

УДК 621.658.018.531

Л.Н. Канов, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО МАКСИМУМУ МОЩНОСТИ

Определен закон изменения сопротивления возбуждения генератора постоянного тока ветроэлектрической установки с целью получения максимальной мощности в статическом и динамическом режимах в условиях изменяющейся скорости ветра и сопротивления нагрузки.

Ключевые слова: генератор постоянного напряжения, максимальная мощность, скорость ветра, переменная нагрузка, ветроэлектрическая установка.

Введение. Закон Украины «Об энергосбережении» и «Национальная энергетическая программа» определяют ветроэнергетику как приоритетное направление в комплексе развития нетрадиционных источников электроэнергии, поэтому применение ветроэлектрических установок (ВЭУ) является актуальной задачей. Наибольший интерес это представляет для потребителей районов, где есть затруднения со стационарным электроснабжением, и в качестве альтернативных источников выступают ВЭУ небольшой мощности. Подобные ВЭУ обычно не имеют редукторов и механических систем регулирования. Изменение скорости ветра и нагрузки ВЭУ влияют на скорость вращения генератора и приводят к изменению вырабатываемой мощности. Поэтому в условиях случайного изменения скорости ветра и нагрузки работа ВЭУ оказывается неустойчивой, а выходная мощность – низкой [1].

Анализу ВЭУ посвящено немало работ [1–4]. В большинстве работ, например [2], приводится описание, усовершенствование и расчет конструкций ВЭУ и их узлов. В других работах [3] дается математическое описание и расчет электрооборудования ВЭУ. Оптимизация режимов ВЭУ рассмотрена в [4], где исследована эффективность работы ВЭУ в зависимости от регулирования угла поворота лопастей ветроколеса. Для управления поворотом лопастей ветроколеса в [3] предлагается использовать нейронные сети, а в [4] описано регулирование ВЭУ USW56-100 с помощью pitch – системы с запаздыванием. Таким образом, сравнительно подробно исследованы режимы мощных ВЭУ с механическими системами управления, в то время как для ВЭУ небольшой мощности более перспективными являются электронные системы регулирования без привлечения механизмов поворота лопастей ветроколеса.

Цель работы. Целью статьи является разработка средств оптимизации по максимуму мощности режима небольшой ВЭУ постоянного тока без привлечения механических систем регулирования.

Методика и материалы исследования. Упрощенная схема ВЭУ, содержащая генератор постоянного напряжения, изображена на рисунке 1. Генератор с номинальным напряжением 110 В представлен источником ЭДС E и внутренним сопротивлением $r_{\text{вн}} = 0,4 \text{ Ом}$; $L_{\text{в}}$, $r_{\text{в}}$ – индуктивность и сопротивление обмотки возбуждения; $r_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки; i , $i_{\text{в}}$, $i_{\text{н}}$ – токи соответственно якоря генератора, обмотки возбуждения и нагрузки; u – выходное напряжение генератора. Генератор приводится во вращение ветроколесом с угловой скоростью Ω ; V – скорость ветра.

Вращающий момент ветроколеса аппроксимируется выражением [1]

$$M_{\text{вк}}(\Omega, V) = (k_1 e^{-k_2(z-z_0)})^2 + k_3 e^{-k_4 z} + k_5 \sin z - k_6 z^5) \frac{\pi \rho V^2 D^3}{16},$$

где $z = \frac{D\Omega}{2V}$ – коэффициент быстроходности; $D = 3 \text{ м}$ – диаметр ветроколеса; ρ – плотность воздуха;

$k_1 \dots k_6$ – коэффициенты аппроксимации: $k_1 = 0,09$; $k_2 = 0,35$; $k_3 = 0,006$; $k_4 = 0,03$; $k_5 = 0,009$;

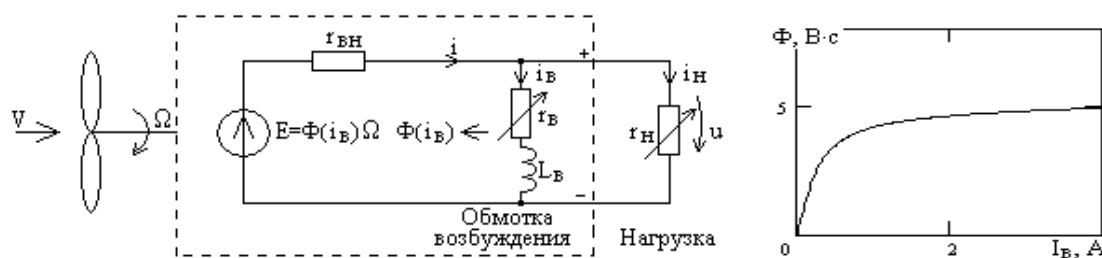


Рисунок 1 – Упрощенная электрическая схема ВЭУ и характеристика намагничивания генератора

