

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

Запропонований метод математичного моделювання режимів вітроелектричної установки з асинхронним генератором. Метод заснований на сплайн-апроксимації вирішення нелінійних рівнянь алгебри електричної частини установки і на цій основі чисельної інтеграції диференціальних рівнянь системи. Метод проілюстрований на прикладі моделювання режиму вітроелектричної установки з безперервним і імпульсним управлінням двигуном повороту лопатей для стабілізації потужності, що виробляється.

Предложен метод математического моделирования режимов ветроэлектрической установки с асинхронным генератором. Метод основан на сплайн-аппроксимации решения нелинейных алгебраических уравнений электрической части установки и на этой основе численного интегрирования дифференциальных уравнений системы. Метод проиллюстрирован на примере моделирования режима ветроэлектрической установки с непрерывным и импульсным управлением серводвигателем поворота лопастей для стабилизации вырабатываемой мощности.

ВВЕДЕНИЕ

Закон Украины "Об энергосбережении" и "Национальная энергетическая программа" определяют ветроэнергетику, как приоритетное направление в комплексе развития нетрадиционных источников энергии. Ветроэлектрические установки (ВЭУ) с горизонтальной осью вращения составляют до 98 % всех ВЭУ, подключенных к сетям энергосистем [1]. Сетевые ВЭУ лишены устройств поддержания частоты тока на уровне стандартов, поэтому автономно работать не могут. В главную силовую цепь подобных ВЭУ входят трехфазный асинхронный генератор (АГ) и повышающий трансформатор. Ветроколесо (ВК) снабжено механизмом поворота лопастей для регулировки вырабатываемой мощности. Упрощенная блок-схема ВЭУ изображена на рис. 1, где обозначены: V – скорость ветра; Ω – угловая скорость вращения ВК; n – передаточное число редуктора; u_s, i_s – напряжение и ток на выходе генератора; C, i_c – емкость и ток батареи конденсаторов; L – эквивалентная индуктивность кабелей и обмоток трансформатора; r, g – сопротивление и проводимость кабелей и арматуры; U, I – напряжение и ток сети.

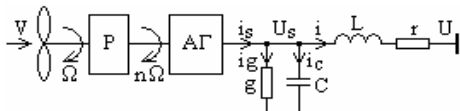


Рис. 1. Упрощенная блок-схема ВЭУ

К настоящему времени подробно описаны электромагнитные процессы в АГ, трансформаторе, проработаны конструкции ВЭУ [1-3]. В маломощных ВЭУ на генераторах с постоянными магнитами изучены динамические режимы при изменяющейся скорости ветра [4], однако в сетевых ВЭУ на АГ динамика режима исследована недостаточно. Так, в [5] предложено управление поворотом лопастей ВК по упрощенной модели АГ при прогнозе скорости ветра. В [6] проведен расчет электрической динамики ВЭУ с АГ при упрощенной модели ВК без учета влияния поворота лопастей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является разработка уточненного математического описания электромеханической системы ВЭУ с АГ, работающей на сеть, и моделирование ее режимов в условиях стабилизации вырабатываемой мощности при изменяющейся скорости ветра.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЭУ

Уравнения АГ в общепринятых обозначениях в ортогональной системе координат d, q , вращающихся с синхронной скоростью ω_s с опережающим вращением поперечной оси, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{sd}}{dt} &= \omega_s \psi_{sq} - r_s i_{sd} - u_{sd}; \\ \frac{d\psi_{rd}}{dt} &= (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} - r_r i_{rd}; \\ \frac{d\psi_{sq}}{dt} &= -\omega_s \psi_{sd} - r_s i_{sq} - u_{sq}; \\ \frac{d\psi_{rq}}{dt} &= -(\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} - r_r i_{rq} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

здесь $\omega_s = n\Omega$ – угловая скорость ротора генератора.

