

УДК 681.3.06: 518.12

### ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ К НОРМИРОВАННОЙ ФОРМЕ

**И. М. Гвоздева, В. Ф. Миргород, Е. В. Деренг**

Одесский национальный политехнический университет  
просп. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044, Украина. E-mail: onorchenko@mail.ru

**П. И. Полищук, О. В. Глазева**

Одесская национальная морская академия  
ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, 65029, Украина. E-mail: pioter.polishuk@yandex.ru

На основе математической модели динамических режимов ветроэнергетической установки турбогенераторного типа решена задача управления по гарантированным запасам аэродинамической устойчивости, что обеспечивает улучшение энергетических и экономических характеристик. Выполнена компьютерная реализация разработанных математических моделей с использованием записей реального ветра. Рассмотрены два основных режима работы: автономный режим работы ветроэнергетической установки, а также режим работы параллельно с сетью бесконечной мощности.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, математическая модель, управление, устойчивость.

### ПЕРЕТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДО НОРМОВАНОЇ ФОРМИ

**І. М. Гвоздєва, В. Ф. Миргород, Є. В. Деренг**

Одеський національний політехнічний університет  
просп. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044, Україна. E-mail: onorchenko@mail.ru

**П. І. Поліщук, О. В. Глазєва**

Одеська національна морська академія  
вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, Україна. E-mail: pioter.polishuk@yandex.ru

На основі математичної моделі динамічних режимів вітроенергетичної установки турбогенераторного типу вирішено задачу управління за гарантованими запасами аеродинамічної сталості, що забезпечує поліпшення енергетичних та економічних характеристик. Виконано комп'ютерну реалізацію розроблених математичних моделей із застосуванням записів реального вітру. Розглянуто два основних режими роботи: автономний режим роботи вітроенергетичної установки, а також режим роботи паралельно з мережею безмежної потужності.

**Ключові слова:** вітроенергетична установка, математична модель, управління, моделювання, стійкість.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Проблема рационального использования возобновляемых источников энергии является актуальной и важной для народнохозяйственного комплекса Украины ввиду нехватки собственных ископаемых энергоресурсов. В мировой практике в настоящее время наблюдается переход к созданию экономичных крупных ветроагрегатов единичной мощностью (1,0...4,0) МВт. Проектируемые ВЭУ требуют разработки соответствующих моделей управления динамическими режимами их работы и оптимизации функционирования.

Основные расчетные соотношения для ВЭУ, полученные из условия баланса располагаемой и потребляемой мощностей, представлены в [1, 2] и основаны на известных соотношениях аэродинамики винтов в виде характеристик быстроходности и уравнениях равновесия вращающихся масс [1–5]. Математические модели динамики ВЭУ детально рассмотрены в [2], и предложена их компьютерная реализация.

Уравнения динамики ВЭУ турбогенераторного типа являются уравнениями равновесия моментов, в том числе моментов инерции, зависящих от оборотов турбомашин и ветроколеса или их угловых скоростей. В то же время основные характеристики турбомашин и ветроколеса представляют собой функции от параметров быстроходности: отношения скорости вращательного движения  $\omega R$  к скорости набегающего потока  $V$ .

Описание динамики ВЭУ в аргументах быстроходности дает возможность исследовать переходные режимы в зависимости от характеристик винтовых групп и оценить располагаемые запасы устойчивости для различного конструктивного исполнения элементов ВЭУ в различных режимах, что и является целью настоящего исследования.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Особенность ВЭУ турбогенераторного типа заключается в расположении на несущем винте турбомашин с собственными винтовыми группами, ориентированными практически перпендикулярно к плоскости несущего винта. Такая конструкция обеспечивает стабильность ветрового напора на винты турбомашин и позволяет использовать синхронные электрические машины в качестве энерговырабатывающих агрегатов. Регулирование оборотов ВЭУ осуществляется поворотом оконечностей лопастей ветроколеса с помощью электроприводов.

В соответствии с [2] уравнения динамики ВЭУ турбогенераторного типа в виде уравнений равновесия моментов имеют следующий вид:

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [m_1(\omega_1 R_1 / V_0)] \times \\ \times R_1^3 V_0^2 - \frac{3\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [C_{t2}(\omega_2 R_{20} / V_2)] \times \\ \times R_{20}^2 R_2 V_2^2 \cos \alpha - M_{C1}(\omega_1, T_H); \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{\pi}{2} \rho(T_H, P_H) [m_2(\omega_2 R_{20} / V_2)] \times \\ \times R_{20}^3 V_2^2 - M_H(S, I) - M_{C2}(\omega_2, T_H), \end{cases} \quad (1)$$

