

УДК 621.3.049

Л.Н. Канов, канд. техн. наук, доцент,**Ю.В. Матвеев, канд. техн. наук, доцент***Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***Е.И. Зарицкая***Одесский национальный морской университет**E-mail: office@osmu.odessa.ua***УСТОЙЧИВОСТЬ РЕЖИМОВ АВТОНОМНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
УСТАНОВКИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

В координатах «скорость ветра – сопротивление нагрузки» определены области устойчивой работы ветроэлектрической установки малой мощности с генератором постоянного тока. Исследованы процессы изменения частоты вращения установки при плавном изменении скорости ветра и сопротивления нагрузки.

Ключевые слова: автономная ветроэлектрическая установка, область устойчивости режима, поверхность решения, скорость ветра, сопротивление нагрузки, частота вращения, скачок скорости, генератор постоянного напряжения.

Введение. Ветроэлектроэнергетика является приоритетной составляющей в комплексе развития нетрадиционных источников электроэнергии Украины и представляется особенно актуальной для удаленных районов, где автономные ветроэлектрические установки (ВЭУ) малой мощности находят все более широкое применение, при этом их отличительной особенностью является работа в условиях изменяющейся скорости ветра и нагрузки генератора. В подобных ВЭУ обычно отсутствуют мультипликаторы и механические стабилизаторы частоты вращения, а для питания потребителей напряжением промышленной частоты используются инверторы.

Работа таких ВЭУ сопровождается резкими изменениями частоты вращения уже при небольших изменениях скорости ветра или сопротивления нагрузки [1, 2], что приводит к возникновению бросков момента и отрицательно сказывается на оборудовании ВЭУ. В [3] описана гибридная ветро-солнечная энергетическая установка, которая не в полной мере обеспечивает преодоление отмеченных особенностей работы ВЭУ, а в [4] на основании сопоставления мощностных характеристик генератора и ветроколеса рекомендуется регулировать генераторы по цепи возбуждения, что мало пригодно для автономной ВЭУ небольшой мощности. В то же время, следует отметить, что в проводимых у нас исследованиях все еще мало внимания уделяется нестационарным динамическим режимам ВЭУ малой мощности, характеризующимся изменением скорости ветра и нагрузки.

Постановка задачи. На основании математического описания ветроколеса и генератора решается задача определения областей устойчивой работы автономной ВЭУ малой мощности с генератором постоянного тока без механических стабилизаторов частоты вращения в пространстве параметров скорость ветра – сопротивление нагрузки.

Содержание исследования. Ведущим элементом ВЭУ является ветроколесо, воспринимающее энергию ветра и передающее ее генератору. Ограничимся рассмотрением генератора постоянного тока с неизменным магнитным потоком, у которого при пренебрежении электрической инерционностью генератора ЭДС E пропорциональна частоте вращения Ω : $E = C_e \Omega \Phi = C_e \Phi \Omega$, где C_e и $C_e \Phi$ – постоянные.

Электромагнитный момент генератора $M_z = C_M \Phi I$ пропорционален току якоря $I = \frac{C_e \Phi \Omega}{R + R_H}$ и,

таким образом, представляется зависимостью $M_z = \frac{C_M C_e \Phi \Omega}{R + R_H}$, где R, R_H – сопротивления генератора и нагрузки.

Кроме электромагнитного момента на валу действует момент трения, который полагаем пропорциональным частоте вращения $M_{TP} = k_{TP} \Omega$, поэтому уравнение механического равновесия моментов ВЭУ для динамического режима имеет вид:

$$M_{BK} = \frac{C_M C_e \Phi \Omega}{R + R_H} + k_{TP} \Omega \pm J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (1)$$

где J – момент инерции вращающихся масс. Момент на валу ветроколеса M_{BK} определяется по

соотношению $M_{BK} = M_{уд. BK}(z) \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16}$ [1], где $M_{уд. BK}(z)$ – удельный вращающий момент; $z = \frac{D\Omega}{2V}$ – коэффициент быстроходности; D – диаметр ветроколеса; ρ – плотность воздуха; V – скорость ветра.