Составляющие потокосцеплений разделим на потокосцепления в зазоре и рассеяния

$$\left. \begin{aligned} \psi_{sd} &= x_{\sigma s} i_{sd} + \psi_{\delta d}(i_{\delta d}); \\ \psi_{sq} &= x_{\sigma s} i_{sq} + \psi_{\delta q}(i_{\delta q}); \\ \psi_{rd} &= x_{\sigma r} i_{rd} + \psi_{\delta d}(i_{\delta d}); \\ \psi_{rq} &= x_{\sigma r} i_{rq} + \psi_{\delta q}(i_{\delta q}) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $i_{\delta d} = i_{sd} + i_{rd}$; $i_{\delta q} = i_{sq} + i_{rq}$ – продольный и поперечный намагничивающий токи; $x_{\sigma s}, x_{\sigma r}$ – реактивности рассеяния. Потокосцепления в зазоре $\psi_{\delta d}(i_{\delta d})$, $\psi_{\delta q}(i_{\delta q})$ являются нелинейными функциями вследствие насыщения магнитной цепи АГ. Далее принята следующая их аппроксимация

$$\psi_{\delta}(i_{\delta}) = a \cdot \arctg(bi_{\delta}) + ci_{\delta},$$

где $a = 0,25$; $b = 7,6$; $c = 0,002$.

Ток АГ i_s отделяется в батарею конденсаторов $i_c = Cdu/dt$, в проводимость $i_g = gu_s$ и в сеть i . Уравнения для составляющих тока в d, q – координатах имеют вид

$$\left. \begin{aligned} i_{sd} &= C \frac{du_{sd}}{dt} - C\omega_s u_{sq} + gu_{sd} + i_d; \\ i_{sq} &= C \frac{du_{sq}}{dt} + C\omega_s u_{sd} + gu_{sq} + i_q \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Напряжение АГ u_s складывается из напряжения на индуктивности $u_L = Ldi/dt$, на сопротивлении $u_r = ri_s$ и напряжения сети u . Уравнения для составляющих напряжения в d, q – координатах имеют вид

$$\left. \begin{aligned} u_{sd} &= L \frac{di_d}{dt} - L\omega_s i_q + r i_d + u_d; \\ u_{sq} &= L \frac{di_q}{dt} + L\omega_s i_d + r i_q + u_q \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где $u_d = 0$; $u_q = -U = \text{const}$ – напряжение сети.

К уравнениям электрической динамики добавляется уравнение механической динамики, связанной со скоростью вращения ВК

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{mp}\Omega + M_{эм} = M_{эк}(z, \alpha), \quad (5)$$

где J – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу ВК; k_{mp} – коэффициент трения; электромагнитный момент АГ:

$$M_{эм} = 3n \cdot (i_{sd}\Psi_{\delta q} - i_{sq}\Psi_{\delta d}); \quad (6)$$

$M_{эк}(z, \alpha)$ – вращающий момент ВК, зависящий от угла поворота лопастей α и от коэффициента быстроходности $z = z(\Omega, V) = 0,5D\Omega/V$; D – диаметр ВК.

Необходимое изменение угла поворота лопастей обеспечивается серводвигателем; соответствующее уравнение имеет вид

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_\alpha u_\alpha, \quad (7)$$

где k_α , u_α – коэффициент усиления и напряжение питания серводвигателя.

Вращающий момент ВК определяется удельным моментом $M_0(z, \alpha)$ и зависит от скорости ветра, диаметра ВК и плотности воздуха ρ

$$M_{эк}(z, \alpha) = M_0(z, \alpha) \cdot V^2 \frac{\pi D^3 \rho}{16}.$$

Удельный момент для различных z и углов α определяется на основании конструкции лопасти по методике Фатева Е.М. [7] и аппроксимируется сплайн-функцией двух переменных z , α . На рис. 2,а изображены рассчитанные графики зависимостей вращающего момента $M_{эк}(z, \alpha)$ от угла α для ВК диаметром $D = 3,5$ м с тремя прямыми лопастями при $\Omega = 15,7$ с⁻¹, $\rho = 1,225$ кг/м³ и различных скоростях ветра. На рис. 2,б – графики зависимостей $M_{эк}(z, \alpha)$ от Ω при различных α и $V = 20$ м/с.

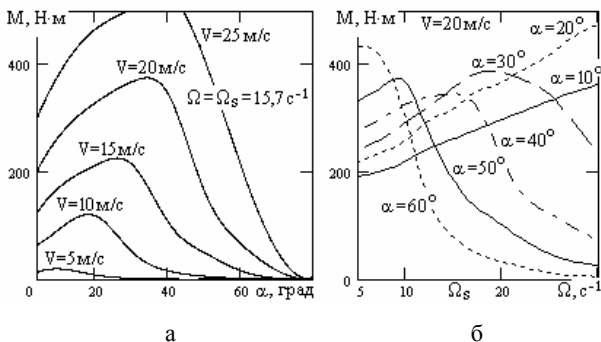


Рис. 2. Момент ветроколеса: а) неизменная скорость вращения; б) неизменная скорость ветра

Рисунки показывают, что момент имеет характерный максимум, зависящий как от скорости ветра, так и от угла поворота лопастей.

