

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА АВТОНОМНОЙ
ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Побудовано модель вітроелектроенергетичної 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.

Введение. Закон Украины «Об энергосбережении» и «Национальная энергетическая программа» определяют ветроэнергетику как приоритетное направление в комплексе развития НИЭ. Это особенно актуально для потребителей удаленных районов, где есть проблемы со стационарным электроснабжением, и в качестве альтернативных источников электрической энергии могут выступить автономные ветроэлектрические установки (АВЭУ) [3].

Отличительной особенностью эксплуатации любой ВЭУ является ее работа в условиях постоянно изменяющейся скорости ветра, отдельные порывы которого могут существенно превышать или быть значительно меньше значения средней скорости, при этом частота вращения ветроколеса ВЭУ мощностью менее 5 кВт при скоростях ветра более $6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$, как правило, не превышает $300 \text{ об}\cdot\text{мин}^{-1}$ [1].

Одной из важных характеристик ветроколеса является быстроходность, определяемая соотношением $z = \frac{R_{BK}\Omega}{V}$, где R_{BK} – радиус ветроколеса; Ω – его угловая скорость; V – скорость ветра.

Быстроходность зависит от типа ветроколеса, его аэродинамических характеристик и количества лопастей [3]. Вместе с тем большой диапазон изменения мощности ветрового потока формирует повышенные требования к конструкции и схеме управления установкой. Ясно, что чем проще конструкция ВЭУ и чем более автоматизировано управление режимом ее работы, тем более надежной и долговечной она будет в эксплуатации. В этом смысле повышение частоты вращения генератора с применением мультипликатора не всегда целесообразно, так как сопровождается возникновением дополнительных потерь, усилением шумности и ухудшением массогабаритных показателей. Именно поэтому в автономных ВЭУ малой мощности все более широкое применение находят низкооборотные многополюсные генераторы на постоянных магнитах.

С применением генераторов этого типа в АВЭУ предпочтительно использовать промежуточное звено постоянного тока с буферным накоплением энергии, а для питания потребителей стабилизированным напряжением промышленной частоты устанавливать инвертор. В работе [1] описана гибридная ветро-солнечная энергетическая установка, которая, однако, не в полной мере обеспечивает преодоление отмеченных затруднений. В [4] на основании сопоставления мощностных характеристик генератора и ветроколеса рекомендуется регулировать генераторы по цепи возбуждения, что мало пригодно для АВЭУ с генераторами на постоянных магнитах. Наиболее привлекательным и достаточно надежным средством для буферного накопителя энергии для АВЭУ малой мощности представляется использование аккумуляторной батареи, которая при достаточной скорости ветра подзаряжается, а при падении этой скорости и возникновении дефицита мощности отдает энергию нагрузке. Для регулирования мощности генератора целесообразно применять балластную активную нагрузку, воспринимающую избыток мощности при порывах ветра, и главная проблема такого регулирования может быть связана только с быстродействующим ее переключением.

Таким образом, в современной литературе разработаны типовые схемы ВЭУ большой и средней мощностей [3, 4], а также режимы работы генератора с электромагнитным возбуждением [3] или с возбуждением от постоянных магнитов [5]. В гораздо меньшей степени исследованы нестационарные динамические режимы ВЭУ малой мощности, характеризующиеся нестационарной скоростью ветра и регулированием нагрузки при условии стабилизации напряжения на нагрузке.

Постановка задачи. В статье рассматриваются функциональная схема автономной ВЭУ малой мощности с синхронным генератором на постоянных магнитах и возможность моделирования режимов ее работы при произвольном характере изменения скорости ветра и соответствующем изменении сопротивления нагрузки, позволяющем поддерживать на заданном уровне выходное напряжение.

