

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННЫМ ГЕНЕРАТОРОМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

**А.М. Олейников**, докт. техн. наук, **Л.Н. Канов**, канд. техн. наук, **М.С. Мирошниченко**, инж.

Севастопольский нац. техн. ун-т,

ул. Университетская, 33, Севастополь, 99053, Украина

E-mail: A.M.Olejnikov@sevgtu.sebastopol.ua

*Предлагаются математическое описание и методика расчета параметров ветроэлектрической установки с автономным асинхронным генератором со стабилизацией частоты и уровня вырабатываемого напряжения в условиях изменяющейся скорости ветра и сопротивления нагрузки. Методика основана на численном решении нелинейных алгебраических уравнений и иллюстрирована расчетом статических и динамических режимов реальной ветроэлектрической установки. Библиограф. 6, рис. 6.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, момент ветроколеса, асинхронный генератор, мощность стабилизации, угол поворота лопасти, алгебраические уравнения, аппроксимация.

**Введение.** Закон Украины «Об энергосбережении» и «Национальная энергетическая программа» определяют ветроэнергетику как приоритетное направление в комплексе развития нетрадиционных источников энергии. В ветроэлектрических установках (ВЭУ) средней мощности, например, таких, как USW56 – 100, используются асинхронные генераторы, работающие на сеть, а главной задачей регулирования ВЭУ является стабилизация вырабатываемой мощности в условиях изменения скорости ветра [1–3]. Асинхронные генераторы оказываются привлекательными как требующие менее жестких условий включения на работу с сетью, чем синхронные, обладают простой конструкцией и более удобны в эксплуатационном отношении.

Стабилизация частоты вращения обеспечивается механизмом изменения угла установки лопастей ветроколеса. Сложность этого механизма обуславливает определенные трудности использования подобных ВЭУ и препятствует применению асинхронных генераторов в автономных ВЭУ небольшой мощности. Другим затруднением является необходимость стабилизации уровня и частоты напряжения, вырабатываемого автономным асинхронным генератором (ААГ) при изменении нагрузки и скорости ветра.

Одним из возможных путей преодоления этих затруднений является использование асинхронных машин с фазным ротором [6], которые открывают дополнительные возможности регулирования. К описанию особенностей работы подобных машин в генераторном режиме исследователи обращались неоднократно. Общая теория и краткий обзор результатов приведены в [3]. В работе [4] помещен алгоритм итерационного расчета характеристик ААГ с использованием Г-образной схемы замещения. Физическое объяснение процесса самовозбуждения асинхронной машины с позиции теории автоколебательных систем дано в [5], однако в доступных работах не приводится расчет их характеристик. Поэтому исследование режимов работы ААГ с фазным ротором в составе ВЭУ представляется весьма актуальным.

**Цель исследования.** Математическое моделирование режимов асинхронного генератора с фазным ротором в составе автономной ВЭУ при работе на активную нагрузку с целью стабилизации уровня и частоты вырабатываемого напряжения в условиях изменения скорости ветра и нагрузки.

**Математическое описание ВЭУ с ААГ.** Анализ режимов ААГ с фазным ротором под резистивной нагрузкой проведен по Т-образной схеме замещения, изображенной на рис. 1, где обозначены:  $r_n$  – сопротивление нагрузки;  $C$  – емкость – источник реактивной мощности;  $r'_p$  – регулируемое сопротивление в цепи ротора;  $s < 0$  – скольжение. Индуктивность ветви намагничивания  $L_\mu$  зависит от модуля потенциала  $\phi_1$  и аппроксимируется выражением

ем  $L_\mu = L_{\mu 0} e^{-(a \cdot |\Phi_1|)^2}$ , где  $L_{\mu 0}$  и  $a$  – коэффициенты аппроксимации. Проводимость  $g_0$ , эквивалентирующая потери в стали, в меньшей степени зависит от  $\Phi_1$  и в данном случае полагается постоянной.

