

РАСЧЕТ РЕЖИМА СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Запропонований метод розрахунку динамічного режиму системи автономного електропостачання змінного струму малої потужності. Метод заснований на попередній аналітичній апроксимації вирішення нелінійного рівняння алгебри і на цій основі чисельної інтеграції диференціальних рівнянь системи. Метод проілюстрований на прикладі розрахунку режиму системи електропостачання з ланкою постійного струму в умовах змінного навантаження.

Предложен метод расчета динамического режима системы автономного электроснабжения переменного тока малой мощности. Метод основан на предварительной аналитической аппроксимации решения нелинейного алгебраического уравнения и на этой основе численного интегрирования дифференциальных уравнений системы. Метод проиллюстрирован на примере расчета режима системы электроснабжения со звеном постоянного тока в условиях переменной нагрузки.

ВВЕДЕНИЕ

Системы автономного электроснабжения малой мощности, приводимые в действие силой ветра и относящиеся к нетрадиционным источникам электроэнергии, применяются для питания бытовых и промышленных нужд и в современных условиях представляют альтернативу традиционному электроснабжению. Это особенно актуально для потребителей удаленных районов, где есть затруднения со стационарным электроснабжением. В системах автономного электроснабжения малой мощности нет механических или гидравлических устройств регулирования скорости вращения, вместо которых применяются балластное сопротивление нагрузки и аккумуляторная батарея (АБ) [1]. Эти элементы входят в промежуточное звено постоянного тока с буферным накопителем энергии и последующим преобразованием ее инвертором в напряжение и ток промышленной частоты. В общем случае подобная система состоит из генератора и выпрямителя, к выходным шинам которого с напряжением u подсоединяется балластное сопротивление $r_{бал}$, аккумуляторная батарея с проводимостью $g_{акк}$ и нагрузка r_n , в качестве которой выступает входное сопротивление инвертора.

В то время как математическое описание мощных систем электроснабжения с ветротурбинами, работающих на сеть, сравнительно подробно исследовано [2, 3], расчету режимов систем автономного электроснабжения малой мощности уделяется меньшее внимание. Однако подобные расчеты необходимы для правильного выбора параметров элементов системы и оценки ее эффективности, так как опыт эксплуатации таких систем показывает, что их работа зачастую неустойчива и сопровождается скачками скорости вращения при изменении сопротивления нагрузки и ветра [4]. В работах [5, 6], например, выполнено моделирование режима подобных систем малой мощности с использованием генератора переменного напряжения на постоянных магнитах, однако математическое описание узла "выпрямитель – фильтр" и аккумуляторной батареи представляется упрощенным, а аналитическая аппроксимация относительного вращающего момента имеет недостаточную точность.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является разработка уточненного математического описания системы автономного электроснабжения малой мощности и расчет ее режима в условиях изменения сопротивления нагрузки и скорости ветра.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Математическое описание генератора с постоянными магнитами при допущении синусоидальности напряжения и ненасыщенности магнитной цепи выполняется в ортогональных d, q – координатах с опережающим вращением продольной оси [5]

$$\left. \begin{aligned} 1,5(r i_d + L_d \frac{d i_d}{dt} + L_q i_q p \Omega) + i_d \frac{R_n}{\sqrt{3}} &= 0; \\ 1,5(r i_q + L_q \frac{d i_q}{dt} - L_d i_d p \Omega - \Psi p \Omega) + i_q \frac{R_n}{\sqrt{3}} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где u_d, i_d, u_q, i_q – продольные и поперечные составляющие фазных напряжений и токов; L_d, L_q – индуктивности фазной обмотки статора генератора вдоль соответствующих осей; p – число пар полюсов; r – активное сопротивление фазы обмотки статора; Ψ – потокосцепление магнитов вдоль продольной оси генератора; Ω – угловая скорость; R_n – обобщенное сопротивление нагрузки.

