагональная, положительно определенная – характеризует энергетические затраты.

Путем назначения определенного соответствия между матрицами \mathbf{B} и \mathbf{R} устанавливается требуемая чувствительность критерия к «расходу управлений» и к ошибкам стабилизации состояния.

Оптимальное управление в смысле заданной структуры функционала (2) рассчитывается по формуле

$$\mathbf{K}_{\text{опт}} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{P}. \quad (3)$$

Симметрическая матрица \mathbf{P} , входящая в это выражение, вычисляется из матричного нелинейного симметрического уравнения типа Риккати [8]:

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{G}\mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{P} = -\mathbf{B},$$

где \mathbf{A} и \mathbf{G} – матрицы коэффициентов объекта управления, описываемого уравнениями (1).

С учетом выражения $\mathbf{u} = -\mathbf{K}_{\text{опт}}\mathbf{x}$ подынтегральную функцию (2) можно представить в виде

$$\mathbf{x}^T (\mathbf{B} + \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K}) \mathbf{x}.$$

Тогда выражение интегральной оценки (2) определяется

$$I = \mathbf{x}_0^T \mathbf{\Gamma} \mathbf{x}_0.$$

где \mathbf{x}_0 – начальное значение вектора состояния \mathbf{x} динамической системы.

Матрица $\mathbf{\Gamma}$ вычисляется из уравнения

$$\mathbf{\Gamma}(\mathbf{A} - \mathbf{G}\mathbf{K}) + (\mathbf{A} - \mathbf{G}\mathbf{K})^T \mathbf{\Gamma} = -\mathbf{B} - \mathbf{K}^T \mathbf{R} \mathbf{K},$$

в котором $\mathbf{D} = \mathbf{A} - \mathbf{G}\mathbf{K}$ – матрица коэффициентов управляемой системы.

Используя данную методику, подставляем в (1) из работы [2] значения элементов матриц и определяем устойчивость системы управления ветроэнергетической установкой колебательного типа.

Результаты исследования представлены на рис. 4–6.

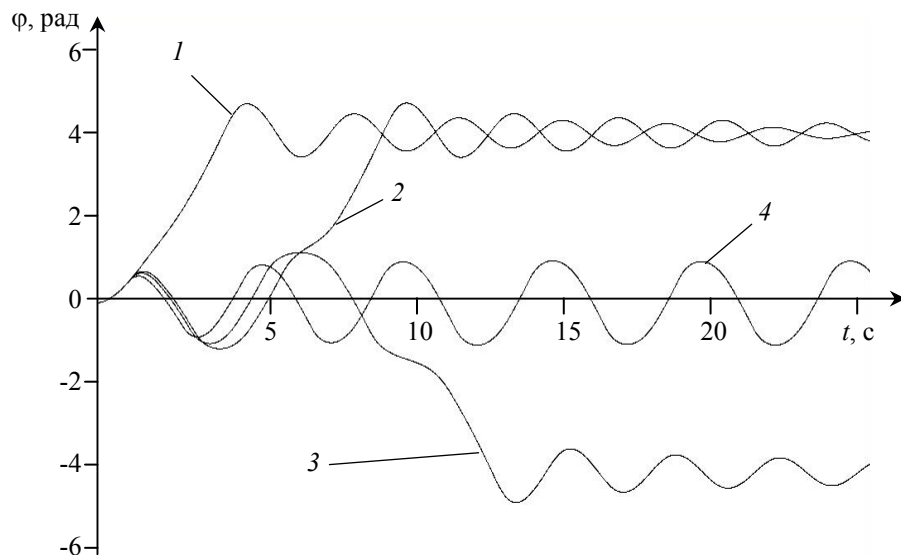


Рис. 4. Зависимость угла отклонения поперечной балки от среднего положения при различных угловых скоростях поворота лопаток, рад/с:
1 – 1; 2 – 4; 3 – 7; 4 – 10