Режим работы ААГ может быть описан уравнениями электрического равновесия для схемы замещения; например, для узла 1 справедливо уравнение

$$Y_{11}\Phi_1 = I_{y1} = 0, \quad (1)$$

где  $Y_{11} = \frac{1}{r_s + jx_s + Z_H} + \frac{1}{jx_\mu} + g_0 + \frac{1}{\frac{r'_r + r'_p}{s} + jx'_r}$  – собственная проводимость узла 1;

$Z_H = \frac{-jx_c \cdot r_H}{r_H - jx_c}$ ;  $x_s = \omega L_s$ ,  $x_c = \frac{1}{\omega C}$ ,  $x_\mu = \omega L_\mu$ ,  $x'_r = \omega L'_r$  – реактивные сопротивления (здесь  $s$  – статор;  $r$  – ротор;  $n$  – нагрузка;  $\mu$  – ветвь намагничивания);  $L_s, L'_r$  – индуктивности рассеяния статора и ротора;  $s = 1 - \frac{p\Omega}{\omega}$  – скольжение;  $p$  – передаточное отношение;  $\Omega$  – угловая скорость вращения ветроколеса;  $I_{y1}$  – узловой ток.

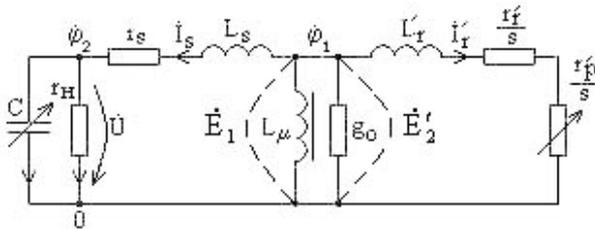


Рис. 1

Однородное уравнение (1) имеет нетривиальное решение только тогда, когда  $Y_{11} = 0$ . Отделяя в  $Y_{11}$  вещественную и мнимую части, получаем два уравнения, определяющие работу ААГ:

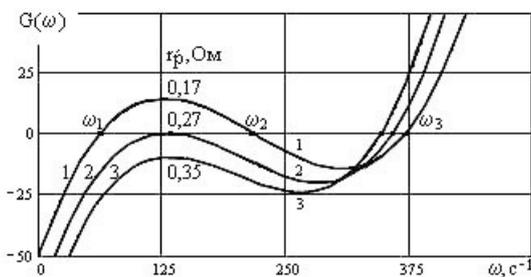
$$\text{Re } Y_{11} = G(\omega) = g_s + g_0 + g_r = 0; \quad (2)$$

$$\text{Im } Y_{11} = B(\omega) = b_s + b_\mu + b_r = 0, \quad (3)$$

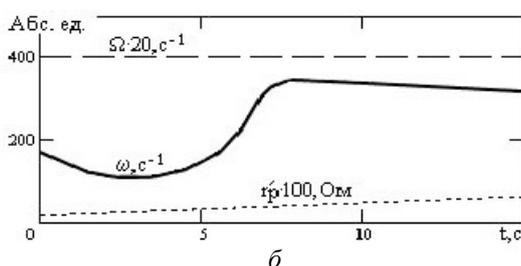
где  $g_s = \frac{r_s + \text{Re } Z_H}{z_s^2}$ ;  $g_r = \frac{r'_r + r'_p}{s \cdot z_r^2}$ ;

$b_s = \frac{x_s + \text{Im } Z_H}{z_s^2}$ ;  $b_r = \frac{x'_r}{z_r^2}$ ;  $b_\mu = \frac{1}{x_\mu}$  – активные и реактивные проводимости ветвей;

$z_s^2 = (r_s + \text{Re } Z_H)^2 + (x_s + \text{Im } Z_H)^2$ ,  $z_r^2 = \left(\frac{r'_r + r'_p}{s}\right)^2 + (x'_r)^2$  – полные сопротивления статорной и роторной цепей.



а



б  
Рис. 2

ной и роторной цепей.

При известных параметрах схемы замещения и заданной угловой скорости  $\Omega$  решение уравнения (2) определяет возможные значения частоты  $\omega = 2\pi f$  генерируемого напряжения ААГ. Уравнение (2) имеет пятый порядок, и его аналитическое решение затруднено. График функции  $G(\omega)$  при различных сопротивлениях  $r'_p$  изображен на рис. 2 а при следующих типичных значениях параметров ААГ небольшой мощности:  $r_s \approx r'_r = 0,09$  Ом;  $r_H = 0,6$  Ом;  $L_s = 4$  мГн;  $L'_r = 3$  мГн;  $g_0 = 9,9 \cdot 10^{-3}$  Ом $^{-1}$ ;  $p = 20$ ;  $C = 380$  мкФ;  $\Omega = 20$  с $^{-1}$ .

