

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА АВАРИЙНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрена необходимость присутствия аварийных тормозных систем в составе ветроэнергетических установок, которые требуется устанавливать в дополнение к основной системе управления мощностью. В качестве решения задачи предложено электромеханическое устройство с возможностью автоматического и ручного управления. За счет особой кинематической компоновки элементов и наличия волнового редуктора устройство способно передавать большой по значению тормозной момент при малых габаритных размерах приводных узлов. Особенностью устройства является возможность интеграции в существующие ветроэнергетические установки без существенных конструктивных изменений. Рассмотрена система управления электрическим приводом тормозного блока на основе функциональной схемы. Проведен анализ системы на предмет устойчивости с помощью критерия Михайлова путем построения годографа характеристического уравнения третьего порядка.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветроэнергетическая установка, аварийная система торможения, система управления, регулирование.

ВВЕДЕНИЕ

Принято считать, что углеводородные запасы по различным оценкам закончатся в некоторых странах-экспортерах уже в текущем столетии [1]. Конечно, это не заставляет всерьез задуматься о сырьевом кризисе современные поколения, однако по скептическим прогнозам аналитиков из корпорации Бритиш Петролеум российские нефтяные запасы могут иссякнуть в ближайшие 30 – 50 лет [2]. Кроме того, ситуация обвала цен на мировом топливном рынке, случившаяся в 2015 году и только усугубляющаяся в 2016, свидетельствует о том, что инвестиции в сырьевую энергетику могут быть весьма рискованными, а в последнее время и вовсе убыточными. И напротив, акции таких мультимиллиардных корпораций – производителей крупных ветровых турбин, как Vestas, Siemens, Nordex показывают неуклонный рост. Таким образом, уже сейчас стоит уделять достаточное внимание вопросам разработки альтернативных источников энергии, в особенности в России. Несомненно, за последнее десятилетие в стране произошли существенные позитивные изменения в области законодательной базы идеологических воззрений в отношении возобновляемой энергетики [3,4], но, тем не менее, наблюдается недостаток в научном и технологическом развитии «зеленого» направления.

Учитывая климатические условия основной части территории Российской Федерации, ветроэнергетика является одним из наиболее подходящих видов возобновляемых источников энергии [5]. Причем перспективно внедрять именно объекты малой ветровой генерации, поскольку на неэлектрифицированной территории находятся небольшие локальные поселения и образования, либо промышленные объекты, не требующие крупных мощностей.

Для преобразования кинетической энергии ветра в электрическую используют ветроэнергетические установки, которые, в свою очередь, делятся на два основных типа: вертикально-осевые и горизонтально-осевые [6]. Наибольшее распространение в мире получили традиционные установки горизонтально-осевого типа, однако в последнее время благодаря ряду пре-

имуществ [7] все более востребованными становятся установки вертикально-осевого типа. На **рис. 1** изображена конструкция ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения [8]. Достоинствами таких установок являются независимость работы от направления ветра, самостоятельный старт при относительно малых скоростях и отсутствие инфразвука, который оказывает негативное влияние на окружающую среду [9,10]. Ветер вращает ротор (ветроколесо) ВЭУ, который в свою очередь вращает вал генератора, тем самым происходит преобразование кинетической энергии набегающего потока ветра в электрическую энергию. Вертикально-осевые ветроэнергетические установки являются более удобными при монтаже, так как генератор и прочее электрооборудование можно располагать на земле.

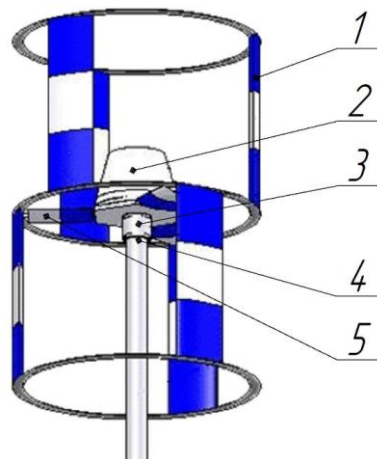


Рис. 1. Вертикально-осевая ветроэнергетическая установка: 1 – лопасти; 2 – электрический генератор; 3 – ступица; 4 – верхний сегмент мачты; 5 – аэродинамические регуляторы

НЕОБХОДИМОСТЬ НАЛИЧИЯ СИСТЕМЫ ТОРМОЖЕНИЯ

Мощность, располагаемая ветроколесом установки, находится в кубической зависимости от скорости ветрового потока, то есть при увеличении скорости ветра в два раза мощность потока возрастает в восемь раз. Исходя из мировой практики использования вет-