Пренебрегая электрической инерционностью генератора по сравнению с механической инерционностью системы, из уравнений (1) получаем:

$$i_q = \frac{1,5 p \Omega \Psi \left(1,5 r + \frac{R_n}{\sqrt{3}}\right)}{L_d L_q (1,5 p \Omega)^2 + \left(1,5 r + \frac{R_n}{\sqrt{3}}\right)^2}; \quad i_d = -\frac{1,5 p \Omega L_q i_q}{1,5 r + \frac{R_n}{\sqrt{3}}}$$

и выходной ток

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \frac{1,5 p \Omega \Psi \sqrt{(1,5 p \Omega L_q)^2 + \left(1,5 r + \frac{R_n}{\sqrt{3}}\right)^2}}{(1,5 p \Omega)^2 L_d L_q + \left(1,5 r + \frac{R_n}{\sqrt{3}}\right)^2}. \quad (2)$$

Уравнение динамики механической части системы имеет вид уравнения равновесия моментов

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{mp}\Omega + M_{ген} = M_{вк}, \quad (3)$$

где J – момент инерции; k_{mp} – коэффициент трения; $M_{ген} = 1,5\pi i_q [1,5\Psi + (L_d - L_q)i_d]$ – электромагнитный момент генератора; $M_{вк}$ – вращающий момент ветроколеса, зависящий от скорости ветра V [5]:

$$M_{вк} = M(z) \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16},$$

где D – диаметр ветроколеса; ρ – плотность воздуха; $z = D\Omega/2V$; $M(z)$ – относительный момент, аппроксимированный в [6] выражением

$$M(z) = k_1 e^{-k_2(z-z_0)^2} + k_3 e^{-k_4 z} + k_5 \sin z - k_6 z^5,$$

где $k_1 = 0,09$; $k_2 = 0,35$; $k_3 = 0,006$; $k_4 = 0,03$; $k_5 = 0,009$; $k_6 = 3 \cdot 10^{-7}$.

Обобщенная нагрузка системы R_n представляет сопротивление диода r_d и последовательно соединенное с ним параллельное соединение аккумуляторной батареи, балластной нагрузки $r_{бал}$ и нагрузки r_n

$$R_n = r_d + (r_{бал}^{-1} + r_n^{-1} + g_{акк})^{-1}, \quad (4)$$

где $g_{акк}$ – проводимость АБ.

Сопротивление диода является функцией тока

$$r_d = r_d(i) = \begin{cases} 10^4, & i \leq 10^{-5} \text{ А}; \\ 0,1 \cdot i^{-1}, & i > 10^{-5} \text{ А}, \end{cases} \quad (5)$$

где первое условие характеризует закрытое состояние диода, второе – открытое.

Балластное сопротивление является функцией напряжения u на нагрузке [6]

$$r_{бал} = r_{бал}(u) = \begin{cases} 10^3, & u \leq U_0; \\ (u - U_0 + 10^{-3})^{-1}, & u > U_0, \end{cases} \quad (6)$$

где первое условие означает выключенное состояние балластного сопротивления (большое сопротивление) при напряжении на нагрузке, меньшем заданного U_0 ; второе слагаемое определяет убывающий характер сопротивления при избытке мощности генератора и превышении напряжением на нагрузке уровня U_0 .

Аккумуляторная батарея представляется своей проводимостью $g_{акк}$, которая зависит от напряжения u и от заряда батареи q

$$g_{акк} = g_{акк}(u, q) = \begin{cases} 0, & q \leq 0 \text{ и } u \leq U_0; \\ 0, & q \geq q_{\max} \text{ и } u \geq U_0; \\ g(u) \text{ иначе,} \end{cases} \quad (7)$$

где q_{\max} – максимально допустимый заряд АБ.

Первое условие означает невозможность разряда полностью разряженной АБ, второе – невозможность заряда полностью заряженной АБ, третье – работу АБ в режиме заряда – разряда и стабилизации напряжения u . Проводимость $g(u)$ определяется выражением [6]

$$g(u) = \begin{cases} \frac{I_{\max}}{u} - \frac{I_{\max}}{U_0} e^{-b(u-U_0)}, & u \geq U_0; \\ -\frac{I_{\max}}{u} + \frac{I_{\max}}{U_0} e^{b(u-U_0)}, & u < U_0, \end{cases}$$

где I_{\max} – максимально допустимый ток заряда и разряда АБ. Первое условие означает режим заряда и поглощения избыточной мощности генератора, вто-

рое – режим заряда. Если ток заряда или разряда меньше предельного значения, происходит стабилизация напряжения на нагрузке, если ток выходит на предельные значения, стабилизации не возникает. Коэффициент b определяет степень сглаживания напряжения и выбирается в диапазоне 2...10.

