

**References**

1. Yemel'yanov, S.V. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoy strukturoy. [Automatic control systems with variable structure] / S.V. Yemel'yanov — Moscow: Nauka, 1970. — 592 p.
2. Maksimova, O. B. Metodika rascheta kriteriya upravleniya strukturoy slozhnykh tekhnicheskikh sistem [The method of computing the criterion for controlling the structure of complex engineering systems] / O. B. Maksimova, V. O. Davydov, V. M. Tonkonogiy // Visnik Sumskogo derzhavnogo universytetu. Seriya Tekhnichni nauky. [Bulletin of Sumy State University. Series Engineering Science.] — Sumi, 2011. — # 3. — pp. 19 — 23.
3. Burakov, M.V. Geneticheskiy algoritm: Teoriya i praktika: Ucheb. posob. [Genetic Algorithm: Theory and Practice: Teaching manual] / M.V. Burakov — St. Petersburg: GUAP [Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation], 2008. — 163 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Кравченко В.П.

Поступила в редакцию 23 мая 2013 г.

УДК 621.313.043.3:621.548

Г.А. Оборский, д-р техн. наук, проф.,  
Б.А. Моргун, канд. техн. наук, доц.,  
А.Н. Бундюк, канд. техн. наук, доц.,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ОБОРОТАМИ РОТОРА

*Г.О. Оборський, Б.О. Моргун, А.М. Бундюк. Побудова математичної моделі вітроелектричної установки як об'єкта управління обертами ротора.* Розроблено математичну модель вітроелектричної установки, яка дозволяє оцінити вплив зовнішніх чинників на динаміку установки. Запропоновано електронну модель динаміки вітроелектричної установки в пакеті MATLAB.

*Ключові слова:* вітроелектрична установка, управління обертами ротора, повітряний потік, електронна модель, математична модель, вплив зовнішніх факторів.

*Г.А. Оборский, Б.А. Моргун, А.Н. Бундюк. Построение математической модели ветроэлектрической установки как объекта управления оборотами ротора.* Разработана математическая модель ветроэлектрической установки, позволяющая оценить влияние внешних факторов на динамику установки. Предложена электронная модель ветроэлектрической установки в пакете MATLAB.

*Ключевые слова:* ветроэлектрическая установка, управление оборотами ротора, воздушный поток, электронная модель, математическая модель, влияние внешних факторов.

*G.A. Oborsky, B.A. Morgun, A.N. Bundyuk. Construction of a mathematical model of wind-electric installation as an object of rotor speed control.* The mathematical model of a wind-electric installation, which allows to estimate the influence of external factors on dynamics of the installation, is developed. The electronic model of dynamics of wind-electric installation in MATLAB is proposed.

*Keywords:* wind-electric installation, rotor speed control, air flow, E-model, mathematical model, influence of external factors.

В соответствии с планами Украины по внедрению ветроэнергетики эксплуатируются ветроэлектрические станции (ВЭС) суммарной мощностью 38,37 МВт. К 2030 г. общая мощность

ВЭС должна достичь 16000 МВт, при этом ежегодное производство электроэнергии на базе ВЭС планируется вывести на уровень 20...35 % от общего количества вырабатываемой в стране электроэнергии [1, 2].

Изучению конструктивных, статических и динамических характеристик ВЭУ посвящены научные работы [3, 4]. Однако исследованию динамических свойств ветроэлектрических установок (ВЭУ) как объекта управления оборотами ротора установки уделено недостаточно внимания.

Цель данной работы — построение математической модели ВЭУ как объекта управления оборотами ВЭУ в условиях воздействия на нее внешних факторов.

Рассмотрим горизонтально-осевую ВЭУ, предназначенную для выработки стабилизированного напряжения в автономном режиме при постоянной частоте вращения ротора. Преобразователем энергии ветрового потока служит асинхронный генератор (АГ) с реактивной мощностью от параллельно подключенных конденсаторов (рис. 1).

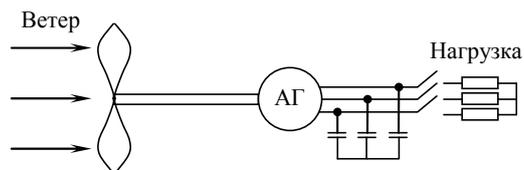


Рис. 1. Схема ВЭУ с АГ и конденсаторным возбуждением

Кинетическая энергия ветрового потока  $E_{ВП}$  определяется как

$$E_{ВП} = 0,5 m v^2, \quad (1)$$

где  $m$  — расход воздуха ( $m = \rho s v$ ), кг/с;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$s$  — площадь сечения, ометаемого ветровым потоком, м<sup>2</sup>;

$v$  — скорость ветрового потока, м/с;

$R$  — радиус сечения, ометаемого ветровым потоком, м.