роагрегатов, известно, что при скоростях ветра выше 15-25 м/с появляется большая вероятность разрушения лопастей и перегрева электрического генератора [11]. Также при высокой частоте вращения ротора могут возникать вибрационные колебания, которые негативно сказываются на функционировании всех элементов конструкции и в особенности подвижных узлов – подшипников, компонентов ротора и элементов тормозных устройств [12]. Чтобы предотвратить появление таких негативных факторов, необходимо оснащать ветроустановки системами управления мощностью и устройствами торможения. В зарубежной литературе можно обнаружить недавно разработанные способы управления мощностью посредством самого электрического генератора [13-15]. Но в реальной практике использования ветроэнергетического оборудования торможение ветроколеса генератором до сих пор не отработано, и остаются достаточно высокие риски перегрева обмоток электрической машины [16], либо ее выход из строя. В связи с этим возникла задача оборудовать агрегаты дублирующими (аварийными) системами управления-торможения.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Решение этой задачи рассмотрим на примере интеграции электромеханического тормозного устройства в конструкцию вертикально-осевой ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт (ВЭУ-3). Как показано на **рис. 2**, в основание ступицы устанавливается блок, состоящий из кулачкового механизма разжатия, редуктора и электропривода.

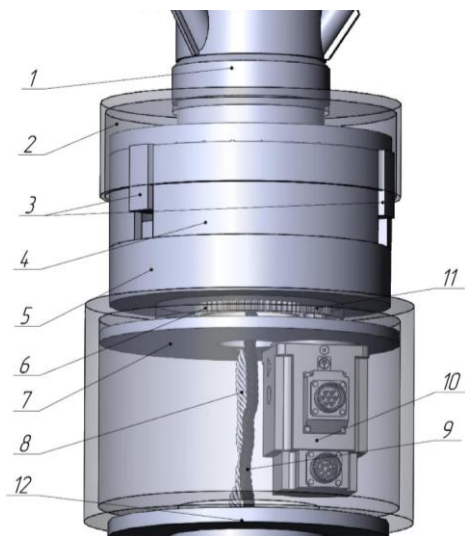


Рис. 2. Электромеханический блок торможения, интегрированный в ступицу ВЭУ-3: 1 – ступица; 2 – контактная стенка; 3 – кулачки; 4 – корпус с направляющими; 5 – волновой редуктор; 6 – входной вал (шестерня) редуктора; 7 – установочная шайба; 8 – гибкий трос ручного привода; 9 – провод от генератора; 10 – электрический привод; 11 – приводная шестерня; 12 – фланец мачты

Между ступицей и крепежным фланцем мачты устанавливаются два промежуточных звена – волновой редуктор с кулачковым разжимным блоком и приводные устройства. В данном случае используется электрический привод и механический. Необходимость механического ручного привода обусловлена требованиями безопасности при использовании ветроэнерге-

тической установки на ответственных объектах [17]. Механическая передача вращающего момента осуществляется с помощью гибкого троса, идущего от основания установки внутри мачты и закрепленного в верхней точке на установочной шайбе. Электропривод тоже крепится на установочную шайбу с противоположной стороны от ручного привода. Оба привода входят в зацепление с волновым редуктором при помощи зубчатой передачи с передаточным соотношением 1:3. Передаточное отношение волнового редуктора составляет 1:120. Такой тип редуктора выбран из конструктивных соображений, так как никакая иная конструкция не позволяет передавать вращения с достаточно большим коэффициентом понижения при наличии центрального отверстия. Отверстие же необходимо для проведения проводов от генератора к основанию мачты. С выходного вала редуктора вращение передается на кулачковый механизм, который состоит из спирального приводного диска, трех кулачков и направляющих. На подошве кулачков имеются гребни, при скольжении которых по спиральному бурту диска кулачки перемещаются в осевом направлении. Таким образом, при движении кулачков от центра к периферии их фрикционные грани упрутся во внутреннюю контактную стенку вращающейся ступицы. В результате чего начнется процесс трения скольжения, что является причиной торможения вращающегося ротора вплоть до полной остановки. При нормализации погодных условий управляющий контроллер подаст соответствующую команду на возврат кулачков в исходное состояние. Очевидно, что сила прижатия кулачков к контактной стенке мачты будет влиять на тормозной момент, передаваемый кулачками. За счет высокого суммарного передаточного коэффициента (1:360) процесс прижатия кулачков к контактной стенке будет достаточно плавным, а также это позволит использовать маломощный электропривод, что существенно уменьшит его габариты. Для большего понимания конструкции электромеханического тормозного устройства на **рис. 3** приведена его кинематическая схема.