Заряд АБ зависит от ее тока и описывается уравнением

$$T_{акк} \frac{dq}{dt} = u \cdot g_{акк}(u, q), \quad (8)$$

где $T_{акк}$ – постоянная, характеризующая емкость АБ и, следовательно, скорость ее заряда и разряда.

Таким образом, режим системы описывается дифференциальными уравнениями (3), (8) и алгебраическим уравнением

$$i = u \cdot (r_{бал}^{-1}(u) + r_n^{-1}(t) + g_{акк}(u, q)), \quad (9)$$

где ток i по выражению (2) зависит от скорости вращения Ω и от обобщенного сопротивления нагрузки R_n по выражению (4) с сопротивлениями $r_d(i)$ по (5), $r_{бал}(u)$ по (6), проводимостью $g_{акк}(u, q)$ по (7) и сопротивлением нагрузки, зависящим от времени $r_n(t)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Непосредственное численное решение уравнений (3), (8), (9) при произвольных $r_n(t)$ и $V(t)$ затруднено. Возможность применения схемного моделирования [5] ограничена большим количеством нелинейных элементов и сложным характером зависимостей. Более предпочтительной представляется аналитическая аппроксимация численного решения алгебраического уравнения (9).

Для этого на сетке r_{ni} , Ω_j ; $i, j = 1, 2, \dots, n$ с шагом Δr_n , $\Delta \Omega$ численным решением уравнения (9) получены значения напряжения

$$u_{ij}(r_{ni}, \Omega_j) = u(r_{n0} + i\Delta r_n, \Omega_0 + j\Delta \Omega) \quad (10)$$

для случаев, когда АБ отключена $g_{акк} = 0$ и когда она включена $g_{акк} = g(u)$. Графически зависимость в виде поверхности функции двух переменных изображена на рис. 1 (случай включенной АБ). Решение и дальнейшие построения выполнены при следующих типовых параметрах системы автономного электроснабжения малой мощности: $L_d = 3,2$ мГн; $L_q = 2,7$ мГн; $r = 0,3$ Ом; $p = 12$; $\Psi = 0,165$ Вб; $k_{mp} = 0,01$; $D = 4$ м; $J = 11,1$ кг·м²; $T_{акк} = 20$; $U_0 = 56$ В. Плоская часть поверхности с отклонениями в доли Вольт характеризует эффект стабилизации напряжения, которая нарушается лишь при малом сопротивлении нагрузки и скорости.

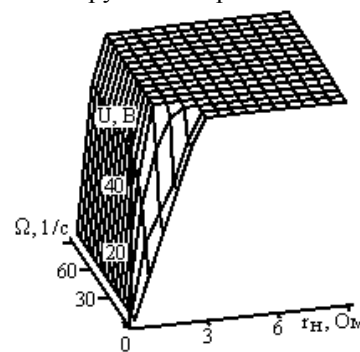


Рис. 1. Поверхность зависимости напряжения от скорости вращения и сопротивления нагрузки

Обе зависимости аппроксимированы функцией Бесселя второго порядка по переменным r_n, Ω [7]:

$$U(r_n, \Omega) = 0,25U_1 + 0,5(x-0,5)U_2 + 0,5(y-0,5)U_3 + (x-0,5)(y-0,5)U_4, \quad (11)$$

где $U_1 = u_{00} + u_{10} + u_{01} + u_{11}$; $U_2 = u_{10} + u_{00} + u_{11} + u_{01}$; $U_3 = u_{01} + u_{00} + u_{11} + u_{10}$; $U_4 = u_{11} + u_{10} + u_{01} + u_{00}$; $x = (r_n - r_{n0})/\Delta r_n$; $y = (\Omega - \Omega_0)/\Delta \Omega$; r_{n0}, Ω_0 – начальные (минимальные) значения r_n, Ω .

