



ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА

WIND ENERGY

Статья поступила в редакцию 02.04.19. Ред. рег. № 2713

The article has entered in publishing office 02.04.19. Ed. reg. No. 2713

УДК 621.313.17

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МНОГОМАШИННОЙ
ВЕТРОУСТАНОВКИ С МЕХАНИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИЕЙ****А.М. Олейников¹, Л.Н. Канов²*¹Институт природно-технических систем

д. 28, ул. Ленина, г. Севастополь, 299011, Россия

тел./факс: +7(8692) 54-44-10; e-mail: ipts-sevastopol@mail.ru

²ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет"

д. 33, ул. Университетская, г. Севастополь, 299053, Россия

тел./факс: +7 (8692) 43-50-02, e-mail: sevsu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.10-12.12-22

Заключение совета рецензентов: 10.04.19 Заключение совета экспертов: 15.04.19 Принято к публикации: 19.04.19

В работе приведено описание оригинальной ветроэлектрической установки с механической редукцией, в которой мощность вертикально-осевой ветротурбины с относительно малой скоростью вращения через мультипликатор распределяется на заданное число генераторов, причем количество включенных в работу генераторов в каждый момент определяется мощностью реально действующего ветрового потока. При такой конструктивной схеме возможно обеспечить эффективную и с максимальным коэффициентом полезного действия работу установки в широком диапазоне скорости ветра и в произвольном графике выдаваемой потребителю электроэнергии. Ввиду того что опыта эксплуатации подобных комплексов до настоящего времени не было, дано подробное математическое описание его основных элементов – ветроколеса, генераторов с электромагнитным возбуждением и магнитоэлектрического типа – и процессов их взаимодействия с ветроколесом, а также результаты математического моделирования режимов работы системы при использовании предложенной системы уравнений. В основу математического описания основных элементов установки – синхронных генераторов – положена система уравнений электрического и механического равновесия в относительных единицах во вращающихся координатах без учета насыщения магнитной цепи. В уравнение механического равновесия системы входят вращающий момент ветроколеса и тормозные электромагнитные моменты генераторов с учетом коэффициентов редукции и трения и, кроме того, введен параметр динамики ротора генератора, обусловленной непрерывными колебаниями вращающего момента ветроколеса под воздействием нестационарного ветрового потока, а скорость ветра, выступающая исходной переменной величиной, моделируется набором синусоид. Упростить модель позволило эквивалентирование однотипных генераторов и пренебрежение в них переходными процессами с малой постоянной времени. На примере расчета установки с синхронными генераторами двух типов малой и средней мощности и с учетом реально действующих факторов продемонстрирована логика взаимодействий в основных элементах рассматриваемого комплекса в процессе преобразования ветрового потока в генерируемую активную и реактивную мощность.

Показаны возможности реализации устойчивой работы такой системы в условиях нестационарного ветрового потока путем регулирования угла установки лопастей при одновременном изменении числа включенных генераторов того или другого типа, что представляет интерес для проектирующих организаций и производителей энергетических объектов.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка; генераторы; возбуждение; постоянные магниты; уравнения равновесия; математическое моделирование.

* Олейников А.М., Канов Л.Н. Исследование режимов работы многомашинной ветроустановки с механической редукцией // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;10-12:12-22.



STUDY ON THE MODES OF OPERATION OF A MULTI-MACHINE INSTALLATIONS WITH MECHANICAL REDUCTION

A.M. Oleynikov¹, L.N. Kanov²

¹The Institute of Natural and Technical systems
28 Lenin Str., Sevastopol, 299011, Russia
tel./fax: +7(8692) 54 44 10, e-mail: ipt-sevastopol@mail.ru

²Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russia
tel./fax: +7 (8692) 43 50 02, e-mail: sevsu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.10-12.12-22

Referred 10 April 2019 Received in revised form 15 April 2019 Accepted 19 April 2019

The paper gives the description of the original wind electrical installation with mechanical reduction in which the output of vertical axis wind turbine with rather low rotation speed over multiplicator is distributed to a certain number of generators. The number of acting generators is determined by the output of actual operating wind stream at each moment. According to this constructive scheme, it is possible to provide effective and with maximum efficiency installation work in a wide range of wind speeds and under any schedule issued to the consumer of electricity. As there are no any experience in using such complexes, mathematical description of its main elements is given, namely windwheels, generators with electromagnetic excitation of magnetic electrical type, then their interaction with windwheel, and also the results of mathematical modeling of work system regimes under using the offered system of equations. The basis for the mathematical description of the main elements of the installation – synchronous generators – are the system of equations of electrical and mechanical equilibrium in relative units in rotating coordinates without considering saturation of the magnetic circuit. The equation of mechanical equilibrium systems includes torque and brake windwheel electromagnetic moments of generators with taking into account the reduction coefficients and friction. In addition, we specify the alternator rotor dynamics resulting from continuous torque of windwheel fluctuations under the influence of unsteady wind flow and wind speed serving as the original variable is modeled by a set of sinusoids. Model simplification is achieved by equalization of similar generators and by disregarding these transitions with a small time constant. Calculation the installation with synchronous generators of two types of small and medium capacity taking into account the operational factors allowed us to demonstrate the logic of interactions in the main elements of the reported complex in the process of converting wind flow into the generated active and reactive power. We have shown the possibility of stable system work under changeable wind stream condition by regulating of the plant blade angle and with simultaneous varying of generator number of different types. All these are in great interest for project organizations and power producers.

Keywords: wind electric installation; generators; excitation; permanent magnets; equilibrium equations; mathematical modeling.



Александр Михайлович
Олейников
Aleksander Oleynikov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией экоэнергетики Института природно-технических систем; Лауреат Гос. премии Украины в области науки и техники; член диссертационного совета ДС 215.059.01.

Образование: Севастопольское высшее военно-морское инженерное училище (1963 г.).

Область научных интересов: электромеханика; энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии; математическое и компьютерное моделирование.

Публикации: более 130, включая 3 монографии, 5 учебников.

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, Head of EcoEnergy Laboratory at the Institute of Natural and Technical Systems; winner of State Prize of Ukraine in Science and Technology; a member of the Dissertation Council BO 215.059.01.

Education: Sevastopol Higher Naval Engineering School, 1963.

Research interests: electromechanics; power plants based on renewable energies; mathematical and computer simulation.

Publications: more than 130, including 3 monographs, 5 textbooks.



Лев Николаевич Канов
Lev Kanov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судового электрооборудования Севастопольского государственного университета, Морской институт.

Образование: Севастопольский приборостроительный институт (1971 г.).

Область научных интересов: теория управления; теоретическая электротехника; математическое и имитационное моделирование; прикладная экология.

Публикации: более 50.