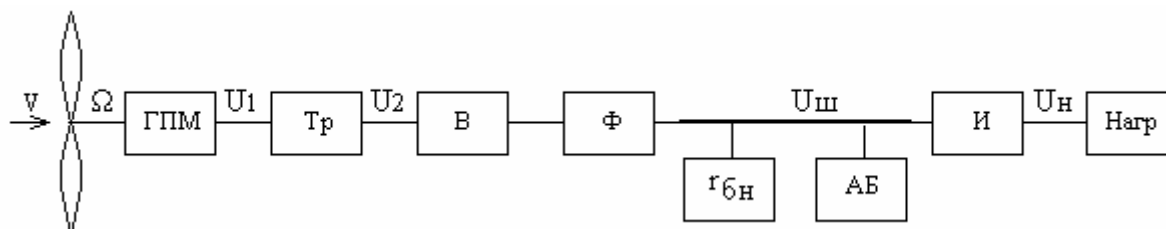


Рис. 1

Функциональная схема ВЭУ. Упрощенная функциональная схема рассматриваемой АВЭУ изображена на рис. 1. Питание от генератора мощностью 1,5 кВт с номинальным фазным напряжением $U_1 = 127$ В, соответствующим частоте вращения $250 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$, подается на понижающий трансформатор Тр; выходное напряжение трансформатора U_2 выпрямляется и через фильтр поступает на сборную шину $U_{ш} = 56$ В, к которой подсоединяются балластная активная нагрузка $r_{бн}$ и аккумуляторная батарея АБ. Со сборной же шины напряжение $U_{ш}$ поступает на инвертор И, с выхода которого снимается стабильное напряжение на нагрузку $U_n = 220$ В промышленной частоты. При увеличении скорости ветра и избытке мощности на ветроколесе, что обычно сопровождается увеличением напряжения генератора и его частоты, сопротивление $r_{бн}$ снижается, и излишняя мощность отводится на балластную нагрузку. Одновременно идет подзарядка аккумуляторной батареи. При снижении мощности на ветроколесе система работает на уменьшение балластной нагрузки, благодаря чему напряжение на сборной шине изменяется незначительно. При полной потере мощности нагрузки и полностью заряженной аккумуляторной батарее ветроколесо выводится от ветра или тормозится. Таким образом, в рассматриваемой системе не предусмотрено непосредственное регулирование скорости ветроколеса; регулирование происходит опосредованно путем изменения нагрузки генератора.

Изменение сопротивления балластной резистивной нагрузки обеспечивается подключением к сборной шине резисторов через устройство широтно-импульсной модуляции с частотой в несколько килогерц. В схеме предусмотрен контроллер работы аккумуляторной батареи, обеспечивающий оптимальный режим ее заряда и разряда (на рис. 1 не показан).

Математическое описание элементов системы. Математическое описание режимов работы генератора с постоянными магнитами (для условий синусоидальности кривой выходного напряжения и ненасыщенной магнитной цепи) выполнено в ортогональных d, q -координатах с опережающим вращением продольной оси. В подобных генераторах не предусматриваются специальных демпфирующих обмоток на роторе; их роль выполняют массивные части ротора. Поскольку демпфирующие токи сравнительно мало влияют на режим работы генератора [5], в математической модели они опущены. Кроме того, изменение потока в зазоре синхронных генераторов с постоянными магнитами вследствие частичного размагничивания постоянных магнитов существенно проявляется лишь при токах, близких к ко-

роткому замыканию, поэтому принято, что магнитный поток остается неизменным. Отметим, что подобные же допущения приняты разработчиками модели машины с постоянными магнитами в пакете MATLAB Simulink.

Исходные уравнения электрического равновесия СГ по продольной и поперечной осям имеют вид [5]

$$\left. \begin{aligned} 1,5r i_d + 1,5L_d \frac{di_d}{dt} + 1,5L_q i_q \Omega p + u_d &= 0; \\ 1,5r i_q + 1,5L_q \frac{di_q}{dt} - 1,5L_d i_d \Omega p - 1,5M_{md} w_m I_m \Omega p + u_q &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

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; M_{md} – коэффициент взаимной индукции между обмоткой статора и магнитом; r – активное сопротивление фазы обмотки статора; I_m – фиктивный постоянный ток магнита; w_m – число витков фиктивной обмотки магнита (обычно $w_m = 1$). Произведение $M_{md} w_m I_m$ образует потокоцепление магнита вдоль продольной оси генератора (далее будем обозначать его через Φ).

Уравнение механического равновесия СГ записывается в виде

$$M_{эм} + M_0 \pm M_\delta = M_{БК}, \quad (2)$$

где $M_{эм} = \frac{2}{3} \cdot 1,5 p i_q [1,5\Phi + (L_d - L_q) i_d]$ – тормозной электромагнитный момент сопротивления генератора; $M_0 = \frac{P_0}{\Omega}$ – момент холостого хода, учитываемый далее как $k_{ТР} \cdot \Omega$ (здесь $k_{ТР}$ – коэффициент трения); $M_\delta = J \frac{d\Omega}{dt}$ – динамический момент (J – момент инерции вращающихся частей ВЭУ); $M_{БК}$ – вращающий момент ветроколеса. Этот момент в соответствии с [3] определяется по соотношению

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

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

Типовой график относительного момента для трехлопастного ветроколеса изображен на рис. 2 а 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.