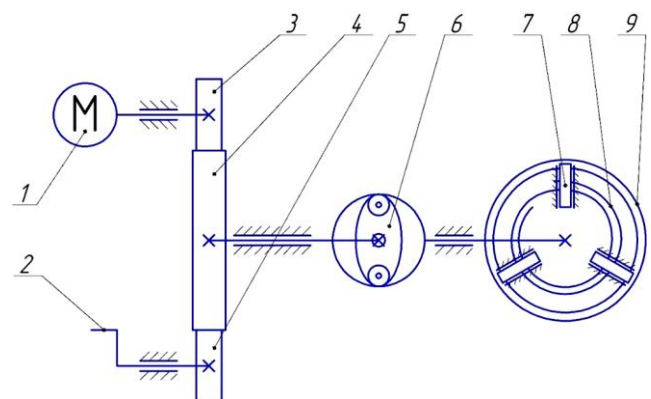


Рис. 3. Кинематическая схема электромеханического тормозного устройства: 1 – электропривод; 2 – ручной привод; 3 – выходная шестерня электропривода; 4 – приводная шестерня волнового редуктора; 5 – выходная шестерня ручного привода; 6 – волновой редуктор; 7 – кулачки; 8 – спиральный диск; 9 – контактная стенка

Для управления электромотором можно использовать штатный микроконтроллер ветроэнергетической установки. Однако для мониторинга состояния

динамических параметров ВЭУ-3 необходимо устанавливать датчики. В целом достаточно иметь три основных вида датчиков: частоты вращения ротора, температуры генератора и вибрационных колебаний на мачте. Приведенный набор датчиков позволяет определять наиболее распространенные причины аварийных ситуаций. Далее необходимо определить структурную последовательность звеньев в системе управления, для этого обратимся к **рис. 4**.

Необходимо учитывать, что все элементы системы управления имеют некоторую инерционность, следовательно, сам процесс управления может быть неустойчивым, либо находиться на границе устойчивости. А принимая во внимание, что ветровая нагрузка на ротор является стохастической величиной, возникает вероятность перерегулирования системы управления. Для исключения перечисленных негативных факторов необходимо провести соответствующую проверку системы на устойчивость. Очевидно, что микроконтроллер, электрический привод, датчики и прочие электронные и электрические компоненты системы управления обладают коэффициентами инерционности. Но величины этих коэффициентов будут ничтожно малы по сравнению с инерционностью механических звеньев – редуктора и кулачкового блока, и их значениями можно в расчете пренебречь. Таким образом, мы получим характеристическое уравнение системы третьего порядка

$$D(p) = a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3. \quad (1)$$

Для определения устойчивости систем третьего порядка сформулированы два критерия – Вышнеградского и Михайлова [18]. В нашем случае для получения универсального шаблона по расчету устойчивости системы более предпочтительным будет критерий Михайлова, т.к. он имеет графическое отображение результатов расчета, в то время как по критерию Вышнеградского приходится работать с крупным математическим массивом. Критерий А.В. Михайлова подразумевает анализ характеристического уравнения, которое можно записать в виде [19]

$$D(j\omega) = R_e(\omega) + jJ_m(\omega), \quad (2)$$

где $R_e(\omega)$ – действительная часть, полученная из составляющих уравнения (1), содержащих четные степени $(j\omega)$, а $J_m(\omega)$, соответственно, из членов с нечетными степенями. Каждому значению ω_i на комплексной плоскости соответствует вектор, конец которого имеет координаты $R_e(\omega_i)$ и $J_m(\omega_i)$. Если варьировать значение ω_i от 0 до ∞ , то конец вектора опишет на комплексной

плоскости кривую, которая будет являться годографом. А если система устойчива, то годограф начинается при $\omega=0$ на действительной положительной полуоси и при неограниченном возрастании ω последовательно огибает начало координат против часовой стрелки, проходя n квадрантов комплексной плоскости, где n – порядок характеристического уравнения [19]. В случае, если годограф проходит через начало координат, это свидетельствует о том, что система находится на границе устойчивости [20].

