

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

*Побудована модель вітроелектричної установки малої потужності на генераторі з постійними магнітами. Для стабілізації напруги на збірній шині застосовано баластне навантаження і акумуляторну батарею. Виконано моделювання динамічного режиму з випадковим характером швидкості вітру і зміни навантаження.*

*Построена модель ветроэлектрической установки малой мощности на генераторе с постоянными магнитами. Для стабилизации напряжения на сборной шине применена балластная нагрузка и аккумуляторная батарея. Выполнено моделирование динамического режима со случайным характером скорости ветра и изменения нагрузки.*

### ВВЕДЕНИЕ

Ветроэлектрическая установка (ВЭУ) преобразует кинетическую энергию ветра в электрическую энергию. Автономные ВЭУ производят электроэнергию для бытовых и промышленных нужд и в современных условиях представляют альтернативу традиционному электроснабжению [1]. Ведущим элементом ВЭУ является ветроколесо, характеризующееся коэффициентом быстроходности

$$z = \frac{R_{\text{вк}} \cdot \Omega}{V},$$

где  $R_{\text{вк}}$  – радиус ветроколеса;  $\Omega$  – его угловая скорость;  $V$  – скорость ветра. Возможности повышения частоты вращения ветроколеса ограничивают аэродинамические факторы; использование для этой цели редукторов и других механических устройств нецелесообразно с точки зрения возникновения дополнительных потерь энергии и ухудшения массогабаритных показателей. Потому для получения напряжения приемлемой частоты необходимо использовать многополюсные генераторы. Перспективными для этой цели являются генераторы на постоянных магнитах, которые просты по конструкции, надежны, не требуют дополнительного питания со стороны обмотки возбуждения.

Основной особенностью ВЭУ является необходимость работы в условиях изменения скорости ветра, отдельные порывы которого могут существенно превышать его среднюю скорость, а в другие моменты времени скорость может значительно снижаться. Это обстоятельство вынуждает использовать в ВЭУ сложные механические или гидравлические устройства регулирования скорости, а, следовательно – выходного напряжения генератора, что существенно усложняет и удорожает всю конструкцию и малопригодно для автономной ВЭУ небольшой мощности. Здесь предпочтительнее использовать установки с промежуточным звеном постоянного тока и буферным накопителем энергии с последующим преобразованием ее в напряжение и ток промышленной частоты. В [2] для этих целей предлагается использовать гибридные ветро-солнечные установки, которые, однако, по очевидным причинам не способствуют в полной мере преодолению отмеченных затруднений. В [3] рекомендуется на основании сопоставления мощностных характеристик генератора и ветроколеса регулировать генераторы по

цепи возбуждения, что неприемлемо для избранной ВЭУ с генераторами на постоянных магнитах.

Среди различных типов накопителей энергии наиболее привлекательным средством для буферного накопителя энергии в ВЭУ малой мощности представляются аккумуляторы, которые при достаточной скорости ветра подзаряжаются, а при падении скорости ветра и дефиците мощности отдают энергию нагрузке. Для оперативного регулирования потока мощности от генератора к нагрузке целесообразно также применять балластную резистивную нагрузку, воспринимающую излишки мощности при больших скоростях ветра.

Таким образом, в современной литературе достаточно разработаны типовые схемы ВЭУ большой и средней мощности [1, 3], а также режимы работы генератора с электромагнитным возбуждением или возбуждением от постоянных магнитов [4]. В гораздо меньшей степени исследованы нестационарные динамические режимы ВЭУ малой мощности, характеризующиеся случайной скоростью ветра и случайной величиной сопротивления нагрузки при условии стабилизации напряжения по мгновенным значениям скорости ветра и выходного напряжения генератора.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является разработка функциональной схемы ВЭУ малой мощности с генератором на постоянных магнитах, а также моделирование режима ее работы в условиях случайной скорости ветра и случайного характера изменения сопротивления нагрузки.

### ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ВЭУ

Упрощенная функциональная схема предлагаемой ВЭУ малой мощности на генераторе с постоянными магнитами изображена на рис. 1. Схема работает следующим образом. Фазное напряжение с генератора ГПМ с номинальной мощностью 1,5 кВт подается на мостовой неуправляемый выпрямитель  $B$  и через демпфирующий фильтр  $\Phi$  поступает на сборную шину 56 В. Сюда же подсоединяется балластная резистивная нагрузка  $БН$  и аккумуляторная батарея  $АБ$  через контроллер заряда – разряда  $КАБ$ . Со сборной шины напряжение поступает на инвертор  $И$ , с выхода которого на нагрузку снимается напряжение 220 В промышленной частоты.