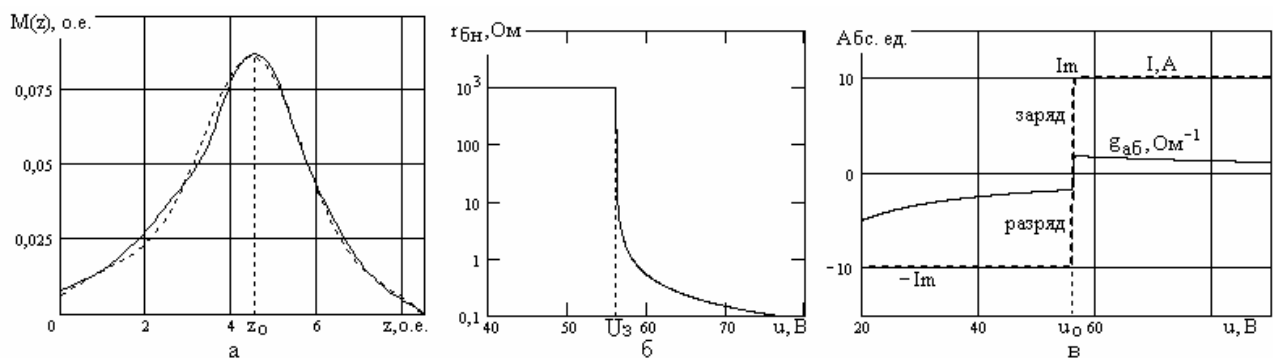


Рис. 2

На рис. 2 а аппроксимированная зависимость (4) показана штриховой линией при следующих значениях параметров: $k_1 = 0,09$; $k_2 = -0,35$; $k_3 = 0,006$; $k_4 = 0,03$; $k_5 = 0,009$; $k_6 = 3 \cdot 10^{-7}$.

Из рисунка следует, что аппроксимация в достаточной степени отражает исходную кривую, особенно с учетом того, что исходная кривая $M(z)$ обычно представляется в весьма усредненном виде [3].

График зависимости сопротивления балластной нагрузки $r_{\text{он}}$ от напряжения $U_{\text{ш}}$ на сборной шине изображен на рис. 2 б, на котором заданное напряжение $U_3 = 56 \text{ В}$. При напряжении, большем U_3 , сопротивление $r_{\text{он}}$ уменьшается, и балластная нагрузка принимает избыток мощности; при дефиците мощности, когда напряжение меньше U_3 , сопротивление балластной нагрузки увеличивается, что стабилизирует напряжение на сборной шине. Приведенная на рис 2 б зависимость $r_{\text{он}} = f(U)$ при $U > U_3$ аппроксимируется выражением

$$r_{\text{он}} = \frac{2}{U - U_3 + 0,002}, \quad (5)$$

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).

Идеализированная вольт-амперная характеристика (ВАХ) аккумуляторной батареи $I = f(U)$ изображена на рис. 2 в 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); контроллер аккумуляторной батареи исключает выход на эти участки, ограничивая токи заряда и разряда почти вертикальной частью характеристики. Проводимость батареи $g_{AB} = f(U)$ (на рис. 2 в сплошная линия), соответствующая данной ВАХ, аппроксимируется выражением

$$\left. \begin{aligned} g_{AB}(U) &= \frac{b_1}{U} - \frac{b_1}{U_3} e^{-b_2(U-U_3)}; U > U_3; \\ g_{AB}(U) &= -\frac{b_1}{U} + \frac{b_1}{U_3} e^{b_2(U-U_3)}; U < U_3 \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где b_1, b_2 – коэффициенты аппроксимации. 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 $b_2 = 10$ – степень сглаживания углов характеристики и уровень наклона от вертикали рабочего участка заряда – разряда батареи (подбирается опытным путем).

