

## II. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.3.049

А. М. Олейников д-р техн. наук<sup>1</sup>, Л. Н. Канов канд. техн. наук<sup>1</sup>,  
Ю. В. Матвеев канд. техн. наук<sup>1</sup>, Е. И. Зарицкая<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Севастопольский национальный технический университет

<sup>2</sup>Одесский национальный морской университет

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЙ БЕЗРЕДУКТОРНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ГЕНЕРАТОРЕ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

*Построена математическая 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.*

**Ключевые слова:** ветрогенератор, асинхронный генератор, ветроколесо, генератор с постоянными магнитами.

#### Введение

Автономные ветроэлектрические установки (ВЕУ) производят электроэнергию для бытовых и промышленных нужд и в современных условиях представляют альтернативу традиционному электроснабжению [1]. Ведущим элементом ВЭУ является ветроколесо, возможности повышения частоты вращения которого ограничивают аэродинамические факторы. Использование для этой цели редукторов и других механических устройств нецелесообразно с точки зрения возникновения дополнительных потерь энергии и ухудшения массогабаритных показателей. Поэтому для получения напряжения приемлемой частоты необходимо использовать тихоходные 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 малой 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 предлага-

ется 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 заряжаются, 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 без механической стабилизации скорости вращения ветроколеса, характеризующиеся случайной скоростью ветра и случайной величиной сопротивления нагрузки при условии стабилизации напряжения на нагрузке по мгновенным значениям скорости ветра и выходного напряжения генератора.

Целью статьи является разработка математического описания схемы ВЭУ малой мощности с генератором на постоянных магнитах, а также моделирование

© А. М. Олейников, Л. Н. Канов, Ю. В. Матвеев, Е. И. Зарицкая 2010 р.

режима ее работы в условиях случайной скорости ветра и случайного характера изменения сопротивления нагрузки.

### Описание работы ВЭУ

ВЭУ малой мощности на генераторе с постоянными магнитами работает следующим образом. Фазное напряжение с генератора с номинальной мощностью 1,5 кВт подается на мостовой неуправляемый выпрямитель и через демпфирующий фильтр поступает на сборную шину 56 В. К этой же шине подсоединяется балластная резистивная нагрузка и аккумуляторная батарея через контроллер заряда – разряда. Со сборной шины напряжение поступает на инвертор, с выхода которого на нагрузку снимается напряжение 220 В промышленной частоты.

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], демпфи-

рующие 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 моделирования MATLAB Simulink.

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

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

где  $u_d, i_d, u_q, i_q$  – продольные и поперечные составляющие фазных напряжений и токов на выходе генератора;  $L_d, L_q$  – индуктивность 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  $R_n$  резистивным, из последних уравнений получаем выражения для составляющих выходного тока генератора

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

$$i_d = - \frac{1,5 \Omega p L_q i_q}{1,5r + \frac{1}{\sqrt{3}} R_n}. \tag{1}$$

Уравнение динамики механической части ВЭУ имеет вид уравнения равновесия моментов

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{mp} \Omega + M_{зен} = M_{вк}, \tag{2}$$

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

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

где  $D$  – диаметр ветроколеса;  $\rho$  – плотность воздуха;  $M(z)$  – относительный момент ветроколеса, зависящий от коэффициента быстроходности  $z = \frac{R_{\text{вк}} \Omega}{V}$ , где  $R_{\text{вк}}$  – радиус ветроколеса.

Типовой график относительного момента для трехлопастного ветроколеса изображен на рис. 1 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. 1 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. 1, аппроксимация в достаточной степени отражает исходную кривую, особенно с учетом того, что сама исходная кривая  $M(z)$  обычно представляется в весьма усредненном виде [1].

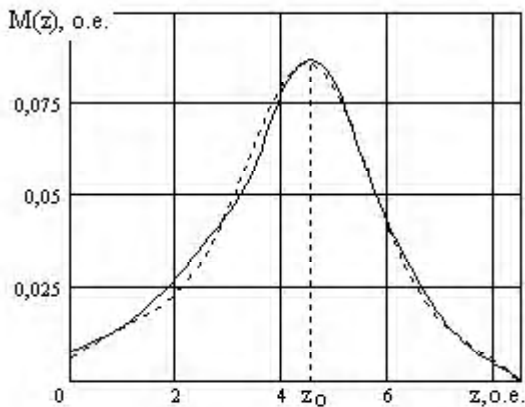


Рис. 1. Типовой график относительного момента (сплошная линия) и его аппроксимация (штриховая линия)

Зависимость сопротивления балластной резистивной нагрузки  $r_{\text{бн}} = f(u)$  от напряжения  $u$  на сборной шине при  $u > U_0$  представляется выражением

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

в котором через  $U_0$  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 и ограничивается сверху значением 1...2 кОм. При реализации системы закон высокочастотной широтно-импульсной модуляции конструиру-

ется таким образом, чтобы обеспечить среднее значение сопротивления в соответствии с выражением (5).