где перекрестные связи входят в (1) через параметр  $C_{t2}(\omega_2 R_{20} / V_2)$ , и через скорость потока на винтах турбомашин  $V_2$ :

$$\left. \begin{aligned} V_2 &= \sqrt{V_0^2 + V_r^2} \cos(\alpha - \beta); \\ V_r &= \omega_1 R_2, \beta = \arctg(V_0 / V_r), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $R_1$  – радиус ветроколеса (ВК);  $R_{20}$  – радиус винтов турбомашин;  $R_2$  – радиус точки установки турбомашин;  $\rho(T_H, P_H)$  – плотность воздуха, зависящая от температуры  $T_H$  и давления  $P_H$ ;  $V_0$  – средняя скорость ветрового потока;  $V_2$  – скорость потока на винтах турбомашин;  $\alpha$  – угол установки турбомашин;  $J_1, J_2$  – моменты инерции ветроколеса и турбомашин;  $z_1$  – быстроходность ветроколеса;  $z_1 = \omega_1 R_1 / V_0$ ,  $z_2$  – быстроходность винтов турбомашин;  $z_2 = \omega_2 R_{20} / V_2$ ;  $C_{n1}(z_1, \delta)$  – семейство расчетных характеристик коэффициента мощности ветроколеса;  $C_{n2}(z_2)$  – расчетная характеристика коэффициента мощности винтов турбомашин;  $C_{t2}(z_2)$  – расчетная характеристика коэффициента осевой силы винтов турбомашин;  $M_H$  – нагрузочный, например, генераторный момент, зависящий от тока нагрузки  $I$ ;  $M_{C1}$  – момент сопротивления.

Как видно из выражения (1), правые части дифференциальных уравнений вращательного движения ветроколеса и турбомашин в явном виде зависят от аргументов быстроходности.

На рис. 1 в качестве иллюстрации качественно представлены характеристики быстроходности ветроколеса в зависимости от угла поворота лопастей и нагрузочная характеристика.

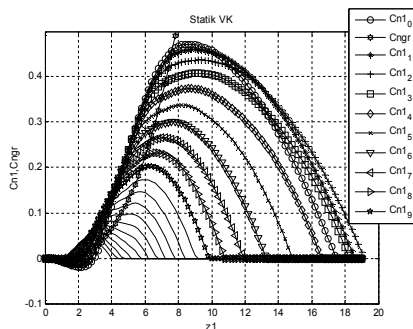


Рисунок 1 – Характеристики быстроходности ветроколеса

В соответствии с поставленной целью исследования необходимо перейти от дифференциальных уравнений в форме (1) для угловых скоростей вращательного движения ветроколеса и турбомашин к дифференциальным уравнениям, в которых искомыми функциями являются изменения параметров быстроходности. Такой подход выполняется на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= z_1 V_0 / R_1; \quad \omega_2 = z_2 V_2 / R_{20}; \\ V_2 &= \sqrt{V_r^2 + V_0^2} \cos\left(\arctg \frac{V_0}{V_r} - \alpha\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Из выражений (1) и (3) получаем следующие безразмерные уравнения динамики ВЭУ турбогенераторного типа:

$$\begin{cases} a \left( \frac{1}{V_0} \frac{dz_1}{dt} + \frac{1}{V_0^2} z_1 \frac{dV_0}{dt} \right) z_1 = \\ = C_{n1}(z_1) - 3bf(z_1)C_{t2}(z_2); \\ d \left( \frac{1}{V_2} \frac{dz_2}{dt} + \frac{1}{V_2^2} z_2 \frac{dV_2}{dt} \right) z_2 = \\ = 3C_{n2}(z_2) - N_H / P_{tg}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $a = 2J_1 / \pi \rho R_1^4$ ;  $b = R_{20}^2 R_2 / R_1^3$ ;

$$f(z_1) = \sqrt{c^2 z_1 + 1} \cos(\arctg c z_1 - \alpha);$$

$$P_{tg} = (\pi \rho / 2) R_{20} V_2^2; \quad c = R_2 / R_1, \quad fd = 2J_2 / \pi \rho R_{20}^4.$$

Как это следует из (4), уравнения динамики ВЭУ в преобразованном виде образуют систему нелинейных и безразмерных уравнений, одинаковых по форме и зависящих от конструктивных особенностей ВЭУ и параметров ветрового потока. Правая часть уравнений (4) путем приравнивания ее к нулю образует нормированные уравнения статики ВЭУ. Уравнения в предлагаемой форме позволяют исследовать переходные режимы при переменном ветре. В частности, из (4) следует возможность потери аэродинамической устойчивости ВК при отрицательном градиенте скорости ветра.

Новый проект ВЭУ–1000 предусматривает возможность ее эксплуатации не только параллельно с сетью, но и в гораздо более сложном автономном режиме с переменной нагрузкой, что потребовало разработки более совершенных алгоритмов управления. В частности, предложено обеспечить управление ВЭУ по запасам аэродинамической устойчивости для максимального использования располагаемой мощности.