Подставив значение  $m$  в (1), получим

$$E_{ВП} = 0,5 \rho s v^3.$$

Мощность ветрового двигателя  $P_{ВД}$  определяется из выражения (2), а ее изменение показано на рис. 2, а.

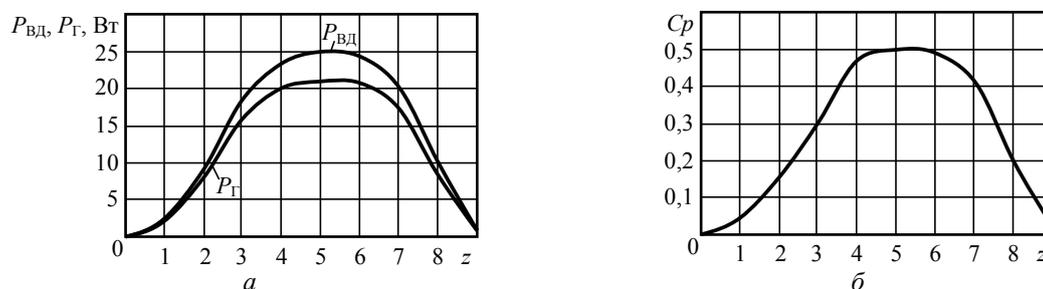


Рис. 2. Зависимость параметров ВЭУ от быстроходности  $z$  для: мощностей  $M_{ВД}$  и  $M_{Г}$  (а) и коэффициента мощности  $C_p$  (б)

Коэффициент мощности  $C_p$  определяется как

$$P_{ВД} = C_p E_{ВП} = 0,5 C_p \rho s v^3, \quad (2)$$

где  $C_p$  — коэффициент, характеризующий эффективность использования энергии ветра.

Величина  $N_{Г}$  определяется по формуле

$$N_{Г} = P_{ВД} \eta_{ОБЦ}, \quad (3)$$

где  $\eta_{ОБЦ} = \eta_{мех} \eta_{эл}$ ;

$\eta_{мех}$ ,  $\eta_{эл}$  — КПД трансмиссии и генератора, соответственно.

Для исследования влияния внешних факторов на ВЭУ составляем математическую модель, описывающую ее поведение в неустановившемся состоянии.

В установившемся состоянии ВЭУ момент движущих сил уравновешивается моментом сил сопротивления. Движущей силой ВЭУ является энергия ветрового двигателя, момент которого обозначим  $M_{\text{ВД}}^0$ . Силой сопротивления ВЭУ является электрический генератор, момент которого  $M_{\Gamma}^0$ . Равенство моментов представляется уравнением [5]

$$M_{\text{ВД}}^0 = M_{\Gamma}^0. \quad (4)$$

В неустановившемся состоянии, когда  $M_{\text{ВД}} \neq M_{\Gamma}$ , появляется динамический момент  $M_{\text{Д}}$ , с учетом которого уравнение (4) принимает вид

$$M_{\text{ВД}} - M_{\Gamma} = M_{\text{Д}}, \quad (5)$$

где  $M_{\text{Д}} = J \dot{\omega} / dt$ ;

$J$  — момент инерции ротора ВЭУ, кг·м<sup>2</sup>;

$\omega$  — угловая скорость вращения ротора, 1/с.

$$M_{\text{ВД}} = M_{\text{ВД}}^0 + \Delta M_{\text{ВД}}; \quad M_{\Gamma} = M_{\Gamma}^0 + \Delta M_{\Gamma}; \quad \omega = \omega^0 + \Delta \omega.$$

После вычитания (4) из (5) получим уравнение динамики ротора

$$\Delta M_{\text{ВД}} - \Delta M_{\Gamma} = J d(\Delta \omega) / dt. \quad (6)$$

Для определения отклонений моментов сил воспользуемся следующими зависимостями:

$$M_{\text{ВД}} = P_{\text{ВД}} / \omega_{\text{ВД}} \quad \text{и} \quad M_{\Gamma} = N_{\Gamma} / \omega_{\Gamma}, \quad (7)$$

где  $M_{\text{ВД}} = f(P_{\text{ВД}})$ ,

$$P_{\text{ВД}} = f_1(Cp, \rho, v, s),$$

$$Cp = f_2(Z),$$

$$Z = f_3(\omega, R, v),$$

$$s = f_4(R, \varphi),$$

$$M_{\Gamma} = f_5(N_{\Gamma}, \omega_{\Gamma}),$$

$\varphi$  — угол отклонения гондолы с ротором, град.