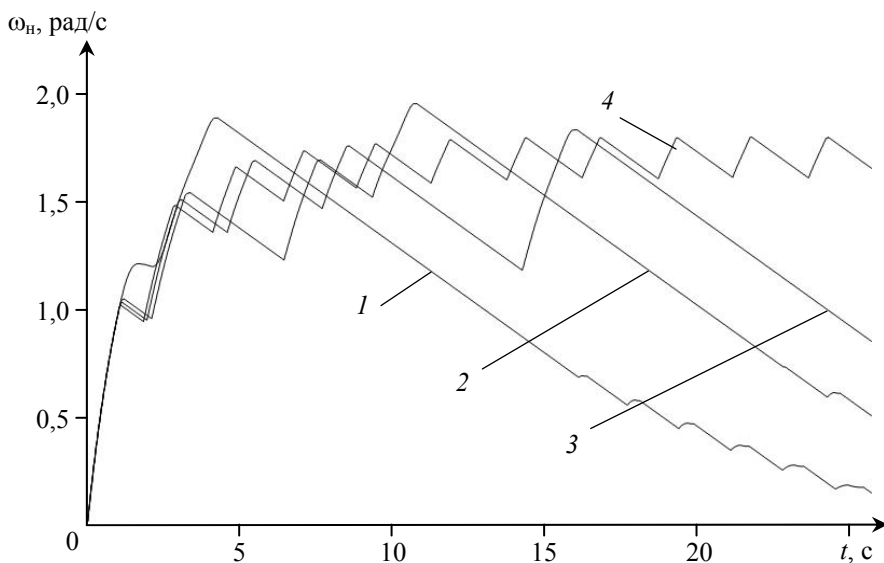


Рис. 5. Изменение угловых скоростей вращения маховика ω_n при различных угловых скоростях поворота лопаток, рад/с:
1 – 1; 2 – 4; 3 – 7; 4 – 10

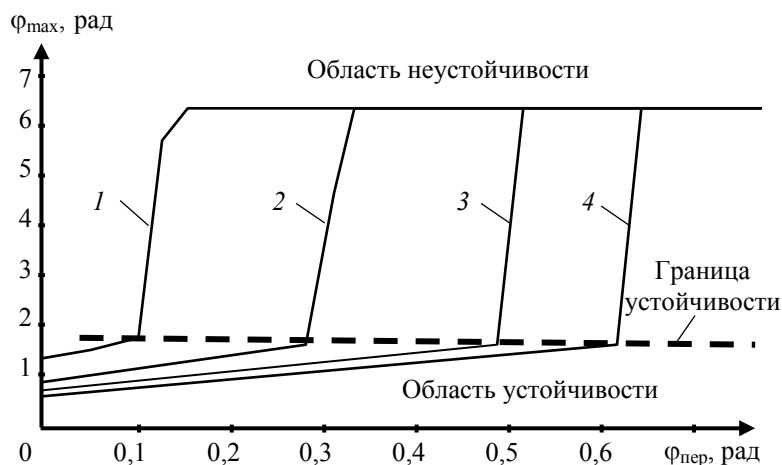


Рис. 6. Зависимость области устойчивого режима при заданном оптимальном угле переключения $\phi_{пер}$ от угловой скорости $\omega_{пов}$, рад/с:
1 – 1; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 10

Зависимость изменения угла отклонения поперечной балки ϕ от среднего положения ВЭУ КТ показана на рис. 4. Графики показывают, что при $\omega_{пов} = 1 \dots 7$ рад/с объект управления не устойчив: значение ϕ стремится к 360° , то есть ветроустановка вместо колебательных движений совершает вращательные. Энергоотдача ветроустановки в этих случаях уменьшается до 0 (см. рис. 5). В реальной конструкции ВЭУ КТ такой эффект невозможен благодаря параллелограммному механизму [1, 2]: при достижении $\phi \approx 90^\circ$ исследуемая система останавливается или, при недостаточной жесткости элементов, ломается.

Каждому набору входных параметров соответствуют свои области устойчивых и неустойчивых режимов. Для параметров ВЭУ КТ, приведенных в [2], границу устойчивости можно определить по графикам, изображенным на рис. 6.

Таким образом, на устойчивость системы управления ветроэнергетической установкой колебательного типа влияет угловая скорость вращения поворотных лопаток. Для каждого значения скорости воздушного потока \bar{u} и момента нагрузки $M_{\text{нагр}}$ [2] необходимо выбирать соответствующие величины $\omega_{\text{пов}}$ с учетом выполнения условия минимизации «расхода управлений», не позволяющего уменьшать энергоотдачу ВЭУ.