Итак, запишем для рассматриваемой системы управления характеристический многочлен с учетом коэффициентов для каждого из блоков системы:

$$D(p) = 3824,5p^3 + 4448,2p^2 + 63,03p + 0,308. \quad (3)$$

Осуществляя подстановку $p=j\omega$ в (3), получим характеристический вектор $D(j\omega)$:

$$D(j\omega) = 3824,5(j\omega)^3 + 4448,2(j\omega)^2 + 63,03(j\omega) + 0,308. \quad (4)$$

Разделив действительную и мнимую составляющую вектора $D(j\omega)$, получим (2). Пересечение годографа с осью R_e происходит при $J_m(\omega)$:

$$J_m(\omega) = \omega \cdot (63,03 - 3824,5\omega^2) = 0, \quad (5)$$

$$\omega_1 = 0, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{63,03}{3824,5}} = 0,128.$$

Таким образом, первая точка пересечения при $\omega_1=0$ соответствует $R_e(\omega_1)=0$, вторая точка при $\omega_2=0,128$ соответствует $R_e(\omega_2)=-73$. Пересечение годографа с осью J_m происходит при

$$R_e(\omega) = 0,308 - 4448,2\omega^2 = 0, \quad (6)$$

$$\omega_1 = \left(\frac{0,308}{4448,2} \right)^{1/2} = 8,3 \cdot 10^{-2}, \quad J_m(\omega_1) = 0,522.$$

Теперь выберем положительные значения корней, т.к. ω изменяется от 0 до ∞ . А для построения графика зададимся рядом значений $0 < \omega < \infty$ и рассчитаем соответствующие значения $R_e(\omega)$ и $J_m(\omega)$. По данным из **таблицы**, приведенной ниже, представлен годограф характеристического уравнения на **рис. 5**.

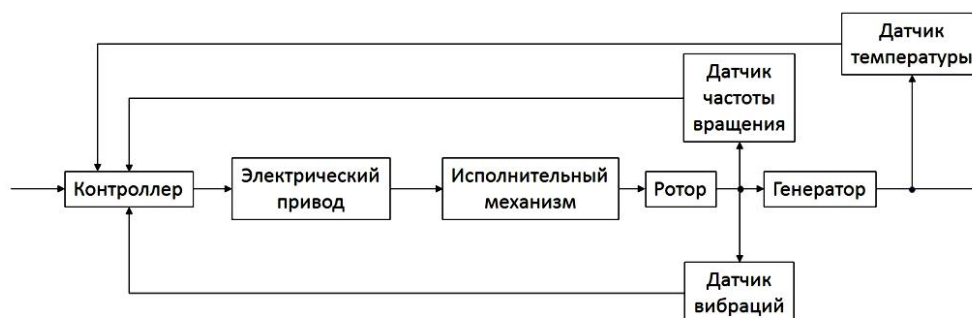


Рис. 4. Функциональная схема системы управления электромеханическим тормозным устройством

ω	0	$5 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}	$2 \cdot 10^{-1}$...	∞
R_e	0,308	-10,8	-28,16	-44,17	-177,6	...	$-\infty$
J_m	0	2,67	3,08	2,47	-17,99	...	$-\infty$