Идеализированная вольтамперная характеристика (ВАХ) аккумуляторной батареи изображена на рис. 2 штриховой линией. Рабочим является почти вертикальный участок этой кривой, при  $I > 0$  соответствующий режиму зарядки, а при  $I < 0$  – режиму разрядки. Горизонтальные участки являются нерабочими (и недопустимы); контроллер аккумуляторной батареи исключает выход на эти участки, ограничивая токи заряда и разряда почти вертикальной частью характеристики. Проводимость батареи  $g_{\text{аб}} = f(u)$  (рис. 2, сплошная линия), соответствующая данной ВАХ, аппроксимируется выражением

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

где  $b_1, b_2$  – коэффициенты аппроксимации. Первые слагаемые в этих выражениях отражают горизонтальные

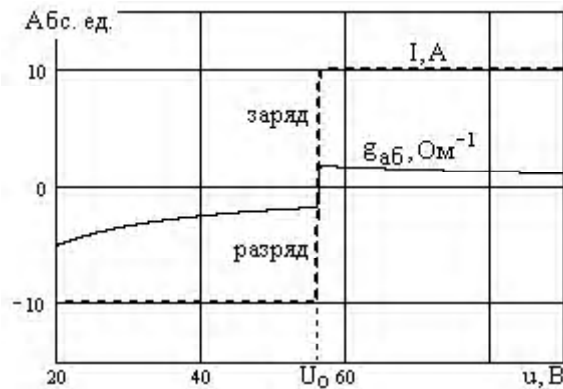


Рис. 2. Вольтамперная характеристика и проводимость аккумуляторной батареи

участки ВАХ, а экспоненциальные обеспечивают плавный переход между этими участками по почти вертикальной линии, соответствующей режимам заряда – разряда батареи. Коэффициент  $b_1$  определяет предельный ток батареи (для определенности принято  $b_1 = 20$ ); 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, подсоединенной к сборной шине, имеет вид

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

где  $r_n(t)$  – сопротивление полезной нагрузки (входное сопротивление инвертора).



Рис.3. Графики стационарного режима ВЭУ:  
 а) скорость ветра и сопротивление нагрузки; б) моменты ветроколеса и генератора;  
 в) напряжение нагрузки и скорость генератора; г) мощность нагрузки

Упрощенное математическое описание узла «выпрямитель – фильтр» определяется уравнением

$$T_{\phi} \frac{du}{dt} + u = R_n I_n, \tag{8}$$

где  $u$  – напряжение на сборной шине;  $T_{\phi}$  – постоянная времени фильтра;  $I_n = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ . Заряд  $q$  (количество электричества) аккумуляторной батареи зависит от ее тока и описывается уравнением

$$T_{a\phi} \frac{dq}{dt} = u \cdot g_{a\phi}(u), \tag{9}$$

где  $T_{a\phi}$  – 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, уравнение (2) вместе с (1), (3), (4), (7), (5) и (6) описывает механическую динамику ВЭУ; уравнение (8) вместе с (1), (7), (5), (6) описывает напряжение  $u$  на сборной шине; уравнение (9) вместе с (6) характеризует текущий заряд батареи.

### Результаты исследования

На рис. 3–рис. 4 представлены графики стационарного режима ВЭУ на интервале длительностью 70 с при случайной скорости ветра  $V(t)$  и случайном характере изменения переменного сопротивления нагрузки  $r_n(t)$ .