Из рис. 2 а следует, что существует несколько возможных значений частоты для выполнения условия (2), а их количество и значения зависят от

параметров Т-образной схемы, величины емкости, сопротивления нагрузки, скорости вращения и регулируемого сопротивления в цепи ротора, и именно этим объясняется нестабильность частоты ААГ даже при небольших изменениях параметров. Характерной особенностью является возможность резкого изменения частоты при небольшом, хотя бы и плавном изменении параметров, когда точки локальных экстремумов графика  $G(\omega)$  являются корнями уравнения (2). Например, при  $r'_p = 0,17 \text{ Ом}$  (кривая 1) возможны три значения частоты:  $\omega_1 = 65 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_2 = 215 \text{ с}^{-1}$ ;  $\omega_3 = 375 \text{ с}^{-1}$ . При увеличении  $r'_p$  до  $0,27 \text{ Ом}$  частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  сливаются к величине  $136 \text{ с}^{-1}$  (линия 2), а при увеличении  $r'_p$  до  $0,35 \text{ Ом}$  остается значение  $\omega_3 = 347 \text{ с}^{-1}$  (линия 3). Поэтому плавное увеличение  $r'_p$  сопровождается скачком частоты от  $136 \text{ с}^{-1}$  до  $347 \text{ с}^{-1}$  при  $r'_p = 0,27 \text{ Ом}$ , рис. 2 б (график сопротивления  $r'_p$  для наглядности показан увеличенным на два порядка). Однако, если перед регулированием  $r'_p$  частота имела значение  $\omega_3 = 375 \text{ с}^{-1}$ , то с ростом  $r'_p$  резких ее скачков не происходит, и она плавно снижается до значения  $347 \text{ с}^{-1}$ . На подобные изменения частоты ААГ указывается и в описании экспериментальных исследований [3].

С другой стороны, при заданной частоте  $\omega$  из уравнения (2) можно получить соотношение для необходимой скорости вращения ротора при определенных заранее заданных остальных параметрах:

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \left( 1 - \frac{(g_s + g_0)(r'_r + r'_p)}{-1 + \sqrt{1 - (2 \cdot (g_s + g_0)x'_p)^2}} \right). \quad (4)$$

Модуль потенциала  $\phi_1$  может быть рассчитан из уравнения (3):

$$|\phi_1|^2 = a^{-2} \cdot \ln(-\omega L_{\mu 0} \cdot (b_s + b_r)). \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует важный вывод о том, что условием самовозбуждения ААГ выступает неравенство  $b_s + b_r < 0$ , на основании которого следует оценивать граничные значения регулируемых параметров, необходимых для начала процесса самовозбуждения.

Напряжение и ток нагрузки определяются из соотношений (рис. 1)

$$U = |I_s| \cdot z_H; \quad I_s = \frac{\phi_1}{r_s + jx_s + Z_H}. \quad (6)$$

Скорость вращения ротора ААГ в составе ВЭУ зависит от скорости ветра, угла установки лопастей ветроколеса и от сопротивления нагрузки. Уравнение равновесия моментов на валу ВЭУ имеет типичный вид:

$$M_{\text{вк}} = J_{\text{вк}} \frac{d\Omega}{dt} + k_{mp} \Omega^2 + M_{\text{эм}}, \quad (7)$$

где  $J_{\text{вк}}$  – момент инерции вращающихся масс.

Для моделирования вращающий момент ветроколеса  $M_{\text{вк}}$  может быть аппроксимирован колоколообразной сплайн-функцией трех переменных  $M_{\text{вк}}(\Omega, \alpha, V)$  [2]; момент трения полагаем зависящим от скорости вращения,  $k_{mp}$  – коэффициент трения. Электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$  ААГ записывается в классическом виде [3]:

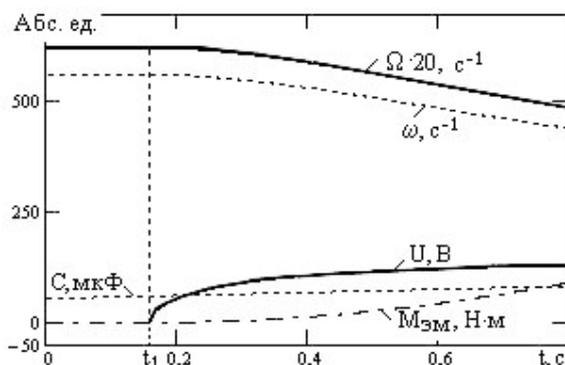


Рис. 3

$$M_{эм} = \frac{-3pU_1^2 \cdot \frac{r'_r + r'_p}{s}}{2\pi f \cdot z_r^2}. \quad (8)$$

Отметим, что математическая модель (4)...(8) записана в допущении преобладания механической инерционности элементов ВЭУ над электрической.