Генератор, вращаясь со скоростью $\omega_s = n\Omega$, несколько превышающей синхронную вследствие скольжения, вырабатывает активную мощность

$$P(\Omega, U) = 3 \cdot (u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq}). \quad (8)$$

Напряжение на серводвигателе поворота лопастей зависит от разности между вырабатываемой мощностью $P(\Omega, U)$ и уставкой P_0 . При изменении скорости ветра серводвигатель поворачивает лопасти так, чтобы обеспечить близость $P(\Omega, U)$ и P_0 . Управляющее напряжение на серводвигателе u_α по (7) определяется разностью $\Delta P = P(\Omega, U) - P_0$: $u_\alpha(\Delta P)$.

АЛГЕБРАИЗАЦИЯ УРАВНЕНИЙ ВЭУ

Приведенные уравнения представляют математическую модель ВЭУ, работающей на сеть с напряжением U и вырабатывающей мощность $P \approx P_0$. Так как механическая инерционность ВЭУ гораздо больше инерционности ее электрической части, приведенное математическое описание является жестким и пригодно для анализа лишь "короткой" динамики ВЭУ порядка секунд. Для анализа "длинной" динамики алгебраизуем электрическую часть математического описания, для чего положим производные в уравнениях (1), (3) и (4) равными нулю.

В этих условиях последовательным исключением из уравнений (1) – (4) переменных i_d , i_q , u_{sd} , u_{sq} , i_{sd} , i_{sq} получаем пару уравнений для поперечных составляющих токов статора и ротора АГ i_{sq} , $i_{r q}$

$$\left. \begin{aligned} A_{sq}3i_{sq} + \omega_s A_{sq}\Psi_{\delta q}(i_{sq} + i_{r q}) + \omega_s F(\cdot) &= A_{su}3U; \\ r_r i_{r q} + s \cdot [s \cdot A_{r1} \cdot (x_{\sigma r} i_{r q} + \Psi_{\delta q}(i_{sq} + i_{r q})) + F(\cdot)] &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где $s = \omega_s - n\Omega$, а A_{ij} , F – коэффициенты преобразования. Численное решение системы (9) $i_{sq}(\Omega, U)$, $i_{r q}(\Omega, U)$ при $U = 220$ В и типичных значениях параметров ($r = 0,02$ Ом; $L = 5$ мГн; $g = 50$ мкСм; $C = 740$ мкФ; $r_r = r_s = 0,09$ Ом; $x_{\sigma s} = 4$ мГн; $x_{\sigma r} = 3$ мГн; $n = 20$) также аппроксимировано сплайн-функциями, графики которых изображены на рис. 3, а график электромагнитного момента АГ по (6) – на рис. 4.

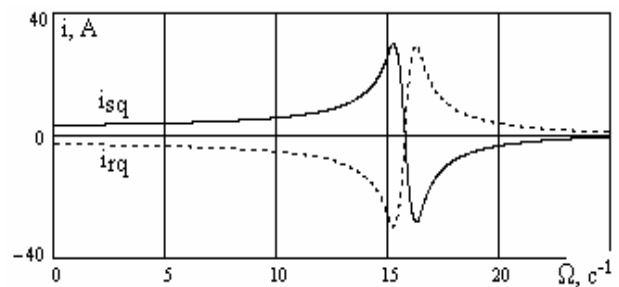


Рис. 3. Зависимость поперечных составляющих токов генератора от угловой скорости ветроколеса

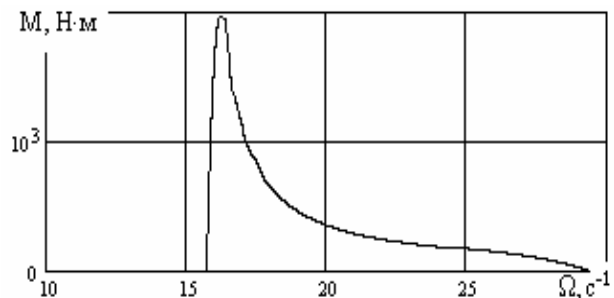


Рис. 4. Зависимость электромагнитного момента генератора от угловой скорости ветроколеса