Уравнения фазы понижающего трансформатора без учета активного сопротивления обмотки и рассеяния имеют вид

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}; u_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}, \quad (7)$$

где L_1, L_2 – индуктивности первичной и вторичной обмоток; M – коэффициент взаимной индукции; u_1, u_2, i_1, i_2 – текущие значения напряжений и токов обмоток; $L_1 = kM$; $L_2 = \frac{1}{k}M$; k – коэффициент трансформации.

Для согласования с системой (1) уравнения (7) формально представляются в виде составляющих в координатах d, q с опережающим вращением продольной оси и скоростью вращения, совпадающей со скоростью Ω ротора генератора [2]:

для первичной обмотки

$$\left. \begin{aligned} u_{d1} &= L_1 \frac{di_{d1}}{dt} + L_1 i_{q1} \Omega p - M \frac{di_{d2}}{dt} - M i_{q2} \Omega p; \\ u_{q1} &= L_1 \frac{di_{q1}}{dt} - L_1 i_{d1} \Omega p - M \frac{di_{q2}}{dt} + M i_{d2} \Omega p \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

для вторичной обмотки

$$\left. \begin{aligned} u_{d2} &= -L_2 \frac{di_{d2}}{dt} - L_2 i_{q2} \Omega p + M \frac{di_{d1}}{dt} + M i_{q1} \Omega p; \\ u_{q2} &= -L_2 \frac{di_{q2}}{dt} + L_2 i_{d2} \Omega p + M \frac{di_{q1}}{dt} - M i_{d1} \Omega p \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В уравнениях (9) приняты соотношения: $u_{d2} = i_{d2} R$; $u_{q2} = i_{q2} R$, где

$$R = R(t, u) = \left(\frac{1}{r_H(t)} + \frac{1}{r_{\text{он}}(u)} + g_{AB}(u) \right)^{-1} \quad (10)$$

– обобщенное сопротивление нагрузки; $r_H(t)$ – сопротивление нагрузки.

Упрощенное математическое описание узла «выпрямитель – фильтр» имеет вид

$$T \frac{dU_w}{dt} + U_w = RI_2, \quad (11)$$

где U_w – напряжение на сборной шине; T – постоянная времени фильтра; $I_2 = \sqrt{i_{d2}^2 + i_{q2}^2}$ – выходной ток трансформатора.

Составляющие выходных напряжений генератора u_d, u_q в уравнениях (1) совпадают с составляющими входных напряжений трансформатора в уравнениях (8), т.е. $u_d = u_{d1}$; $u_q = u_{q1}$. То же самое относится и к составляющим тока, т.е. $i_d = i_{d1}$; $i_q = i_{q1}$. Благодаря этому уравнения (1), (2), (4)...(6), (8)...(11) связываются в единую систему математического описания АВЭУ.

Схемная модель АВЭУ. Непосредственное решение уравнений (1), (2), (8), (9), (11) затруднено, поэтому для исследования режима АВЭУ применена методика схемного моделирования [2]. Приведенной выше математической модели соответствует схемная модель, изображенная на рис. 3. На этом рисунке обозначены линейные проводимости, численно равные сопротивлениям: $g1 = g2 = 1,5r$; $g3 = k_{TP}$; $g4 = 1$; линейные сопротивления, численно равные проводимостям переменной нагрузки $R1 = R2 = r_H^{-1}(t)$; нелинейные сопротивления, численно равные проводимостям балластной нагрузки и аккумуляторной батареи: $R3 = R4 = \frac{1}{r_{\text{он}}(u)}$ по уравнению (5); $R5 = R6 = g_{AB}(u)$ по уравнениям (6); линейные емкости, численно равные индуктивностям: $C1 = 1,5L_d$; $C2 = C4 = L_1$; $C3 = 1,5L_q$; $C5 = C6 = L_2$; $C7 = J$ (момент инерции): $C8 = T$ (постоянная времени).

