

С. Н. Чижма, А. И. Захаров

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ВЕТРОВОГО ГЕНЕРАТОРА

110

Статья посвящена разработке методики расчета оптимальной конфигурации ветровых генераторов. Рассмотрены электромеханические свойства синхронных генераторов на постоянных магнитах с неявнополюсным ротором, дано аналитическое представление характеристик таких генераторов. Также произведен обзор механических свойств ветровых турбин с горизонтальной осью вращения. Приведенный материал позволил разработать методику теоретического расчета параметров ветровой турбины и механического привода для работы ветрового генератора на номинальную мощность в нормальных условиях. Проведено моделирование ветровой турбины в программе MATLAB, подтверждающее корректность приведенной методики расчета.

Paper is devoted to development of calculation method for optimal configuration of wind generators. Electromechanical features of permanent magnets synchronous generators with round rotor are researched, formularization is made for these features. Also mechanical properties of wind turbines with horizontal rotation axis are described. Reviewed theoretical materials allowed to develop calculation method of wind turbine parameters and gearbox parameters for performing nominal output power with normal operation conditions. Simulation of wind generator in MATLAB software confirmed efficiency of proposed calculation method.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, ветровой генератор, синхронный генератор, ветровая турбина, методика расчета.

Keywords: alternative energy, wind generator, synchronous generator, wind turbine, calculation method.

Сегодня часто наблюдается внедрение ветровых энергетических установок малой мощности для обеспечения электрической энергией удаленных промышленных объектов и частных хозяйств. Ветроустановки применяются как в качестве самостоятельных источников электроэнергии, так и в составе гибридных ветросолнечных установок. В обоих случаях эффективность их работы непосредственно зависит от технического решения, определяющего характеристики электромеханических свойств конструкции ветрового генератора.

Цель работы: исследование электромеханических свойств ветровых энергетических установок малой мощности, разработка методики расчета оптимальной конфигурации ветрового генератора.

Постановка задачи

Ветровой генератор состоит из ветровой турбины, механического привода и синхронного генератора на постоянных магнитах (СГПМ). На рисунке 1 схематично изображена структура ветрового генератора



[1]. Ветер вызывает вращение ветровой турбины со скоростью ω_T (об/мин), возникает механический момент силы T_T . Механический привод позволяет обеспечить скорость вращения электрического генератора ω_G в пределах номинальных значений в соответствии с передаточным числом i . Электрическая нагрузка, подключенная к обмоткам синхронного электрогенератора, определяет электромагнитный момент T_G , направленный обратно моменту T_T .

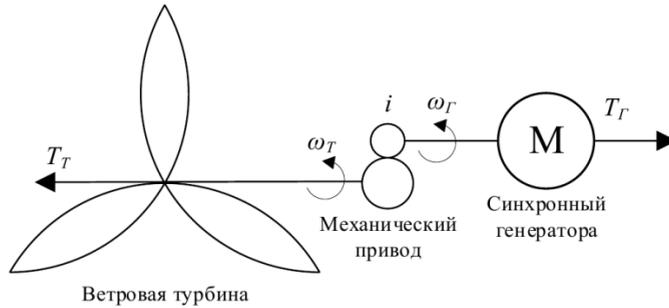


Рис. 1. Структура ветрового генератора

Далее рассмотрена зависимость электрической и механической мощности СГПМ от нагрузки при постоянной скорости вращения ω_G и выведено аналитическое представление $P_G(R_H, \omega_G)$ и $P_M(R_H, \omega_G)$. Проведено моделирование, подтверждающее верность теоретического представления электрической и механической мощности СГПМ. Рассмотрены механические свойства типового ветрового колеса, исследована оптимальная конфигурация электромеханической конструкции ветрового генератора.

