

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

*На основі розробленої математичної моделі динамічних режимів вітроенергетичної установки турбогенераторного типу вирішено задачу управління по гарантованих запасах аеродинамічної сталості, що забезпечує поліпшення енергетичних та економічних характеристик. Виконано комп'ютерну реалізацію розроблених математичних моделей із застосуванням записів реального вітру. Розглянуто автономний режим роботи вітроенергетичної установки, а також режим роботи паралельно із мережею безмежної потужності.*

*На основе разработанной 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 автономный режим работы ветроэнергетической установки, а также режим работы параллельно с сетью бесконечной мощности*

*On the basis of the developed mathematical model of the dynamic modes of wind-driven powerplant of turbogenerator type the problem of guaranteed aerodynamic stability margin control is solved. It provides the improvement of energetic and economic characteristics. Computer realization of the developed mathematical models with using the writings of a real wind is fulfilled. The off-line mode of work of wind-driven powerplant and the functional mode in parallel with a network of infinite power are considered.*

**Введение.** Проблема создания и использования возобновляемых источников энергии является актуальной и важной для народнохозяйственного комплекса Украины. Наряду с выпуском относительно маломощных ветроэнергетических установок (ВЭУ) в настоящее время наблюдается переход к созданию экономических крупных агрегатов единичной мощностью 1,0–4,0 МВт. В Украине создана ВЭУ турбогенераторного типа мощностью 0,75 МВт (рис.1), а также проектируется ВЭУ указанного типа мощностью более 1 МВт. Новый тип энергетических объектов требует разработки соответствующих моделей управления динамическими режимами их работы и оптимизации функционирования.

**Анализ проблемы и цель исследования**  
Основные расчетные соотношения для ВЭУ рассматриваемого типа, полученные из условия баланса располагаемой и потребляемой мощностей, представлены в [1,2]. Они основаны на известных соотношениях аэродина-

мики 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. Разработанные математические модели динамики ВЭУ на переходных режимах позволили разработать, отладить и практически реализовать соответствующие алгоритмы управления указанным сложным нелинейным объектом. Особенности таких алгоритмов и вопросы их оптимизации недостаточно полно освещены в опубликованных исследованиях.

Целью настоящей работы является разработка моделей процессов управления ВЭУ в динамических режимах и их компьютерная реализация в виде комплекса программно-алгоритмических средств.

**Основные результаты.** Особенность ВЭУ турбогенераторного типа заключается в расположении на несущем винте (ветроколесе) большого диаметра турбомашин с собственными винтовыми группами, ориентированными почти перпендикулярно к

плоскости несущего винта. Такая конструкция обеспечивает стабильность ветрового напора на винты турбомашин и большую равномерность используемой мощности по сравнению с традиционными ВЭУ. Энерговыврабатывающими агрегатами являются синхронные электрические машины номинальной мощностью 350 кВт. Регулирование оборотов ВЭУ осуществляется поворотом оконечностей лопастей ветроколеса с помощью электроприводов. Функционирование ВЭУ обеспечивает комплекс взаимосвязанных цифровых информационно-измерительных и управляющих систем. Структурная схема ВЭУ представлена на рис. 1, где приняты следующие обозначения блоков: ROTOR – ветроколесо; TURBO – турбомашин; SINX – синхронные генераторы; UPL – устройство поворота лопастей ротора ветроколеса; GONDOLE – гондола; DATA – измерители и датчики; VEU – устройства управления ВЭУ; VDES – устройство управления ветродизельной электростанции, в составе которой находится ВЭУ.