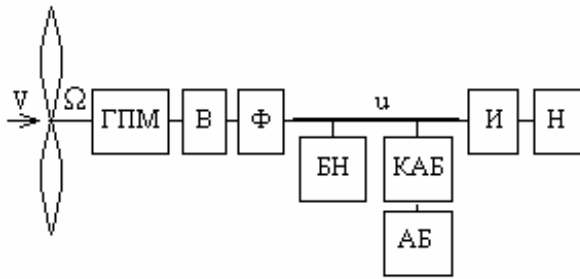


Рис. 1. Функциональная схема ВЭУ

При избытке мощности генератора, что выражается в увеличении напряжения вследствие увеличения скорости ветра, проводимость балластной нагрузки увеличивается, что приводит к оттоку излишней мощности. Кроме того, в этих условиях имеется возможность подзаряда аккумуляторной батареи; ее контроллер обеспечивает ограничение зарядного тока и полное его прекращение при максимальном заряде. Вследствие этого напряжение на сборной шине возрастает незначительно. Аналогичная работа происходит и при снижении мощности, потребляемой нагрузкой. При полной потере мощности нагрузки и полностью заряженной аккумуляторной батарее ветроколесо выводится от ветра или тормозится. Таким образом, в предлагаемой системе не предусматривается прямого регулирования скорости ветроколеса; это происходит опосредованно путем регулирования нагрузки генератора.

Дефицит мощности возникает при кратковременном снижении скорости ветра или набросе нагрузки на инвертор. При дефиците мощности на сборной шине проводимость балластной нагрузки снижается до нуля, а разряжающаяся аккумуляторная батарея поддерживает напряжение на неизменном уровне. Контроллер ограничивает разрядный ток батареи и прекращает его при максимально допустимом ее разряде. Изменение проводимости балластной нагрузки обеспечивается подключением к сборной шине низкоомных резисторов через устройство широтно-импульсной модуляции с частотой 4-6 кГц.

#### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Математическое описание режимов работы генератора с постоянными магнитами при условии синусоидальности кривой выходного напряжения и ненасыщенности магнитной цепи выполняется в ортогональных  $d, q$  – координатах с опережающим вращением продольной оси. В подобных генераторах нет специальных демпфирующих обмоток на роторе; их роль играют массивные части ротора или алюминиевая заливка. Согласно результатам исследования [4] демпфирующие токи сравнительно мало влияют на режим такого генератора, поэтому далее в математической модели они будут опущены. Кроме того, изменение магнитного потока вследствие частичного размагничивания существенно проявляется лишь при токах, близких к короткому замыканию. Поэтому далее полагаем, что магнитный поток магнитов остается постоянным. Отметим, что подобное же допущение принято разработчиками модели машины с постоянными магнитами в пакете имитационного моделиро-

вания MATLAB Simulink.

Таким образом, уравнения по продольной и поперечной составляющим токов и напряжений генератора имеют вид [4]:

$$\left. \begin{aligned} 1,5r_i d + 1,5L_d \frac{di_d}{dt} + 1,5L_q i_q \Omega p + u_d &= 0; \\ 1,5r_i q + 1,5L_q \frac{di_q}{dt} - 1,5L_d i_d \Omega p - 1,5\Psi \Omega p + u_q &= 0 \end{aligned} \right\},$$

где  $u_d, i_d, u_q, i_q$  – продольные и поперечные составляющие фазных напряжений и токов на выходе генератора;  $L_d, L_q$  – индуктивности фазной обмотки статора генератора вдоль соответствующих осей;  $p$  – число пар полюсов;  $r$  – активное сопротивление фазы обмотки статора;  $\Psi$  – потокосцепление магнитов вдоль продольной оси генератора.

