

УДК 621.311.24

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.02

## ДИНАМИКА МОМЕНТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЭУ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЕМ

Д. Г. АЛЕКСЕЕВСКИЙ, А. Г. АЛЕКСЕЕВ, О. О. ПАНКОВА\*, К. О. ТУРЫШЕВ,  
А. В. ТАРАНЕЦ, С. Л. ШМАЛИЙ

кафедра электронных систем, ЗГИА, г. Запорожье, УКРАИНА  
\* email: bloxa2007@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Целью работы является определение зависимостей величины кратковременных превышений мощности на выходе ветроэнергетической установки с аэродинамическим мультиплицированием, возникающих в ходе электромеханических переходных процессов при применении моментного способа управления, от характеристик электромеханической системы и ветрового потока. Решение поставленной задачи проводилось с использованием модельного эксперимента. В качестве инструмента исследования в работе была использована математическая модель электромеханической системы ветроэнергетической установки с аэродинамическим мультиплицированием. В результате получены временные зависимости отклика моделей в виде временных зависимостей мощности на выходе электрооборудования ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием и моментным управлением.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка; ветротурбина; математическая модель; аэродинамическое мультиплицирование; моментное управление ВЭУ.

## DYNAMICS OF TORQUE CONTROL OF THE ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF WIND POWER WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION

D. ALEKSEEVSKIY, O. ALYEKSYEYEV, O. PANKOVA, K. TURYSHEV, A. TARANEC,  
S. SHMALIJ

department of electronic system, ZSEA, Zaporizhzhya, UKRAINE

**ABSTRACT** The purpose is to determine the dependencies of the value of short-term power excesses at the output of a wind power plant with aerodynamic multiplication that arise during electromechanical transients when applying the moment control method, on the electromechanical system and the wind flow characteristics. The dependence of super nominal emissions of the output power of a wind power plant with aerodynamic multiplication and moment control on the characteristics of the wind flow was studied for the first time. The mathematical models synthesis method of multi-channel wind-generating complexes proposed by the authors was used in the paper. Solution of the problem was carried out with using a model experiment. The wind turbine with aerodynamic multiplication mathematical model synthesized using the technique proposed by the authors earlier. The input of the wind turbine mathematical model was feeding by the wind flow as a function of time, which included a trend component and a sinusoidal component with given parameters. During the model experiment, the models time dependences of the response, as a time dependences of the output power of the wind turbine electromechanical system obtained. The simulation results in the form of graphs and in the form of an approximating expression presented. The obtained results can be used for calculating the installed capacity of electrical equipment for wind power plants with aerodynamic multiplication and moment control, taking into account the overloads that arise during the electromechanical transient process.

**Keywords:** wind power plant; wind turbine; mathematical mode; aerodynamic multiplication; torque control of the wind power plant.

### Введение

Построение схемы ветроэнергетической установки с применением аэродинамического мультиплицирования является, на сегодня, достаточно перспективным альтернативным направлением развития ветроэнергетики [1,2]. Применение данной схемы позволяет избавиться от механического мультипликатора и использовать непосредственное соединение генератора и ветротурбины без увеличения массы и габаритов генератора. Также эта схема позволяет уменьшить

механическую нагрузку в основании лопастей ветротурбины.

Для обеспечения заданной диаграммы выработки электроэнергии в настоящее время в ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием применяется регулирование режимом работы системы при помощи поворота лопасти первичной ветротурбины [1,2]. Использование данного механизма особенно важно в режиме ограничения мощности системы, когда скорость ветрового потока превышает номинальное значение. Однако такой способ является не единственно возможным.

В работе [3] был описан способ моментного управления режимом работы электромеханической системой ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием. В соответствии с данным алгоритмом задание режима работы системы осуществляется не за счет изменения угла установки лопастей первичной ветротурбины, а путем задания момента генераторов на валу вторичных ветротурбин.

Данный способ управления является более сложным, с точки зрения закона регулирования. Однако он позволяет отказаться от механизмов поворота лопастей первичной ветротурбины, что, в свою очередь, снижает стоимость ветротурбины и повышает ее эксплуатационную надежность.

