

УДК 62-83-52:621.311.24

Д.Г. Алексеевский, канд. техн. наук

Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОМЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ВЭУ****Д.Г. Алексеевський**, канд. техн. наук

Запорізька державна інженерна академія, м. Запоріжжя, Україна

**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МОМЕНТНОГО УПРАВЛІННЯ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЮ СИСТЕМОЮ ВЕУ****D.G. Alekseevskiy**, Candidate of Technical Sciences

Zaporozhe State Engineering Academy, Zaporozhe, Ukraine

**ANALYSIS OF TORQUE CONTROL EFFECTIVENESS FOR WPP
ELECTROMECHANICAL SYSTEM**

Рассматриваются особенности работы электромеханической системы ВЭУ с постоянным углом установки лопастей при переменном характере ветрового потока. Предложена обобщенная математическая модель на базе системы приведенных параметров как инструмент исследования эффективности алгоритмов управления. Показаны результаты использования данной модели для анализа эффективности известных алгоритмов управления моментом генератора. Обоснована необходимость применения прогноза для построения оптимального управления моментом генератора ВЭУ.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, алгоритм управления, модель.

Розглянуто особливості роботи електромеханічної системи ВЕУ з постійним кутом встановлення лопатей при змінному характері вітрового потоку. Запропонована узагальнена математична модель на базі системи наведених параметрів як інструмент дослідження ефективності алгоритмів управління. Показані результати використання цієї моделі для аналізу ефективності відомих алгоритмів управління моментом генератора. Обґрунтована необхідність використання прогнозу для оптимального управління моментом генератора ВЕУ.

Ключові слова: вітроенергетична установка, алгоритм управління, модель.

The working features of the electromechanics system, which is Wind Power Generator (WPG) with the constant setting of blades corner and with variable character of wind stream, are discussed. The generalized mathematical model that is based on the system of the reduced parameters is proposed as an instrument for research of management algorithms efficiency. The results of this model using for efficiency analysis of the known generator torque control algorithms are shown. The necessity of prognosis control for creation WPG with optimal torque management is grounded.

Key words: wind power generator, the control algorithm, model.

Постановка проблемы. Электромеханическая система ВЭУ при эксплуатации находится под воздействием ветрового потока, значение скорости которого изменяется во времени. Характер его изменения оказывает существенное влияние на величину суммарной выработки электроэнергии. Это требует разработки совершенных, с точки зрения выработки, алгоритмов управления электромеханической системой ВЭУ не только в статическом, но и в динамическом режиме.

Анализ основных исследований и публикаций. В работе [1] был рассмотрен алгоритм управления электромеханической системой ВЭУ в течение электромеханического переходного процесса, вызванного изменением скорости ветрового потока. Разгон электромеханической системы при порыве ветра производился при заданном динамическом моменте. Выбор его величины обусловлен характером изменения величины ветрового потока и инерционностью электромеханической системы ВЭУ.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Открытым вопросом остается разработка алгоритма выбора величины рассмотренного динамического момента, исходя из параметров самой системы генерирования и характера ветрового потока.

Цель статьи. Главной целью этой работы является определение характера влияния изменений ветрового потока на величину выработки ветроэлектрогенерирующей системы при различных значения динамического момента в рамках предложенного в [1] алгоритма управления моментом генератора.

Материал и результаты исследования. В качестве инструмента исследования в данной работе предложена модель обобщенной электромеханической системы ВЭУ, построенной на основе системы базисных величин.

В основе модели обобщенной электромеханической системы ВЭУ лежит следующая система базисных величин:

$\omega^{ном}$ – номинальная скорость вращения ветротурбины;

$M_{БК}^{ном}$ – номинальный момент ветротурбины;

Z_{opt} – оптимальная быстроходность, соответствующая $C_p = C_p^{max}$;

C_p^{max} – максимальное значение коэффициента преобразования энергии ветрового потока;

$V_b^{ном}$ – номинальное значение скорости ветрового потока;

$P_{БК}^{ном}$ – номинальное значение мощности на валу ветротурбины;