Пренебрегая электрической инерционностью обмоток генератора по сравнению с его механической инерционностью и полагая обобщенное сопротивление нагрузки  $R_H$  по преимуществу резистивным, последние уравнения получаем в виде

$$\left. \begin{aligned} 1,5r_i d + 1,5L_q i_q \Omega p + \frac{1}{\sqrt{3}} R_H i_d &= 0; \\ 1,5r_i q - 1,5L_d i_d \Omega p - 1,5\Psi \Omega p + \frac{1}{\sqrt{3}} R_H i_q &= 0 \end{aligned} \right\},$$

откуда

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

$$i_d = - \frac{1,5\Omega p L_q i_q}{1,5r + \frac{1}{\sqrt{3}} R_H}. \quad (1)$$

Уравнение динамики механической части ВЭУ имеет вид уравнения равновесия моментов

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{mp} \Omega + M_{ген} = M_{вк}, \quad (2)$$

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

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

где  $D$  – диаметр ветроколеса;  $\rho$  – плотность воздуха;  $M(z)$  – относительный момент ветроколеса, зависящий от коэффициента быстроходности.

Типовой график относительного момента для трехлопастного ветроколеса, изображен на рис. 2 сплошной линией. Для целей моделирования этот момент аппроксимируется нелинейной зависимостью;

$$M(z) = k_1 e^{-k_2(z-z_0)^2} + k_3 e^{-k_4 z} + k_5 \sin z - k_6 z^5, \quad (4)$$

где  $k_1 - k_6$  – коэффициенты аппроксимации.

На рис. 2 аппроксимированная зависимость (4) показана штриховой линией при значениях параметров:  $k_1 = 0,09$ ;  $k_2 = 0,35$ ;  $k_3 = 0,006$ ;  $k_4 = 0,03$ ;  $k_5 = 0,009$ ;

$k_6 = 3 \cdot 10^{-7}$ . Как следует из рис. 2, аппроксимация в достаточной степени отражает исходную кривую, особенно с учетом того, что сама исходная кривая  $M(z)$  обычно представляется в весьма усредненном виде [1].

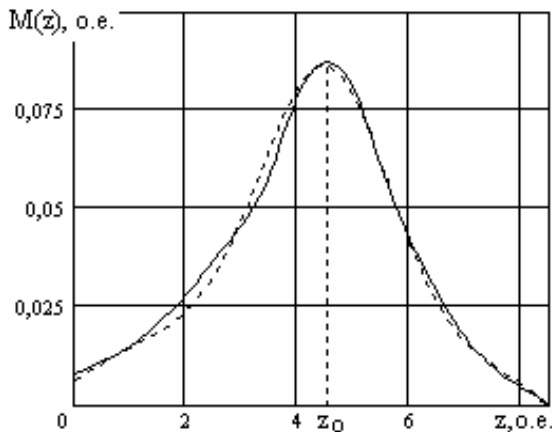


Рис. 2. Типовой график относительного момента

График зависимости сопротивления балластной резистивной нагрузки  $r_{\text{бн}}$  от напряжения  $u$  на сборной шине изображен на рис. 3, на котором  $U_0$  обозначено заданное напряжение  $U_0 = 56 \text{ В}$ . При напряжении, большем  $U_0$ , сопротивление  $r_{\text{бн}}$  уменьшается, и балластная нагрузка принимает избыток мощности, что стабилизирует напряжение на сборной шине. При дефиците мощности, когда напряжение меньше  $U_0$ , сопротивление балластной нагрузки увеличивается. Приведенная на рис. 3 зависимость  $r_{\text{бн}} = f(u)$  при  $u > U_0$  аппроксимируется выражением:

$$r_{\text{бн}} = \frac{2}{u - U_0 + 0,002}, \quad (5)$$

где  $u$  – текущее значение напряжения на сборной шине.

Возможна также кусочно-линейная аппроксимация соотношения (5). При реализации системы закон высокочастотной широтно-импульсной модуляции конструируется таким образом, чтобы обеспечить среднее значение сопротивления в соответствии с кривой (5).

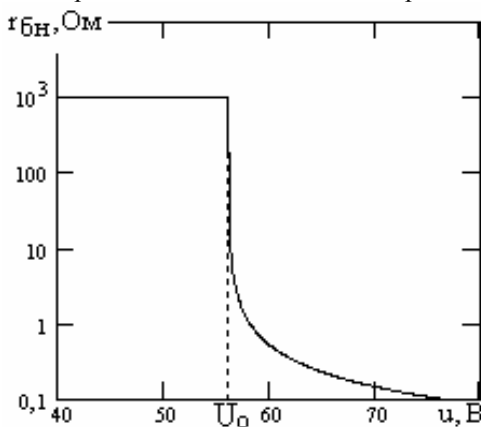


Рис. 3. Сопротивление балластной нагрузки

Идеализированная вольт-амперная характеристика (ВАХ) аккумуляторной батареи  $I = f(u)$  изображена на рис. 4 штриховой линией. Почти вертикальный участок этой кривой при  $I > 0$  соответствует режиму зарядки, а при  $I < 0$  – режиму разрядки. Горизонтальные участки являются нерабочими (и недопустимы); кон-

троллер аккумуляторной батареи исключает выход на эти участки, ограничивая токи заряда и разряда почти вертикальной частью характеристики.