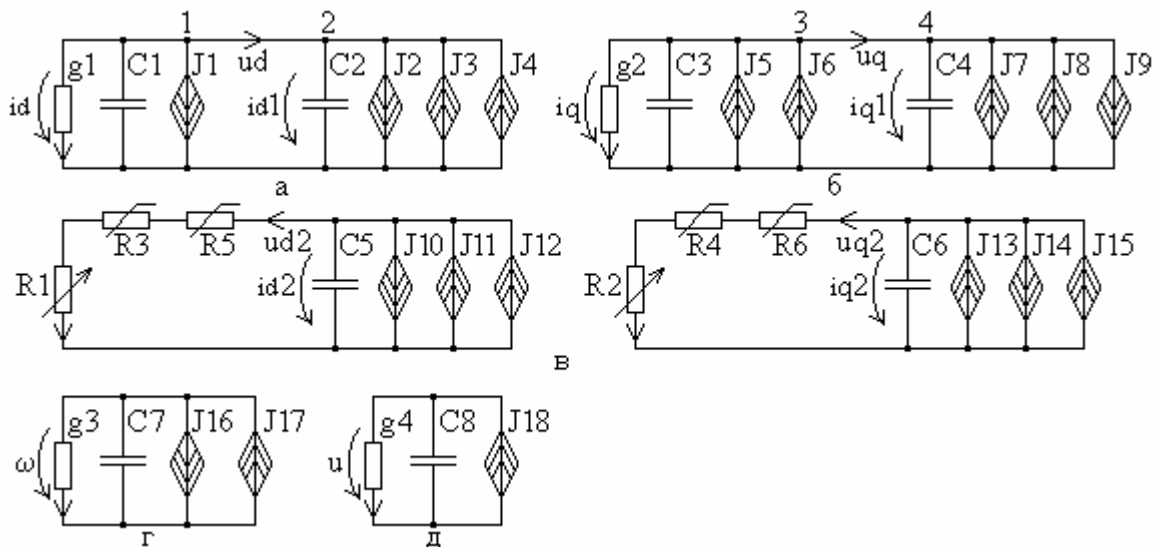


Рис. 3

Далее в модели обозначены линейные управляемые источники тока: $J3 = M \frac{di_{d2}}{dt}$; $J6 = 1,5\Phi\Omega p$; $J8 = M \frac{di_{q2}}{dt}$; $J11 = M \frac{di_{d1}}{dt}$; $J15 = M \frac{di_{q1}}{dt}$; нелинейные управляемые источники тока: $J1 = 1,5L_q i_q \Omega p$; $J2 = L_1 i_{q1} \Omega p$; $J4 = M i_{q2} \Omega p$; $J5 = 1,5L_d i_d \Omega p$; $J7 = L_1 i_{d1} \Omega p$; $J9 = M i_{d2} \Omega p$; $J10 = L_2 i_{q2} \Omega p$; $J12 = M i_{q1} \Omega p$; $J13 = L_2 i_{d2} \Omega p$; $J14 = M i_{d1} \Omega p$; $J16 = 1,5 p i_q [1,5\Phi + (L_d - L_q) i_d]$ – электромагнитный момент генератора в (2); $J17 = M \left(\frac{\Omega R_{BK}}{V} \right) \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16}$ – момент ветроколеса по выражению (3); $J18 = R \sqrt{i_{d2}^2 + i_{q2}^2}$ по (11), где R – обобщенное сопротивление нагрузки по (10).

Напряжения на емкостях $C1, C2$ и $C3, C4$ численно соответствуют составляющим тока генератора i_{d1}, i_{q1} ; на емкостях $C5, C6$ – составляющим тока во вторичной обмотке трансформатора i_{d2}, i_{q2} ; на емкости $C7$ – скорости вращения генератора Ω ; на емкости $C8$ – напряжению U_u на сборной шине. Ток в проводнике 1 – 2 на рис. 3 а численно соответствует продольной составляющей напряжения генератора u_{d1} ; в проводнике 3 – 4 на рис. 3 б – поперечной составляющей этого напряжения; токи в сопротивлениях $R5, R6$ на рис. 3 в – продольной и поперечной составляющим напряжения на вторичной обмотке трансформатора u_{d2}, u_{q2} . Скорость ветра задается в управляемом источнике $J17$; переменное сопротивление нагрузки r_H – в сопротивлениях $R1, R2$.

Результаты исследования. На рис. 4 представлены параметры стационарного режима АВЭУ с СГ на постоянных магнитах ($P_n = 1,5$ кВт; $n_1 = 250$ об/мин) на интервале длительностью 25 с при произвольной скорости ветра $V(t)$ и произвольном характере изменения переменного сопротивления нагрузки $r_H(t)$.