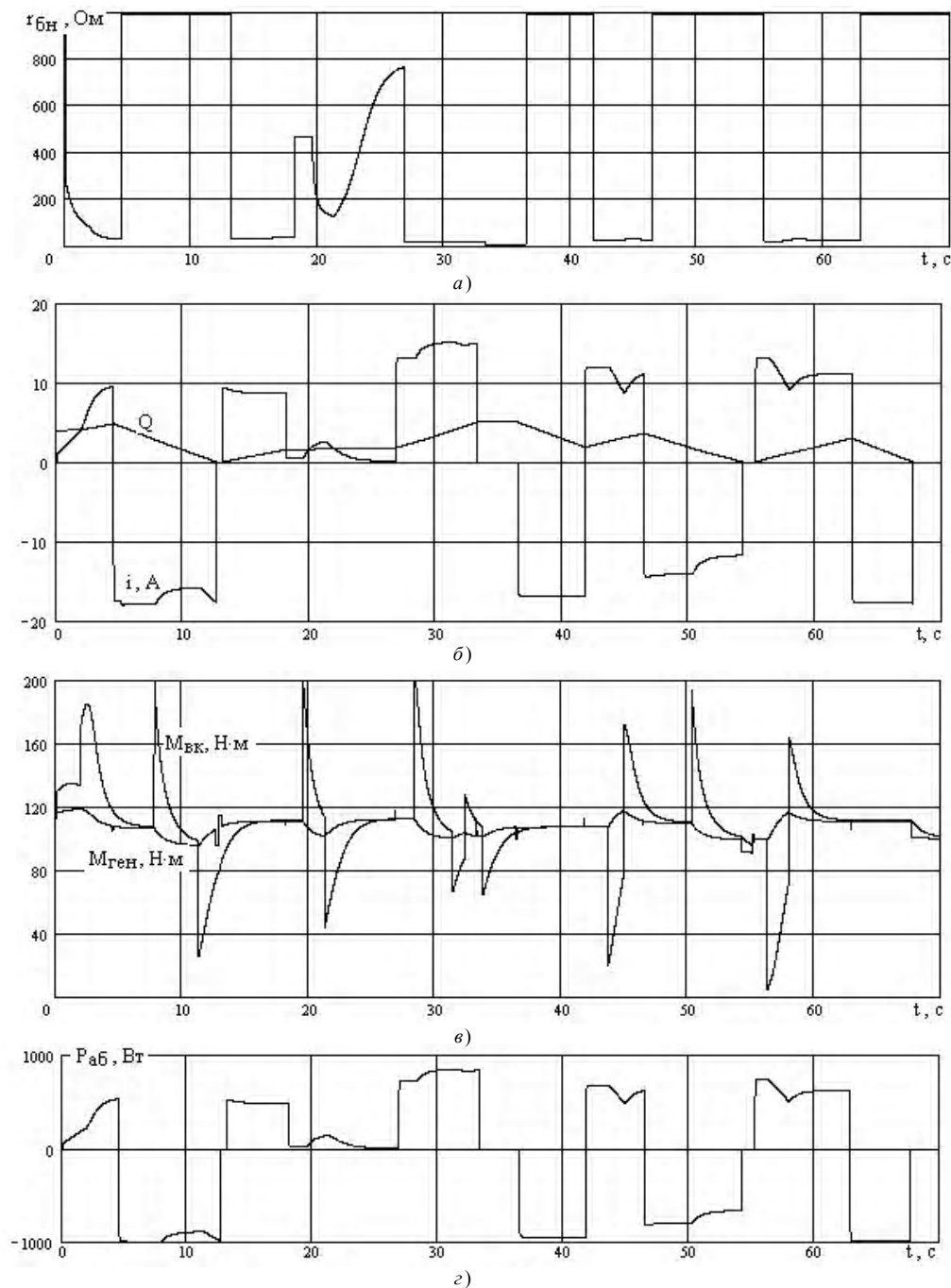


Рис.4. Графики стационарного режима ВЭУ:  
 а) сопротивление балластной нагрузки; б) ток и заряд батареи;  
 в) мощность генератора и ветроколеса; г) мощность батареи

Расчет выполнен по вышеизложенной математической модели в среде MathCad со следующими численными значениями параметров, характерными для ВЭУ малой мощности с генератором на постоянных магнитах: индуктивность 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  $k_{mp} = 0,01$ ; диаметр ветроколеса  $D = 4$  м; момент инерции вращающихся масс  $J = 11,1$  кг·м<sup>2</sup>; по-

стоянные времени:  $T_e = 1,1$  с ;  $T_{аб} = 20$  с.

Как видно из графиков, 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.

Ясно видно также, 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  $r_{он}(t)$ , 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.

Мощность ветроколеса  $P_{вк} = \Omega M_{вк}$  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  $P_{ген} = \Omega M_{ген}$  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  $P_n = \frac{u^2}{r_n(t)}$  повторяет изменения сопротивления нагрузки. Мощность аккумуляторной батареи  $P_{аб} = u^2 g_{аб}$  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.

## Выводы

Предложенная разработка 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 подсоединенной к нагрузке, обеспечивает более стабильное напряжение ВЭУ в условиях случайных колебаний скорости ветра и мощности нагрузки.

Ближайшей задачей в направлении исследований является создание действующего макета разработанной ВЭУ и испытание ее с целью проверки достоверности разработанной математической модели.

## 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 мало-мощного генератора с постоянными магнитами методом схемного моделирования / А. М. Олейников, Л. Н. Канов // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2007. – Вып. 80. – С. 29–34.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2010 р.

Олейников О. М., Канов Л. Н., Матвеев Ю. В., Зарицька О. И. Математична модель автономної безредукторної вітроелектричної установки на генераторі з постійними магнітами.

Побудовано 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.

**Ключові слова:** вітрогенератор, асинхронний генератор, ветроколесо, генератор з постійними магнітами.

Oleynikov A., Kanov L., Matveev Y., Zarickaya E. Mathematical model of self-contained direct-drive wind-driven electric plant based on permanent magnet generator.

The model of a low-power wind-driven electric plant based on a permanent magnet generator has been developed. To stabilize collecting bus voltage, a ballast load and a storage battery are used. Dynamic conditions with random nature of wind speed and load change are modeled.

**Key words:** wind-generator, asynchronous generator, windwheel, permanent magnet generator.