Для иллюстрации на рис. 3 изображен процесс самовозбуждения ААГ при плавном увеличении емкости, рассчитанный решением уравнения (7) с подстановкой  $\Omega$  из (4),  $|\phi_1|^2$  из (5) и  $M_{эм}$  из (8) при  $r_H = 13$  Ом,  $r'_p = 1$  Ом,  $V = 12,5$  м/с,  $\alpha = 30^\circ$ . Самовозбуждение, как видно, наступает при достижении емкостью значения 59,6 мкФ и сопровождается увеличением напряжения и электромагнитного момента и соответствующим падением скорости вращения и частоты.

**Стабилизация частоты и уровня напряжения ААГ.** Покажем возможность выбора регулирующих параметров ВЭУ  $r'_p$ ,  $\alpha$  и  $C$  с тем, чтобы в стационарных условиях стабилизировать частоту  $\omega$  и уровень  $U$  напряжения на нагрузке при различных значениях скорости ветра и сопротивления нагрузки. Для этого, полагая  $\omega$  и  $U$  заданными постоянными величинами и  $\frac{d\Omega}{dt} = 0$ , решаем совместно уравнения (6) и (7) с подстановкой  $|\phi_1|^2$  из (5) и  $\Omega$  из (4) относительно регулирующих параметров  $r'_p$ ,  $\alpha$  и  $C$  на сетке значений  $r_H$ ,  $V$ .

Из выражений (6), (7) следует, что величина напряжения  $U$  не зависит от сопротивления  $r'_p$  и угла  $\alpha$ , поэтому стабилизацию целесообразно осуществлять одновременным изменением двух параметров:  $r'_p$  и  $C$  или  $\alpha$  и  $C$  при фиксированных значениях третьего параметра  $\alpha$  или  $r'_p$  соответственно. Расчеты показали,

что значение стабилизирующей емкости нечувствительно к скорости ветра и изменяется лишь в зависимости от сопротивления нагрузки:  $C = C(r_H)$ . График этой зависимости изображен на рис. 4 а при  $\alpha = 20^\circ$ . Полученные массивы значений  $C$ ,  $r'_p$  и  $\alpha$  аппроксимированы сплайн-функциями переменных  $r_H$  и  $V$ :

$$C = C(r_H); \quad r'_p = r'_p(r_H, V) \quad \text{при } \alpha = 20^\circ;$$

$$\alpha = \alpha(r_H, V) \quad \text{при } r'_p = 0,5 \text{ Ом} \quad (9)$$

на интервалах  $r_H = 15 \dots 250$  Ом и  $V = 8 \dots 20$  м/с при  $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$  и  $U = 220$  В. Графики этих функций изображены на рис. 4 б, в, где четко видно, что  $r'_p$  и  $\alpha$  растут с ростом  $r_H$  и  $V$ .

Для оценки результатов расчетов стабилизации осуществлялось решение уравнения (7) относительно  $\omega(t)$  при сравнительно медленном изменении скорости ветра и различной нагрузке. Скорость вращения  $\Omega(t)$  и напряжение  $U(t)$  подсчитывались по (4) и (6), а вместо  $r'_p$ ,  $\alpha$  и  $C$  подставлялись их значения по аппроксимации (9) относительно текущих величин  $r_H(t)$  и  $V(t)$ . Временные диаграммы режимов со стабилизацией частоты и величины напряжения для двух вариантов регу-