$k_6 = 3 \cdot 10^{-7}$. Нелинейная зависимость магнитного потока Φ от тока возбуждения (рисунок 1) аппроксимируется выражением $\Phi(i_g) = a \cdot \arctg(bi_g) + ci_g$, где $a = 3,1$; $b = 4$; $c = 0,06$; ЭДС генератора имеет вид $E = \Phi(i_g)\Omega$. Электромагнитный момент генератора определяется выражением $M_{эм} = \Phi(i_g)i$, где $i = i_g + i_n$. Для внешнего контура схемы (рисунок 1) справедливо равенство $E = ir_{гн} + i_nr_n$, откуда получаем $i = \frac{E + r_n i_g}{r_{гн} + r_n}$. Таким образом, условие равновесия механических моментов на оси ВЭУ имеет вид

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{мп}\Omega + M_{эм} = M_{вк}, \quad (1)$$

где J – момент инерции вращающихся масс; $k_{мп}$ – коэффициент трения.

Уравнение электрического равновесия для правого контура схемы (рисунок 1) на основании второго закона Кирхгофа выглядит следующим образом:

$$\frac{d\Phi}{dt} + r_g i_g = r_n i_n \quad \text{или} \quad \frac{\partial \Phi}{\partial i_g} \frac{di_g}{dt} + r_g i_g = r_n \frac{E - r_{гн} i_g}{r_{гн} + r_n}. \quad (2)$$

Мощность нагрузки определяется выражением $P = r_n i_n^2$, тогда для количества вырабатываемой генератором энергии за время T получаем

$$w = \int_{t_0}^{t_0+T} P dt. \quad (3)$$

На основании выражений (1) – (3) описание режима ВЭУ представим уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left[M_{вк}(\Omega, V) - k_{мп}\Omega - \Phi(i_g) \frac{\Phi(i_g)\Omega + r_n i_g}{r_{гн} + r_n} \right]; \\ \frac{di_g}{dt} &= \left(\frac{ab}{1 + (bi_g)^2} + c \right)^{-1} \left[r_n \cdot \left(\frac{\Phi(i_g)\Omega - r_{гн} i_g}{r_{гн} + r_n} \right) - r_g i_g \right]; \\ \frac{dw}{dt} &= \left(\frac{\Phi(i_g)\Omega - r_{гн} i_g}{r_{гн} + r_n} \right)^2 r_n dt. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Поставим задачу определения такого закона изменения r_g , при котором за время T ВЭУ вырабатывает максимальное количество электроэнергии в условиях произвольного изменения скорости ветра V и сопротивления нагрузки r_n .

В качестве начального приближения рассмотрим стационарный режим ВЭУ. Из первых двух уравнений (4) для заданных значений V и r_n определим i_g , и подстановка в последнее уравнение (4) дает выражение мощности генератора, как функции сопротивления нагрузки r_n и скорости ветра V $P = P(r_n, r_g, V)$. Типичный вид этой функции изображен на рисунке 2, а, а контурный график – на рисунке 2, б. Из рисунка следует, что максимум мощности достигается на прямой $r_g = kr_n + b$. Обнаруженная зависимость сохраняется при скоростях ветра от 1 м/с до 20 м/с. Таким образом, закон изменения сопротивления возбуждения r_g в зависимости от r_n и V , обеспечивающий максимум мощности нагрузки, имеет вид

$$r_{g0}(r_n, V) = k(V)r_n + b(V), \quad (5)$$

в котором $k(V)$, $b(V)$ определяются из графиков (рисунок 2, б) при различных V . Эти зависимости изображены на рисунке 2, в и могут быть аппроксимированы. Типичные графики оптимального статического режима при сравнительно медленно меняющейся скорости ветра и сопротивлении нагрузки изображены на рисунке 3, а. Для сравнения на рисунке приведены графики мощности нагрузки при произвольных постоянных значениях сопротивления r_g .