При установке ВЭУ на уровне моря при температуре  $t_0$  (°C) ( $T_0 = t_0 + 273$  К) и давлении  $B_0$  (мм рт. ст.) величина плотности воздуха —  $\rho_0$ . Для других условий плотность воздуха определяется как

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{T_{B_0}}{T_B} \cdot \frac{B}{B_0}.$$

Отклонение  $\rho$  от номинального значения при изменении температуры и давления воздуха показано на рис. 3 и определяется как

$$\Delta \rho = \frac{\partial \rho}{\partial T_B} \cdot \Delta T_B + \frac{\partial \rho}{\partial B} \cdot \Delta B, \quad (8)$$

где  $\partial \rho / \partial T_B = -\rho_0 / T_0$ ;

$$\partial \rho / \partial B = \rho_0 / B_0.$$

Для управления оборотами ротора используем метод вывода ротора из-под ветра [1], который уменьшает проекцию ометаемой площади ротора на перпендикулярную ветру плоскость (рис. 4, а). Площадь ометания, в свою очередь, зависит от угла поворота гондолы с ротором  $\varphi$  (рис. 4, б).

Разложив функции (7) в ряд Тейлора и оставив первые элементы ряда, получим при  $R = \text{const}$  и  $\omega_{\text{ВД}} = \omega_{\Gamma} = \omega$ .

$$\Delta M_{ВД} = \frac{\partial M_{ВД}}{\partial P_{ВД}} \left( \frac{\partial P_{ВД}}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial T_B} \Delta T_B + \frac{\partial P_{ВД}}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial P_{ВД}}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial P_{ВД}}{\partial i} \frac{\partial s}{\partial \varphi} \Delta \varphi \right) + \frac{\partial M_{ВД}}{\partial \omega} \Delta \omega, \quad (9)$$

$$\Delta M_{\Gamma} = \frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial N_{\Gamma}} \Delta N_{\Gamma} + \frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega} \Delta \omega. \quad (10)$$

Подставив уравнения (9), (10) в (6) и проведя соответствующие преобразования, получим дифференциальное уравнение динамики ротора ВЭУ в удобной форме

$$T \frac{d(\Delta \omega)}{dt} + \Delta \omega = k_1 \Delta T_B + k_2 \Delta B + k_3 \Delta v + k_4 \Delta N_{\Gamma} + k_5 \Delta \varphi, \quad (11)$$

где  $T = \frac{J}{\left( \frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega} - \frac{\partial M_{ВД}}{\partial \omega} \right)}$ ;

$$k_1 = \frac{\frac{\partial M_{ВД}}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T_B}}{\frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega} - \frac{\partial M_{ВД}}{\partial \omega}},$$

$$k_2 = \frac{\frac{\partial M_{ВД}}{\partial \rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial B}}{\frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega} - \frac{\partial M_{ВД}}{\partial \omega}},$$

$$k_3 = \frac{\frac{\partial M_{ВД}}{\partial v}}{\frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega} - \frac{\partial M_{ВД}}{\partial \omega}},$$

$$k_4 = \frac{\frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial N_{\Gamma}}}{\frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega} - \frac{\partial M_{ВД}}{\partial \omega}},$$

$$k_5 = \frac{\frac{\partial M_{ВД}}{\partial \varphi}}{\frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega} - \frac{\partial M_{ВД}}{\partial \omega}}.$$