### Анализ последних достижений и литературы

Исследованию динамики электромеханических систем ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием было посвящено ряд работ последних лет [5-10]. В этих публикациях в основном рассматривались вопросы динамической устойчивости, возникновения пульсаций мощности на выходе ВЭУ с регулированием углом установки лопастей и выбора оптимальных рабочих режимов с точки зрения критерия максимальной выработки.

Однако, динамика переходных процессов в электромеханической системе ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием и моментным управлением до настоящего времени была изучена недостаточно.

### Постановка проблемы

При изменении значения скорости ветрового потока, в электромеханической системе ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием и моментным управлением, также как и у классической одноканальной ВЭУ с переменной скоростью вращения, могут возникать кратковременные превышения номинальной мощности генераторов. Их значения должны быть учтены при выборе установленной мощности электрооборудования электромеханической системы ВЭУ. Величина сверхноминальных выбросов мощности зависит как от свойств электромеханической системы ВЭУ, так и от характера изменения ветрового потока. Вследствие наличия многочисленных нелинейностей и высокого порядка системы эти зависимости имеют достаточно сложный характер. Тем не менее, они могут быть исследованы с помощью модельного эксперимента.

### Цель статьи

Таким образом, целью работы является определение зависимостей величины сверхноминальных выбросов мощности на выходе электромеханической системы ВЭУ с

аэродинамическим мультиплицированием и моментным управлением от характеристик ветрового потока.

### Материалы и результаты исследования

Визуальная модель ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием и моментным управлением приведена на рис. 1. Синтез модели произведен с помощью методики, приведенной в [4]. Она описывает электромеханическую систему ВЭУ, состоящую из первичной ветротурбины и трех вторичных каналов преобразования мощности. Каждый из каналов включает: вторичную ветротурбину, синхронный генератор, выпрямитель, индуктивный фильтр и импульсный преобразователь постоянного напряжения для регулирования тока генератора. Все три канала по выходу подключены на общее звено постоянного тока.

Алгоритм моментного управления ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием достаточно подробно описан в работе [3]. В приведенной модели его реализует блок, расположенный в нижней части рис. 1.

Результаты моделирования выходной мощности при переменном характере ветрового потока приведены на рис. 2. Так как данная модель описывает систему в относительных единицах, то ограничение производится на единичном уровне, который соответствует номинальной выходной мощности.

Для иллюстрации процесса ограничения мощности пунктирной линией на графике показана временная зависимость выходной мощности при отсутствии ограничения. Сплошной линией показана временная зависимость при реализации моментного управления. На графиках видны незначительные броски мощности.

При исследовании свойств системы были выявлены основные факторы, определяющие величину выбросов мощности. К ним относятся: трендовая составляющая ветрового потока, его амплитуда и период пульсации.

Характер влияния тренда показан на рис. 3, на котором представлены результаты моделирования мощности ВЭУ при пульсирующем ветровом потоке с линейно-возрастающим трендом.

Максимальные выбросы мощности наблюдаются в районе значения 1.1 от номинальной скорости ветрового потока. На это значение остальные факторы не оказывают существенного влияния. Поэтому исследование остальных факторов, в данной работе, проводилось при фиксации этого значения.

Значительное влияние на величину выбросов оказывают значения периода и амплитуды пульсации ветрового потока. Результаты модельных экспериментов приведены на рис. 4.