УПРАВЛЕНИЕ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ МОЩНОСТИ

Стационарный режим ВЭУ при заданных V , α и U с учетом трения определяется пересечением графиков на рис. 2,б с левой частью графика на рис. 4:

$$k_{тр}\Omega + M_{эм}(\Omega, U) = M_{вк}(z(\Omega, V), \alpha).$$

Кроме того, АГ должен вырабатывать заданную мощность P_0 по (8)

$$P_0 = P(\Omega, U).$$

График мощности, вырабатываемой генератором в зависимости от угла α и от скорости ветра, изображен на рис. 5. График показывает, что на плоскости α, V существует линия критического угла, на которой вырабатываемая мощность максимальна. Графики линий уровня мощности на плоскости α, V для ряда значений P_0 получены совместным численным решением двух последних уравнений с использованием аппроксимированных функций и изображены на рис. 6. На этом же рисунке изображена линия критического угла $\alpha_{кр}$.

Из рис. 6 следует, что при увеличении скорости ветра, например, от величины V_1 до V_2 и возникшем избытке мощности $\Delta P = P(\Omega, U) - P_0 > 0$ для поддержания заданного уровня P_0 следует уменьшить угол α от величины α_1 до α_2 , если $\alpha < \alpha_{кр}$, и увеличить от α_3 до α_4 , если $\alpha > \alpha_{кр}$.

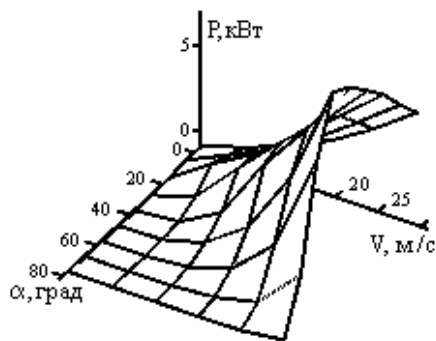


Рис. 5. График мощности, вырабатываемой генератором

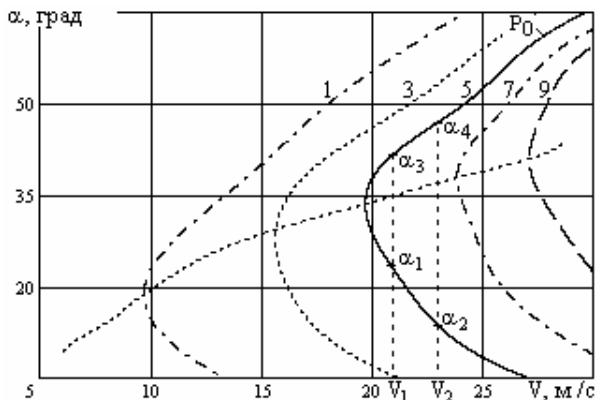


Рис. 6. Линии уровня мощности (цифры обозначают мощность в кВт)

При снижении скорости ветра и дефиците мощности $\Delta P = P(\Omega, U) - P_0 < 0$ выполняются обратные действия. При снижении скорости ветра ниже критической для заданной мощности P_0 рабочая точка ВЭУ смещается влево по линии критического угла, и стабилизация мощности не осуществляется.

Для реализации непрерывного управления ста-

билизацией мощности напряжение на серводвигателе должно изменяться следующим образом

$$u_\alpha = \Delta P \cdot \arctg(k \cdot (\alpha - \alpha_{кр}(V))), \quad (10)$$

где k – постоянный коэффициент. Подобный вид напряжения исключает "дребезг" управления. Кроме того, напряжение u_α ограничивается так, чтобы угол α не покидал пределы [4...85] градусов.

На рис. 7,а изображены результаты моделирования режима ВЭУ с непрерывным управлением, рассчитанные по уравнениям (5) – (7), (10) при $k_\alpha = 1,5$; $k = 2$ для стабилизации мощности $P_0 = 5$ кВт, а на рис. 7,б – соответствующая траектория рабочей точки на плоскости V, α . На участке А при достаточной скорости ветра обеспечивается стабилизация мощности. На участке В при снижении скорости ветра угол достигает критического значения, и мощность падает, а на С – при избытке мощности угол достигает нижнего предела, и стабилизации мощности не происходит.