В режиме работы параллельно с сетью при постоянной синхронной частоте нехватка располагаемой мощности может потенциально привести к переходу синхронных генераторов в двигательный режим с нежелательными последствиями. В автономном режиме перегрузка турбомашин приводит к уходу на левую ветку характеристики быстроходности и потере устойчивости, следствием которой является остановка винтов и резкий рост оборотов ветроколеса.

Результаты оценки эффективности предложенной модификации алгоритмов

управления, полученные в результате математического моделирования, приведены на рис. 2, где представлены запасы устойчивости ВЭУ в автономном режиме работы без ограничения и с введенным в алгоритмы управления ограничением параметра, характеризующего аэродинамическую устойчивость. Таким параметром является

$$dKy = (1 - Ky) 100 \%,$$

где  $Ky$  – отношение тангенса наклона текущей точки рабочего режима на характеристике быстроходности турбомашин к граничному тангенсу наклона.

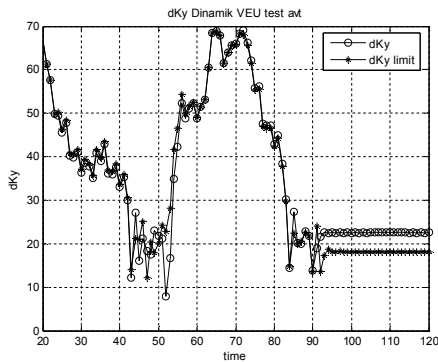


Рисунок 2 – Запасы устойчивости ВЭУ для реального ветрового потока

Наиболее важным результатом исследований является установленный эффект резкой потери запасов устойчивости при отрицательном градиенте скорости ветра (рис. 2). Ограничение нагрузки по оборотам ветроколеса не гарантирует устойчивости в переходных режимах ввиду его большой инерционности. Как это следует из результатов

моделирования, разработанные алгоритмы управления гарантируют требуемый уровень запасов аэродинамической устойчивости в наиболее сложной ситуации переменной нагрузки и флуктуирующего ветрового потока.

**ВЫВОДЫ.** Математическая модель динамики впервые создаваемого сложного энергетического объекта в нормированной форме позволяет на этапе проектирования оценить соответствие проектных решений ожидаемым результатам, предложить новые принципы и законы управления таким объектом в условиях переменной нагрузки и нестационарности ветрового потока. Перспективы дальнейших исследований заключаются в создании стенда-имитатора ВЭУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голубенко Н.С. Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэлектрической установки большой мощности / Материалы IV Международной конференции “Нетрадиционная энергетика в XXI веке”. – 2003. – С. 125–132.
2. Миргород В.Ф., Ранченко Г.С., Голубенко Н.С. Моделирование динамических режимов ветроэнергетической установки большой мощности // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2006. – Вип. 4 (30). – С. 96–99.
3. Твайдел Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
4. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
5. Johnson G. *Wind Energy System*. – N.-Y.: Prentice Hall, 1985. – 421 p.

#### TRANSFORMATION OF MATHEMATICAL MODEL OF WIND-DRIVEN POWERPLANT DYNAMICS TO THE NORMALIZED FORM

**I. Gvozdeva, V. Mirgorod, E. Dereng**

Odessa National Polytechnic University

ul. Shevchenko, 1, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: onopchenko@mail.ru

**P. Polischuk, O. Glazeva**

Odessa National Maritime Academy

ul. Didrihsona, 8, Odessa, 65029, Ukraine. E-mail: pioter.polishuk@yandex.ru

On the basis of mathematical model of dynamic behavior of the turbine wind-driven powerplant the problem of control under guaranteed aerodynamic stability margin is solved. It provides improvement of energetic characteristics. Computer realization of the developed mathematical models with use of writings of a real wind is executed. Two basic functional modes are considered: an off-line mode of work of wind-driven power plant, and also a functional mode in parallel with a network of infinite power.

**Key words:** wind-driven powerplant, mathematical model, control, stability.

#### REFERENCES

1. Golubenko N.S. Aerodynamic features of multiplierless turbogenerator circuit of the high-powered wind-driven powerplant // *Materials of IV International conference “Nontraditional energetics in XXI century”*. – 2003. – PP. 125–132. [in Russian]
2. Mirgorod V.F., Ranchenko G.S., Golubenko N.S. Modelling the dynamic modes of high-powered wind-driven powerplant // *Air-space Technique and Technology*. – 2006. – Iss. 4 (30). – PP. 96–99. [in Russian]
3. Tsvadel John, Weir A.D. *Renewable energy resources*. – M.: Energoatomizdat, 1990. – 392 p. [in Russian]
4. Shefter Ya.I. *Using of wind energy*. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 200 p. [in Russian]
5. Johnson G. *Wind Energy System*. – N.-Y.: Prentice Hall, 1985. – 421 p.

Стаття надійшла 20.07.2012.  
Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Шамардіною В.Н.