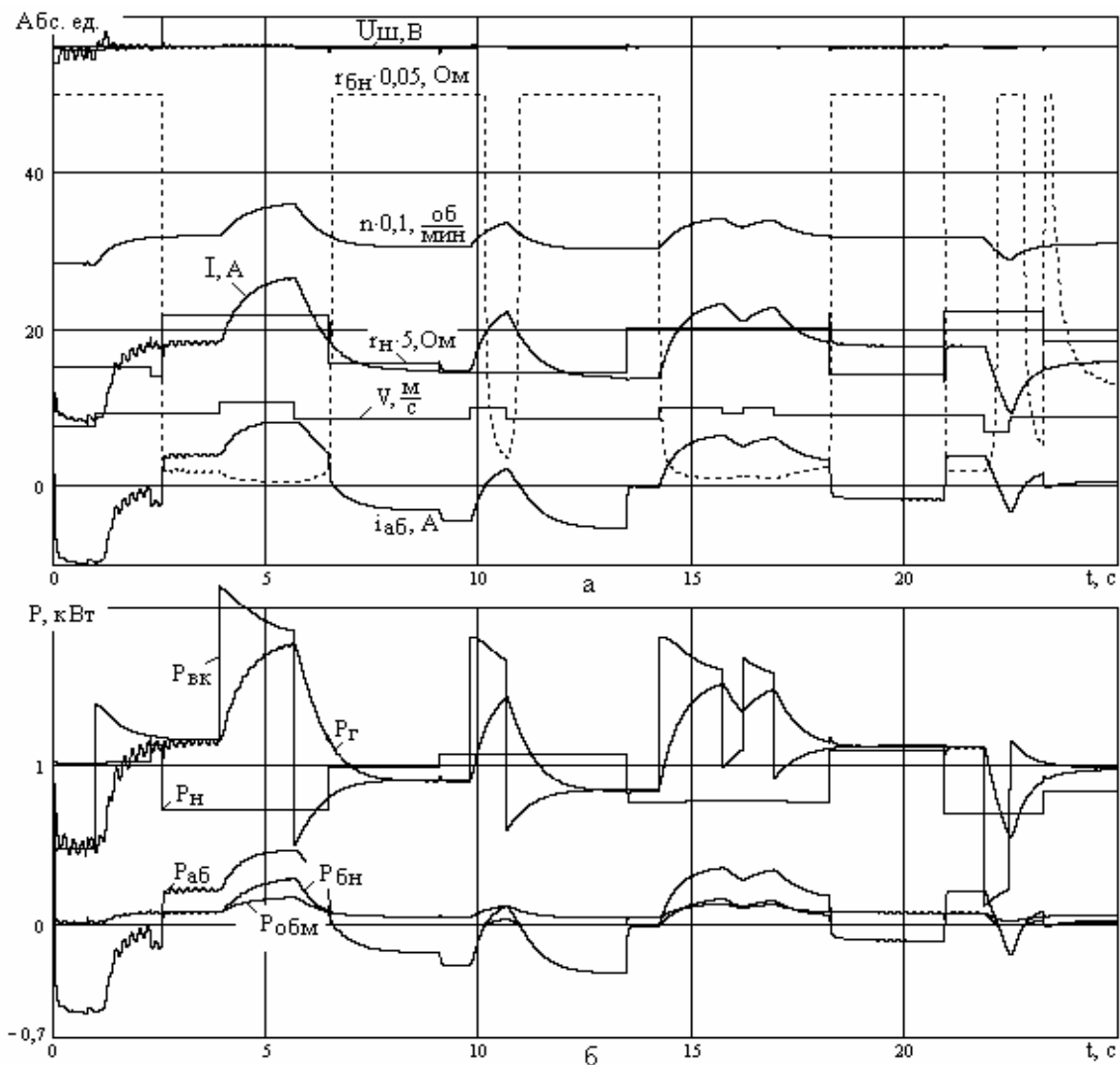


Рис. 4

Расчет выполнен по построенной модели со следующими численными значениями параметров: индуктивности и сопротивление фазы генератора $L_d = 0,058$ Гн; $L_q = 0,048$ Гн; $r = 7$ Ом; число пар полюсов $p = 12$; магнитное потокоцепление постоянных магнитов на полюс $\Phi = 0,597$ Вб; коэффициент трения $k_{TP} = 0,02$; диаметр ветроколеса $D = 3$ м; момент инерции вращающихся масс $J = 4$ кг·м²; коэффициент трансформации $n = 5,3$; коэффициент взаимной индукции трансформатора $M = 10$ Гн; постоянная времени фильтра $T = 1,1$ с.