Описанный метод может быть реализован в виде импульсного управления. Для этого при небалансе мощности ΔP на серводвигатель подаются импульсы напряжения u_α неизменной амплитуды $u_{ам}$, длительности T_u с паузами между ними T_n . Угол α изменяется таким образом до тех пор, пока вырабатываемая мощность не войдет в заданный диапазон регулирования $[P_0 - dP, P_0 + dP]$. На рис. 8,а изображены результаты моделирования режима ВЭУ с импульсным управлением, а на рис. 8,б – соответствующая траектория рабочей точки, рассчитанная при $u_{ам} = 50$ В; $T_u = 0,06$ мин.; $T_n = 0,02$ мин.; $dP = 0,4$ кВт.

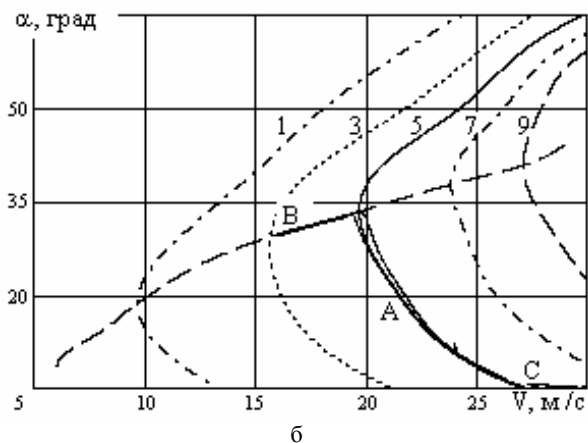
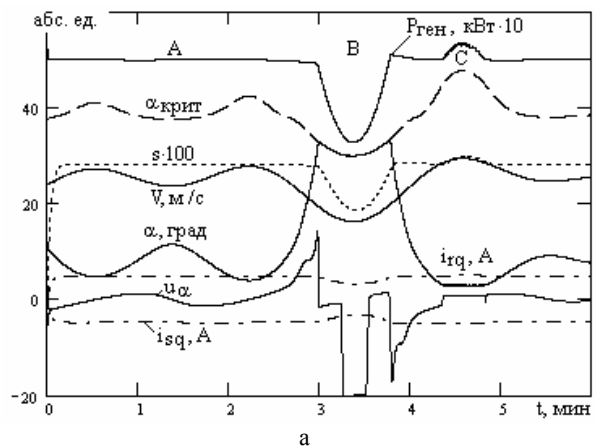


Рис. 7. Режим ВЭУ с непрерывным управлением

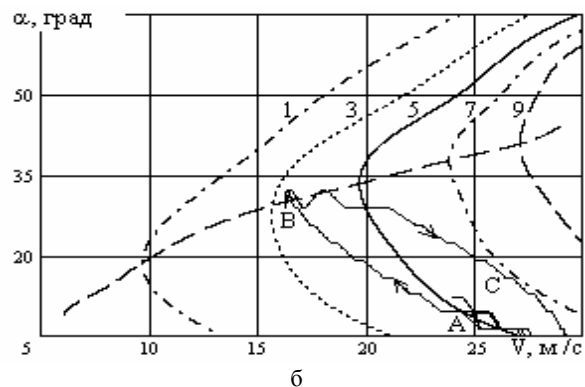
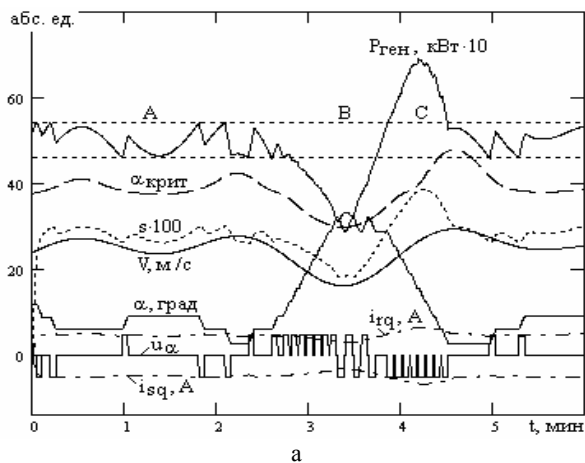


Рис. 8. Режим ВЭУ с импульсным управлением

Графики показывают, что на участке А мощность удерживается в заданном диапазоне отдельными импульсами управляющего напряжения серводвигателя. На участке В серводвигатель не успевает обрабатывать дефицит мощности, а на участке С – избыток мощности. При минимуме скорости ветра разнополярными импульсами напряжения создается колебательный режим около линии критического угла.