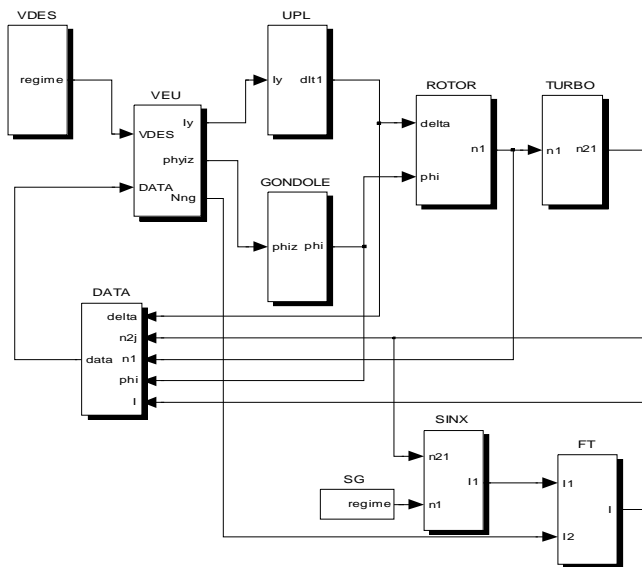


Рис.1. Структурная схема ВЭУ турбогенераторного типа

Динамика совместного вращательного движения ветроколеса и турбомашин при условии идентичности характеристик турбомашин описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений

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

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

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

В представленных уравнения обозначены:

$J_1$  – момент инерции ветроколеса;

$J_2$  – момент инерции турбомашин;

$R_1$  – радиус ветроколеса;

$R_2$  – радиус установки турбомашин;

$R_{20}$  – радиус винтов турбомашин;

$\rho(T_H, P_H)$  – зависящая от температуры  $T_H$  и давления  $P_H$  плотность воздуха;

$V_0$  – средняя скорость ветрового потока;

$V_2$  – скорость потока на винтах турбомашин;

$\alpha$  – угол установки турбомашин;

$Z_1 = \omega_1 R_1 / V_0$  – быстроходность ветроколеса;

$Z_2 = \omega_2 R_{20} / V_2$  – быстроходность винтов турбомашин;

$m_1(\omega_1 R_1 / V_0) = C_{n1}(Z_1, \delta) / \omega_1$  – коэффициент момента ветроколеса;

$C_{n1}(Z_1, \delta)$  – 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 скольжения  $S$  и тока нагрузки  $I$ ;

$M_{C2}, M_{C1}$  – моменты сопротивления.

Управляемыми координатами являются: угловая скорость (обороты) ветроколеса  $\omega_1(n_1)$ ; мощность ветроколеса  $N_1$ ; угловая скорость (обороты) винтов турбомашин  $\omega_{2k}(n_{2k})$ ; располагаемая мощность турбомашин  $N_{2K}, K = 1, 2, 3$ .

На рис.2 представлены характеристики быстроходности ветроколеса в зависимости от угла поворота лопастей и нагрузочная характеристика, на рис.3 – характеристики быстроходности винтов турбомашин.

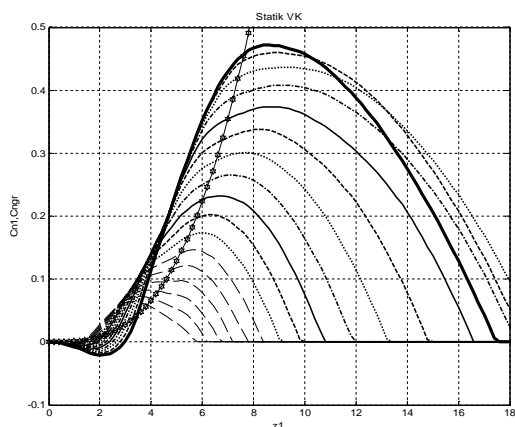


Рис.2. Характеристики быстроходности ветроколеса, (—) – линия нагрузки и (- - -) – характеристики быстроходности  $C_{n1}(Z_1, \delta)$  при различных углах лопастей