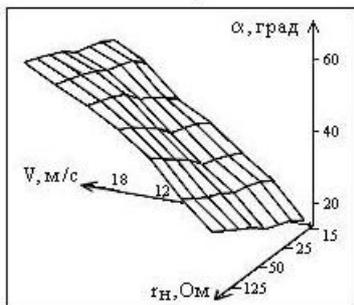
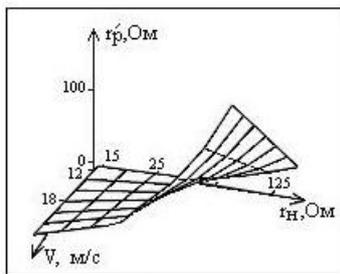
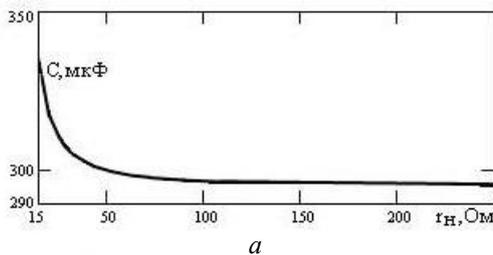


Рис. 4

лирования:  $r'_p$ ,  $C$  и  $\alpha$ ,  $C$  представлены на рис. 5. Как видно, более эффективно стабилизация осуществляется чисто электрическим путем при регулировании  $r'_p$ ,  $C$ , однако этот режим сопровождается колебаниями скорости вращения  $\Omega(t)$ , а регулирование  $\alpha$ ,  $C$  менее эффективно, но зато достигается определенная стабилизация также и скорости вращения.

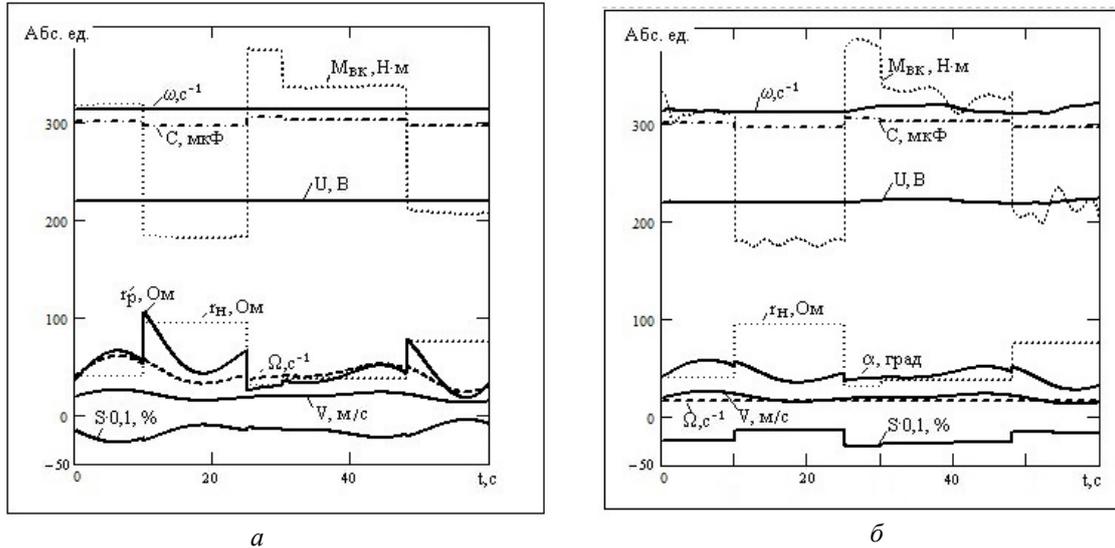


Рис. 5

**Стабилизация режима при использовании инвертора.** Применение регулирующих конденсаторов большой емкости затрудняет стабилизацию режима работы ВЭУ малой мощности. В [6] приводятся сведения о применении вместо емкости в схеме ВЭУ с ААГ автономного инвертора с широтно-импульсной модуляцией, причем частота возбуждения ААГ принудительно задается инвертором. Покажем возможность стабилизации напряжения регулированием тока инвертора.

Схема замещения ААГ для этого случая аналогична изображенной на рис. 1 с заменой емкости источником синусоидального тока  $J = Je^{j\psi}$ , направленного от узла 2 к узлу 0. Начальную фазу источника тока полагаем  $\psi = 90^\circ$ , что характерно при включении емкости; начальную фазу напряжения на нагрузке полагаем нулевой  $U = U$ . Потенциал  $\phi_1$  узла 1 подсчитывается также по уравнению (1), где в выражении для собственной проводимости  $\underline{Y}_{11}$  следует заменить  $\underline{Z}_H$  на  $r_H$ , а узловой ток определяется равенством

$$\dot{I}_{y1} = -\frac{J \cdot r_H}{r_s + r_H + jx_s}.$$

Напряжение на нагрузке равно

$$U = \frac{r_H \cdot (\phi_1 - J \cdot (r_s + jx_s))}{r_s + r_H + jx_s}, \quad (10)$$