Проводимость батареи  $g_{\text{аб}} = f(u)$  (рис. 4, сплошная линия), соответствующая данной ВАХ, аппроксимируется выражением

$$g_{\text{аб}}(u) = \left. \begin{aligned} & \frac{b_1}{u} - \frac{b_1}{U_0} e^{-b_2(u-U_0)}; u > U_0; \\ & -\frac{b_1}{u} + \frac{b_1}{U_0} e^{b_2(u-U_0)}; u < U_0 \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где  $b_1, b_2$  – коэффициенты аппроксимации.

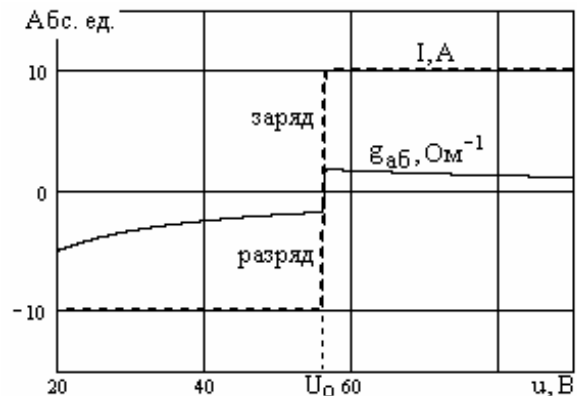


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика аккумуляторной батареи

Первые слагаемые в этих выражениях отражают горизонтальные участки ВАХ, а экспоненциальные – обеспечивают плавный переход между этими участками по почти вертикальной линии, соответствующей режимам заряда – разряда батареи. Коэффициент  $b_1 = 20$  определяет предельный ток батареи, коэффициент  $b_2 = 10$  – определяет степень сглаживания углов характеристики и уровень наклона от вертикали рабочего участка заряда – разряда батареи (подбирается опытным путем). Таким образом, обобщенное сопротивление нагрузки имеет вид:

$$R_{\text{н}} = R_{\text{н}}(t, u) = \left( \frac{1}{r_{\text{н}}(t)} + \frac{1}{r_{\text{бн}}(u)} + g_{\text{аб}}(u) \right)^{-1}, \quad (7)$$

где  $r_{\text{н}}(t)$  – сопротивление полезной нагрузки (входное сопротивление инвертора).

Упрощенное математическое описание узла "выпрямитель – фильтр" определяется уравнением:

$$T_{\text{в}} \frac{du}{dt} + u = R_{\text{н}} I_{\text{н}}, \quad (8)$$

где  $u$  – напряжение на сборной шине;  $T_{\text{в}}$  – постоянная времени фильтра;  $I_{\text{н}} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ .

Заряд  $q$  (количество электричества) аккумуляторной батареи зависит от ее тока и описывается уравнением:

$$T_{\text{аб}} \frac{dq}{dt} = u \cdot g_{\text{аб}}(u), \quad (9)$$

где  $T_{\text{аб}}$  – постоянная, характеризующая емкость батареи, и следовательно, скорость ее заряда и разряда.

Правая часть уравнения (9) – ток батареи, ограничиваемый сверху и снизу при разряде и заряде и равный нулю, когда батарея разряжена и  $u < U_0$ , а

также когда батарея полностью заряжена и  $u > U_0$ .

Таким образом, уравнения (1) – (7) описывают механическую динамику ВЭУ; уравнение (8) вместе с (1), (5) – (7) описывает напряжение  $u$  на сборной шине; уравнение (9) вместе с (6) характеризует текущий заряд батареи.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 5 представлены графики стационарного режима ВЭУ на интервале длительностью 70 с при случайной скорости ветра  $V(t)$  и случайном характере изменения переменного сопротивления нагрузки  $r_n(t)$ . Расчет выполнен по вышеизложенной математической модели со следующими численными значениями параметров, характерными для ВЭУ малой мощности с генератором на постоянных магнитах: индуктивности и сопротивление фазы генератора  $L_d = 0,0032$  Гн;  $L_q = 0,0027$  Гн;  $r = 0,3$  Ом; число пар полюсов  $p = 12$ ; магнитное потокоцепление постоянных магнитов на полюс  $\Psi = 0,165$  Вб; коэффициент трения  $k_{тр} = 0,01$ ; диаметр ветроколеса  $D = 4$  м; момент инерции вращающихся масс  $J = 11,1$  кг·м<sup>2</sup>; постоянные времени:  $T_b = 1,1$  с;  $T_{аб} = 20$  с.