Теперь возможно численное интегрирование уравнений (3), (8) при обращении к одной из двух функций $U(r_n, \Omega)$ в зависимости от включенного или выключенного состояния АБ в соответствии с условиями (7).

Для анализа стационарного режима системы электроснабжения, при различных r_n, V с использованием значений момента генератора $M_{ген}$, соответствующих величинам напряжения (10), на сетке r_{ni}, V_k ; $i, k = 1, 2 \dots n$ с шагом $\Delta r_n, \Delta V$ численно получены значения скорости, как решения уравнения (3) при $d\Omega/dt = 0$

$$\Omega_{ik}(r_{ni}, V_k) = \Omega(r_{n0} + i\Delta r_n, V_0 + k\Delta V).$$

Эти значения определяют установившуюся скорость вращения генератора при фиксированных r_n, V и образуют сложную складчатую поверхность, фрагмент которой изображен на рис. 2, а сечения ее плоскостями $\Omega, 0, V$ для различных r_n – на рис. 3. Эти рисунки получены для включенных балластного сопротивления и АБ и показывают, что на поверхности решения выделяются две устойчивые области с сечениями по $0-a$ и $b-c$ с положительным наклоном к оси V и одна неустойчивая область с сечением по $a-b$ и отрицательным наклоном. Линии перегиба, отделяющие устойчивые и неустойчивые области поверхности, в проекции на плоскость r_n, V изображены на рис. 4 (сплошные линии).

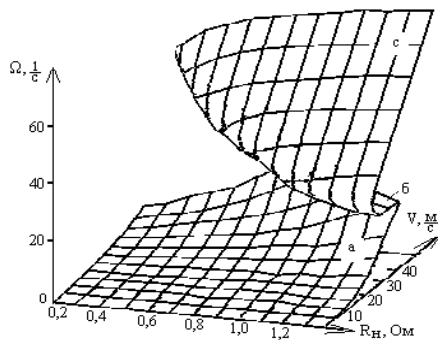


Рис. 2. Поверхность зависимости скорости генератора от сопротивления нагрузки и скорости ветра

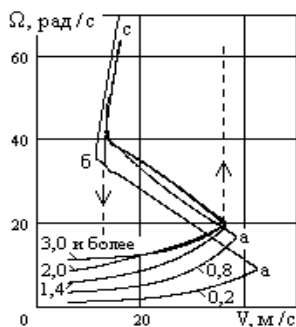


Рис. 3. Сечения поверхности скорости в условиях стабилизации при различных сопротивлениях нагрузки

При увеличении скорости ветра и неизменном сопротивлении нагрузки изображающая точка режима перемещается по вертикальной прямой на плоскости r_n, V , и при пересечении с линией перегиба a , скорость Ω скачком перейдет с нижней устойчивой области $0-a$ (малая скорость) на верхнюю устойчивую область $b-c$ (большая скорость) на рис. 3 по штриховой линии вверх.

При снижении скорости ветра и неизменном сопротивлении нагрузки происходит обратный скачок скорости Ω с верхней области в нижнюю (по штриховой линии вниз) по достижении линии перегиба b (рис. 4).

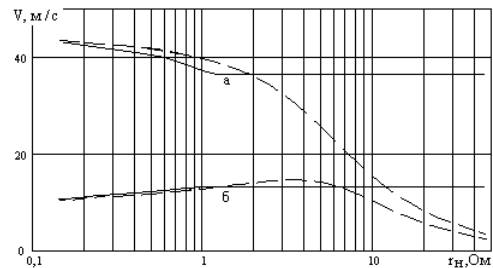


Рис. 4. Линии перегиба поверхности скорости

Аналогичные скачки скорости генератора происходят при изменении сопротивления нагрузки в диапазоне до 1 Ом и при постоянной скорости ветра. При изменении сопротивления в диапазоне, большем 1 Ом, в силу стабилизирующего действия балластного сопротивления и АБ скачков скорости не происходит; поверхность решения оказывается параллельной оси r_n .

Анализ рис. 2-4 показывает, что устойчивая работа системы возможна в широком диапазоне r_n, V на нижней области поверхности решения $0-a$ с низкими скоростями вращения генератора (до 20 с^{-1}). Уход на верхнюю область высоких скоростей возможен только при чрезмерных скоростях ветра ($\approx 35 \text{ м/с}$) в точке b .