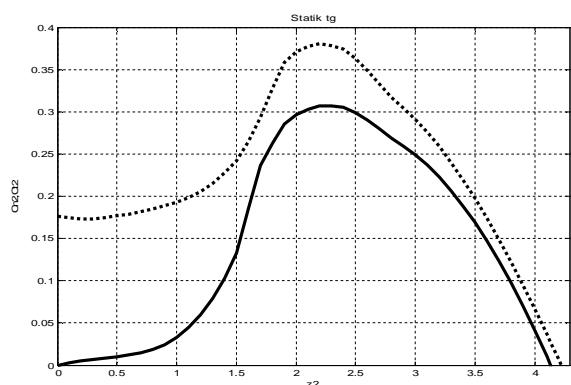


Рис.3. Характеристики быстроходности винтов турбомашин, (—) – зависимость  $C_{n2}(Z_2)$  и (- - -) – зависимость  $C_{t2}(Z_2)$

Разработанные алгоритмы управления, реализованные в системе управления ВЭУ-750, предусматривают совместную работу двух ограничителей – оборотов ветроколеса и мощности, объединенных с помощью селектора минимума. Такое решение, как показывает опытная эксплуатация ВЭУ, позволило обеспечить заданные требования. 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 мощности.

В режиме работы параллельно с сетью при постоянной синхронной частоте нехватка мощности (при падении скорости ветра, либо в динамических переходных режимах) может потенциально привести к переходу синхронных генераторов в двигательный режим с нежелательными последствиями. В автономном режиме перегрузка турбомашин приводит к сдвигу характеристики быстроходности влево и к потере устойчивости, следствием которой является остановка винтов и резкий рост оборотов ветроколеса.

Результаты оценки эффективности предложенных алгоритмов управления путем компьютерного моделирования приведены на рисунках 4–7. На рисунках обозначены:  $n2z$  – обороты турбомашин;  $N2$  – мощность ВЭУ;  $V_0$  – скорость ветрового потока;  $n1$  – обороты ветроколеса;  $\delta$  – угол поворота лопастей;  $n2z$  – заданные обороты турбомашин;  $Nn$  – мощность нагрузки;  $dK_y$  – располагаемый запас аэродинамической устойчивости;  $dK_y \text{ limit}$  – ограничиваемый запас аэродинамической устойчивости. На рис.4 и 6 соответственно представлены: параметры ВЭУ в режиме работы параллельно с сетью и в автономном режиме, причем в последнем случае использованы записи реального ветрового потока. На рис.5,7 представлены запасы устойчивости ВЭУ в указанных режимах

без ограничения и с введенным в алгоритмы управления ограничением параметра, характеризующего аэродинамическую устойчивость. Таким параметром является  $dK_y = (1 - K_y)100\%$ , где  $K_y$  – отношение тангенса наклона текущей точки рабочего режима на характеристике быстроходности турбомашин к граничному тангенсу наклона.

Наиболее важным результатом исследований является установление эффекта резкой потери запасов устойчивости при отрицательном градиенте скорости ветра, что наглядно представлено на рис.7. Ограничение тока нагрузки в функции оборотов 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.

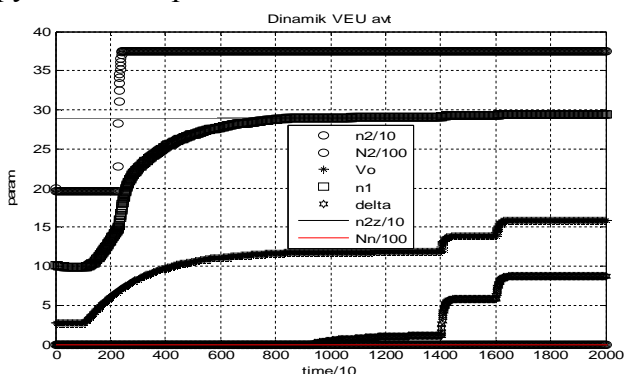


Рис.4. Изменение параметров ВЭУ в режиме работы параллельно с сетью для имитируемого ветрового потока