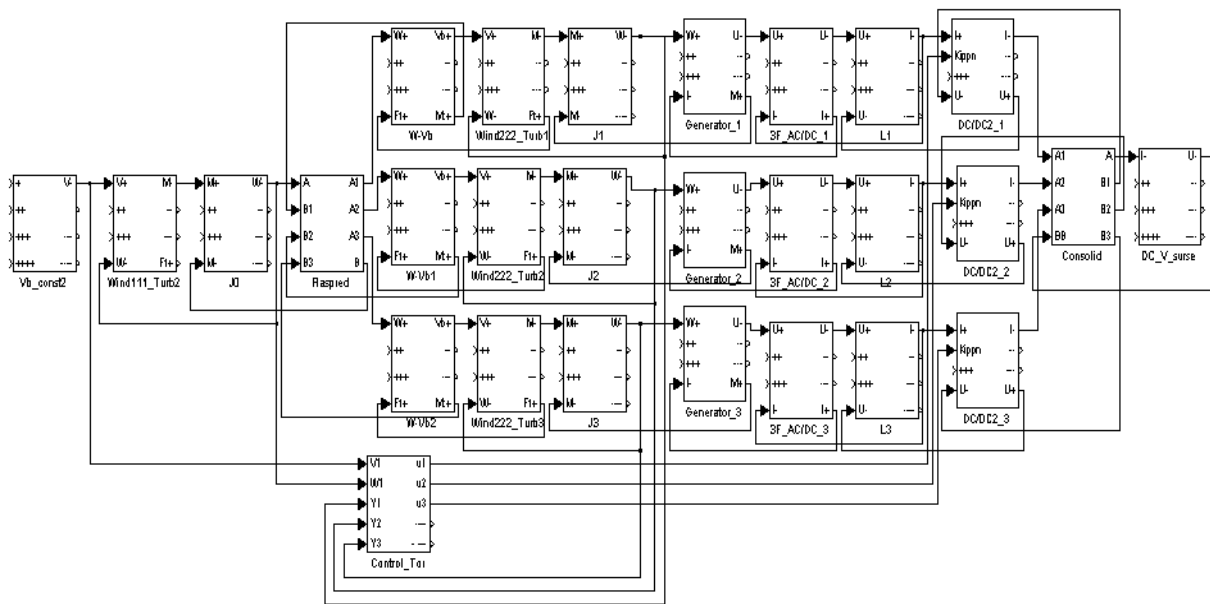


Рис. 1 – Визуально-блочная модель трехканальной ветроэнергетической установки с аэродинамическим мультиплицированием и моментным управлением

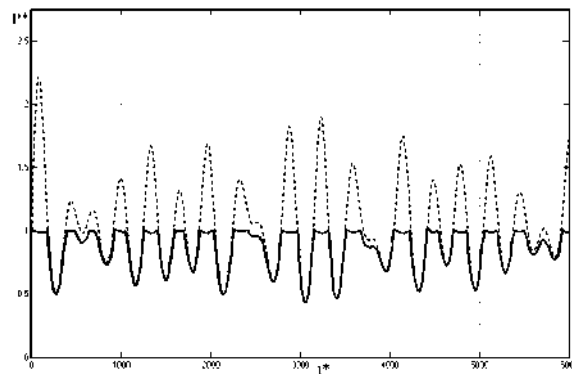


Рис. 2 – Результаты моделирования процесса ограничения мощности при моментном управлении режимом ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием

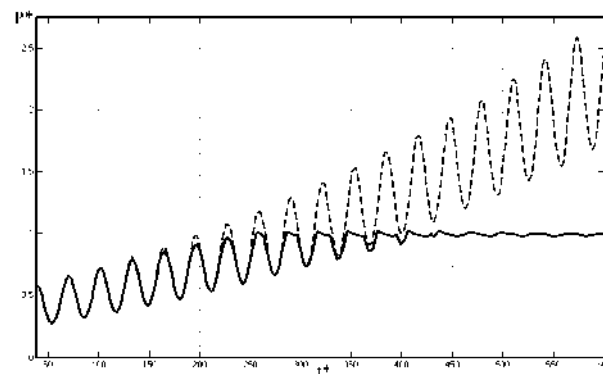


Рис. 3. – Результаты моделирования процесса ограничения мощности при моментном управлении режимом ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием, иллюстрирующие влияние трендовой составляющей скорости ветрового потока на величину выброса выходной мощности

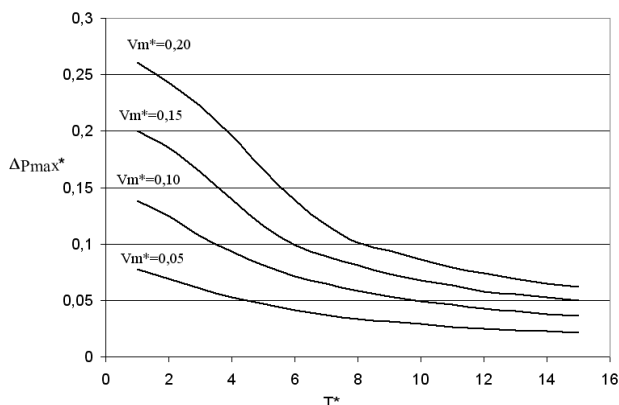


Рис. 4. – Зависимость величины значения выброса мощности от периода и амплитуды пульсации скорости ветрового потока в относительных единицах при моментном управлении режимом ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием

При увеличении частоты пульсации первичного ветрового потока выбросы мощности значительно увеличиваются. Существенный рост наблюдается в районе  $T^* \leq 8$ .