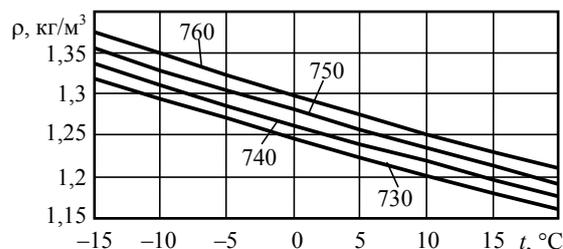
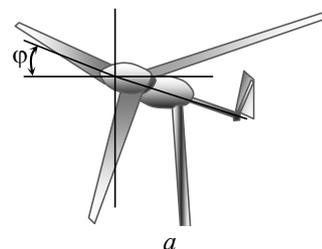
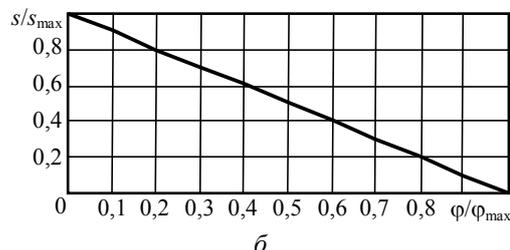


Рис. 3. Изменение плотности воздуха



а



б

Рис. 4. Поворот гондолы с ротором на угол  $\varphi$

Определим частные производные в уравнении (11) с использованием (2), (3), (7), (8), получим

$$\frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial \omega} = -\frac{N_{\Gamma}}{\omega_0^2}, \quad \frac{\partial M_{ВД}}{\partial \omega} = -\frac{P_{ВД}}{\omega_0^2}, \quad \frac{\partial M_{\Gamma}}{\partial N_{\Gamma}} = \frac{1}{\omega_0},$$

$$\frac{\partial M_{ВД}}{\partial \rho} = \frac{0,5C_p \pi R^2 v_0^3}{\omega_0}, \quad \frac{\partial M_{ВД}}{\partial v} = \frac{1,5C_p \rho \pi R^2 v_0^2}{\omega_0},$$

$$\frac{\partial M_{ВД}}{\partial \varphi} = \frac{0,5C_p \rho v_0^3 k \varphi}{\omega_0},$$

где  $k\varphi$  — коэффициент передачи механизма отклонения гондолы с ротором, м<sup>2</sup>/град.

Зависимость площади сечения, ометаемой ветровым потоком, от поворота гондолы с ротором определяем из выражения

$$s = s_{\max} (1 - \varphi / \varphi_{\max}),$$

где  $s_{\max}$  — площадь сечения, ометаемая ветровым потоком при  $\varphi=0$ , м<sup>2</sup>;  
 $\varphi_{\max}$  — максимальное отклонение гондолы с ротором ( $\varphi_{\max}=90$  град);  
 $\varphi$  — текущее отклонение от  $\varphi_{\max}$ , град.

Коэффициент  $k\varphi$  определяем из графика (рис. 4, б), где

$$k\varphi = \Delta s / \Delta \varphi.$$

Для решения уравнения (11) построена электронная модель ВЭУ в пакете MATLAB, которая содержит пять каналов внешних воздействий.

ВЭУ как объект управления оборотами ротора регламентирует минимальное отклонение оборотов ротора от номинального значения под воздействием независимых внешних факторов. Статическая ошибка регулирования недопустима. Для удовлетворения этих требований выбран пропорционально-интегральный закон регулирования с 40 %-ным перерегулированием переходного процесса. Результаты моделирования АСР оборотов ВЭУ представлены на рис. 5.