$t_{баз}$ – базисное время системы – это время разгона вращающихся масс электромеханической системы с моментом инерции J из неподвижного состояния до номинальной скорости при действии на систему только номинального момента ветротурбины:

$$t_{баз} = \frac{\omega_{ном} \cdot J}{M_{БК}^{ном}}. \quad (1)$$

В соответствии с системой базисных величин может быть сформирована система относительных величин:

– относительная скорость вращения ветротурбины:

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega^{ном}}, \quad (2)$$

где ω – фактическая скорость вращения ветротурбины;

– относительный момент ветротурбины:

$$M_{БК}^* = \frac{M_{БК}}{M_{БК}^{ном}}, \quad (3)$$

где $M_{БК}$ – фактический момент ветротурбины;

– относительная быстроходность ветротурбины:

$$Z^* = \frac{Z}{Z_{opt}}, \quad (4)$$

где Z – фактическая быстроходность ветротурбины;

– относительная быстроходность ветротурбины при холостом ходе:

$$Z_{xx}^* = \frac{Z_{xx}}{Z_{opt}}, \quad (5)$$

где Z_{xx} – быстроходность ветротурбины в режиме холостого хода;

– относительное значение коэффициента преобразования энергии ветрового потока:

$$C_p^* = \frac{C_p}{C_p^{max}}, \quad (6)$$

где C_p – фактическое значение коэффициента преобразования энергии ветрового потока;

– относительное значение скорости ветрового потока:

$$V_b^* = \frac{V_b}{V_b^{ном}}, \quad (7)$$

где V_b – фактическое значение скорости ветрового потока;

– относительное значение мощности на валу ветроколеса:

$$P_{BK}^* = \frac{P_{BK}}{P_{BK}^{ном}}, \quad (8)$$

где P_{BK} – фактическое значение мощности на валу ветроколеса;

– относительное время:

$$t^* = \frac{t}{t_{баз}}, \quad (9)$$

где t – фактическое время.

Представление параметров электромеханической системы ВЭУ в относительном базисе позволяет значительно упростить ее анализ. В частности, угловая скорость при которой ветротурбина находится в оптимальном режиме отбора мощности ($C_p = C_p^{max}$) в относительных единицах, определяется как:

$$\omega_{opt}^* = V_b^*. \quad (10)$$

Действительно, оптимальная скорость вращения вала ветротурбины соответствует оптимальной быстроходности:

$$\omega_{opt} = \frac{Z_{opt} \cdot V_b}{R_{BK}}. \quad (11)$$

Оптимальная быстроходность может быть определена из номинального режима:

$$Z_{opt} = \frac{\omega_{ном} \cdot R_{BK}}{V_b^{ном}}. \quad (12)$$

После подстановки (12) в (11) и преобразования получаем:

$$\frac{\omega}{\omega^{ном}} = \frac{V_b}{V_b^{ном}}. \quad (13)$$

Таким образом, с учетом формул (2) и (7) подтверждается выражение (10).

Зависимость коэффициента преобразования от быстроходности в относительных единицах $C_p^*(Z^*)$ приведена на рисунке 1.

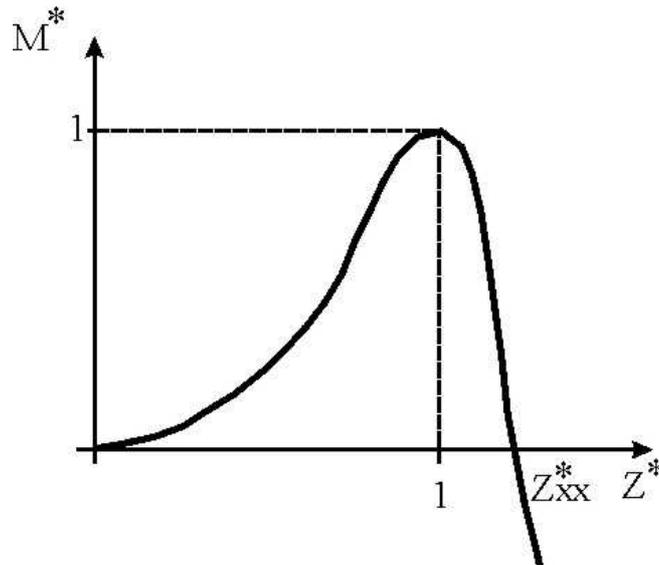


Рис. 1. График зависимости $C_p^*(Z^*)$

Зависимость $C_p^*(Z^*)$ может быть представлена в полиномиальном виде:

$$C_p^*(Z^*) = \sum_{i=1}^n a_i \cdot Z^{*i}, \quad (14)$$

где a_i ($i = 1 \dots n$) – коэффициенты аппроксимации полинома n -й степени.