Работа системы на верхней области поверхности решения возможна на скоростях ветра $13 \dots 16 \text{ м/с}$ и сопровождается значительными изменениями скорости вращения в диапазоне $40 \dots 60 \text{ с}^{-1}$. Неприятной особенностью является невозвратный переход в нижнюю область при снижении скорости ветра до 13 м/с . Таким образом, стабилизация напряжения на нагрузке при изменении ее сопротивления в широком диапазоне не достигается ценой значительных колебаний скорости вращения генератора и узким диапазоном благоприятного изменения скорости ветра.

Для сравнения на рис. 5 изображены сечения рассматриваемой поверхности решения уравнения (3) для различных r_n в условиях отсутствия стабилизации напряжения (балластное сопротивление и АБ отключены). Соответствующие линии перегиба a и b в проекции на плоскость r_n, V изображены на рис. 4 (штриховые линии). Рис. 4, 5 показывают, что с ростом r_n происходит спрямление поверхности решения. При $r_n > 50 \text{ Ом}$ она уже представляет наклонную плоскость, и устойчивая работа с приемлемыми скоростями вращения $20 \dots 40 \text{ с}^{-1}$ возможна при скоростях ветра до $8 \dots 12 \text{ м/с}$. При сопротивлениях нагрузки $r_n < 2 \text{ Ом}$ ярко выраженный складчатый характер поверхности решения сохраняется.

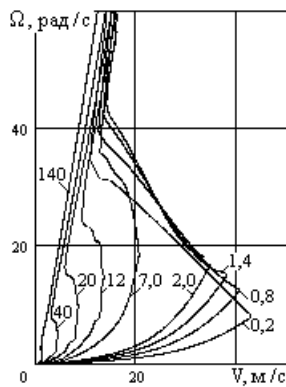


Рис. 5. Сечения поверхности скорости без стабилизации

На рис. 6 изображены расчетные графики режима системы при изменяющихся сопротивлении нагрузки и скорости ветра, полученные численным интегрированием уравнений (3), (8) с обращением к соответствующим функциям $U(r_n, V)$ по выражению (11). Колебания скорости ветра происходят около значения 15 м/с, что соответствует работе системы на верхней области решений. Режим характеризуется значительными изменениями скорости вращения.

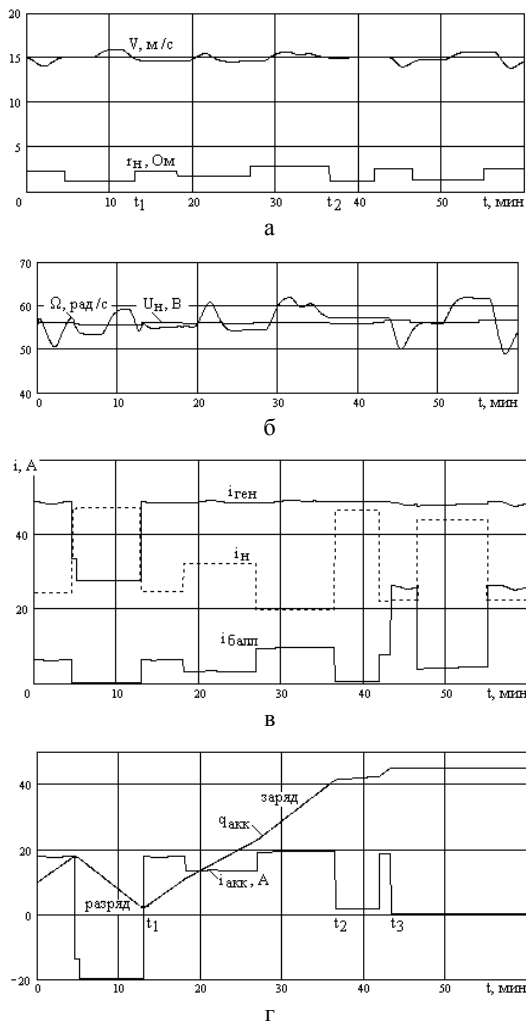


Рис. 6. Стационарный режим системы:

- а) скорость ветра и сопротивление нагрузки;
- б) скорость генератора и напряжение нагрузки;
- в) ток генератора, нагрузки и балластного сопротивления;
- г) ток и заряд аккумулятора.