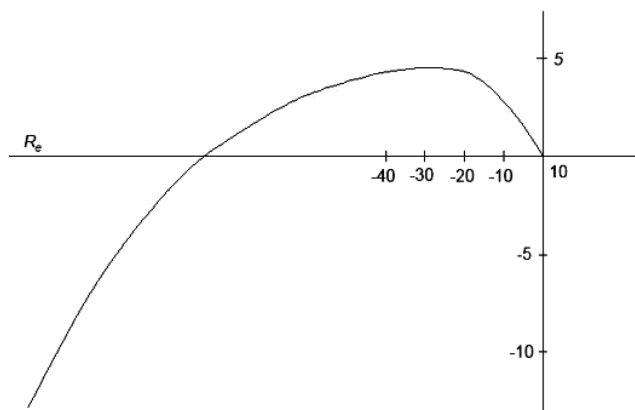


Рис. 5. Годограф Михайлова для характеристического уравнения третьего порядка

На основании полученного годографа Михайлова можно сделать вывод об устойчивости системы, т.к. кривая последовательно огибает точку начала координат против часов стрелки и проходит через 3 квадранта комплексной плоскости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преимуществами исследуемого электромеханического устройства аварийного торможения являются его высокая надежность и возможность интеграции в существующие ветроэнергетические установки без существенных конструктивных изменений. Тормозной механизм имеет длительный срок работы и удовлетворительную степень ремонтпригодности. Кроме того, рассматриваемая система будет иметь невысокую стоимость по сравнению с теми затратами, которые могут возникнуть в связи с последствиями аварии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. Изд. 2-е, доп. СПб.: Наука, 2013. 308 с.
2. British Petroleum: спрос на энергоресурсы вырастет, приоритет сместится на экотопливо. Федеральное государственное унитарное предприятие «Международное информационное агентство «Россия сегодня» Экономика. 2016. URL: <http://ria.ru/economy/20160210/1372534873.html> (дата обращения: 11.02.2016).
3. Федеральный закон от 26.03.2003 N 35-ФЗ (ред. от 30.12.2015) «Об электроэнергетике». М., 2015.
4. Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 N 449 (ред. от 10.11.2015) «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности». М., 2015.
5. Безруких П.П. Использование энергии ветра // Техника, экономика, экология. М.: Колос, 2008.
6. Лятхер, В.М. Развитие ветроэнергетики // Малая энергетика. 2006. № 2(4-5). С.18-38.
7. Кирпичникова И.М., Мартянов А.С., Соломин Е.В. Моделирование генератора ветроэнергетической установки // Электротехника. 2013 №10. С.46-49.
8. Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S., Solomin E.V. Vertical axis wind turbines. New aspects / ISJAE 2013. №1-2 (118). С. 55-58.
9. Безруких П.П. Ветроэнергетика. Вымыслы и факты. Ответы на 100 вопросов. М.: Институт устойчивого развития Общественной палаты Российской Федерации. Центр экологической политики России, 2011. 74 с.

гической политики России, 2011. 74 с.

10. Соломин Е.В., Кирпичникова И.М., Мартянов А.С. Итерационный подход в разработке и оптимизации вертикально-осевых ветроэнергетических установок // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. трудов VII междунар. науч. конференции молодых ученых. Новосибирский государственный технический университет; Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. Новосибирск, 2015. С. 92-95.
11. Безруких П.П. Использование энергии ветра. Техника, экономика, экология. М.: Колос, 2008.
12. Michos D, Dialynas E, Vionis P. Reliability and Safety Assessment of Wind Turbines Control and Protection Systems. WIND ENGINEERING, 2006, 26(6):359-369.
13. Jogendra Singh Thongam and Mohand Ouhrouche (2011). MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Dr. Rupp Carriveau (Ed.), ISBN: 978-953-307-508-2.
14. Thongam J.S., Bouchard P., Ezzaidi H. and Ouhrouche M. Wind speed sensorless maximum power point tracking control of variable speed wind energy conversion systems, Proc. of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC 2009, May 3-6, 2009, Florida, USA.
15. Kwon J.M., Kim J.H., Kwak S.H. and Lee H.H. Optimal power extraction algorithm for DTC in wind power generation systems, Proc. IEEE International Conf. on Sustainable Energy Technology, (ICEST 2008), Singapore, 24-27 Nov., 2008 pp. 639 - 643.
16. Wang S., Qi Z. and Undeland T. State space averaging modeling and analysis of disturbance injection method of MPPT for small wind turbine generating systems, Proc. APPEEC, 2009.
17. Ильичев В.Г. Основы автоматики и системы автоматического регулирования: учеб. пособие. Челябинск: ЧПИ, 1986. 87 с.
18. Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Теория автоматического управления: учеб. пособие / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 196 с.
19. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1980. 309 с.
20. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. 4-е изд., перераб. и доп. СПб: Профессия, 2003. 752 с.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRO-MECHANICAL SYSTEM OF EMERGENCY BRAKING FOR WIND TURBINE

Solomin E.V., Sirotkin E.A., Kozlov S.V.

The authors stressed the importance of emergency braking systems for wind turbines. These braking tools should be embedded in wind turbine design as the expansion of the main control system. The research group considered electromechanical device with automatic and manual modes to solve this problem. The device with small overall dimensions transmits high braking torque with the help of specific kinematic parts combination and waveform gear reduction unit. The specific feature of the braking system is the ability of its integration into the wind turbine construction without significant changes. The authors discussed the electrical drive control system on the basis of functional chart. System stability was analyzed using Mikchailov criterion plotting the hodograph of third order performance equation.

Keywords: renewable energy sources, wind turbine, emergency braking system, control system.