Наряду с рядовыми характеристиками синхронных генераторов, такими как характеристика холостого хода, внешняя и регулировочная характеристики, для задач поиска оптимальной мощности и выбора конфигурации ветрового генератора удобно пользоваться характеристикой, определяющей зависимость электрической мощности генератора при постоянной скорости вращения – $P_G(R_H)$ при $\omega_G = \text{const}$ [2]. В данной работе проведен анализ нескольких СГПМ с характеристиками, приведенными в таблице 1. Среди важных характеристик указаны номинальная скорость вращения генератора $\omega'_{Г.ном}$, об/мин, номинальная мощность $P_{Г.ном}$, фазное сопротивление обмоток $R_{обм}$, амплитуда линейного напряжения в режиме холостого хода при скорости вращения 1000 об/мин $U_{т.хх.л}$ (1000), индуктивность обмоток $L_{обм}$, количество полюсов $2p$, момент инерции ротора J .

Таблица 1

Характеристики СГПМ

Генератор	$\omega'_{Г.ном}$, об/мин	$P_{Г.ном}$, кВт	$R_{обм}$, Ом	$U_{т.хх.л}(1000)$	$L_{обм}$, мГн	$2p$	J , кг·м ²
P21R 90L8	750	1,1	7,3	410	18	8	0,00375
P21R112M8	750	3	2,4	430	11	8	0,01225
P21R100L6	1000	3	2,7	305	14	6	0,00625



Известно, что напряжение в режиме холостого хода СГПМ линейно зависит от скорости вращения $\omega'_Г$, что можно выразить следующим образом:

$$U_{т.хх.л} = k\omega'_Г = k \frac{60\omega_Г}{2\pi}, \quad (1)$$

где $k = \frac{U_{т.хх.л}(1000)В}{1000 \text{ об / мин}}$ – коэффициент пропорциональности; $\omega_Г$ – скорость вращения СГПМ в рад/с.

112

В данной работе используется модель СГПМ с неявнополюсным ротором. Для оценки падения напряжения на нагрузке такого генератора предложена эквивалентная схема, представленная на рисунке 2 [3]. Эквивалентная схема состоит из источника фазного напряжения, равного $U_{хх.ф} = \frac{U_{т.хх.л}}{\sqrt{3}}$; активного сопротивления обмоток $R_{обм}$; реактивного сопротивления обмоток $p\omega_Г L_{обм}$; сопротивления нагрузки R_H . Все элементы схемы соединены последовательно, через них течет фазный комплексный ток $\dot{I}_{ф.н}$.

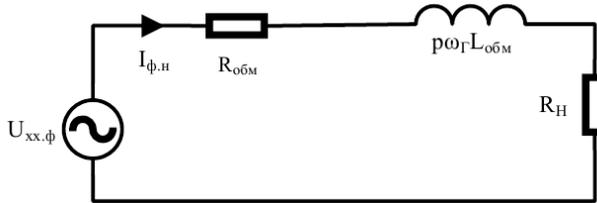


Рис. 2. Эквивалентная схема

Воспользовавшись законами Кирхгофа, получим

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ф.н} &= \frac{\dot{U}_{хх.ф}}{R_{обм} + R_H + jp\omega_Г L_{обм}}, \\ \dot{U}_{ф.н} &= \dot{U}_{хх.ф} - \dot{I}_{ф.н} (R_{обм} + jp\omega_Г L_{обм}) = \dot{U}_{хх.ф} - \frac{\dot{U}_{хх.ф} (R_{обм} + jp\omega_Г L_{обм})}{R_{обм} + R_H + jp\omega_Г L_{обм}} = \\ &= \frac{\dot{U}_{хх.ф} R_H}{R_{обм} + R_H + jp\omega_Г L_{обм}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Представим напряжение холостого хода только действительной частью и воспользуемся формулой (1). В результате получим

$$\dot{U}_{ф.н} = \frac{60}{2\pi\sqrt{3}} \frac{k\omega_Г R_H}{R_{обм} + R_H + jp\omega_Г L_{обм}}. \quad (3)$$

Действующее значение этого напряжения определяется как

$$U_{д.ф.н} = \frac{60}{2\pi\sqrt{6}} \frac{k\omega_Г R_H}{\sqrt{(R_{обм} + R_H)^2 + (p\omega_Г L_{обм})^2}}. \quad (4)$$