Как видно из графиков рисунка 4, зависимость выбросов мощности от амплитуды пульсации первичного ветрового потока  $V_m^*$ , имеет линейный характер влияния.

Зависимость, приведенная на рисунке 4 при среднем значении скорости первичного ветрового потока  $V_r = 1.1$ , может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$\Delta P^* = V_m^* (a_5 T^{*5} + a_4 T^{*4} + a_3 T^{*3} + a_2 T^{*2} + a_1 T^* + a_0) \quad (1)$$

где  $V_m^*$  - амплитуда пульсации первичного ветрового потока в относительных единицах,

$T^*$  - период пульсации первичного ветрового потока в относительных единицах,

$a_0 \dots a_5$  - коэффициенты аппроксимации,

$$(a_0 = 1.38, a_1 = 6.33 \cdot 10^{-2}, a_2 = -7.64 \cdot 10^{-2},$$

$$a_3 = 1.16 \cdot 10^{-2}, a_4 = -7.00 \cdot 10^{-4}, a_5 = 6.33 \cdot 10^{-5})$$

### Выводы

При порывистом характере ветрового потока на выходе ветроэнергетической установки с аэродинамическим мультиплицированием и моментном управлении возникают кратковременные превышения выходной мощности над номинальным значением. Величина превышения, главным образом, зависит от значения трендовой составляющей, амплитуды и частоты пульсации ветрового потока.

В результате модельного эксперимента в работе были получены математические выражения, описывающие эти зависимости. Они имеют вид семейства убывающих функций от периода пульсации

ветрового потока. Уровень каждой из функций семейства линейно зависит от амплитуды пульсации ветрового потока.

Полученные результаты могут быть использованы при расчетах установленной мощности электрооборудования ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.

### Список литературы

1. Голубенко, Н. С. Аэродинамические особенности безмультипликаторной турбогенераторной схемы ветроэлектрической установки большой мощности / Н. С. Голубенко // *Материалы IV международной конференции «Нетрадиционная энергетика в XXI веке»*. – Крым, Гурзуф. – 2003. – С. 125-132.
2. Голубенко, Н. С. Тенденции развития ветроэлектрических и безмультипликаторных ветровых установок / Н. С. Голубенко, С. И. Довголюк, А. М. Фельдман, В. А. Цыганов // *Нетрадиционная энергетика XXI века – материалы IV междунар. конф.* – Гурзуф: – 2003. – С. 68-74.
3. Алексієвський, Д. Г. Моментне управління ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням / Д. Г. Алексієвський // *Вісник КНУТД. Серія: Технічні науки*. – К.: КНУТД». – 2015. – № 5 (90). – С. 32-36.
4. Алексеевский, Д. Г. Визуальное моделирование многоканальных ветроэлектрогенерирующих систем / Д. Г. Алексеевский // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Спецвипуск: *Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика*. – Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – 2017. – № 27 (1249). – С. 332-336.
5. Голубенко, Н. С. Моделирование электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультипликатором в режиме стабилизации скорости ветровых турбин / Н. С. Голубенко, П. Д. Андриенко, И. Ю. Немудрый, Д. Г. Алексеевский // *Електротехніка і електроенергетика*. – 2011. – № 1. – С. 70-73.
6. Миргород, В. Ф. Управление ветроэнергетической установкой большой мощности по запасам аэродинамической устойчивости / В. Ф. Миргород // *Вестник двигателестроения*. – 2009. – № 3. – С. 67-70.