В соответствии с (6) максимальная эффективность ветротурбины:

$$C_p^{*\max} = 1. \quad (15)$$

В соответствии с выражениями (2), (3) и (8) момент на валу ветротурбины может быть определен через относительные мощность и угловую скорость на валу ветротурбины:

$$M_{BK}^* = \frac{M_{BK}}{M_{BK}^{ном}} = \frac{P_{BK} \cdot \omega^{ном}}{P_{BK}^{ном} \cdot \omega} = \frac{P_{BK}^*}{\omega^*}. \quad (16)$$

В свою очередь, мощность на валу ветротурбины в относительных единицах может быть определена через относительную скорость ветрового потока:

$$P_{BK}^* = \frac{P_{BK}}{P_{BK}^{ном}} = \frac{\rho \cdot S_{BK} \cdot V_b^3 \cdot C_p}{2 \cdot \rho \cdot S_{BK} \cdot V_b^{ном3} \cdot C_p^{max}} = \frac{V_b^3}{V_b^{ном3}} \cdot \frac{C_p}{C_p^{max}} = V_b^{*3} \cdot C_p^*, \quad (17)$$

где ρ – плотность воздуха;

S_{BK} – площадь, ометаемая ветроколесом.

Тогда в соответствии с (16) и (17) может быть определена механическая характеристика ветротурбины в относительных единицах:

$$M_{BK}^* = \frac{V_b^{*3} \cdot C_p^*(Z^*)}{\omega^*}. \quad (18)$$

В соответствии с выражениями (18), (10) и (15) может быть определено значение момента в режиме максимального отбора мощности ветрового потока в относительных единицах:

$$M_{BK_opt}^* = \frac{V_b^{*3} \cdot C_p^*(Z^*)}{\omega^*} \Bigg|_{\substack{C_p^*(Z^*) = C_p^{*\max} \\ \omega^* = \omega_{opt}^*}} = V_b^{*2}. \quad (19)$$

Быстроходность в относительных единицах может быть выражена через угловую скорость и скорость ветрового потока:

$$Z^* = \frac{\omega^*}{V_b^*}. \quad (20)$$

Уравнение движения электромеханической системы ВЭУ имеет вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{BK}(V_b, \omega) - M_G, \quad (21)$$

где M_G – момент генератора.

Обозначим левую часть уравнения (21) как динамический момент, действующий в системе:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (22)$$

Динамический момент, по аналогии с (3), в относительных единицах выразим как отношение фактического динамического момента к номинальному моменту ветротурбины:

$$M_d^* = \frac{M_d}{M_{BK}^{ном}}. \quad (23)$$

Подставим в формулу (22) выражение угловой скорости ω , времени t и динамического момента M_d используя формулы (2), (9) и (23) соответственно. После выноса констант за знак дифференциала и сокращений получим выражение для определения динамического момента системы:

$$M_d^* = \frac{d\omega^*}{dt^*}. \quad (24)$$

Момент генератора, по аналогии с (23), в относительных единицах выразим как отношение фактического момента генератора к номинальному моменту ветротурбины:

$$M_G^* = \frac{M_G}{M_{BK}^{ном}}. \quad (25)$$

Таким образом, на основании (18), (21), (24) и (25) уравнение движения электромеханической системы ВЭУ в относительных единицах примет вид:

$$\frac{d\omega^*}{dt^*} = M_{BK}^*(V_b^*, \omega^*) - M_G^*. \quad (26)$$

На основе полученных выражений может быть построена математическая модель электромеханической системы ВЭУ в относительном базисе. Укрупненная структурная схема модели приведена на рисунке 2.

Рассмотрим реализацию модели на примере алгоритма, рассмотренного в [1]. В целях наглядности демонстрации результатов примем следующие допущения.