Колебания напряжения на нагрузке наблюдаются в пределах 1...2 В на уровне $U_0 = 56$ В, т.е. стабилизация напряжения осуществляется. Ток балластного сопротивления увеличивается на интервалах времени, когда увеличивается сопротивление нагрузки. Аккумуляторная батарея на первом провале сопротивления нагрузки разряжается предельным током, что приводит к потере стабилизации напряжения. На интервале t_1-t_2 при сравнительно высоких сопротивлениях нагрузки АБ заряжается, и стабилизация напряжения осуществляется более эффективно. При полном заряде АБ с момента t_3 его стабилизирующее действие прекращается, и колебания напряжения нагрузки становятся более заметными, изменения тока балластного сопротивления – более интенсивными.

На рис. 7 изображены графики режима системы при скачкообразной потере скорости вращения генератора в момент t_1 , когда скорость ветра достигает критического значения (13 м/с). В течение 10 мин после потери скорости за счет разряда АБ поддерживается напряжение нагрузки. При полном разряде АБ система переходит на нижнюю поверхность скорости 2...4 с⁻¹. Для возвращения системы в рабочий режим необходимо отключить АБ, балластное сопротивление и нагрузку, тогда возможно увеличение скорости генератора до 40...60 с⁻¹ (рис. 5).

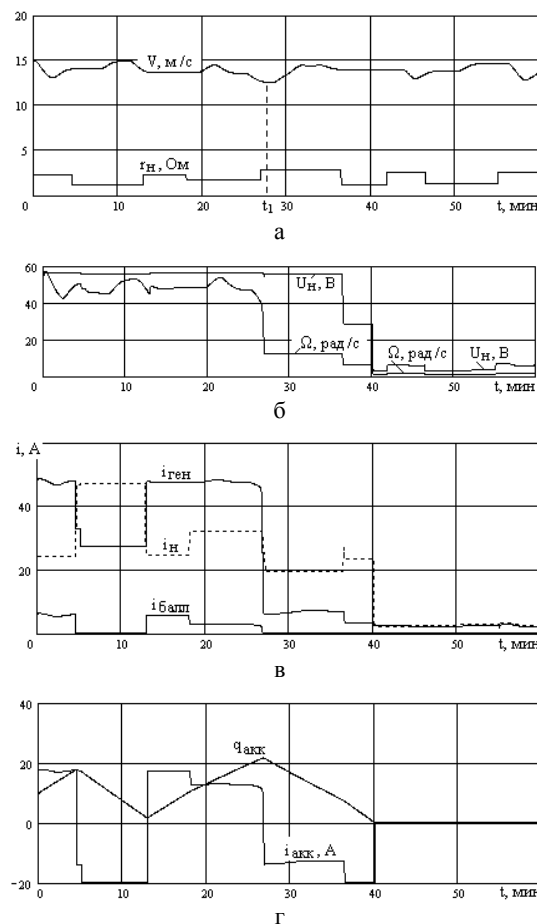


Рис. 7. Потеря скорости и напряжения системы при падении скорости ветра:

- а) скорость ветра и сопротивление нагрузки;
- б) скорость генератора и напряжение нагрузки;
- в) ток генератора, нагрузки и балластного сопротивления;
- г) ток и заряд аккумулятора.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод решения совокупности нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений режима системы автономного электроснабжения позволяет имитировать динамику системы в течение длительного времени в условиях произвольно меняющейся скорости ветра и сопротивления нагрузки. Построенное математическое описание системы в достаточной мере отражает ее поведение.