7. **Алексеевский, Д. Г.** Объяснение эффекта автооптимизации электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием / **Д. Г. Алексеевский**, // *Технічні науки та технології. Науковий журнал. Серія: Технічні науки.* – Чернігів: Чернігівський державний технологічний університет. – 2015. – № 1 (1). – С. 170–176.
8. **Миргород, В. Ф.** Моделирование динамических режимов ветроэнергетической установки большой мощности / **В. Ф. Миргород, Г. С. Ранченко, Н. С. Голубенко** // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* – 2006. – № 4(30). – С.96-99.
9. **Гвоздева, И. М.** Моделирование динамики ветроэнергетической установки большой мощности / **И. М. Гвоздева, В. Ф. Миргород, О. В. Глазева** // *Електротехнічні та комп'ютерні системи.* – 2010. – № 1. – С.53-57.
10. **Гвоздева, И. М.** Преобразование математической модели динамики ветроэнергетической установки к нормированной форме / **И. М. Гвоздева, В. Ф. Миргород, Е. В. Деренг, П. И. Полищук, О. В. Глазева** // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи.* – 2012. – № 1. – С. 456-458.
4. **Alekseevskij, D. G.** Vizual'noe modelirovanie mnogokanal'nyh vetrojelektrogenerirujushhih system [Visual modeling of multi-channel wind power generation systems]. *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut». Specvipusk: Problemi avtomatizovanogo elektroprivodu. Teorija i praktika.* – Harkiv: Nacional'nij tehničnij universitet «Harkivs'kij politehničnij institut». – 2017, 27(1249), 332-336.
5. **Golubenko, N. S.** Modelirovanie elektromehaničeskoj sistemy vetroenergetičeskoj ustanovki s aerodinamičeskim multiplikatorom v rezhyme stabilizacii skorosti vetrovyh turbin. [Modeling electromechanical system wind energy with aerodynamic multiplication in state wind turbine speed hole]. *El.tehnikna i el.energetika*, 2011, 1, 70-73.
6. **Mirgorod, V. F.** Upravleniye vetroenergetičeskoj ustanovkoj bolshoy moshchnosti po zapasam aerodinamičeskoj ustoychivosti. [Control wind energy installation great power by aerodynamic reserve stability] *Vestnik dvigatelestroyeniya*, 2009, 3, 67–70.
7. **Alekseevskiy, D. G.** Ob'iasnenie efekta avtooptimizatsii elektromekhanicheskoj sistemy VEU s aerodinamičeskim multiplitsirovanіem [Autooptimization effect definition of electromechanical wind power system with aerodynamic multiplication]. *Visnik KNUTD. Seriya: Tekhnichni nauki – Technical science*, 2015, 1, 170-176.

#### Bibliography (transliterated)

1. **Golubenko, N. S.** Aerodinamičeskie osobennosti bezmul'tiplikatornoj turbogeneratornoj shemy vetrojelektričeskoj ustanovki bol'shoj moshchnosti [Aerodynamic features of a multiplatform turbo generator circuit of a large-capacity wind power plant]. *Materialy IV mezhdunarodnoj konferencii «Netradicijonnaja jenergetika v NHI veke»*, 2003, 125-132.
2. **Golubenko, N. S., Dovgoljuk, S. I., Fel'dman, A. M., Cyganov, V. A.** Tendencii razvitiya vetrojelektričeskih i bezmul'tiplikatornyh vetrovyh ustanovok [Trends in the development of wind-powered and zero-multiplex wind farms]. *Netradicijonnaja jenergetika XXI veka – materialy IV mezhdun. Konf.*, 2003, 68-74.
3. **Alekseevskij, D. G.** Momentne upravlinnia VEU z aerodinamičnim multiplikuvanniam. [orque upravlinnya VEy s aerodinamičnim multiplikuvanniam]. *Visnik KNUTD. Seriya: Tekhnichni nauki.* – K.: KNUTD. [News KNUTD. Seriya: Tehnichni science - K.: KNUTD], 2015, 5 (90), 32-36.
8. **Mirgorod, V. F., Ranченко, G. S., Golubenko, N. S.** Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov vetrojenergetičeskoj ustanovki bol'shoj moshchnosti [Modeling of dynamic modes of high-power wind power plant]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologija*, 2006, 4(30), 96-99.
9. **Gvozdeva, I. M., Mirgorod, V. F., Glazeva, O. V.** Modelirovanie dinamiki vetrojenergetičeskoj ustanovki bol'shoj moshchnosti [Simulation of the dynamics of a wind power plant of high power]. *Elektrotehnični ta komp'juterni sistemi [Electrical and computer systems]*, 2010, 1, 53-57.
10. **Gvozdeva, I. M., Mirgorod, V. F., Dereng, E. V., Polishhuk, P. I., Glazeva, O. V.** Преобразование математической модели динамики ветроэнергетической установки к нормированной форме [Transformation of the mathematical model of the dynamics of the wind power plant to the normalized form]. *Elektromehanični i energozberigajuchi sistemi [Electromechanical and energy saving systems]*, 2012, 1, 456-458.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Алексеевский Дмитрий Геннадиевич** – кандидат технических наук, доцент, Запорожская государственная инженерная академия, доцент кафедры электронных систем, г. Запорожье, Украина; e-mail: lasian2017@ukr.net.