Потребляемую нагрузкой полную мощность получим следующим образом:

$$P_{\Gamma} = 3 \frac{U_{д.ф.н}^2}{R_H} = \frac{60^2}{8\pi^2} \frac{(k\omega_{\Gamma})^2 R_H}{(R_{обм} + R_H)^2 + (p\omega_{\Gamma} L_{обм})^2} \quad (5)$$

Механическая мощность, необходимая для вращения СГПМ, определяется суммой мощности нагрузки и мощности потерь в обмотке:

$$P_M = 3 \frac{U_{д.ф.н}^2}{R_H + R_{обм}} = \frac{60^2}{8\pi^2} \frac{(k\omega_{\Gamma})^2 R_H^2}{((R_{обм} + R_H)^2 + (p\omega_{\Gamma} L_{обм})^2)(R_H + R_{обм})} \quad (6)$$

Для проверки истинности приведенных выражений в программном продукте *MATLAB* проведено моделирование СГПМ из таблицы 1. Структурная схема модели приведена на рисунке 3.

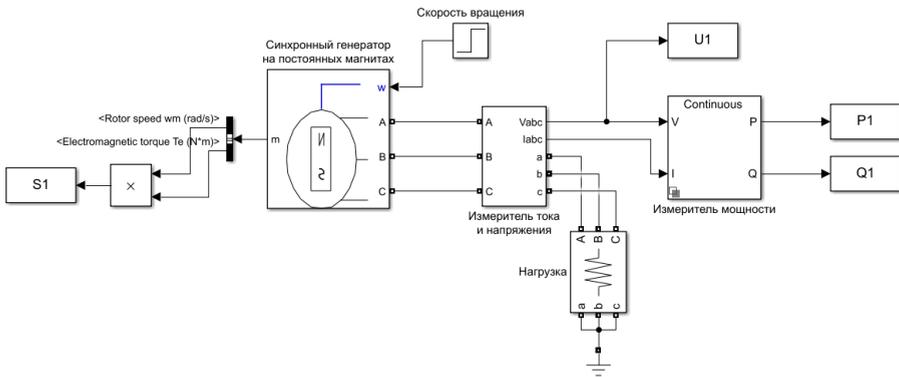


Рис. 3. Структурная схема модели для исследования характеристик $P_{\Gamma}(R_H)$ и $P_M(R_H)$ СГПМ

На вход блока синхронного генератора подается сигнал, определяющий скорость вращения генератора ω'_{Γ} . При постоянной скорости вращения производится ряд измерений мощности, выделяемой на нагрузке, с помощью измерителя мощности P_{Γ} при различных сопротивлениях нагрузки R_H . Также производится измерение механической мощности P_M , необходимой для вращения СГПМ с заданной скоростью вращения ω'_{Γ} . Результаты моделирования представлены на рисунке 4.

На рисунке 4 отмечены точки, в которых генератор выходит на номинальную электрическую мощность $P_{\Gamma,ном}$ при номинальной скорости вращения $\omega'_{\Gamma,ном}$. По этим точкам можно определить сопротивление нагрузки R_H . Также по результатам моделирования можно определить механическую мощность P_M , необходимую для вращения генератора в номинальном режиме. Соответствующие значения сведены в таблицу 2.