Кривая удельного момента для трехлопастного колеса изображена на рисунке 1, а сплошной линией [1]. Для аналитического исследования зависимость $M_{уд. BK}(z)$ аппроксимирована уравнением [5]

$$M_{уд. BK}(z) = k_1 e^{-k_2(z-z_0)^2} + k_3 e^{-k_4 z} + k_5 \sin z - k_6 z^5,$$

где $z_0 = 4,5$; $k_1 - k_6$ – коэффициенты аппроксимации. На рисунке 1, а аппроксимированная кривая показана штриховой линией при следующих значениях коэффициентов: $k_1 = 0,09$; $k_2 = 0,35$; $k_3 = 0,006$; $k_4 = 0,03$; $k_5 = 0,009$; $k_6 = 3 \cdot 10^{-7}$. Как видно, результаты аппроксимации в достаточной степени отражают исходную кривую, особенно с учетом того, что эта кривая обычно сама представляется в усредненном виде [1].

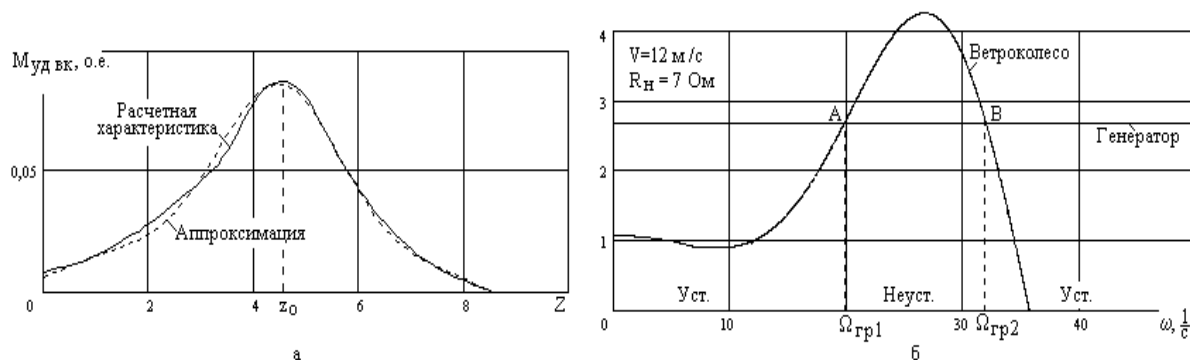


Рисунок 1 – Характеристики ВЭУ: а) характеристика ветроколеса; б) определение граничных точек устойчивой области

Для установившегося режима работы ВЭУ справедливо уравнение

$$M_{BK} = k_{TP} \Omega + \frac{C_M C_e \Phi \Omega}{R + R_H}, \quad (2)$$

Определим в пространстве параметров V , R_H и Ω границы области устойчивых частот вращения ВЭУ. Крайние точки удовлетворяют уравнению

$$k_{TP} + \frac{C_M C_e \Phi}{R + R_H} = \frac{\partial M_{BK}}{\partial \Omega}. \quad (3)$$

В свою очередь

$$\frac{\partial M_{BK}}{\partial \Omega} = \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16} \frac{\partial M_{уд. BK}}{\partial \Omega},$$

где

$$\frac{\partial M_{уд. BK}(z)}{\partial \Omega} = \left[-k_1 k_2 (z - z_0) e^{-k_2 (z - z_0)^2} - k_3 k_4 e^{-k_4 z} + k_5 \cos z - 5k_6 z^4 \right] \frac{\partial z}{\partial \Omega}, \quad \text{а} \quad \frac{\partial z}{\partial \Omega} = \frac{D}{2V}. \quad (4)$$

Графическое решение уравнения (3) представлено на рисунке 1, б. Левая часть этой зависимости является прямой, параллельной оси абсцисс, а правая часть построена по выражениям (4) для ВЭУ малой мощности, имеющей параметры: $C = 4,39$; $R = 0,2$ Ом; $k_{TP} = 0,01$; $D = 3$ м. Точки $\Omega_{гр.1}$ и $\Omega_{гр.2}$ границы области устойчивости определяются пересечением линий, соответствующих левой и правой частям уравнения (4). Диапазон неустойчивых частот вращения ВЭУ заключен между этими граничными точками.