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Associate Professor at Marine Electrical Equipment of Sevastopol State University, Marine Institute.

Education: Sevastopol Instrument-making Institute, 1971.

Research interests: control theory; theoretical electrical engineering; applied ecology.

Publications: more than 50.

1. Введение

Среди современных направлений развития возобновляемой энергетики к приоритетным обоснованно относится ветроэнергетика [1–4] – единичная мощность ветровых систем приближается к 10 МВт [5]. При этом использование в ветроустановках, как правило, одного генератора явно ограничивает как надежность установки в целом, так и ее КПД при номинальных режимах работы в частности [6–8].

Одним из путей дальнейшего развития ветроэнергетики является дробление потока мощности на несколько генераторов [9]. Например, в [10] описана оригинальная, хотя и весьма сложная, трехмашинная ВЭУ с аэродинамической редуцией скорости ветроколеса.

В настоящей статье впервые реализуется математическая модель и анализируются физические процессы в многомашинной вертикально-осевой ветроустановке (рис. 1) [11], которая представляется логи-

ческим развитием современных ВЭУ этого типа [12]. Вся электрическая часть этой установки расположена в основании опоры на неподвижной платформе и включает заданное число генераторов обычного исполнения, при этом через узел их соединения с низкоскоростной ветротурбиной реализуется механическая мультипликация.

Скорость вращения ветроколеса (ВК) стабилизируется регулированием угла установки лопастей, а развиваемый ВК момент зависит от его диаметра (в кубе), скорости ветра (в квадрате) и угла установки [13].

С учетом необходимости регулирования и активной, и реактивной мощностей, а также с учетом режима запуска ВЭУ в работу рассматривается вариант использования двух групп однотипных электрических машин – с электромагнитным возбуждением (СГЭМ) [9] и с постоянными магнитами (СПМ) [14, 15].

Список обозначений	
<u>Буквы латинского алфавита</u>	
r, x_d, x_q	Активное и индуктивные сопротивления фазы обмотки статора по продольной и поперечной осям
x_{ad}, x_{aa}	Индуктивные сопротивления реакции якоря
$x_{kdb}, r_{kdb}, x_{kdb}, r_{kd}$	Составляющие сопротивлений обмотки демпфирующего контура
i_d, i_q	Продольная и поперечная составляющие тока статора
i_{kd}, i_{kq}	Составляющие тока демпфирующего контура
J	Момент инерции ветроколеса с учетом приведенных моментов генераторов
$k_{сгэм}, k_{спм}$	Коэффициенты передачи трансмиссии от ветроколеса к тому или иному генератору
k_a, k_{da}	Коэффициенты стабилизации
u_f, i_f, r_f, x_f	Напряжение, ток и сопротивления обмотки возбуждения
s	Динамический параметр движения ротора генератора
D, Q	Принадлежность к продольному и поперечному демпфирующим контурам
dD, qQ	Коэффициенты взаимной индукции между демпфирующими контурами и обмоткой статора
V	Скорость ветра, м/с
<u>Буквы греческого алфавита</u>	
α	Угол установки лопастей
θ	Угол нагрузки
Ψ	Потокосцепление
Ω	Скорость вращения
<u>Буквы русского алфавита</u>	
M	Электромагнитный момент
e	Напряжение сети (мгновенное значение)
<u>Индексы нижние</u>	
вк	Ветроколесо
СГЭМ	Синхронный генератор с электромагнитным возбуждением
СПМ	Синхронный генератор с постоянными магнитами
тр	Трение

2. Теоретический анализ

Математическая модель такого электромеханического комплекса построена на системе нелинейных

дифференциальных уравнений для отдельных компонентов, а изучение протекающих в нем физических процессов сводится к анализу модели в современных программных комплексах.

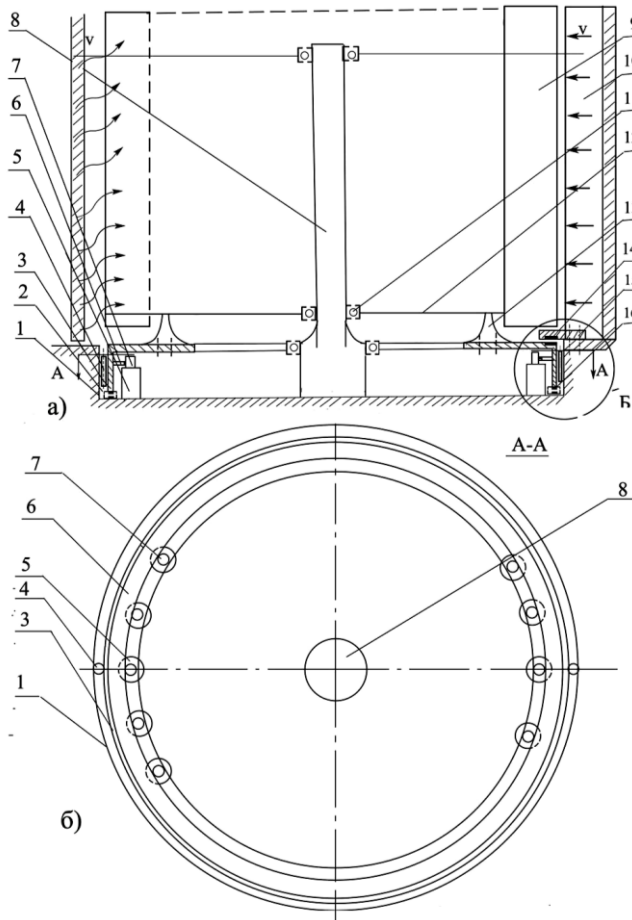


Рис. 1 – Конструктивная схема многомашинной вертикально-осевой ветроустановки: 1 – основание; 2 – подпятник; 3 – рабочее колесо; 4 – центрирующие валики; 5 – статоры; 6 – узел зацепления; 7 – роторы генераторов; 8 – центральная стойка; 9 – ветроколесо; 10 – направляющий аппарат; 11 – подшипниковый узел; 12, 13 – поперечная тяга и опора ветроколеса; 14, 16 – магнитные подвесы; 15 – нажимные сегменты

Fig. 1 – Constructive scheme of multi-machine vertical-axis wind turbine: 1 – base; 2 – thrust bearing; 3 – impeller; 4 – centering rollers; 5 – stators; 6 – node mesh; 7 – generator rotors; 8 – central desk; 9 – windwheel; 10 – guide apparatus; 11 – bearing node; 12, 13 – lateral thrust and reliance windwheel; 14, 16 – magnetic suspensions; 15 – push segments

В основу математического описания основного элемента установки – синхронного генератора (СГ) – положена система уравнений электрического и механического равновесия в относительных