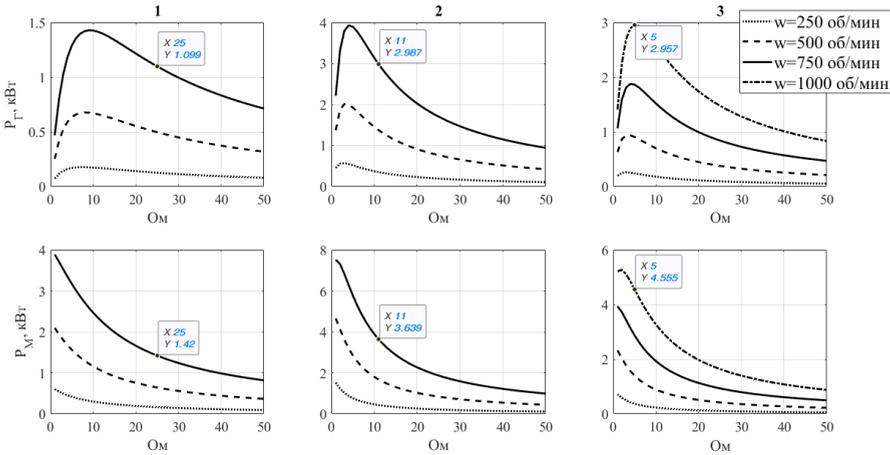


Рис. 4. Результаты моделирования СПГМ

Таблица 2

Результаты моделирования

Генератор	Характеристика			
	$\omega'_{Г}$, об/мин	P_G , кВт	P_M , кВт	$R_{H,ном}$, Ом
P21R90L8	750	1,099	1,42	25
P21R112M8	750	2,987	3,639	11
P21R100L6	1000	2,957	4,555	5

Необходимо отметить, что данные результаты моделирования отлично согласуются с результатами, полученными по формулам (5) и (6) для тех же условий.

Ветровая турбина

Модель ветровой турбины основана на известной зависимости [4; 5], согласно которой вырабатываемая ветровой турбиной механическая мощность зависит от ее конструктивных параметров и скорости ветра следующим образом:

$$P_M = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} V_{ветра}^3, \tag{7}$$

где P_M – механическая мощность турбины, Вт; c_p – коэффициент использования энергии ветра; ρ – плотность воздуха ($\text{кг}/\text{м}^3$); A – ометаемая площадь ветровой турбины, м^2 ; $v_{ветра}$ – скорость ветра, $\text{м}/\text{с}$; λ – коэффициент крутящего момента; β – угол тангажа лопастей.

Коэффициент крутящего момента определяется как отношение линейной скорости вращения края лопасти турбины к скорости ветра:

$$\lambda = \frac{\omega_{Г} R}{V_{ветра}}. \tag{8}$$



Угол тангажа β , в свою очередь, определяется как угол между плоскостью лопасти и плоскостью ее перемещения [6].

Коэффициент c_p для горизонтальных ветровых турбин определен в аналитическом виде [7]:

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1(c_2/\lambda_i - c_3\beta - c_4)e^{-c_5/\lambda_i} + c_6\lambda, \quad (9)$$

где коэффициенты $c_1 = 0,5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0,4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$, $c_6 = 0,0068$, а λ_i определяется из выражения (10).

На рисунке 5 представлено семейство кривых $c_p(\lambda, \beta)$, причем видно, что максимум коэффициента производительности $c_{p,max} = 0,48$ достигается при нулевом угле тангажа и коэффициенте крутящего момента $\lambda = 8,1$.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}. \quad (10)$$

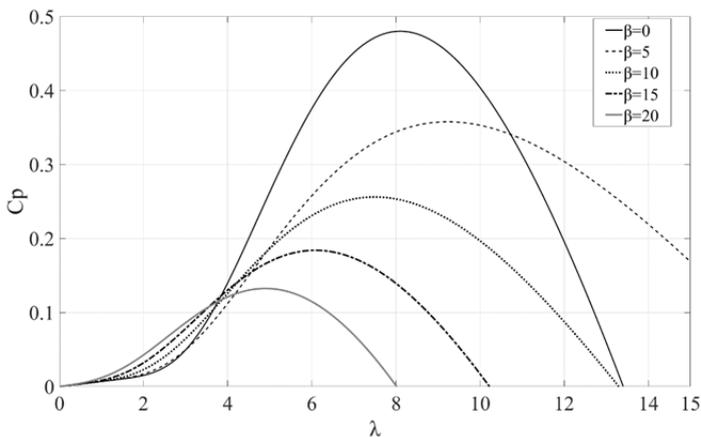


Рис. 5. Семейство зависимостей коэффициента использования энергии ветра c_p от коэффициента крутящего момента λ и угла тангажа β