Список литературы

1. Пат. 2173791 Российская Федерация, МПК⁷ F 03 D 3/06. Ветровая энергетическая установка / Милошевич В.Р., Карапетян Р.М., Конюхов М.И., Петров Г.А. ; заявитель и патентообладатель Тамб. воен. авиац. инженер. ин-т. – № 99120251/06 ; заявл. 23.09.1999 ; опубл. 20.09.2001, Бюл. №26. – 3 с.
2. Петров, Г.А. Система управления ветроэнергетической установкой колебательного типа / Г.А. Петров // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 164–170.
3. Цыпкин, Я.З. Релейные автоматические системы / Я.З. Цыпкин. – М. : Наука, 1974. – 576 с.
4. Чиликин, М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.
5. Быстродействующие электроприводы с широтно-импульсными преобразователями / М.Е. Гольц [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
6. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 712 с.
7. Красовский, А.А. Аналитическое конструирование контуров управления ЛА / А.А. Красовский. – М. : Машиностроение, 1969. – 240 с.
8. Kleinman, D.L. On an Iterative Technique for Riccati Equation Computation / D.L. Kleinman // IEEE Trans. On Automatic Control. – 1968. – Vol. 13, № 1. – P. 20–25.

Quality Assessment of Control System for Oscillation-Type Wind-Driven Power Plant

I.V. Miloserdov, G.A. Petrov

*Tambov High Military Aviation Engineering College of Radio-Electronics
(Military Institute) THMAECCRE (MI); germpet@mail.ru*

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

Abstract: The paper studies the automated control over oscillation-type wind-driven power plant and its operation stability.

References

1. Pat. 2173791 Russia, IPC⁷ F 03 D 3/06. Wind-driven electric plant / Miloshevich V.R., Karapetyan R.M., Konyuhov M.I., Petrov G.A. ; applicant and patent holder is Tambov Military Aviation Engineering College. – № 99120251/06 ; appl. 23.09.1999 ; publ. 20.09.2001, Bul. № 26. – 3 p.

2. Petrov, G.A. Control system over wind-driven electric plant of vibratory type / G.A. Petrov // Transactions TSTU. – 2008. – Т. 14. – P. 164–170.
 3. Tsytkin, Ya.Z. Relay automatic systems / Ya.Z. Tsytkin. – М. : Nauka, 1974. – 576 p.
 4. Chilikin, M.G. General course of electric drive / M.G. Chilikin, A.S. Sandler. – М. : Energoatomizdat, 1981. – 576 p.
 5. Fast Electric Drives with pulse-width converters / M.E. Golts [and others]. – М. : Energoatomizdat, 1986. – 184 p.
 6. Handbook for Theory of automatic control / ed. by A.A. Krasovskiy. – М. : Nauka, 1987. – 712 p.
 7. Krasovsky, A.A. Analytic engineering of control circuits / A.A. Krasovsky. – М. : Mashinostroenie, 1969. – 240 p.
 8. Kleinman, D.L. On an iterative technique for Riccati equation computation / D.L. Kleinman // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1968. – Vol. 13, № 1. – P. 20–25.
-

Einschätzung der Qualität des Steuerungssystems von der Windenergieanlage des Schwingungstypus

Zusammenfassung: Es wird das System der automatischen Steuerung von der Windenergieanlage des Schwingungstypus und die Gewährleistung der Stabilität ihres Funktionierens untersucht.

Evaluation de la qualité du système de la gestion de l'installation à vent énergétique du type oscillant

Résumé: Est envisagé le système de la gestion automatique de l'installation à vent énergétique du type oscillant de l'assurance de la stabilité de son fonctionnement.

Авторы: *Милосердов Игорь Васильевич* – доктор технических наук, доцент, начальник кафедры радиотехники; *Петров Герман Алексеевич* – инженер-электроник отдела информационных технологий, ТВВАИУРЭ.

Рецензент *Карнов Иван Георгиевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиосвязи (авиационной) ТВВАИУРЭ.