единицах во вращающихся координатах $d-q$ с опережающим вращением поперечной оси [16–18] и без учета насыщения магнитной цепи. Для СГЭМ имеем

$$\left. \begin{aligned}
 e \cdot \sin \theta &= r_i i_d + x_d \frac{di_d}{dt} + x_{ad} \frac{di_f}{dt} + x_{ad} \frac{di_{kd}}{dt} - (1+s)(x_q i_q + x_{aq} i_{kq}); \\
 e \cdot \cos \theta &= r_i i_q + x_q \frac{di_q}{dt} + x_{aq} \frac{di_{kq}}{dt} + (x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{kd})(1+s); \\
 u_f &= r_f i_f + x_f \frac{di_f}{dt} + x_{ad} \frac{di_d}{dt} + x_{ad} \frac{di_{kd}}{dt}; \\
 0 &= r_{kd} i_{kd} + x_{kd} \frac{di_{kd}}{dt} + x_{ad} \frac{di_f}{dt} + x_{ad} \frac{di_d}{dt}; \\
 0 &= r_{kq} i_{kq} + x_{aq} \frac{di_q}{dt} + x_{kq} \frac{di_{kq}}{dt}; \\
 \frac{d\theta}{dt} &= s; \\
 M_{\text{СГ}} &= i_d i_q (x_q - x_d) - x_{ad} i_q (i_f + i_{kd}) + x_{aq} i_{kq} i_d.
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где e – напряжение сети; θ – угол нагрузки; r, x_d, x_q – активное и индуктивные сопротивления фазы обмотки статора по продольной и поперечной осям; x_{ad} и x_{aq} – то же для индуктивного сопротивления реакции якоря; x_{kd}, r_{kd} и x_{kq}, r_{kq} – составляющие сопротивлений обмотки демпфирующего контура; i_d, i_q – продольная и поперечная составляющие тока статора; $u_f,$

i_f, r_f и x_f – напряжение, ток и сопротивления обмотки возбуждения; i_{kd}, i_{kq} – составляющие тока демпфирующего контура; s – динамический параметр движения ротора генератора, обусловленного колебаниями вращающего момента ВК; M_{CT} – электромагнитный момент генератора.

Уравнения для СГПМ имеют вид [9]:

$$\left. \begin{aligned} e \cdot \sin \theta &= 1,5(r_{dc}i_{dc} + x_{dc}\frac{di_{dc}}{dt} + x_{dD}\frac{di_D}{dt} - (1+s)(x_{qc}i_{qc} + x_{qQ}i_Q)); \\ e \cdot \cos \theta &= 1,5(r_{qc}i_{qc} + x_{qc}\frac{di_{qc}}{dt} + x_{qQ}\frac{di_Q}{dt} + (x_{dc}i_{dc} + x_{dD}i_D + \Psi)(1+s)); \\ 0 &= r_D i_D + x_D \frac{di_D}{dt} + 1,5x_{dD}\frac{di_{dc}}{dt}; \\ 0 &= r_Q i_Q + x_Q \frac{di_Q}{dt} + 1,5x_{qQ}\frac{di_{qc}}{dt}; \\ \frac{d\theta}{dt} &= s; \\ M_{CTPM} &= 1,5i_{dc}(i_{qc}x_{qc} + 1,5x_{qQ}i_Q) - 1,5p i_{qc}(x_{dc}i_{dc} + 1,5(\Psi + x_{dD}i_D)). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где индекс «с» отмечает принадлежность к СГПМ; Ψ – потокосцепление; D, Q – принадлежность к продольному и поперечному демпфирующим контурам, роль которых выполняют массивные части ротора; индексы dD, qQ – коэффициенты взаимной индукции между демпфирующими контурами и обмоткой статора.

Уравнение механического равновесия вращающего момента ветроколеса и моментов СГ с учетом коэффициентов редукции и трения записывается в следующем виде:

$$J \frac{ds}{dt} + k_{CTEM} \sum M_{CTEM} + k_{CTPM} \sum M_{CTPM} + k_{тр} \Omega_{ВК} (1+s) = M_{ВК} (\Omega_{ВК} (1+s), \alpha, V), \quad (3)$$

где J – момент инерции ветроколеса с учетом приведенных моментов генераторов; k_{mp} – коэффициент

трения; $\Omega_{ВК}$ – угловая скорость вращения ВК; $\sum M_{CTEM}$ – сумма электромагнитных моментов СГЭМ; $\sum M_{CTPM}$ – то же СГПМ; α – угол установки лопастей; k_{CTEM} и k_{CTPM} – коэффициенты передачи трансмиссии от ВК к тому или иному генератору; V – скорость ветра. Момент ВК $M_{ВК}$ зависит от диаметра ВК и плотности воздуха.

С учетом одновременности и равной динамики переходных процессов в СГ (изменения параметра s и углов нагрузки θ машин одноименного типа), для упрощения процесса моделирования принята концепция эквивалентирования: один эквивалентный генератор представляет группу СГЭМ, другой – группу СГПМ, а возможное количество генераторов в группе определенным образом увязано со скоростью ветра (табл.).

Таблица

Количество включаемых генераторов в зависимости от скорости ветра

Table

The number of generators included depending on wind speed

$V(t), \text{ м/с}$	18 ÷ 17	17 ÷ 16	14 ÷ 13	12 ÷ 11	10 ÷ 9	8 ÷ 7	7 ÷ 6
n_{CTEM}	2	1	1	1	1	1	1
n_{CTPM}	10	10	8	6	4	2	1

Исходя из этого уравнение (3) приводится к виду:

$$J \frac{ds}{dt} + n_{CTEM} k_{CTEM} M_{CTEM} + n_{CTPM} k_{CTPM} M_{CTPM} + k_{тр} \Omega_{ВК} (1+s) = M_{ВК} (\Omega_{ВК} (1+s), \alpha, V). \quad (4)$$

Мощности генераторов рассчитываются по уравнениям:



$$P_{\text{СТЭМ}} = 1,5(u_d i_d + u_q i_q) n_{\text{СТЭМ}} = 1,5e \cdot (-\sin \theta \cdot i_d - \cos \theta \cdot i_q) n_{\text{СТЭМ}} ;$$

$$P_{\text{СТПМ}} = 1,5(u_{dc} i_{dc} + u_{qc} i_{qc}) n_{\text{СТПМ}} = 1,5e \cdot (-\sin \theta \cdot i_{dc} - \cos \theta \cdot i_{qc}) n_{\text{СТПМ}} ;$$

$$Q_{\text{СТЭМ}} = 1,5(u_d i_q - u_q i_d) n_{\text{СТЭМ}} = 1,5e \cdot (-\sin \theta \cdot i_d + \cos \theta \cdot i_q) n_{\text{СТЭМ}} .$$