Выбор оптимальной конструкции ветрогенератора

Задача поиска оптимальной конфигурации ветрового генератора сводится к обеспечению согласованности электрической и механической частей для максимальной эффективности при эксплуатации. Для этого необходимо учесть условия, в которых будет производиться эксплуатация проектируемой ветровой установки. Важнейшим параметром, который необходимо учитывать при проектировании, является номинальная скорость ветра $V_{ном}$. Под ним понимается средняя скорость ветра, характерная для выбранной местности. Также важно знать номинальную мощность генератора $P_{Г,ном}$. По формуле (5) для номинальной мощности и номинальной скорости вращения генератора можно найти сопротивление нагрузки $R_{Н,ном}$. Подставляя это значение в формулу (6), определим механическую мощность $P_{М,ном}$, соответствующую номинальному режиму работы. На основе формулы (7) рассчитывается длина лопастей ветровой турбины:



$$r = \sqrt{\frac{2P_{M.ном}}{c_{p.маx} \rho \pi V_{ном}^3}}. \quad (11)$$

Формула (8) позволяет оценить номинальную скорость вращения $\omega_{T.ном}$ (рад/с) ветровой турбины, обеспечивающую номинальную механическую мощность, равную $P_{M.ном}$:

$$\omega_{T.ном} = \frac{\lambda_{ном} V_{ном}}{R} \left(\frac{рад}{с} \right). \quad (12)$$

При этом номинальная скорость вращения генератора $\omega_{Г.ном}$ может отличаться от номинальной скорости вращения ветровой турбины $\omega_{T.ном}$, что должно быть предусмотрено применением механической передачи с передаточным числом:

$$i = \frac{\omega_{Г.ном}}{\omega_{T.ном}}. \quad (13)$$

Данный подход к проектированию ветровых генераторов исследован с помощью модели, реализованной в программе *MATLAB* и изображенной на рисунке 6. На вход блока, моделирующего работу ветровой турбины, поступают сигналы, определяющие скорость ветра $V_{ветра}$ (м/с), угол атаки β (град), радиус ветровой турбины r (м) и скорость вращения ветровой турбины ω_T (рад/с). На выходе данного блока формируется значение механического момента силы турбины $T_{M.T}$. Далее рассчитывается механический момент генератора $T_{M.Г}$ в соответствии с передаточным числом i :

$$T_{M.Г} = i \cdot T_{M.T}. \quad (14)$$

Электрический генератор вращается со скоростью ω_G . По формуле (13) рассчитывается угловая скорость вращения ветровой турбины ω_T . Этот сигнал поступает на вход блока ветровой турбины. СГПМ через измеритель тока и напряжения подключен к электрической нагрузке.