На рисунке 2, а поверхность граничных точек изображена в трехмерном пространстве, как неоднозначная функция аргументов V и R_H . Поверхность стационарных скоростей ВЭУ Ω (по

уравнению (2)), как неоднозначная функция тех же аргументов, приведена на рисунке 2, б. Как видно, решения уравнения (2) образуют складчатую поверхность, нижняя область 1 которой соответствует малым значениям V , R_H и частотам вращения ВЭУ; средняя область 2 – имеет обратную зависимость частоты вращения от скорости ветра; высокая область 3 – соответствует большим значениям V , R_H и большим частотам вращения.

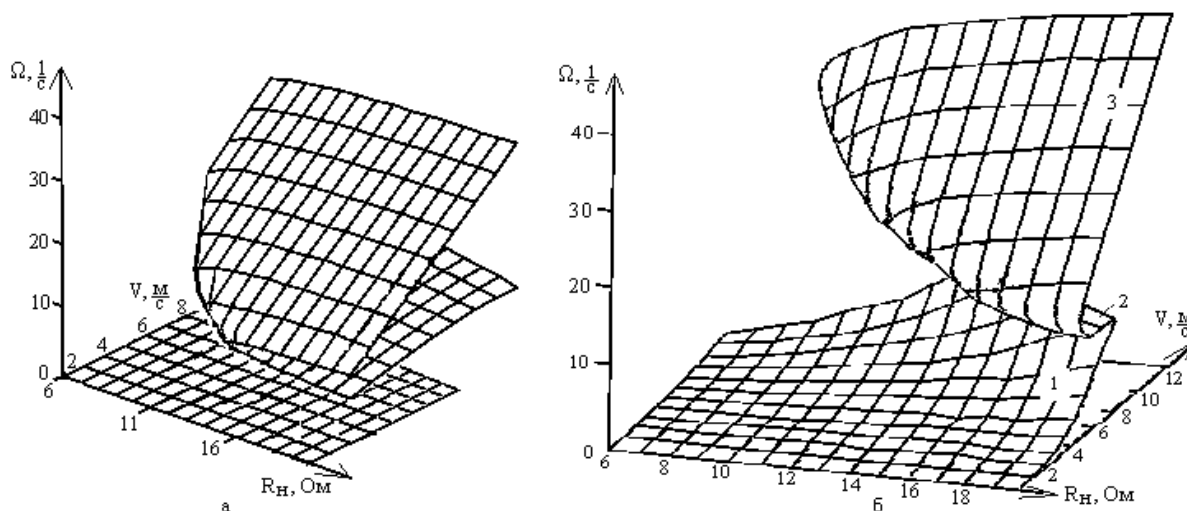


Рисунок 2 – Графическое представление режима ВЭУ: а) область устойчивости; б) поверхность решения

Если совместить поверхности решения на рисунке 2, б и граничных точек устойчивости (рисунок 2, а), то окажется, что часть поверхности решения, соответствующая области 2, заключена внутри области неустойчивости, охватываемой граничной поверхностью. Следовательно, частоты вращения ВЭУ, соответствующие точкам области 2 поверхности решения (рисунок 2, б), характеризуют неустойчивые режимы ВЭУ. При взгляде сверху области поверхности решения перекрываются, что отражает неоднозначный характер решения уравнения (2). Проекциями складки поверхности на плоскость V , R_H являются линии a и b (рисунок 3, а), при этом линия a отделяет области 1 и 2, а линия b – области 2 и 3. На рисунке 3, б изображено сечение поверхности решения (рисунок 2, б) плоскостью, параллельной координатной плоскости $(\Omega, 0, R_H)$ и соответствующей скорости ветра 12 м/с; линии 1, 2, 3 соответствуют сечениям областей 1, 2, 3 поверхности решения.