ВЫВОДЫ

На основании алгебраизации математического описания ВЭУ с АГ получены уравнения ВЭУ, пригодные для моделирования "длинной" динамики. Выполнено математическое моделирование непрерывного и импульсного управления. Импульсное управление проще, однако, точность регулирования ниже. Перспективным продолжением исследований является построение оптимального управления режимом ВЭУ на основе прогноза скорости ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безруких П.П. Использование энергии ветра / П.П. Безруких. – М.: Изд-во "Колос", 2008. – 196 с.
2. Лукутин Б.В. Энергоэффективные управляемые генераторы для ветроэлектростанций / Б.В.Лукутин, Е.Б. Шандарова, А.И.Муравлев // Известия ВУЗов. Сер. Электромеханика. – 2008. – № 6. – С. 63-66.

3. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: нац. аэрокосм. ун-т (ХАИ). – Севастополь: Севастоп. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.
4. Канов Л.Н. Расчет режима системы автономного электроснабжения переменного тока малой мощности // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 4. – С. 29-33.
5. Буяльский В.И. Повышение эффективности управления ветротурбиной // Вестник СевГТУ. Серия Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2008. – Вып. 88. – С. 152-156.
6. Гармаш В.С. Моделирование переходных режимов работы ветроэлектростанций с асинхронными генераторами [Электронный ресурс]. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua>.
7. Фатеев Е.М. Ветродвиатели и ветроустановки. – М.: Сельхозиздат, 1957. – 195 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bezrukih P.P. Ispol'zovanie `energii vetra / P.P. Bezrukih. - M.: Izd-vo "Kolos", 2008. - 196 s. 2. Lukutin B.V. `Energo`effektivnye upravlyаемые generatory dlya vetro`elektrostancij / B.V.Lukutin, E.B. Shandarova, A.I.Muravlev // Izvestiya VUZov. Ser. `Elektromehanika. - 2008. - № 6. - S. 63-66. 3. Krivcov V.S. Neischerpaemaya `energiya. Kn. 2. Vetro`energetika / V.S. Krivcov, A.M. Olejnikov, A.I. Yakovlev. - Har'kov: nac. a`erokosm. un-t (HAI). - Sevastopol': Sevastop. nac. tehn. un-t, 2004. - 519 s. 4. Kanov L.N. Raschet rezhima sistemy avtonomnogo `elektrosnabzheniya peremennogo toka maloj moschnosti // Elektrotehnika i elektromehanika. - 2011. - № 4. - S. 29-33. 5. Buyal'skij V.I. Povysnenie `effektivnosti upravleniya ветротурбиной // Vestnik SevGTU. Seriya Mehanika, `energetika, `ekologiya: sb. науч. tr. - Sevastopol': Izd-vo SevNTU. - 2008. - Vyp. 88. - S. 152-156. 6. Garmash V.S. Modelirovanie perehodnyh rezhimov raboty vetro`elektrostancij s asinhronnymi generatorami [`Elektronnyj resurs]. - Doneck: DonNTU, 2007. - Rezhim dostupa: <http://masters.donntu.edu.ua>. 7. Fateev E.M. Vetrodviigateli i ветроустановки. - M.: Sel'hozizdat, 1957. - 195 s.

Поступила 15.06.2012

Канов Лев Николаевич, к.т.н., доц.

Севастопольский национальный технический университет
кафедра судовых и промышленных электромеханических систем
99053, Севастополь, ул. Университетская, 33
тел. (0962) 435272

Kanov L.N.

Mathematical modeling of a wind-electric plant with an asynchronous generator.

A mathematical modeling method for wind-electric asynchronous-generator plant modes is introduced. The method employs a spline approximation of the solution to nonlinear algebraic equations of the plant's electric part and, on this basis, numerical integration of the system's differential equations. The method is illustrated with an example of mode modeling for a wind-electric plant with continuous and pulse control of the blades turning servomotor for the power output stabilization.

Key words – mathematical modeling, moment of windwheel, asynchronous generator, power stabilization, blade turning angle, algebraic equations, solution approximation.