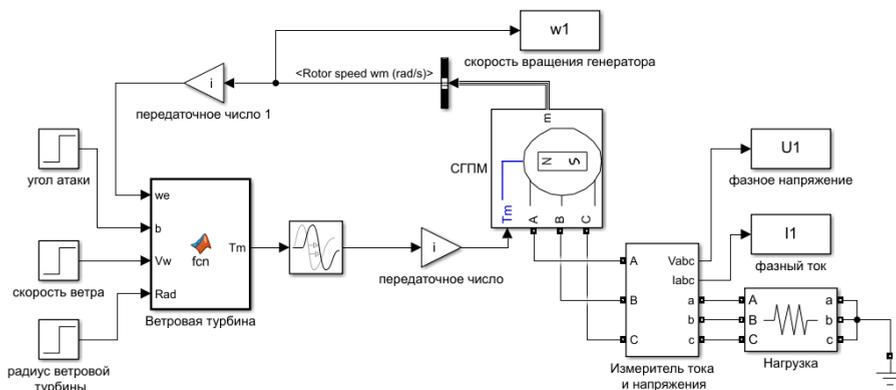


Рис. 6. Структурная схема модели ветрового генератора



Исследование модели ветровой установки заключается в определении зависимости электрической мощности генератора при постоянной скорости ветра — $P_G(R_H)$ при $V_{ветра} = \text{const}$. Необходимо отметить, что на результат моделирования значительно влияет начальное состояние генератора. В случае, если в начальный момент времени $t = 0$ скорость вращения генератора ω_G приближается к номинальным значениям, при номинальном ветре наблюдается четкая корреляция между результатами моделирования ветрового генератора и результатами моделирования СПИМ (табл. 2), что говорит о корректности расчетного метода. Более детально результаты моделирования представлены на рисунке 7, где видны графики зависимости электрической мощности генератора P_G , механической мощности генератора P_M , а также скорости вращения генератора ω_G от сопротивления нагрузки R_H для различных скоростей ветра: 3, 5, 7 и 9 м/с. При расчете за номинальную скорость ветра приняли $V_{ветра} = 5$ м/с. Видно, что при номинальной скорости ветра и номинальной нагрузке значения мощностей, полученные в результате моделирования, близки к аналогичным значениям из таблицы 2.

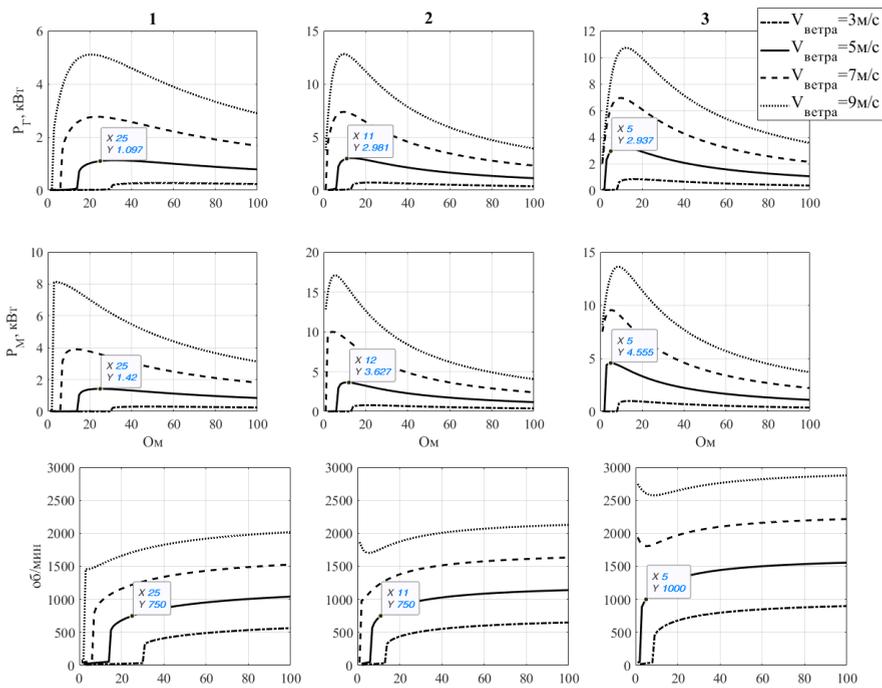


Рис. 7. Результаты моделирования ветрового генератора при $\omega_G(t = 0) \approx \omega_{G,ном}$

Далее приведены результаты моделирования ветрового генератора с номинальной мощностью 1100 Вт для случаев, когда $\omega_G(t = 0) \approx 0$ и $\omega_G(t = 0) \approx \omega_{G,ном}$, то есть когда ветровой генератор в начальный момент времени находился в состоянии покоя или вращался с номинальной скоростью. Результаты моделирования приведены на рисунке 8. Видно, что при номинальном ветре, номинальной нагрузке и нулевой началь-



ной скорости вращения генератор не раскручивается до номинальных оборотов и генерируемая мощность близка к нулю. Такие же результаты показали и модели с другими генераторами. Данный эффект необходимо учитывать при разработке систем управления ветровыми установками. Результаты моделирования приведены в таблице 3.