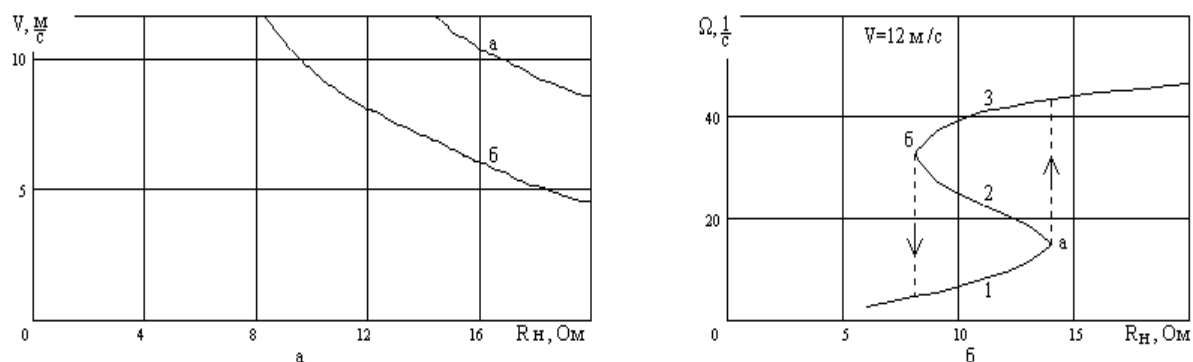


Рисунок 3 – Поверхность решения: а) граничные линии складки; б) сечение плоскостью

Анализ результатов исследования. Поверхности решения и граничной области, а также кривые на рисунке 3 позволяют исследовать поведение ВЭУ при практически реальных изменениях скорости ветра и сопротивления нагрузки. При скорости ветра 12 м/с и сопротивлении $R_H = 7$ Ом частота вращения генератора составляет $3,6 \text{ с}^{-1}$, т.е. рабочая точка ВЭУ находится в области 1 (рисунок 3, б). При постепенном увеличении сопротивления рабочая точка перемещается по горизонтальной линии (рисунок 3, б) вправо, и частота вращения генератора плавно растет. В момент достижения значения $R_H = 14$ Ом рабочая точка скачком перейдет от значения $14,34 \text{ с}^{-1}$ до значения $43,47 \text{ с}^{-1}$ в области 3. Этот переход сопровождается броском момента на ВЭУ при неизменной скорости ветра 12 м/с. На рисунке 3, б этот скачок происходит вверх из точки a , соответствующей линии a (рисунок 3, а).

Если, далее, сопротивление нагрузки уменьшается при той же скорости ветра, частота вращения ВЭУ медленно уменьшается и при $R_H = 8$ Ом скачком снижается от величины $32,46 \text{ с}^{-1}$ до $4,47 \text{ с}^{-1}$. На рисунке 3,б этому скачку соответствует пунктирная линия из точки б.

Подобные переходы могут иметь место и при плавном изменении скорости ветра и неизменном сопротивлении нагрузки или при одновременном изменении этих параметров, и ни при каких изменениях V , R_H частота вращения ВЭУ не достигает значений в области 2 неустойчивых режимов (внутренней поверхности складки). Таким образом, скачки частоты вращения ВЭУ объясняются переходами точки решения уравнения (2) с одной устойчивой области поверхности решения на другую, минуя область 2 неустойчивых решений.

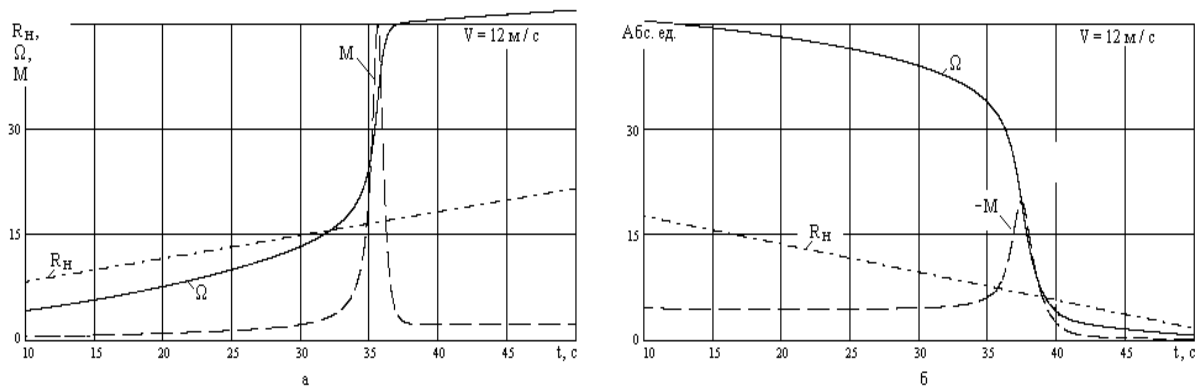


Рисунок 4 – Переходные процессы ВЭУ: а) разгон при увеличении сопротивления нагрузки; б) торможение при снижении сопротивления нагрузки