1. Модель не учитывает инерционность формирователя момента.
2. Механические потери в системе включены в описание механической характеристики ветротурбины.
3. В качестве критерия эффективности алгоритма управления принимается относительная энергия на валу генератора W^* на интервале моделирования - T^* :

$$W^* = \int_0^{T^*} M_G^* \cdot \omega^* dt^*. \quad (27)$$

Результаты моделирования приведены на рисунке 3.

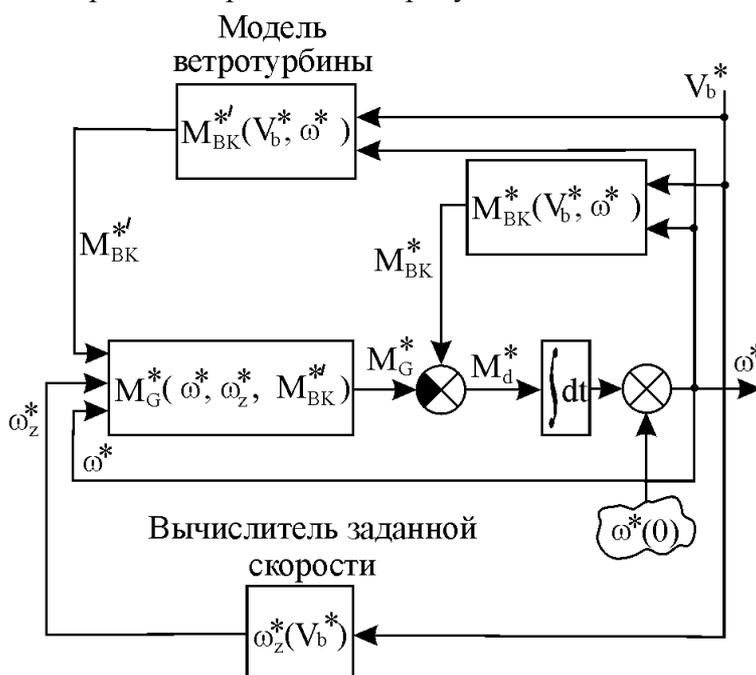


Рис. 2. Структурная схема модели электромеханической системы ВЭУ в относительном базисе

В качестве примера использования обобщенной модели рассмотрено поведение системы на участке разгона, при резком увеличении скорости ветрового потока на 20 % от номинала для четырех вариантов алгоритмов управления.

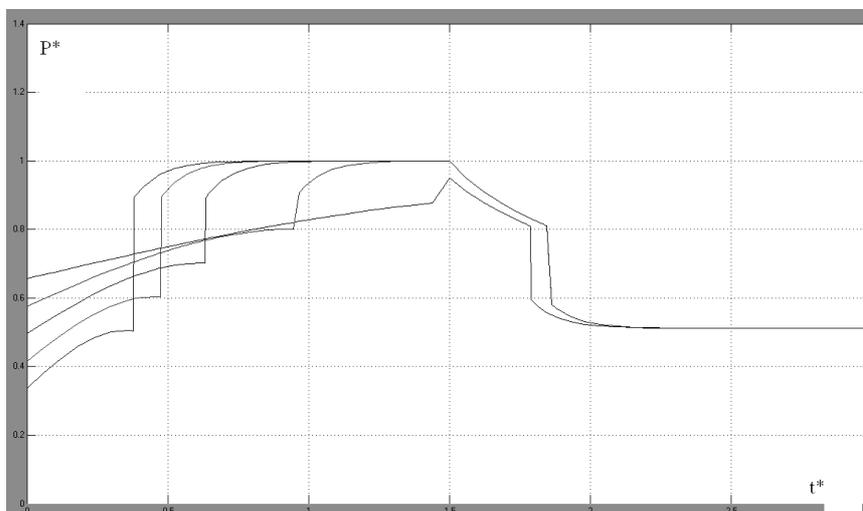


Рис. 3. Графики мгновенной мощности в режиме разгона при различных динамических моментах

Алгоритмы управления моментом отличаются величиной динамического момента или, что тоже самое, интенсивностью разгона до целевой скорости вращения. Рассмотренные варианты соответствуют величинам динамического момента $M_d^* = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ соответственно. Графики отражают изменение мгновенной мощности во времени, выраженное в относительных единицах. Энергия, передаваемая генератору, соответствует площади под кривой мощности.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что выработка электроэнергии будет зависеть от длительности порыва ветрового потока. На рисунке 4 показаны результаты определения выработки в зависимости от величины длительности порыва ветрового потока для различных вариантов алгоритмов управления моментом.