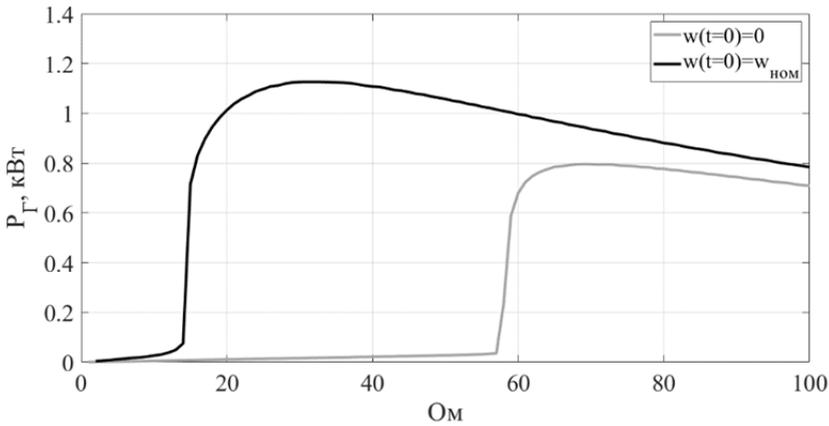


Рис. 8. Моделирование ветрового генератора при различных начальных условиях

Таблица 3

Результаты моделирования ветрового генератора

Генератор	Характеристика					
	$\omega'_Г$	P_G при $\omega_G(t=0) \approx \omega_{Г.ном}$, кВт	P_M при $\omega_G(t=0) \approx \omega_{Г.ном}$, кВт	$P_{Г.мах}$ при $\omega_G(t=0) \approx 0$, кВт	r , м	i
P21R90L8	750	1,097	1,42	0,794	3,54	0,1455
P21R112M8	750	2,981	3,627	1,975	5,67	0,091
P21R100L6	1000	2,937	4,555	2,464	6,35	0,061

Заключение

В рамках данной работы исследованы свойства электрических синхронных генераторов, ветровых турбин и ветровых генераторов. Сформулирована методика расчета оптимальной конфигурации ветрового генератора, состоящая из следующих этапов:

- 1) определение номинальных условий эксплуатации ветрогенератора – номинальной скорости ветра $V_{ном}$, номинальной мощности генератора $P_{Г.ном}$ и номинальной скорости вращения генератора ω_G ;
- 2) расчет сопротивления нагрузки в номинальном режиме согласно (5) и (6);
- 3) расчет радиуса ветровой турбины согласно (11);
- 4) определение скорости вращения ветровой турбины согласно (12);
- 5) определение передаточного числа механического привода (13).



Рассчитанные таким образом ветровые генераторы протестированы с помощью модели, созданной в программной среде *MATLAB*. Результаты моделирования показали, что в условиях, которые определены как номинальные, ветровой генератор достигает номинальной мощности.

Список литературы

1. Luo N., Vidal Y., Acho L. Wind Turbine Control and Monitoring. Springer, 2014.
2. Герман-Галкин С. Г., Кардонов Г. А. Электрические машины : лабораторные работы на ПК. СПб., 2003.
3. Кацман М. М. Электрические машины : учебник для учащихся электротехн. спец. техникумов. М., 1990.
4. Лукутин Б. В. Возобновляемые источники энергии : учеб. пособие. Томск, 2008.
5. Soetedjo A., Lomi A., Mulayanto W. P. Modeling of Wind Energy System with MPPT Control // ICEEI. Bandung, 2011.
6. Rekioua D. Wind Power Electric Systems Modeling, Simulation and Control. Springer, 2014.
7. Heier S. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons, 1998.

Об авторах

Сергей Николаевич Чижма — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: SCHizhma@kantiana.ru

Артем Игоревич Захаров — ассист., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AIZakharov@kantiana.ru

The authors

Prof. Sergey N. Chizhma, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: SCHizhma@kantiana.ru

Artyom I. Zhaharov, Assistant, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AIZakharov@kantiana.ru