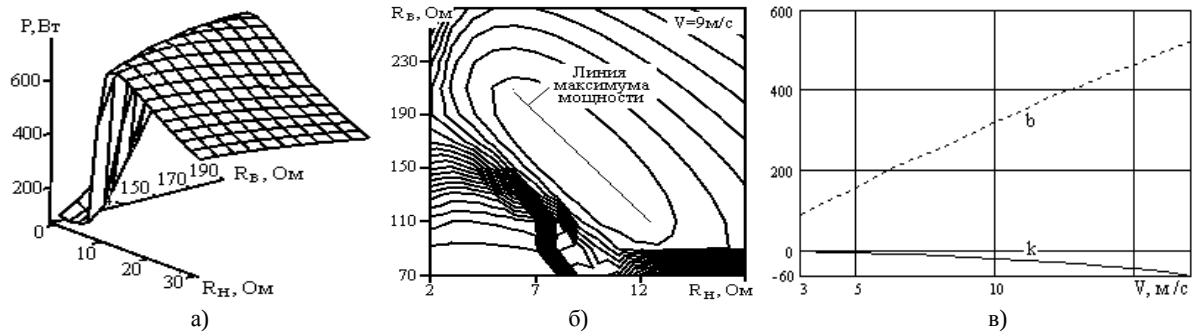


Рисунок 2 – Мощность генератора

Для оптимизации динамического режима (4) предположим, что на исследуемом интервале выполнено прогнозирование скорости ветра $V(t)$ и изменения нагрузки $r_h(t)$. Для отыскания оптимального закона изменения $r_e(t)$, доставляющего максимум $w(t_0 + T)$, построим линеаризованную на траектории (4) с $r_{e0}(t) = r_e(r_h, V)$ по (5) сопряженную систему

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = -\mathbf{A}^T \mathbf{p}, \quad (6)$$

где $A_{i,1} = \frac{\partial f_i}{\partial \Omega}$, $A_{i,2} = \frac{\partial f_i}{\partial i_e}$; $i = 1, 2, 3$; f_1, f_2, f_3 – правые части (4); p_1, p_2, p_3 – сопряженные переменные; $p_3 \equiv 1$. Система (6) решается в обратном времени с нулевыми условиями в момент $t_0 + T$. На основании [5] получаем поправку $\Delta r_{e1}(t)$ к начальному приближению $r_{e0}(t)$

$$\Delta r_{e1}(t) = k \frac{\partial f_2}{\partial i_e} \bigg|_0 p_2(t), \quad (7)$$

где k выбирается так, чтобы $w(t_0 + T)$ в (4) при $r_{e1}(t) = r_{e0}(t) + \Delta r_{e1}(t)$ достигало максимума и $r_{e1}(t) > 0$ при всех t . Далее цикл определения поправки $\Delta r_{ei}(t)$ повторяется.

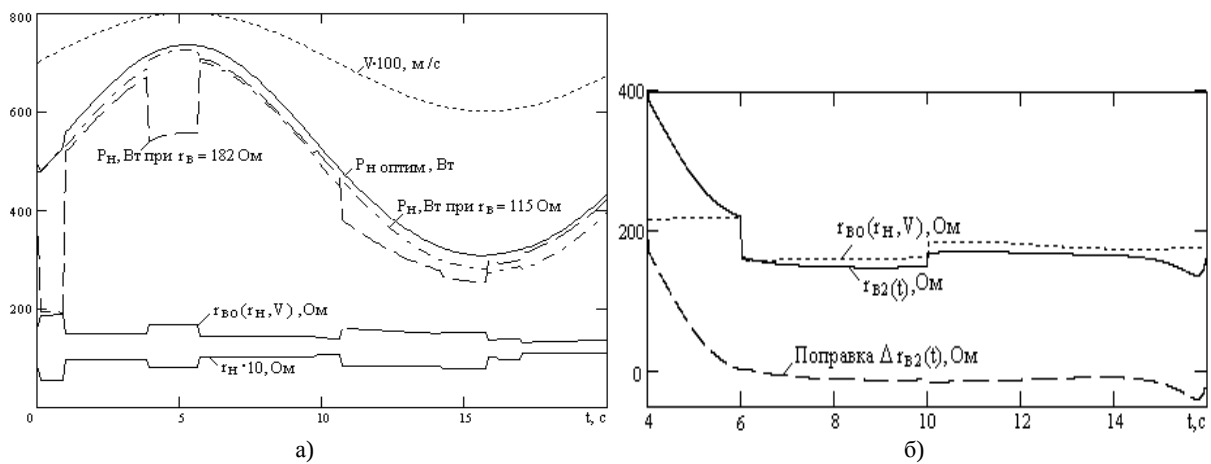


Рисунок 3 – Оптимальные режимы ВЭУ:

а) статические режимы; б) оптимальное сопротивление возбуждения в динамическом режиме