На рис. 5,а изображены зависимости основных параметров режима от времени, на рис. 5,б – мощности. Для наглядности график скорости ветра показан увеличенным в 5 раз, а график сопротивления нагрузки  $r_n(t)$  – увеличенным в 10 раз. Графики показывают,

что ВЭУ в целом успешно справляется с задачей поддержания напряжения  $u$  на сборной шине на уровне 56 В. Небольшие отклонения напряжения заметны лишь при значительных перепадах сопротивления нагрузки и скорости ветра. Так, провал напряжения на сборной шине произошел в интервале от 12,3 с до 14 с вследствие неблагоприятного сочетания снижения скорости ветра и сопротивления нагрузки, что привело к быстрому разряду аккумуляторной батареи.

Графики показывают, что изменение скорости ветра сопровождается бросками момента ветроколеса, которые объясняются инерционностью вращающихся масс ВЭУ и требуют повышенного внимания к проектированию ее механической части. В интервалах постоянства скорости ветра момент ветроколеса незначительно превышает момент генератора из-за наличия момента трения. Скорость генератора отслеживает изменение скорости ветра с запаздыванием, объясняемым моментом инерции вращающихся масс и мало зависит от задаваемых значений сопротивления нагрузки. Ток генератора испытывает значительные колебания, объясняемые как изменением сопротивлений  $r_n(t)$  и  $r_{бн}(t)$ , так и током аккумуляторной батареи  $i_{аб}$  (на рисунке зарядный ток принят положительным, а разрядный – отрицательным). Заряд батареи в целом поддерживается на достаточном уровне, кроме отмеченного случая провала напряжения на нагрузке, и на интервале от 14 с до 23 с из-за низкого сопротивления нагрузки.