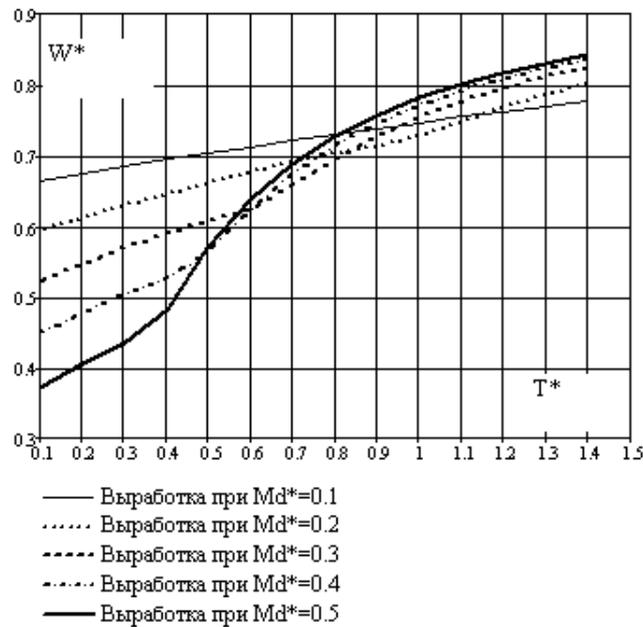


Рис. 4. Графіки залежності виробки від величини довготривалості порыва ветрового потоку для різних динамічних моментів

При малих відносних періодах порыва ветрового потоку переваги по виробці, при розгоні електромеханічної системи, мають алгоритми з малим динамічним моментом системи. І, навпаки, при більшій стабільності ветрового потоку більш ефективними виявляються алгоритми з більшими динамічними моментами і, відповідно, з більшою інтенсивністю розгона.

Таким чином, вибір варіанта управління залежить від значень величини ветрового потоку в наступні моменти часу, і, відповідно, оптимальне управління моментом повинно здійснюватися на основі прогнозу значень ветрового потоку.

Дані висновки косвенно підтверджуються результатами, отриманими в роботі [2], де були розглянуті питання ефективності застосування прогнозного алгоритму управління опором ланки збудження генератора постійного струму з точки зору підвищення виробки електроенергії ВЕУ. По думку автора, застосування алгоритму управління з урахуванням динаміки призводить до збільшення виробки на 10...12 %.

Висновки.

1. Розглянута система відносних величин дозволяє застосувати узагальнений підхід до аналізу і синтезу алгоритмів управління електромеханічної системою ветроенергетичної установки з жорсткою аеродинамікою.
2. При використанні системи відносних параметрів основні залежності і співвідношення, що описують електромеханічну систему, значно спрощуються.
3. Побудована математична модель системи дозволяє дослідити ефективність різних алгоритмів управління ВЕУ для широкого класу ветрогенеруючих систем, проводити їх порівняльний аналіз і визначати області їх ефективного застосування.
4. Оптимальний алгоритм управління моментом генератора ВЕУ з жорсткою аеродинамікою повинен будуватися на основі прогнозу значень величини ветрового потоку в наступні моменти часу.

Список використаних джерел

1. Алексеевский Д. Г. Динамічні траєкторії регулювання ветроелектрогенеруючої системи на основі сверхсинхронного вентилювального каскаду / Д. Г. Алексеевский, А. В. Перверзев, В. В. Семенов // Технічна електродинаміка. Тем. випуск "Силовa електроніка та енергоефективність". – 2002. – Ч. 2. – С. 14-17.

2. *Канов Л. Н.* Оптимизация режима ветроэнергетической установки постоянного тока по максимуму мощности / Л. Н. Канов // Оптимізація виробничих процесів : зб. наук. пр. Вип. 13. – Севастополь, 2011. – С. 91-94.