Для численного решения (1) и (2) эти уравнения удобно преобразовать в нормальную форму, то есть относительно производных. Для этого первое, третье и четвертое уравнения из системы (1) запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} x_d \frac{di_d}{dt} + x_{ad} \frac{di_f}{dt} + x_{ad} \frac{di_{kd}}{dt} &= (1+s)(x_q i_q + x_{aq} i_{kq}) - r_i i_d + e \cdot \sin \theta; \\ x_{ad} \frac{di_d}{dt} + x_f \frac{di_f}{dt} + x_{ad} \frac{di_{kd}}{dt} &= -r_f i_f + u_f; \\ x_{ad} \frac{di_d}{dt} + x_{ad} \frac{di_f}{dt} + x_{kd} \frac{di_{kd}}{dt} &= -r_{kd} i_{kd}. \end{aligned} \right\}$$

Полученная система уравнений решается относительно производных

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{\Delta_{id}}{\Delta_d}; \quad \frac{di_f}{dt} = \frac{\Delta_{if}}{\Delta_d}; \quad \frac{di_{kd}}{dt} = \frac{\Delta_{ikd}}{\Delta_d}, \quad (5)$$

где определитель Δ_d и алгебраические дополнения

$$\Delta_d = \begin{vmatrix} x_d & x_{ad} & x_{ad} \\ x_{ad} & x_f & x_{ad} \\ x_{ad} & x_{ad} & x_{kd} \end{vmatrix}; \quad \Delta_{id} = \begin{vmatrix} F_d & x_{ad} & x_{ad} \\ F_f & x_f & x_{ad} \\ F_{kd} & x_{ad} & x_{kd} \end{vmatrix}; \quad \Delta_{if} = \begin{vmatrix} x_d & F_d & x_{ad} \\ x_{ad} & F_f & x_{ad} \\ x_{ad} & F_{kd} & x_{kd} \end{vmatrix}; \quad \Delta_{ikd} = \begin{vmatrix} x_d & x_{ad} & F_d \\ x_{ad} & x_f & F_f \\ x_{ad} & x_{ad} & F_{kd} \end{vmatrix}$$

и в которых составляющие F рассчитываются по соотношениям:

$$F_d = (1+s)(x_q i_q + x_{aq} i_{kq}) - r_i i_d + e \cdot \sin \theta, \quad F_f = -r_f i_f + u_f; \quad F_{kd} = -r_{kd} i_{kd}.$$

Аналогично второе и пятое уравнения в системе (1) преобразуются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} x_q \frac{di_q}{dt} + x_{aq} \frac{di_{kq}}{dt} &= -(x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{kd})(1+s) - r_i i_q + e \cdot \cos \theta; \\ x_{aq} \frac{di_q}{dt} + x_{kq} \frac{di_{kq}}{dt} &= -r_{kq} i_{kq} \end{aligned} \right\}$$

Аналогично первое и третье уравнения из системы (2) перепишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} x_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} + x_{dD} \frac{di_D}{dt} &= (1+s)(x_{qc} i_{qc} + x_{qQ} i_Q) - r_c i_{dc} + \frac{2}{3} e \cdot \sin \theta; \\ 1,5x_{dD} \frac{di_{dc}}{dt} + x_D \frac{di_D}{dt} &= -r_D i_D. \end{aligned} \right\}$$

Полученная система уравнений решается относительно производных:

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{\Delta_{iq}}{\Delta_q}; \quad \frac{di_{kq}}{dt} = \frac{\Delta_{ikq}}{\Delta_q}, \quad (6)$$

Полученная система уравнений решается относительно производных

$$\frac{di_{dc}}{dt} = \frac{\Delta_{idc}}{\Delta_{dc}}; \quad \frac{di_D}{dt} = \frac{\Delta_{iD}}{\Delta_{dc}}, \quad (7)$$

где определитель Δ_q и алгебраические дополнения

$$\Delta_q = \begin{vmatrix} x_q & x_{aq} \\ x_{aq} & x_{kq} \end{vmatrix}; \quad \Delta_{iq} = \begin{vmatrix} F_q & x_{aq} \\ F_{kq} & x_{kq} \end{vmatrix}; \quad \Delta_{ikq} = \begin{vmatrix} x_q & F_q \\ x_{aq} & F_{kq} \end{vmatrix}$$

где определитель Δ_{dc} и алгебраические дополнения

$$\Delta_{dc} = \begin{vmatrix} x_{dc} & x_{dD} \\ 1,5x_{dD} & x_D \end{vmatrix}; \quad \Delta_{idc} = \begin{vmatrix} F_{dc} & x_{dD} \\ F_{dD} & x_D \end{vmatrix}; \quad \Delta_{iD} = \begin{vmatrix} x_{dc} & F_{dc} \\ 1,5x_{dD} & F_{dD} \end{vmatrix}$$

и в которых

$$F_q = -(x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{kd})(1+s) - r_i i_q + e \cdot \cos \theta; \quad F_{kq} = -r_{kq} i_{kq}.$$

и в которых

$$F_{dc} = (x_{qc} i_{qc} + x_{qQ} i_Q)(1+s) - r_c i_{dc} + \frac{2}{3} e \cdot \sin \theta; \quad F_{dD} = -r_D i_D.$$

Точно так же второе и четвертое уравнения из системы (2) записываются в виде:



$$\left. \begin{aligned} x_{qc} \frac{di_{qc}}{dt} + x_{qQ} \frac{di_Q}{dt} &= -(x_{dc}i_{dc} + x_{ad}i_D + \Psi)(1+s) - r_c i_{qc} + \frac{2}{3} e \cdot \cos \theta; \\ 1,5x_{qQ} \frac{di_{qc}}{dt} + x_Q \frac{di_Q}{dt} &= -r_Q i_Q. \end{aligned} \right\}$$

Полученная система уравнений решается относительно производных:

$$\frac{di_{qc}}{dt} = \frac{\Delta_{iqc}}{\Delta_{qc}}; \quad \frac{di_Q}{dt} = \frac{\Delta_{iQ}}{\Delta_{qc}}, \quad (8)$$

где определитель Δ_{qc} и алгебраические дополнения

$$\Delta_{qc} = \begin{vmatrix} x_{qc} & x_{qQ} \\ 1,5x_{qQ} & x_Q \end{vmatrix}; \Delta_{iqc} = \begin{vmatrix} F_{qc} & x_{qQ} \\ F_{qQ} & x_Q \end{vmatrix}; \Delta_{iQ} = \begin{vmatrix} x_{qc} & F_{qc} \\ 1,5x_{qQ} & F_{qQ} \end{vmatrix}$$

и в которых

$$F_{qc} = -(x_{dc}i_{dc} + x_{ad}i_D + \Psi)(1+s) - r_c i_{qc} + \frac{2}{3} e \cdot \cos \theta; \quad F_{qQ} = -r_Q i_Q.$$

Таким образом, динамика системы описывается уравнениями (5 – 8), уравнением $\frac{d\theta}{dt} = s$ и уравнением (4) механического равновесия.