REFERENCES

1. Elistratov V.V. *Vozobnovlyаемая энергетика* [Renewable Power Generation], 2-nd edition, SPb, Nauka, 2013, 308 p.
2. British Retroleum: *spros na energoresursy vyrastet, prioritet smestitsja na eko-toplivo* [demand on energy resources will grow up, pollution-free fuel will get the main priority], Federalnoe gosudarstvennoe unitarnoe predpriyatie «Mezhdunarodnoe informacionnoe agentstvo «Rossija segodnya», Economics. 2016. URL: <http://ria.ru/economy/20160210/1372534873.html> (accessed: 11.02.2016).
3. Federal Law on 26.03.2003 N 35-ФЗ (as in force on 30.12.2015) «Electric Energy Act».
4. Decree of the RF Government on 28.05.2013 N 449 (as in force on 10.11.2015), «Stimulation of Renewable Energy sources Application in the Wholesale Market of Electrical Energy and Power».
5. Bezrukih, P.P. *Ispolzovanie energii vetra* [Wind Energy Application], Engineering, Economics, Ecology, Moscow, Kolos, 2008.
6. Lyather, V.M. *Razvitie vetroenergetiki* [Wind Power Engineering Development], Malaja energetika, 2006, no.2(4-5). pp. 18-38.
7. Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S., Solomin E.V. *Modelirovanie generatora vetroenergeticheskoy ustanovki* [Generator Modeling for Wind-Driven Power Plant], Electrical engineering, 2013, no.10, pp.46-49.
8. Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S., Solomin E.V. Vertical axis wind turbines. New aspects, ISJAEE 2013. no.1-2 (118). pp 55-58.
9. Bezrukih P.P. *Vetrojenergetika. Vymysly i fakty. Otvety na 100 voprosov* [Wind Power Engineering. Myths and Facts. Answers to 100 Questions]. Moscow, Institut ustojchivogo razvitiya Obshhestvennoj palaty Rossijskoj Federacii, Centr jekologicheskoy politiki Rossii, 2011, 74 p.
10. Solomin E.V., Kirpichnikova I.M., Martyanov A.S. *Iteracionnyj podhod v razrabotke i optimizacii vertikalnoosevnyh vetroenergeticheskikh ustanovok* [Iterative Approach to development and Improvement of Vertical Axis Wind Turbines], Collection of scientific papers: Electrical engineering. Electrotechnics. Collection of scientific papers of the VII international scientific conference of young scientists. Novosibirsk State Technical University; Interuniversity center of assistance to scientific and innovative activity of students and young scientists of Novosibirsk region. Novosibirsk, 2015. pp. 92-95.
11. Bezrukih P.P. *Ispolzovanie jenergii vetra. Tehnika, ekonomika, ekologiya* [Making Use of Wind Energy. Engineering, Economics, Ecology]. M.: Kolos, 2008.
12. Michos D, Dialynas E, Vionis P. Reliability and Safety Assessment of Wind Turbines Control and Protection Systems. WIND ENGINEERING, 2006, 26(6):359-369.
13. Jogendra Singh Thongam and Mohand Ouhrouche (2011). MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Dr. Rupp Carriveau (Ed.), ISBN: 978-953-307-508-2.
14. Thongam J.S., Bouchard P., Ezzaiddi H. and Ouhrouche M. Wind speed sensorless maximum power point tracking control of variable speed wind energy conversion systems, Proc. of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference IEMDC 2009, May 3-6, 2009, Florida, USA.
15. Kwon J.M., Kim J.H., Kwak S.H. and Lee H.H. Optimal power extraction algorithm for DTC in wind power generation systems, Proc. IEEE International Conf. on Sustainable Energy Technology, (ICEST 2008), Singapore, 24-27 Nov., 2008 pp. 639 - 643.
16. Wang S., Qi Z. and Undeland T. State space averaging modeling and analysis of disturbance injection method of MPPT for small wind turbine generating systems, Proc. APPEEC, 2009.
17. Ilyichev V.G. *Osnovy avtomatiki i sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya: Ucheb. posobie dlja studentov vech. obucheniya* [Fundamentals of Automation and Automatic Control Systems], Chelyabinsk, ChPI, 1986, 87 p.
18. Dyadik V.F., Bajdali S.A., Krinicyan N.S. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnoe posobie* [Theory of Automatic Control: textbook], National Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk: Publishing center of Tomsk Polytechnic University, 2011, 196 p.
19. Voronov A.A. *Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Avtomaticheskoe regulirovanie nepreryvnyh lineynyh sistem* [Fundamentals of Automatic Control Theory. Automatic Control of Continuous Linear Systems], 2nd edition. Moscow, Energy, 1980, 309 p.
20. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of Automatic Control Systems], 4-th edition. SPb, Professiya, 2003, 752 p.