из которого получаем более наглядную, чем (1), формулу для  $\phi_1$  через  $U$ :

$$\phi_1 = J \cdot (r_s + jx_s) + U \frac{r_s + r_H + jx_s}{r_H}. \quad (11)$$

Подставив  $|\phi_1|^2$  из (11) в выражение собственной проводимости  $\underline{Y}_{11}$  и приравняв  $\phi_1$  из уравнения (1) к правой части (11), получим выражение для определения скорости  $\Omega$  при заданных  $J$  и  $U$ :

$$\left| J \cdot (r_s + jx_s) + U \frac{r_s + r_H + jx_s}{r_H} \right| = \left| -\frac{J \cdot r_H}{(r_s + r_H + jx_s) \cdot \underline{Y}_{11}(\Omega)} \right|. \quad (12)$$

Подставляя  $\Omega$  из (12) в выражения (7) и (8) и значение  $|\phi_1|^2$  из (11) в (8) и далее подставляя  $M_{эм}$  из (8) в (7), получаем уравнение (7) в виде, пригодном для определения тока инвертора  $J$  при заданных  $U$ ,  $r_H$ ,  $V$ ,  $r'_p$ ,  $\alpha$ ,  $\omega$  и при  $\frac{d\Omega}{dt} = 0$ :

$$M_{вк}(\Omega(J), \alpha, V) = k_{mp} \Omega(J)^2 + M_{эм}(J).$$

Это уравнение также решаем на сетке значений  $r_H$  и  $V$ . Полученный массив значений  $J$  аппроксимируем функцией двух переменных  $J = J(r_H, V)$ . График этой функции изображен на рис. 6 а при  $r'_p = 0,5$  Ом и  $\alpha = 25^\circ$ , а временные диаграммы, иллюстрирующие эффект стабилизации, – на рис. 6 б.

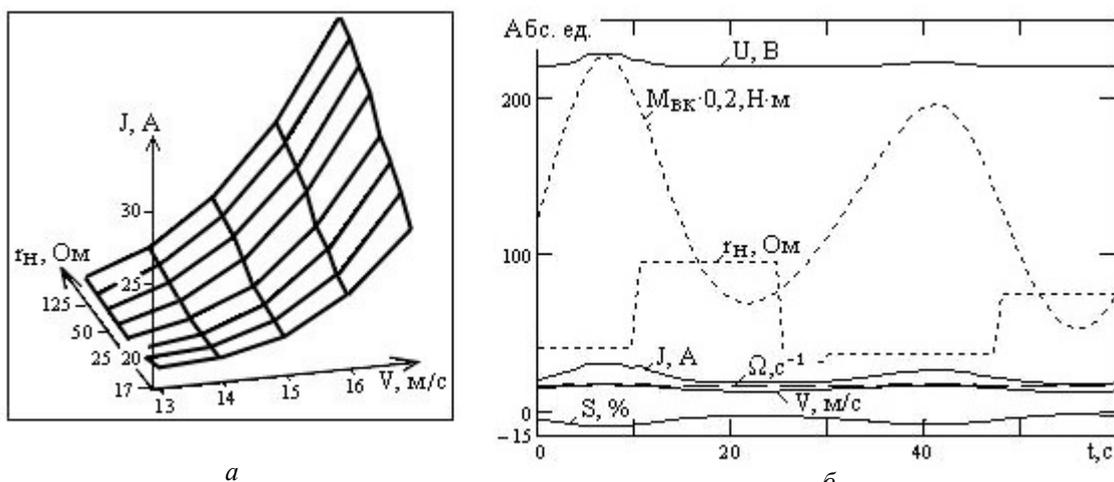


Рис. 6

Диаграммы получены решением для  $\Omega$  из уравнения (1) при подстановке в него  $|\phi_1|^2$  из (7), (8), а также  $J = J(r_H, V)$ . По полученным значениям  $\Omega$  из выражений (7), (8) определяем  $|\phi_1|^2$ , а затем из (10) – напряжение на нагрузке. Рис. 6 б показывает, что стабилизация напряжения осуществляется в достаточном диапазоне изменения сопротивления нагрузки и скорости ветра. Достоинством описанного подхода к стабилизации напряжения являются непосредственная установка частоты напряжения и стабилизация его величины регулированием тока инвертора.