В целом, при принятых упрощениях, для анализа динамики системы генераторов необходимо было бы решать 11 нелинейных дифференциальных уравнений. Однако существует возможность сокращения их числа до 7 путем исключения из рассмотрения токов в демпфирующих контурах генераторов [10, 11]. Это оправдывается тем, что все генераторы жестко связаны в одну механическую систему с большим моментом инерции, в которой заметные качания роторов генераторов маловероятны.

В этих условиях уравнения СГЭМ принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} e \cdot \sin \theta &= r_i i_d + x_d \frac{di_d}{dt} + x_{ad} \frac{di_f}{dt} - (1+s)x_q i_q; \\ e \cdot \cos \theta &= r_i i_q + x_q \frac{di_q}{dt} + (x_d i_d + x_{ad} i_f)(1+s); \\ u_f &= r_f i_f + x_f \frac{di_f}{dt} + x_{ad} \frac{di_d}{dt}; \\ \frac{d\theta}{dt} &= s; \\ M_{СГЭМ} &= i_d i_q (x_q - x_d) - x_{ad} i_q i_f. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Для приведения их к нормальной форме первое и третье уравнения системы (9) записываются в виде:

$$\left. \begin{aligned} x_d \frac{di_d}{dt} + x_{ad} \frac{di_f}{dt} &= (1+s)x_q i_q - r_i i_d + e \cdot \sin \theta; \\ x_{ad} \frac{di_d}{dt} + x_f \frac{di_f}{dt} &= -r_f i_f + u_f. \end{aligned} \right\}$$

По аналогии с (5) данная система уравнений решается относительно производных:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{\Delta_{id}}{\Delta_d}; \quad \frac{di_f}{dt} = \frac{\Delta_{if}}{\Delta_d}, \quad (10)$$

где главный определитель представляется в виде

$$\Delta_d = \begin{vmatrix} x_d & x_{ad} \\ x_{ad} & x_f \end{vmatrix}, \text{ а алгебраические дополнения}$$

$$\Delta_{id} = \begin{vmatrix} F_d & x_{ad} \\ F_f & x_f \end{vmatrix}; \quad \Delta_{if} = \begin{vmatrix} x_d & F_d \\ x_{ad} & F_f \end{vmatrix},$$

при этом

$$F_d = x_q i_q (1+s) - r_i i_d + e \cdot \sin \theta; \quad F_f = -r_f i_f + u_f.$$

В свою очередь уравнения равновесия СГПМ также упрощаются:

$$\left. \begin{aligned} e \cdot \sin \theta &= 1,5(r_c i_{dc} + x_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} - (1+s)x_{qc} i_{qc}); \\ e \cdot \cos \theta &= 1,5(r_c i_{qc} + x_{qc} \frac{di_{qc}}{dt} + (x_{dc} i_{dc} + \Psi)(1+s)); \\ \frac{d\theta}{dt} &= s; \\ M_{СГПМ} &= 1,5i_{dc} i_{qc} x_{qc} - 1,5p i_{qc} (x_{dc} i_{dc} + 1,5\Psi). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Приведение первых двух уравнений из (11) и второго уравнения из (9) к нормальной форме очевидно.

С целью алгебраизации уравнений генераторов необходимо учесть, что движение большого ротора ВК, трансмиссии и роторов генераторов, жестко связанных с ВК в одну тяжелую систему, гораздо более инерционно, чем электромеханическая динамика генераторов. Первая имеет порядок десятков секунд, а вторая – порядок десятых доли секунды. Процесс моделирования значительно упрощается, если электромеханической динамикой генераторов пренебречь.

Полагая в первых трех уравнениях (9) производные равными нулю, получаем для СГЭМ следующие алгебраические уравнения:

$$\left. \begin{aligned} e \cdot \sin \theta &= r_i i_d - (1+s)x_q i_q; \quad e \cdot \cos \theta = \\ &= r_i i_q + (x_d i_d + x_{ad} i_f)(1+s); \quad u_f = r_f i_f. \end{aligned} \right\}$$

а их решение имеет вид:



$$i_f(t) = \frac{u_f(t)}{r_f};$$

$$i_d(t) = \frac{r \cdot e \cdot \sin \theta + (1+s)x_q \cdot (e \cdot \cos \theta - x_{ad} \cdot (1+s) \cdot i_f(t))}{r^2 + (1+s)^2 x_q x_d};$$

$$i_q(t) = \frac{-e \cdot \sin \theta \cdot (1+s)x_d + (e \cdot \cos \theta - x_{ad} \cdot (1+s) \cdot i_f(t)) \cdot r}{r^2 + (1+s)^2 x_q x_d}. \quad (12)$$

Таким образом, СГЭМ описывается только уравнением момента (последнее уравнение в (9) с подстановками из (12) (напряжение возбуждения $u_f(t)$ полагаем заданным).

Аналогично алгебраические уравнения СГПМ получаем из (11):

$$\left. \begin{aligned} e \cdot \sin \theta &= 1,5(r_c i_{dc} - (1+s)x_{qc} i_{qc}); \\ e \cdot \cos \theta &= 1,5(r_c i_{qc} + (x_{dc} i_{dc} + \Psi)(1+s)), \end{aligned} \right\}$$

а их решение имеет вид:

$$i_{dc}(t) = \frac{\frac{2}{3} r_c \cdot e \cdot \sin \theta + (1+s)x_{qc} \cdot \left(\frac{2}{3} e \cdot \cos \theta - \Psi(1+s) \right)}{r_c^2 + (1+s)^2 x_{qc} x_{dc}};$$

$$i_{qc}(t) = \frac{-\frac{2}{3} e \cdot \sin \theta \cdot (1+s)x_{dc} + \left(\frac{2}{3} e \cdot \cos \theta - \Psi(1+s) \right) \cdot r_c}{r_c^2 + (1+s)^2 x_{qc} x_{dc}}.$$

Следовательно, СГПМ также описывается уравнением равновесия моментов (последнее уравнение в (11) с подстановками из (13).

В итоге упрощенное математическое описание электромеханической системы рассматриваемой ветроэлектростанции состоит из дифференциального уравнения (4) для механической динамики с подстановками выражений моментов и последние уравнения в (9) и (11) с учетом выражений составляющих токов (12) и (13). К уравнению (4) добавляется уравнение для динамического параметра $\frac{d\theta}{dt} = s$.

Стабилизация скорости вращения ВК при изменении скорости ветра осуществляется в первую очередь за счёт управления углом установки лопастей α , реализация которого показана на рис. 2.