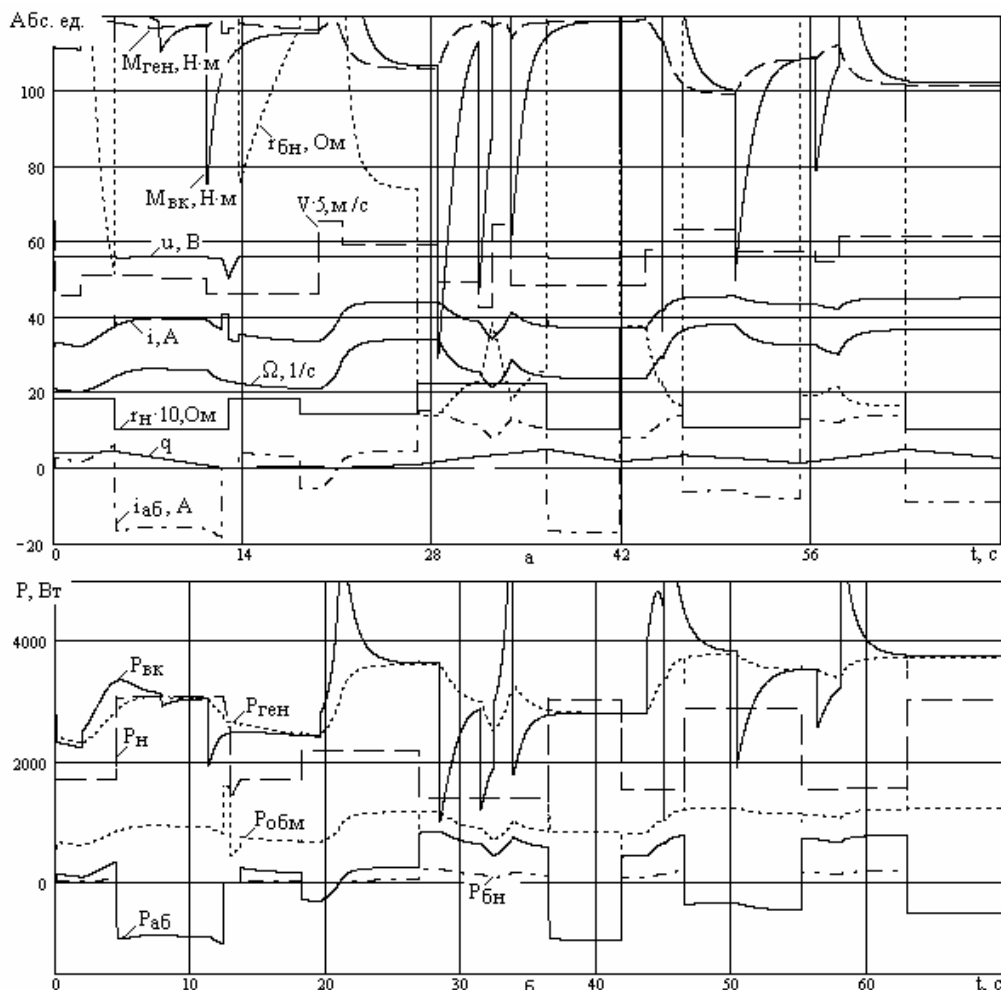


Рис. 5. Стационарный режим ВЭУ

Мощность ветроколеса  $P_{\text{вк}} = \Omega \cdot M_{\text{вк}}$  (рис. 5,б) имеет резкие колебания в соответствии с изменением скорости ветра. Мощность генератора складывается из мощности нагрузки, мощности балластного сопротивления, мощности аккумуляторной батареи и мощности нагрева обмоток генератора. В силу инерционности системы мощность генератора  $P_{\text{ген}} = \Omega \cdot M_{\text{ген}}$  изменяется плавно и колеблется в пределах от 2,5 кВт до 3,7 кВт. Так как напряжение на сборной шине практически постоянно, график мощности нагрузки  $P_{\text{н}} = u^2 / r_{\text{н}}(t)$  практически точно повторяет график изменения сопротивления нагрузки. Мощность аккумуляторной батареи  $P_{\text{аб}} = u^2 \cdot g_{\text{аб}}$  во время заряда положительна, а во время разряда – "отрицательна" и подпитывает нагрузку при дефиците мощности генератора. На предельный разрядный ток 20 А батарея выходит только в момент  $t = 13$  с. В это время мощность ее составляет 1,3 кВт. На рис. 5,б изображены также графики мощности балластной нагрузки  $P_{\text{бл}} = u^2 / r_{\text{бл}}(t)$  и потерь в обмотках генератора  $P_{\text{обм}} = r \cdot u^2 / R_{\text{н}}$ .

### ВЫВОДЫ

Предложенная функциональная схема ВЭУ малой мощности с постоянными магнитами обеспечивает заданный уровень напряжения на сборной шине при значительных колебаниях скорости ветра и сопротивления нагрузки, а ее математическая модель достаточно адекватно описывает стационарные и переходные режимы ВЭУ. Отсутствие трансформатора и редуктора улучшает массогабаритные показатели системы, а применение буферной аккумуляторной батареи достаточной емкости, постоянно подключенной к нагрузке, обеспечивает более стабильное напряжение ВЭУ в условиях случайных колебаний скорости ветра и мощности нагрузки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. 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.
2. Дзензерский В.А. Принципы построения гибридных ветро-солнечных энергоустановок / В.А. Дзензерский, Н.Е. Житник, С.В. Плаксин, Л.М. Погорелая и др. // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 67-72.
3. 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.
4. Олейников А.М. Исследование режимов маломощного генератора с постоянными магнитами методом схемного моделирования / А.М. Олейников, Л.Н. Канов // Вестник СевГУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2007. – Вып. 80. – С. 29-34.

Поступила 30.09.2009

*Олейников Александр Михайлович*, д.т.н., проф.,  
*Матвеев Юрий Валентинович*, к.т.н., доц.,  
*Канов Лев Николаевич*, к.т.н., доц.

Севастопольский национальный технический университет,  
кафедра судовых и промышленных электромеханических систем

Украина, 99053, Севастополь, ул. Университетская, 33  
тел. (0692) 435272, e-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

*A.M. Oleynikov, Yu.V. Matveev, L.N. Kanov*

#### **Modeling of a low-power wind plant mode.**

A model of a low-power wind plant is built on a permanent magnet generator. For voltage stabilization on the busbar, a ballast and a storage battery are applied. Modeling of dynamic mode is executed for random wind speed and load variations.

**Key words – model, wind plant, permanent magnet generator, ballast, storage battery, dynamic mode modeling.**