Из изложенного следуют выводы: 1. Предложенное математическое описание ВЭУ, основанное на нетривиальном решении нелинейного алгебраического уравнения для Т-образной схемы замещения ААГ, позволяет определить частоту выходного напряжения и ее зависимость от изменения параметров ВЭУ, при этом показано, что даже плавное изменение этих параметров может сопровождаться скачкообразным изменением частоты в широких пределах.

2. Существует возможность расчета емкости, угла установки лопастей и регулирующего сопротивления в цепи ротора для стабилизации частоты и величины напряжения ААГ при изменении нагрузки и скорости ветра. Для их поддержания неизменными при увеличении сопротивления нагрузки и скорости ветра следует уменьшать емкость и увеличивать регулируемое сопротивление ротора. Это особенно актуально для ВЭУ небольшой мощности, так как позволяет исключить из состава ВЭУ механизм изменения угла установки лопастей.

3. Применяемый для возбуждения ААГ автономный инвертор, включаемый вместо емкости параллельно сопротивлению нагрузки, также может использоваться для стабилизации напряжения на нагрузке при изменении ее величины и скорости ветра.

1. *Алексеевский Д.Г., Андриенко П.Д., Метельский В.П., Немудрый И.Ю.* Анализ режимов работы ветро-электрической установки с аэродинамической мультипликацией // *Электротехника та електроенергетика.* – 2012. – № 1. – С. 69–72.
2. *Канов Л.Н.* Математическое моделирование ветроэлектрической установки с асинхронным генератором // *Электротехника і Електромеханіка.* – 2012. – № 5. – С. 71–74.
3. *Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.* Неисчерпаемая энергия: В 3 кн.; кн. 2. Ветроэнергетика. – Харьков: Харьковский нац. аэрокосм. ун-т (ХПИ). – Севастополь: Севастоп. нац. техн. ун-т, 2004. – 579 с.
4. *Мазуренко Л.І.* Асинхронні генератори з вентильним та вентильно-ємнісним збудженням для автономних енергоустановок: Автореф. дис. ... докт. техн. наук / Ін-т електродинаміки НАН України. – Київ, 2001. – 38 с.
5. *Нетушил А.В.* К расчету режимов самовозбуждения автономного асинхронного генератора // *Электричество.* – 1978. – № 4. – С. 52–54.
6. *Переверзев А.В.* Об использовании крановых асинхронных двигателей в качестве генераторов для автономных ВЭУ // *Электротехника та електроенергетика.* – 2008. – № 1. – С. 20–23.

УДК 621.3.049

**О.М. Олейников**, докт. техн. наук, **Л.М. Канов**, канд. техн. наук, **М.С. Мірошниченко**, інж.

Севастопольський нац. техн. ун-т,

Університетська, 33, Севастополь, 99053, Україна

**Математичне моделювання режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором малої потужності**

*Пропонуються математичний опис і методика розрахунку параметрів вітроелектричної установки з автономним асинхронним генератором зі стабілізацією частоти і рівня напруги, що виробляється, в умовах швидкості вітру і опору навантаження, що змінюються. Методика заснована на чисельному розв'язанні нелінійних алгебраїчних рівнянь й ілюстрована розрахунком статичних і динамічних режимів реальної вітроелектричної установки. Бібл. 6, рис. 6.*

**Ключові слова:** математичне моделювання, момент вітроколеса, асинхронний генератор, потужність стабілізації, кут повороту лопаті, алгебраїчні рівняння, апроксимація.

**O.M. Oleynikov, L.M. Kanov, M. S. Miroshnychenko**

Sevastopol National Technical University, 33,

University st., Sevastopol, 99053, Ukraine

**Mathematical modeling of an autonomous wind - electric plant modes with low power asynchronous generator**

*Mathematical description and method of calculation of parameters of the windelectric setting is offered with an autonomous asynchronous generator with the purpose of stabilizing of frequency and level of the produced tension in the conditions of changing speed of wind and resistance of loading. A method is based on the numeral decision of nonlinear algebraic equalizations and illustrated the calculation of the static and dynamic modes of the windelectric setting. References 6, figures 6.*

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

Надійшла 13.06.2013

Received 13.06.2013