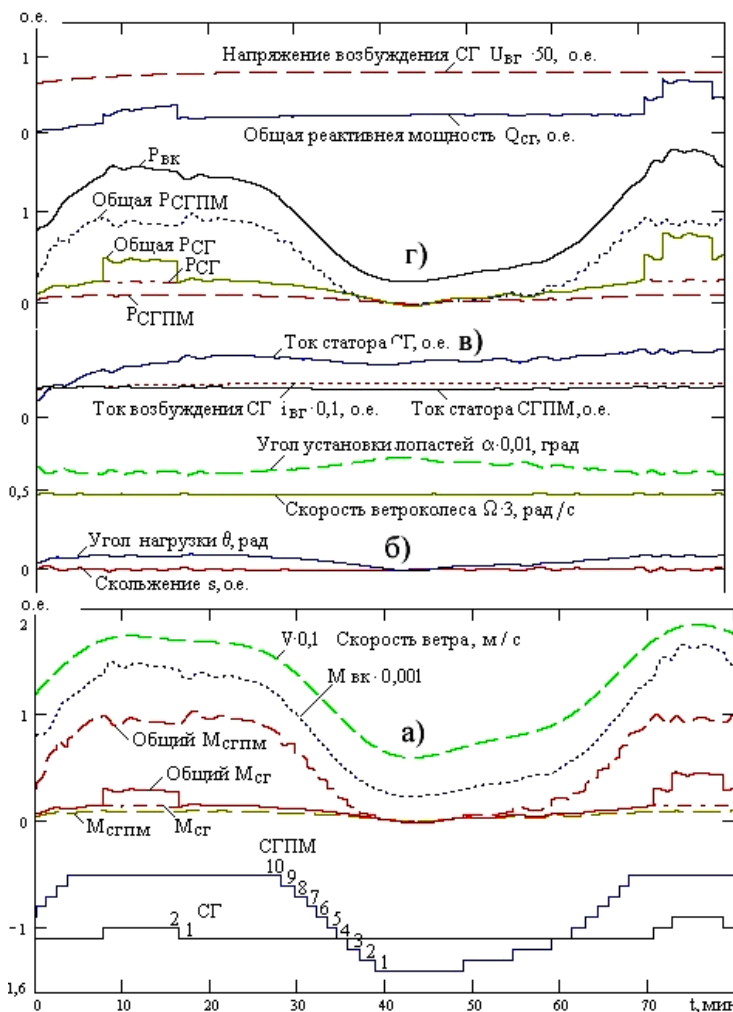


Рис. 2 – Результаты моделирования режимов работы многомашинной вертикально-осевой ветроустановки
Fig. 2 – The results of modeling work mode of multi-machine vertical-axis wind turbine



С ростом скорости ветра параметр s генераторов и скорость вращения ВК начинают увеличиваться. Скорость изменения угла установки лопастей пропорциональна значению скольжения с обратным знаком, поэтому угол установки начинает уменьшаться, и момент ВК также уменьшается. Аналогичная связь реализуется и по скорости изменения параметра s . Таким образом, чем больше s и скорость его увеличения, тем сильнее сигнал на уменьшение угла установки лопастей и тем меньше вращающий момент. Наоборот, чем меньше становится параметр s при падении скорости ветра и чем больше скорость его уменьшения, тем больше скорость увеличения угла установки лопастей α и тем больше вращающий момент.

Поэтому к уравнениям механической динамики добавляется еще одно уравнение изменения угла установки для стабилизации скольжения

$$\frac{d\alpha}{dt} = -k_a s - k_{da} \frac{ds}{dt}, \quad (14)$$

в которое $\frac{ds}{dt}$ подставляется из уравнения (4). Коэффициенты k_a , k_{da} подбираются в соответствии с необходимым уровнем стабилизации, который обеспечивает близкое к нулю значение скольжения при изменении скорости ветра.

3. Результаты моделирования

В качестве основных исходных элементов модели выбраны два типа генераторов, имеющих параметры: СГЭМ мощностью 100 кВт, напряжение $U = 220$ В, ток нагрузки $I = 180$ А, $n = 1500$ об/мин, $\Omega = 157$ с⁻¹, $p = 2$ со следующими данными (в о.е.): $r = 0,005$; $u_f = 0,013$; $r_f = 0,011$; $e = 1$; $x_d = 1$; $x_g = 0,6$; $x_{ad} = 0,85$; $x_f = 0,9$; $i_{fh} = 1,182$. СГПМ имеет мощность 20 кВт [12], $U = 220$ В, $I = 40$ А, $n = 125$ об/мин, $\Omega = 13,09$ с⁻¹, $p = 24$, $r_c = 0,05$, $x_{dc} = 2,0$, $x_{gc} = 1,3$, $\psi = 0,906$ [4].

Для расчета начальных условий моделирования динамического режима выполнено решение алгебраического уравнения, полученного из уравнения (4) при $\frac{d}{dt} = 0$ и $s = 0$. Средняя скорость ветра V принята равной 12 м/с.; $D_{ВК} = 25$ м; $\alpha = 65$, $n_{эм} = 1$ и $n_{СГПМ} = 6$ (согласно табл.). Получаем следующие значения параметров начального режима в о.е.: $\theta = 0,04465$; $i_d = -0,013$; $i_q = -0,074$; $i_{эм} = 0,076$; $i_{dc} = -0,119$; $i_{gc} = -0,027$; $i_{СГПМ} = 0,122$; $M_{эм} = 0,075$; $M_{СГПМ} = 0,053$; $M_{тр} = 0,236$; $M_{ВК} = 0,805$; $M_{дин.} = 0,179$ (см. рис. 2).

Переменная скорость ветра, выступающая исходной переменной величиной, моделируется набором синусоид $V(t) = 12 + 6\sin 0,1t + \sin 0,28t$; для удобства сравнения на рис. 2 она уменьшена в 10 раз и там же изображены графики электромагнитных моментов двух типов генераторов, их суммарные моменты и момент ВК, уменьшенный в 1 000 раз.

На рис. 2б и 2в изображены кривые колебания угла нагрузки (параметра s), самого угла нагрузки θ генератора с электромагнитным возбуждением, угла установки лопастей α (уменьшенного для удобства в 100 раз), скорость ВК Ω (увеличенная в три раза), а также графики токов статора I электромагнитного генератора и генератора с постоянными магнитами. Ступенчатые линии в нижней части рис. 2а показывают количество работающих в данный момент времени генераторов.

На рис. 2г изображены графики активных мощностей электромагнитного генератора и генератора с постоянными магнитами, их суммарной мощности, а также мощность $P_{ВК}$, развиваемую ВК, и график напряжения возбуждения $U_{ВГ}$.