Типовая система автономного электроснабжения с электрическими средствами стабилизации напряжения устойчиво работает при значительных скоростях ветра. Снижение скорости ветра приводит к скачкообразной потере скорости генератора и выходного напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукутин Б.В. Энергоэффективные системы генерирования электроэнергии для автономных ветроэлектростанций / Б.В. Лукутин, О.Б. Лукутин, Е.Б. Шандарова // Известия Томского политехнического ун-та. Т.308. – 2005. – № 7. – С. 203–206.
2. Андриенко П.Д. Стабилизация частоты вращения турбин генераторов ветроэлектрической установки / П.Д. Андриенко, В.С. Кражан, И.Ю. Немудрый. – Материалы международной н/т конф. "Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах", Севастополь, 2010 г. – Изд-во СевНТУ. – 2010. – С. 97-98.
3. 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.
4. Устойчивость режима автономной ветроэлектрической установки малой мощности / А.М.Олейников [и др.] – Материалы международной н/т конф. "Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах", Севастополь, 2010 г. – Изд-во СевНТУ. – 2010. – С. 102-103.
5. Моделирование динамического режима автономной ветроэлектрической установки малой мощности / А.М.Олейников [и др.] // Праці Інституту електродинаміки НАНУ: зб. наук. праць. – Київ. – 2009. – Вип. 24. – С. 11-18.
6. Моделирование режима ветроэлектрической установки малой мощности / А.М.Олейников [и др.] // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 2. – С. 16-20.
7. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

Bibliography (transliterated): 1. Lukutin B.V. `Energ`o`effektivnyye sistemy generirovaniya `elektro`energii dlya avtonomnyh vetro`elektrostantsij / B.V. Lukutin, O.B. Lukutin, E.B. Shandarova // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo un-ta. T.308. - 2005. - № 7. - S. 203-206. 2. Andrienko P.D. Stabilizaciya chastoty vrascheniya turbin generatorov vetro`elektricheskoy ustanovki / P.D. Andrienko, V.S. Krazhan, I.Yu. Nemudryj. - Materialy mezhdunar n/t. konf. "Problemy povysheniya `effektivnosti` `elektromehaniicheskikh preobrazovatelej v `elektro`energeticheskikh sistemah", Sevastopol', 2010 g. - Izd-vo SevNTU. - 2010. - S. 97-98. 3. Buyal'skij V.I. Povyschenie `effektivnosti upravleniya vetroturbinoy // Vestnik SevGTU. Seriya Mehanika, `energetika, `ekologiya: sb. nauch. tr. - Sevastopol': Izd-vo SevNTU. - 2008. - Vyp. 88. - S. 152-156. 4. Ustojchivost' rezhima avtonomnoj vetro`elektricheskoy ustanovki maloj moschnosti / A.M.Olejnikov [i dr.] - Materialy mezhdunarodnoj n/t konf. "Problemy povysheniya `effektivnosti` `elektromehaniicheskikh preobrazovatelej v `elektro`energeticheskikh sistemah", Sevastopol', 2010 g. - Izd-vo SevNTU. - 2010. - S. 102-103. 5. Modelirovanie dinamiicheskogo rezhima avtonomnoj vetro`elektricheskoy ustanovki maloj moschnosti / A.M.Olejnikov [i dr.] // Praci Institutu elektrodinamiki NANU: zb. nauk. prac'. - Kiiv. - 2009. - Vip. 24. - S. 11-18. 6. Modelirovanie rezhima vetro`elektricheskoy ustanovki maloj moschnosti / A.M.Olejnikov [i dr.] // Elektrotehnika i elektromehaniika. - 2010. - № 2. - S. 16-20. 7. Korn G. Spravochnik po matematike / G Korn, T.Korn. - M.: Nauka, 1968. - 720 s.

Поступила 01.04.2011

Канов Лев Николаевич, к.т.н., доц.

Севастопольский национальный технический университет
кафедра судовых и промышленных
электромеханических систем
99053, Севастополь, ул. Университетская, 33, СевНТУ
тел. (0962) 435–272

Kanov L.N.

Calculation of an autonomous low-power ac supply system state

A calculation technique for dynamic state of an autonomous low-power ac supply system is introduced. The technique is based on preliminary analytical approximation of the solution of a nonlinear algebraic equation and numeral integration of differential equations of the system. The technique is illustrated with an example calculation of the state of a power supply system with a DC link under variable load conditions.

Key words – power supply, alternating current, storage battery, variable load, algebraic and differential equations set.