На рис. 4 а для наглядности график сопротивления балластной нагрузки $r_{\text{он}}(t)$ показан уменьшенным в 20 раз (штриховая линия); график частоты вращения генератора – уменьшенным в 10 раз; график сопротивления нагрузки $r_H(t)$ – увеличенным в 5 раз. Как видно, АВЭУ успешно справляется с задачей поддержания напряжения $U_{\text{ш}}$ на сборной шине на уровне 56 В. Незначительные его отклонения заметны лишь при значительных перепадах сопротивления нагрузки. Скорость генератора отслеживает изменение скорости ветра с некоторым запаздыванием, что связано с действием момента инерции вращающихся масс и мало зависит от задаваемых значений сопротивления нагрузки. Ток нагрузки генератора испытывает значительные колебания, объясняющиеся как изменением сопротивления $r_H(t)$, так и сопротивлением балластной нагрузки $r_{\text{он}}(t)$ и зарядным током аккумуляторной батареи i_{AB} . На рисунке зарядный ток принят положительным, а разрядный – отрицательным.

Мощность ветроколеса $P_{BK} = \Omega M_{BK}$ (рис. 4 б) имеет резкие колебания в соответствии с изменением скорости ветра. В силу инерционности системы мощность генератора $P_G = \Omega M_{ЭМ}$ изменяется более плавно и колеблется в пределах от 0,6 до 1,7 кВт. Так как напряжение на сборной шине постоянно, график мощности нагрузки $P_H = \frac{U_{\text{ш}}^2}{r_H}$ практически точно повторяет график изменения сопротивления нагрузки. Мощность аккумуляторной батареи $P_{AB} = U_{\text{ш}} i_{AB}$ во время заряда положительна, а во время разряда – отрицательна и подпитывает нагрузку при дефиците мощности генератора. На предельный разрядный ток 10 А батарея выходит только на интервале первых полутора секунд работы АВЭУ из-за низкой скорости ветра и небольшого сопротивления нагрузки. В этот период мощность ее составляет 0,55 кВт. На рис. 4 б изображены также графики мощности балластной нагрузки $P_{\text{он}} = \frac{U_{\text{ш}}^2}{r_{\text{он}}}$ и потерь в обмотках генератора $P_{ОБМ} = 2r \cdot 0,5(i_d^2 + i_q^2)$, что позволяет оценить КПД генератора в рассматриваемых условиях.

Выводы. Предложенная функциональная схема АВЭУ малой мощности с СГ с постоянными магнитами обеспечивает заданный уровень напряжения на сборной шине при значительных колебаниях скорости ветра и сопротивления нагрузки, а ее математическая модель достаточно точно описывает стационарные и переходные режимы работы АВЭУ.

Наличие трансформатора несколько ухудшает массогабаритные показатели системы, поэтому весьма перспективным направлением является разработка и применение низковольтного тихоходного многополюсного генератора на постоянных магнитах, а также разработка схемы и алгоритма управления инвертором для исключения звена постоянного тока.

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

The model of the windelectrical energy setting of small-yield is built on a generator with permanent magnets. For stabilizing of tension on a collapsible tire the ballast loading and storage battery is applied. The design of the dynamic mode is executed with casual character of speed of wind and change of loading.

1. Дзензерский В.А., Житник Н.Е., Плаксин С.В., Погорелая Л.М. Принципы построения гибридных ветро-солнечных энергоустановок // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 67–72.

2. *Канов Л.Н.* Схемное моделирование электроэнергетических систем переменного тока // *Электротехника та електроенергетика*. – 2004. – № 1. – С. 5 – 9.
3. *Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И.* Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика. – Харьков. нац. аэрокосм. ун-т (ХАИ). – Севастополь: Севастоп. нац. техн. ун-т, 2004. – 519 с.
4. *Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б., Муравлев А.И.* Энергоэффективные управляемые генераторы для ветроэлектростанций // *Изв. вузов. Сер. Электромеханика*. – 2008. – № 6. – С. 63–66.
5. *Олейников А.М., Канов Л.Н.* Исследование режимов маломощного генератора с постоянными магнитами методом схемного моделирования // *Вестн. СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: Сб. науч. тр.* – Севастополь, 2007. – Вып. 80. – С. 29–34.

Надійшла 1.06.2009