Обсуждение результатов. На рисунке 3, б на интервале от 4 с до 16 с изображены графики начального приближения сопротивления возбуждения $r_{e0}(t) = r_e(r_h, V)$ по (5), поправки $\Delta r_{e2}(t)$ и сопротивления $r_{e2}(t)$, полученного после двух циклов оптимизации. Количество энергии, выработанное генератором при $r_{e0}(t) = r_e(r_h, V)$, составило $2,34 \cdot 10^{-3}$ кВт·час, а при $r_{e2}(t)$ – $2,64 \cdot 10^{-3}$ кВт·час. Таким образом, оптимальное управление сопротивлением возбуждения с учетом динамики ВЭУ привело к увеличению вырабатываемой электроэнергии.

Для оптимизации режима ВЭУ на длительном промежутке времени задачу определения оптимального сопротивления $r_e(t)$ по (7) следует решать периодически на небольших интервалах

времени, прогнозируя изменения скорости ветра и сопротивления нагрузки. Отметим, что увеличение количества энергии при оптимальном сопротивлении $r_g(t)$ составляет 10...12 % по сравнению с первоначальным значением, полученным при начальном сопротивлении $r_{g0}(t) = r_g(r_n, V)$. Так как определение оптимального сопротивления $r_g(t)$ связано с вычислительными затратами, а выигрыш невелик, то при невысокой инерционности ВЭУ и не слишком быстро изменяющейся скорости ветра и нагрузке можно ограничиться лишь статической оптимизацией $r_g(r_n, V)$.

Выводы. В случае сравнительно медленного изменения скорости ветра и нагрузки сопротивление возбуждения, обеспечивающее максимальную мощность генератора, определено функцией скорости ветра и нагрузки. При необходимости учета инерционности ВЭУ в случае быстрых изменений скорости ветра и сопротивления нагрузки определение оптимального сопротивления возбуждения требует прогнозирования скорости ветра и нагрузки и увеличения вычислительных затрат. Проведенные расчеты показали, что выработка электроэнергии с учетом динамики ВЭУ при оптимальном сопротивлении возбуждения на 10...12 % больше, чем при сопротивлении $r_{g0}(t) = r_g(r_n, V)$, определенном для статического режима.

Перспективными направлениями исследования могли бы быть алгоритмы оперативного прогнозирования скорости ветра и нагрузки, а также импульсные системы реализации оптимального сопротивления возбуждения.

Библіографічний список використаної літератури

1. Олейников А.М. Моделирование динамики режима автономной ВЭУ малой мощности / А.М. Олейников, Ю.В. Матвеев, Л.Н. Канов, Е.И. Зарицкая // Праці ІЕД НАНУ: зб. наук. праць. — 2009. — Вип. 24. — С. 11–18.
2. Лукутин Б.В. Энергоэффективные системы генерирования электроэнергии для автономных ветроэлектростанций / Б.В. Лукутин, О.Б. Лукутин, Е.Б. Шандарова // Известия Томского политехнического университета. Сер. Технические науки. — 2005. — Т. 308. — № 7. — С. 203–206.
3. Мустафаев Р.И. Сравнительная оценка эффективности функционирования современных ветроэлектрических установок / Р.И. Мустафаев, Л.Г. Гасанова // Известия вузов. Сер. Электромеханика. — 2008. — № 4. — С. 57–60.
4. Буяльский В.И. Оптимизация системы автоматического управления ветроэнергетической установкой USW56–100 / В.И. Буяльский // Оптимізація виробничих процесів: зб. наук. пр. — Севастополь, 2010. — Вип. 12. — С. 164–167.
5. Афанасьев В.Н. Математическая теория конструирования систем управления / В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов. — М.: Высш. шк., 1998. — 574 с.

Поступила в редакцию 30.03.2011 г.

Канов Л.М. Оптимізація режиму вітроелектричної установки постійного струму за максимумом потужності

Визначено закон змінення опору збудження генератора постійного струму вітроелектричної установки з метою отримання максимальної потужності в статичному й динамічному режимі в умовах швидкості вітру й опору навантаження, що змінюється.

Ключові слова: генератор постійної напруги, максимальна потужність, швидкість вітру, змінне навантаження, вітроелектрична установка.

Kanov L.N. Mode optimization for the wind power installation of direct current by the power maximum

The law of change of excitation resistance for a generator of direct current in a wind power installation is defined with the purpose of obtaining the maximum power in the static and dynamic modes under the conditions of changing speed of wind and resistance of loading.

Keywords: generator of direct current, maximum power, speed of wind, variable loading, wind power installation.