**Dmitriy Alekseevskiy** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Docent, Zaporizhzhia State Engineering Academy, Docent of Department of Electronic system, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: lasian2017@ukr.net.

**Алексеев Александр Геннадиевич** – кандидат технических наук, доцент, Запорожская государственная инженерная академия, доцент кафедры электронных систем, г. Запорожье, Украина; e-mail: alexejew2013@gmail.com.

**Aleksandr Alyeksyeyev** – candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Docent, Zaporizhzhia State Engineering Academy, Docent of Department of Electronic system, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: alexejew2013@gmail.com.

**Панкова Ольга Олеговна** – аспирант, Запорожская государственная инженерная академия, аспирант кафедры электронных систем, г. Запорожье, Украина; e-mail: bloxa2007@gmail.com.

**Olga Pankova** – postgraduate student, Zaporizhzhia State Engineering Academy, postgraduate student of Department of Electronic system, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail bloxa2007@gmail.com.

**Турьшев Константин Олегович** – ассистент, Запорожская государственная инженерная академия, ассистент кафедры электронных систем, г. Запорожье, Украина; e-mail: k\_turyshhev@ukr.net.

**Konstantin Turyshev** – assistant, Zaporizhzhia State Engineering Academy, assistant of Department of Electronic system, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: k\_turyshhev@ukr.net.

**Таранець Андрій Вікторович** – асистент, Запорізька державна інженерна академія, асистент кафедри електронних систем, г. Запоріжжя, Україна; e-mail: awtar@i.ua.

**Andrej Taranec** – assistant, Zaporizhzhia State Engineering Academy, assistant of Department of Electronic system, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail awtar@i.ua.

**Шмалій Сергій Леонидович** – кандидат технічних наук, доцент, Запорізька державна інженерна академія, доцент кафедри електронних систем, г. Запоріжжя, Україна; e-mail: shsl@i.ua.

**Sergej Shmalij** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Docent, Zaporizhzhia State Engineering Academy, Docent of Department of Electronic system, Zaporizhzhya, Ukraine, e-mail: shsl@i.ua.

*Пожалуйста, ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Алексеевский, Д. Г.** Динамика моментного управления электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием / **Д. Г. Алексеевский, А. Г. Алексеев, О. О. Панкова, К. О. Турьшев, А. В. Таранец, С. Л. Шмалій** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 13-18. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.02.

*Please cite this article as:*

**Alekseevskiy, D., Alyeksyeyev, O., Pankova, O., Turyshev, K., Taranec, A., Shmalij, S.** Dynamics of Torque Control of the Electromechanical System of Wind Power with Aerodynamic Multiplication. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **26** (1302), 1, 13-18, doi:10.20998/2413-4295.2018.26.02.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Алексієвський, Д. Г.** Динаміка моментного управління електромеханічною системою ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням / **Д. Г. Алексієвський, О. Г. Алексєєв, О. О. Пенкова, К. О. Турішев, А. В. Таранець, С. Л. Шмалій** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 1. – С. 13-18. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.02.

**АНОТАЦІЯ** Метою роботи є визначення залежностей величини короткочасних перевищень потужності на виході вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням, які виникають в ході електромеханічних перехідних процесів при застосуванні моментного способу управління, від характеристик електромеханічної системи і вітрового потоку. При вирішенні поставленого завдання було проведено за допомогою модельного експерименту. Як інструмент дослідження в роботі була використана математична модель електромеханічної системи вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням. В результаті отримані тимчасові залежності відгуку моделей у вигляді часових залежностей потужності на виході електромеханічної системи ВЕУ. Отримані залежності можуть бути використані при виборі параметрів електрообладнання ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням та моментним управлінням.

**Ключові слова:** вітроенергетична установка; віротурбіна; математична модель; аеродинамічне мультиплікування; моментне управління ВЕУ.

*Поступила (received) 20.07.2018*