Следует обратить внимание на то, что в интервале времени от 30 мин до 65 мин скорость ветра падает до 5 ÷ 7 м/с, и для поддержания режима выработки мощности ВЭУ генераторы с постоянными магнитами по одному отключаются от ВК и от сети. Таким способом поддерживается момент на электромагнитном генераторе и выработка его мощности. На этом же интервале времени для поддержания скорости ВК угол установки лопастей ВК увеличивается до 70°, а момент ВК снижается в 6 раз. В конце этого интервала все генераторы с постоянными магнитами оказываются отключенными, момент ВК уравнивается только тормозным моментом электромагнитного генератора, при этом его мощность снижается примерно вдвое.

По мере дальнейшего нарастания скорости ветра генераторы с постоянными магнитами по одному подключаются к сети, также подключаются и два электромагнитных генератора. Углы установки лопастей снижаются для сдерживания роста момента ВК и его скорости вращения. Таким образом, скорость вращения поддерживается на достаточно стабильном уровне. В моменты включения и отключения генераторов от сети возникают локальные переходные процессы, интенсивность которых сдерживается сравнительно большим суммарным моментом инерции системы.

По мере увеличения числа работающих генераторов с постоянными магнитами СГ с электромагнитным возбуждением вырабатывает меньше мощности, угол нагрузки θ также снижается, уменьшается и общая вырабатываемая мощность ВЭУ.

На рис. 2г проиллюстрирована возможность генерирования реактивной мощности $Q_{СГ}$ СГЭМ при их перевозбуждении, что соответствует физическим процессам.

В конечный момент моделирования при $t = 80$ мин состояние системы характеризуется следующими значениями: $i_d = -0,014$; $i_q = -0,157$; $i_f = 1,189$; $s = -0,0019$; $\theta = 0,094$; $\alpha = 60,4^\circ$; $i_{dc} = -0,119$; $i_{qc} = -0,053$. В этом режиме ток СГЭМ составляет 0,157; ток СГПМ – 0,13; активная мощность, выраба-



тываемая электромагнитным генератором – 0,236; мощность одного генератора с постоянными магнитами – 0,096; мощность всех электромагнитных генераторов достигает 0,4725; мощность всех генераторов с постоянными магнитами – 0,955; а общая вырабатываемая активная мощность – 1,464. Мощность, развиваемая ВК, достигает 1,483; разность мощностей приходится на потери; момент электромагнитного генератора – 0,158; а момент одного генератора с постоянными магнитами составляет 0,101; общий момент всех генераторов достигает 1,324; момент трения – 0,235.

4. Заключение

Реализация математического моделирования на предложенной системе уравнений электрического и механического равновесия с учетом реально действующих факторов процесса преобразования энергии вполне адекватно отражает логику взаимодействий в основных элементах рассматриваемого комплекса.

Результаты моделирования показывают целесообразность и реальную возможность конструирования и внедрения ветроустановок подобного типа, а также реализации их управления в условиях нестационарных ветровых потоков.

Список литературы

[1] Кривцов, В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектродгенераторы: учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ; Севастополь: СевНТУ, 2003. – 400 с.

[2] Кривцов, В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика: учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ; Севастополь: СевНТУ, 2004. – 519 с.

[3] Кривцов, В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 3. Альтернативная энергетика: учебник / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ; Севастополь: СевНТУ, 2006. – 621 с.

[4] Кривцова, В.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 4. Ветродородная энергетика: учебник / В.И. Кривцова, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ; Севастополь: СевНТУ, 2007. – 606 с.

[5] Dvorak P., Yan J. Мегаконструкции. Самые большие ветрогенераторы [Электронный ресурс] (China, sawt.com.) – Режим доступа <https://geektimes.com/post/284188/>. – (Дата обращения: 02.02.2018).

[6] Олейников, А.М. Моделирование динамического режима автономной ветроэлектрической установки малой мощности / А.М. Олейников, Л.Н. Канов, Е.И. Зарицкая // Праці інституту електродинаміки НАН України. – 2009. – № 24. – С. 11–18.

[7] Олейников, А.М. Автономные ветроэлектродгенераторы малой мощности / А.М. Олейников, А.В.

Пильганчук, Л.Л. Загоруйко // Сб. Научн. Трудов СІЯЭІП, Севастополь. – 1999. – № 1. – С. 77–79.

[8] Олейников, А.М. Автономная безредукторная ВЭУ с тихоходным синхронным генератором средней мощности / А.М. Олейников, Е.И. Зарицкая, А.В. Пильганчук // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, Энергетика, Экология: Сб. Науч. Тр. – Севастополь: СевНТУ. – 2009. – Вып. 97. – С. 103–106.

[9] Олейников, А.М. Практические разработки в интересах развития ветроэлектрических установок / А.М. Олейников, В.В. Усачев // Системы контроля окружающей среды. – 2018. – № 12 (32). – С. 133–141.

[10] ПФГ «Конкорд» Ветроэлектрическая турбогенераторная установка ТГ-750. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії в енергозабезпеченні регіону: Матеріали науково-практичної конференції // Регіональний філіал національного інституту стратегічних досліджень в м. Дніпропетровську; за ред. проф. А.І. Шевцова. – 2007. – С. 38–41

[11] Пат. 88140 Украина, МПК Н 02 К 21/00. Многомашинная вертикально-осевая ветроустановка / Олейников А.М. – [и др.]; заявитель и патентообладатель Олейников А.М. и др. – № 2012 02 1219; заявл. 24.02.2012; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 5.

[12] Абрамовский, Е.Р. Ретроспектива и перспектива вертикально-осевой ветроэнергетики. /Е. Р. Абрамовский, И. Ю. Костюков, С. В. Тарасов, А. И. Яковлев // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «ІФНТ». – 2014. – 22. – С. 18–31.

[13] Автономные ветроэнергетические установки: учеб.-метод. пособие для студентов техн. высш. учеб. заведений / под ред. А.М. Олейникова. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – 192 с.

[14] Балагуров, В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.

[15] Пат. 86070 Украина, МПК Н02К 21/00. Ротор тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами / Олейников А.М. – [и др.]; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. техн. ун-т. – № 200700457; заявл. 16.01.07; опубл. 25.03.09, Бюл. № 6.

[16] Шейнман, Л.Е. Расчет переходных процессов синхронных машин. – Севастополь: изд-во Севастопольское ВВМИУ, 1972. – 144 с.

[17] Казовский, Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М., Л.: изд-во АН СССР, 1962. – 624 с.

[18] Веретенников, Л.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах кораблей. – Л.: изд-во Военно-морской академии им. Гречко А.А., 1965. – 493 с.

[19] Трещев, И.И. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.: Энергия, 1980. – 342 с.

[20] Тафт, В.А. Электрические цепи с периодическими изменяющимися параметрами и переходные



процессы в синхронных машинах. – М.: изд-во АН СССР, 1958. – 188 с.