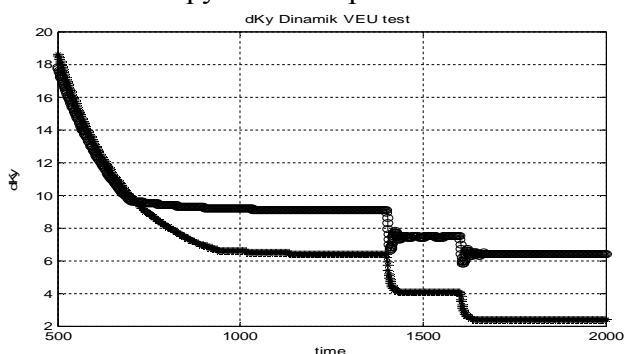


Рис.5. Запасы устойчивости ВЭУ в режиме работы параллельно с сетью

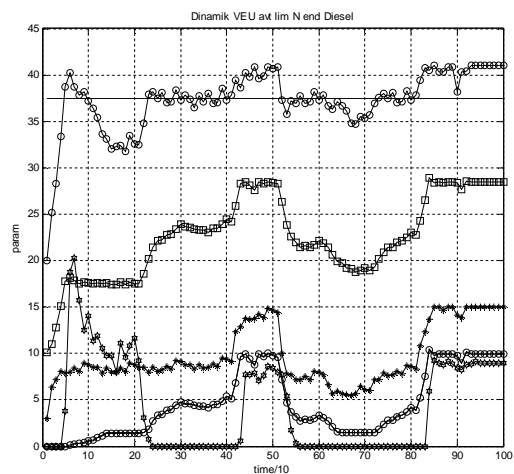


Рис.6. Изменение параметров ВЭУ в автономном режиме для реального ветрового потока

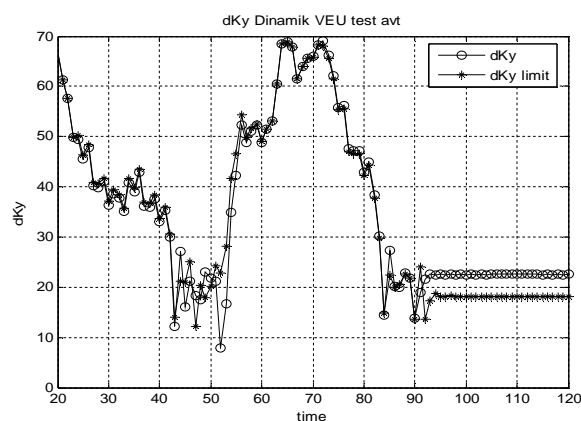


Рис.7. Запасы устойчивости ВЭУ в автономном режиме работы

**Заключение.** Математическая модель динамики впервые создаваемого сложного энергетического объекта позволила 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 виртуального стенда имитации режимов функционирования ВЭУ.

## Список использованной литературы

1. Голубенко Н.С., Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэлектрической установки большой мощности / Н.С. Голубенко // Материалы IV международн. кон. “Нетрадиционная энергетика в XXI веке”. – Крым, Гурзуф.: – 2003. – С. 125-132.

2. Миргород В.Ф. Моделирование динамических режимов ветроэнергетической установки большой мощности / В.Ф. Миргород, Г.С. Ранченко, Н.С. Голубенко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 4(30). – 2006. – С.96-99.

3. Твайдел Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии / Дж. вайдел, А. Уэйр. [Пер. с англ]. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.

4. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра / Я.И. Шефтер. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.

5. Johnson G. Wind Energy System / G. Johnson. – N.Y: Prentice Hall, 1985 – 421 p.

Получено 18.10.2010



Гвоздева  
Ирина Маратовна,  
д-р техн. наук, доцент,  
вед.науч.сотр.,  
Одесск.нац.политехн.ун-  
та (067)485-31-65  
E-mail  
onopchenko@mail.ru



Миргород  
Владимир Федорович,  
к.т.н., доцент  
Одесск.нац.политехн.  
ун-та т. (067) 918-50-20  
E-mail  
mirgorod\_v@mail.ru



Глазева Оксана  
Владимировна,  
к.т.н., доцент  
Одесск.нац.морской  
академии  
8(048)733-23-67  
E-mail glazeva@bk.ru