На рисунке 4,а представлен график зависимости частоты вращения ВЭУ от времени при увеличении R_H и неизменной скорости ветра 12 м/с, рассчитанный численным решением уравнения (1). Как видно, при достижении R_H значения 14 Ом происходит резкое повышение частоты вращения генератора, скорость которого ограничена лишь механическим моментом инерции ВЭУ; процесс сопровождается резким увеличением динамического момента. На рисунке 4,б изображены аналогичные графики переходного процесса при плавном уменьшении сопротивления. Обратный скачкообразный переход решения из области высоких значений частоты вращения в область низких происходит при сопротивлении нагрузки 8 Ом. Скачок частоты вращения сопровождается ударным тормозным моментом на валу ВЭУ. Аналогичный вид имеют графики переходных процессов при плавном изменении скорости ветра и неизменном сопротивлении нагрузки.

Выводы

В статье показано, что частота вращения ВЭУ является неоднозначной функцией скорости ветра и сопротивления нагрузки и образует две области, соответствующие устойчивым высоким и низким значениям, и область неустойчивых значений. Получила объяснение неустойчивая работа ВЭУ: при плавном изменении скорости ветра и сопротивления нагрузки происходят резкие скачки частоты вращения ВЭУ, когда решение уравнения ВЭУ переходит из одной устойчивой области в другую.

Перспективным направлением исследования в этой области является выявление аналогичных закономерностей ВЭУ с генераторами других типов, а также разработка электронной системы управления, которая удерживала бы рабочую точку ВЭУ в устойчивой области высоких частот вращения при изменении скорости ветра и сопротивления нагрузки.

Библиографический список использованной литературы

1. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 2. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. — Харьков. нац. аэрокосм. ун-т (ХАИ). — Севастополь: СевНТУ, 2004. — 519 с.
2. Кобут В. Лучшее письмо номера / В. Кобут // Популярная механика. — 2010. — № 2. — С. 10.
3. Дзензерский В.А. Принципы построения гибридных ветросолнечных электроустановок / В.А. Дзензерский, Н.Е. Житник, С.В. Плаксин, Л.М. Погорелая // Электротехника та електроенергетика. — 2007. — № 1. — С. 67–72.
4. 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.

5. Олейников А.М. Моделирование динамического режима автономной ветроэлектрической установки малой мощности / А.М. Олейников, Ю.В. Матвеев, Л.Н. Канов, Е.И. Зарицкая // *Праці Інституту електродинаміки НАНУ: зб. наук. пр.* — К., 2009. — Вип. 24. — С. 11–18.

Поступила в редакцію 05.05.2010 г.

Канов Л.М., Матвеев Ю.В., Зарицка Е.І. Стійкість режимів автономної вітроелектричної установки малої потужності

У координатах «швидкість вітру – опір навантаження» визначені зоні стійкої роботи вітроелектричної установки малої потужності з генератором постійного струму. Досліджені процеси змінення частоти обертання установки під час плавної зміни швидкості вітру і опору навантаження.

Ключові слова: автономна вітроелектрична установка, зона стійкості режиму, поверхня рішення, швидкість вітру, опір навантаження, частота обертання, стрибок швидкості, генератор постійної напруги.

Kanov L.N., Matveev Y.V., Zaritskaya E.I. Stability of the modes of the autonomous wind-electrical installation of low power

In the coordinates «speed of wind – resistance of loading» the areas of steady work of the wind-electrical installation are determined with the generator of direct voltage of low power. The processes of the rotation frequency change for the installation at the smooth change of the speed of wind and resistance of loading are analyzed.

Keywords: autonomous wind-electrical setting, area of stability of the mode, surface of decision, speed of wind, resistance of loading, frequency of rotation, sharp jump of speed, generator of permanent voltage.