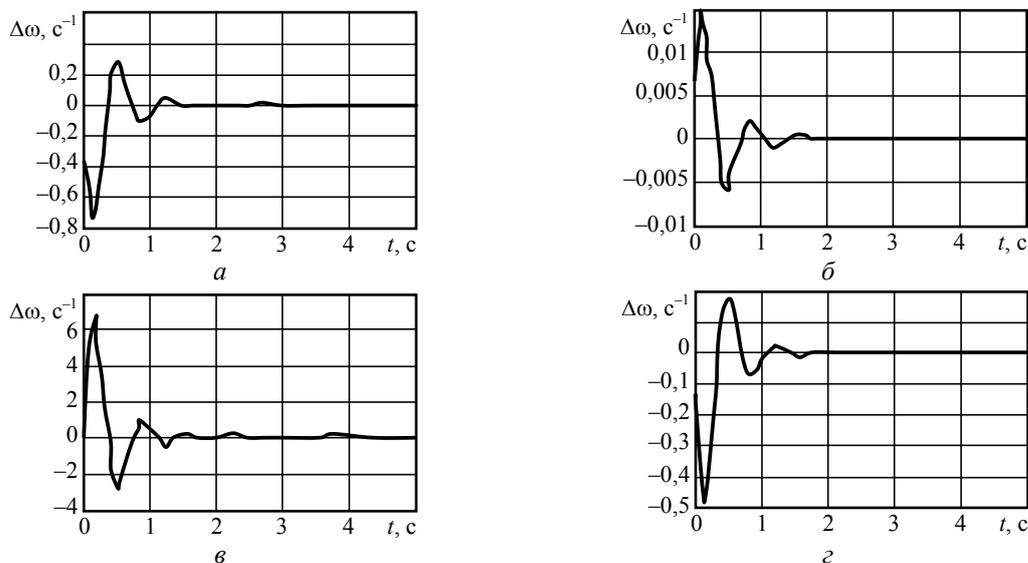


Рис. 5. Переходные процессы АСР при единичном увеличении: температуры воздуха (а), давления воздуха (б), скорости ветра (в), нагрузки генератора (г)

Переходные процессы в АСР соответствуют заданным требованиям: статическая ошибка регулирования отсутствует, перерегулирование для всех переходных процессов составило 37...40 %, время регулирования не более 2 с.

#### Выводы

Построены математическая и электронная модели динамики ВЭУ, позволяющие определить изменение скорости вращения ротора  $\Delta\omega$  под влиянием изменения температуры  $\Delta T_B$  и давления  $\Delta B$  воздуха, скорости ветра  $\Delta v$ , а также изменения электрической нагрузки генератора  $\Delta N_T$  и угла наклона гондолы  $\Delta\varphi$ .

На базе математической модели сформирована АСР оборотов ротора путем вывода гондолы из воздушного потока, а электронная модель позволила провести моделирование АСР при воздействии на нее внешних факторов.

Результаты моделирования АСР подтверждают целесообразность разработки математической модели и работоспособность сформированной системы управления.

#### Литература

1. Дзензерский, В.А. Ветроустановки малой мощности / В.А. Дзензерский, С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков. — К.: Наук. думка, 2011. — 592 с.

2. О строительстве ветроэлектростанций: Указ Президента Украины от 02.03.96 г., № 159. № 159. [www.rada.gov.ua](http://www.rada.gov.ua) > laws/show/159/96.
3. Васько, В.П. Управление параметрами электроэнергии автономных ветроэлектрических установок / В.П. Васько. — К.: Техн. електродинаміка. 2002. — № 1. — С. 53 — 56.
4. Тихевич, О.О. Согласование параметров электрического генератора с характеристиками ветротурбин / О.О. Тихевич // *Авіац. косм. техніка і технологія*. — Харків: НАУ “ХАІ”. 2000. — Вып. 21. — С. 64 — 67.
5. Кривцов, В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы: учеб. / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. — Харків: НАУ “ХАІ”; Севастополь: Севастоп. НТУ, 2003. — 400 с.

#### References

1. Dzenzerskiy, V.A. Vetroustanovki maloy moshchnosti. [Low-power wind installations] / V.A. Dzenzerskiy, Tarasov V.A., Kostyukov. — Kyiv, 2011. — 592 p.
2. stroitel'stve vetroelektrostantsiy. [On construction of wind power plants]: Ukaz Prezidenta Ukrainy ot 02.03.96 g., # 159. [www.rada.gov.ua](http://www.rada.gov.ua) > laws/show/159/96.
3. Vas'ko, V.P. Upravlenie parametrami elektroenergii avtonomnykh vetroelektricheskikh ustanovok. [Controlling the parameters of the electric power of autonomous wind power installations] / V.P. Vas'ko. — Kyiv, 2002. — # 1. — pp. 53 — 56.
4. Tikhevich, O.O. Soglasovanie parametrov elektricheskogo generatora s kharakteristikami vetroturbin. [Coordination of parameters of the electric generator with characteristics of wind turbines] / O.O. Tikhevich. // *Avia. kosm. tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace Engineering and Technology]. — Kharkiv, 2000. — Iss. 21. — pp. 64 — 67.
5. Krivtsov V.S. Neischerpaemaya energiya. [Inexhaustible energy] Book 1 / Vetroelektrogenerator: ucheb. [Wind-electric generators: manual]. / V.S. Krivtsov, A.M. Oleynikov, A.I. Yakovlev. — Kharkiv, 2003. — 400 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Мазуренко А.С.

Поступила в редакцию 13 мая 2013 г.