References

[1] Krivtsov V.S, Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. Inexhaustible energy. Book 1. Windelektrogenerators: tutorial (Neischerpaemaya energiya. Kn. 1. Vetroelektrogeneratory: uchebnik). Kharkov: Nats. aerokosm. un-tKhAI; Sevastopol: SevNTU, 2003; 400 (in Russ.).

[2] Krivtsov V.S, Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. Inexhaustible energy. Book 2. Windenergy: tutorial (Neischerpaemaya energiya. Kn. 2. Vetroenergetika: uchebnik). Kharkov: Nats. aerokosm. un-t KhAI; Sevastopol: SevNTU, 2004; 519 (in Russ.).

[3] Krivtsov V.S, Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. Inexhaustible energy. Book 3. Alternative energy: tutorial (Neischerpaemaya energiya. Kn. 3. Alternativnaya energetika: uchebnik). Kharkov: Nats. aerokosm. un-t KhAI; Sevastopol: SevNTU, 2006; 621 p. (in Russ.).

[4] Krivtsova V.I, Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. Inexhaustible energy. Book 4. Windhydro energy: tutorial (Neischerpaemaya energiya. Kn. 4. Vetrovodorodnaya energetika: uchebnik). Kharkov: Nats. aerokosm. un-t KhAI; Sevastopol: SevNTU, 2007; 606 p. (in Russ.).

[5] Dvorak P., Yan J. Megoconstruction. The biggest wind generators [E-resource] (Megakonstruktii. Samye bol'shie vetrogeneratory). China, sawt.com (02.02.2018). Available on: <https://geektimes.com/post/284188/>.

[6] Oleynikov A.M., Kanov L.N., Zaritskaya E.I. Modeling of dynamic mode of low energy autonomous wind plant (Modelirovanie dinamičeskogo rezhima avtonomnoi vetroelektricheskoi ustanovki maloi moshchnosti) *Pratsi instytutu elektrodinamiki NAN Ukraini*, 2009;(24):11–18 (in Ukr.).

[7] Oleynikov A.M., Pil'ganchuk A.V., Zagoruiko L.L. Autonomous wind elektro generators of low output (Avtonomnye vetroelektrogeneratory maloi moshchnosti). *Sb. Nauchn. Trudov SIYaEIP, Sevastopol*, 1999;(1)77–79 (in Russ.).

[8] Oleynikov A.M., Zaritskaya E.I., Pilganchuk A.V. Autonomous gearless WEP with low-speed synchronous generator of an average output (Avtonomnaya bezreduktornaya VEU s tikhokhodnymsinkhronnym generatoromsredneimoshchnosti) *Vestnik SEVNTU. Ser. Mekhanika, Energetika, Ekologiya: Sb. Nauch. Tr. – Sevastopol: SEVNTU*, 2009;(97):103–106 (in Russ.).

[9] Oleynikov A.M., Usachev V.V. Practical elaborations for further development of WEP (Prakticheskie razrabotki v interesakh razvitiya vetroelektricheskikh ustanovok). *Monitoring systems of environment*, 2018;12(32):133–141 (in Russ.).

[10] Golubenko N.S., Dovgalyuk S.I., Fel'dman A.M. PFG "Koncord" Windelectrical turbogenerator plant TG-750. Non-traditional and renewable energy in the power supply of the region: the materials of scientific-practical Conference (PFG "Koncord" Vetroelektricheskaya tur-

bogeneratorsnaya ustanovka TG-750. Netraditsiini na vidnovlyuvanidzherelaenergii v energozabezpechenni regionu. Materiali naukovo-praktichnoi konferentsii. Regional'nii filial natsional'nogo institutu strategichnikh doslidzhen' v m. Dnipropetrovs'ku); Ed. Prof. A.I. Shevtsov, 2007; pp. 38–41 (in Russ.).

[11] Oleynikov A.M., Plakida V.T., Usachev V.V., Yakovlev A.I. Multi-machine vertical-axis WEP (Pat. 88140 Ukraina, MPK N 02 K 21/00. Mnogomashinnaya vertikal'no-osevaya vetroustanovka) / [Opubl. 03.11.2014. Bul. no. 5 (in Russ.).

[12] Abramovskij E.R., Kostyukov I. Yu., Tarasov S. V., Yakovlev A. I. Retrospective and prospect of vertical-axis wind power (Retrospektiva ierspektiva vertikal'no-osevoi vetroenergetiki). *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Seriya "IFNIT"*, 2014;(22):18–31 (in Ukr.).

[13] Oleynikov A.M., Matveev Yu.V., Gruba G.I., Plakida V.T., Gracheva L.I., Danilov V.N. Autonomous WEP: The text-book for technical students in H. school (Avtonomnye vetroenergeticheskie ustanovki: uchebno-metod. posobie dlya studentov tekhn. vyssh. ucheb. Zavedenii. Ed. A.M. Oleynikov. Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2009; 192 p. (in Russ.).

[14] Balagurov V.A., Galteev F.F. Electrical generators with permanent magnets (Elektricheskie generatory s postoyannym magnitami). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1988; 280p. (in Russ.).

[15] Oleynikov A.M., Martynov V.N., Tereshchenko P.V. Rotor of low-speed synchronous permanent magnet generator (Pat. 86070 Ukraina, MPK N 02 K 21/00. Rotor tikhokhodnogo sinkhronnogo generatora s postoyannymi magnitami) / Zayavitel' ipatentoobladatel' SevNTU; Opubl. 03.25.2009. Byul. no. 6 (in Russ.).

[16] Sheinman L.E. Synchronous machines transient processes calculation (Raschet perekhodnykh processov v sinkhronnykh mashinakh). Sevastopol: izd-vo Sevastopol'skoe VVMU, 1972; 144 p. (in Russ.).

[17] Kazovskii E.Ya. Transient processes of ac machines (Perekhodnye protsessy v elektricheskikh mashinakh peremennogo toka). Moscow, Leningrad: izd-vo AN SSS, 1962; 624 p. (in Russ.).

[18] Veretennikov L.P. Transient processes in ships power plants. (Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh korablei). Leningrad: izd-vo V.M Akademiim. Grechko A.A.. 1965; 493 p. (in Russ.).

[19] Treshchev I.I. Transient processes in electrical machines of alternating current. (Perekhodnye protsessy v elektricheskikh mashinakh peremennogo toka). Moscow: Energiya Publ., 1980; 342 p. (in Russ.).

[20] Taft V.A. Electrical circuits with periodically varying parameters and transient processes in synchronous machines. (Elektricheskie tsepi s periodicheski izmenyayushchimisya parametrami i perekhodnye protsessy v sinkhronnykh mashinakh). Moscow: izd-vo AN USSR, 1958; 188 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI

