

ДУБЛИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТОРМОЖЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин, Е.С. Бодрова, М.С. Чиненов

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Приведены данные по регионам Российской Федерации с наиболее высокими среднегодовыми скоростями ветра, обоснована рентабельность использования в данных регионах ветроэнергетических установок. Рассмотрены негативные факторы, с которыми можно столкнуться при эксплуатации ветроэнергетического оборудования в зоне повышенных ветровых нагрузок. Определена необходимость применения дублирующих систем торможения в ветроэнергетических установках. Приведено аналитическое сравнение существующих способов торможения ВЭУ, выявлены их преимущества и недостатки. Предложен наиболее надежный и эффективный вариант электромеханического торможения ветроколеса, в котором сочетаются преимущества рассмотренных аналогов и отсутствуют их недостатки. Приводится описание такой электромеханической системы торможения для вертикально-осевой ветроэнергетической установки с использованием компьютерной 3D-модели, созданной в программном комплексе SolidWorks. Рассмотрена кинематическая схема системы торможения, описывающая взаимосвязь основных компонентов системы: электропривода, редуктора, трехкулачкового тормозного блока и тормозного барабана на роторе ВЭУ. Также в статье описаны созданная схема и алгоритм управления данной системой торможения, основывающиеся на постоянном мониторинге состояния основных компонентов ВЭУ и удержании ее в допустимых рабочих диапазонах. Сделано заключение об эффективности применения рассматриваемой системы торможения на ветроэнергетических установках.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроэнергетические установки, системы торможения, дублирующие системы.

Введение

В настоящее время целый ряд государств активно занимается освоением арктических территорий. Это обусловлено тем, что на северных территориях находятся еще не освоенные месторождения полезных ископаемых. По оценкам ООН стоимость запасов полезных ископаемых на арктических территориях РФ составляет более 21 триллиона долларов [1]. Только на Ямале добывается порядка 90 % российского газа [2].

Кроме того, арктические территории рассматриваются как стратегически важные объекты. На них могут размещаться объекты военного назначения (например, комплексы противовоздушной обороны) или навигационные объекты (станции ГЛОНАСС) [3]. Ямальский полуостров еще и уникален тем, что он равноудален от Парижа и Пекина. Таким образом, при существующей геополитической обстановке регион может стать центральным звеном в цепи поставок энергетических ресурсов на всем континенте.

Две трети территории России на данный момент все еще не охвачены электрическими сетями [4]. Этот факт вполне объясним с экономической точки зрения – стоимость проведения ЛЭП и затраты на их эксплуатацию и обслуживание будут велики и могут долго окупаться по времени. Однако следует учитывать, что территории, которые не

подключены к общей энергосети, уже сейчас в определенной степени охвачены децентрализованным и автономным энергоснабжением. Но стоимость 1 кВт·ч на отдаленных объектах может достигать 70 рублей [5]. Такая высокая цена обусловлена низким уровнем развития используемых там энергетических технологий. По разным оценкам на энергетически децентрализованной территории страны проживает от 10 до 25 млн человек [6]. Более 50 регионов считаются энергодефицитными, что ставит их собственную энергобезопасность под угрозу [7].

На рис. 1 приведена ночная съемка евразийского континента со спутника [8]. По фотографии видно, что в большей степени электрифицированы европейская (западная) и южная части России. А самыми «темными» являются северные и дальневосточные территории.

Для устойчивого развития данных территорий необходимо иметь соответствующую инфраструктуру с достаточным энергоснабжением. В данный момент главным энергоносителем в тех регионах является дизельное топливо. Однако данный вид топлива вреден для экологии, а стоимость транспортировки топлива делает стоимость 1 кВт·ч непомерно высокой [9]. Обозначенную проблему можно решить путем использования ветроэнергетических установок (ВЭУ). Причем будет актуально



Рис. 1. Ночная съемка евразийского континента со спутника

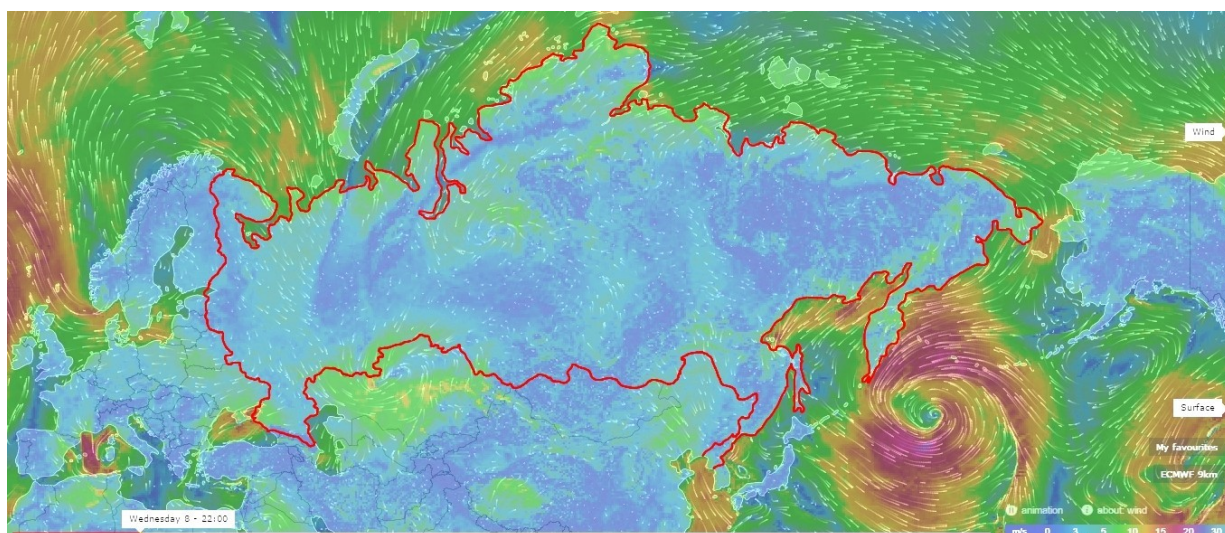


Рис. 2. Распределение среднегодовых скоростей ветра на территории РФ и на прилегающих к ней территориях

использование малых установок мощностью до 100 кВт, которые могут работать в автономном режиме. На рис. 2 представлено распределение среднегодовых скоростей ветра на территории РФ и на прилегающих к ней территориях [10]. При сравнении рис. 1 и 2 видно, что наибольшие среднегодовые скорости ветра наблюдаются на «неподсвеченных» северных и дальневосточных территориях. Северные регионы находятся в зеленой области ветровой нагрузки (5...10 м/с). А некоторые дальневосточные регионы, в особенности Камчатский полуостров, находятся в зоне устойчиво высоких скоростей ветра 10...15 м/с (отмечено желтым цветом). Таким образом, использова-

ние ветрогенераторов на обозначенных территориях будет выгодно, исходя из экономических и технических соображений.

Способы управления мощностью ветроэнергетических установок

Вырабатываемая ВЭУ мощность находится в кубической зависимости от скорости набегающего потока ветра [11]. Подавляющее большинство производителей ветроэнергетических установок проектируют свои изделия таким образом, что выработка номинальной мощности происходит при скорости ветра 11 м/с. При этом не учитываются климатические и географические факторы буду-

щей эксплуатации ветроэнергетических установок. Исходя из таких конструктивных особенностей ветрогенераторов, при скорости ветра выше 11 м/с необходимо ограничивать мощность на ветроколесе [12].

На сегодняшний день существует несколько традиционных способов ограничения мощности на роторе ветроустановок:

1. Увеличение электрической нагрузки на генератор. При возрастании скорости ветра контроллер ВЭУ увеличивает электрическую нагрузку на генератор, тем самым снижая частоту вращения ротора [13]. Данный способ управления мощностью наиболее энергоэффективен с точки зрения отбора мощности, однако, не предназначен для работы при продолжительных высоких скоростях ветра [14]. Это обусловлено тем, что обмотки генератора будут нагреваться с увеличением электрической нагрузки и в определенный момент достигнут критической температуры, после которой им необходимо охлаждение. Как правило, периоды большой ветровой нагрузки могут продолжаться от суток до нескольких недель.

2. Замыкание обмоток генератора с использованием ШИМ. При таком способе торможения можно плавно тормозить ротор ветроустановки в необходимых диапазонах частоты вращения. Однако недостатком этого способа является также быстрый перегрев электрического генератора, так как обратная кинетическая энергия ветроколеса превращается в тепловую энергию на обмотках генератора [15]. В результате этим способом можно пользоваться лишь кратковременно.

3. Аэродинамическое торможение. Существует множество конструкций аэродинамических ре-

гуляторов: это и поворачивающиеся лопасти вокруг оси маха, и специальные тормозные лопасти, которые разворачиваются в зависимости от частоты вращения, и устройства вывода ветроколеса из-под набегающего потока. Но как показала практика, такие регуляторы проявили свою эффективность лишь на крупных ВЭУ мегаваттного класса.

4. Механические тормозные системы. Данный вид систем является наиболее примитивным из всех перечисленных. Но на данном этапе развития техники и технологий он является самым надежным и самым экономически выгодным. Во-первых, механическое торможение ветроколеса подразумевает превращение кинетической энергии в тепловую, которая выделяется на тормозных колодках. Современные фрикционные материалы сохраняют свои рабочие характеристики при температурах до 800 °С, в то время как обмотки генератора не рекомендуется нагревать выше 100 °С [16]. Во-вторых, такие механизмы имеют наибольшую ремонтпригодность, так как отработанные механические части можно заменять, не вскрывая корпус ветрогенератора. И, в-третьих, механические тормозные системы выполняют роль обязательной дублирующей системы торможения. Согласно стандартам все ВЭУ, мощность которых превышает 5 кВт, должны иметь как минимум одну дублирующую систему торможения [17].

Электромеханическая система торможения ВЭУ

В данной работе рассмотрена электромеханическая система торможения с исполнительным механизмом в виде трехкулачкового блока для вертикально-осевой ВЭУ мощностью 3 кВт (рис. 3).

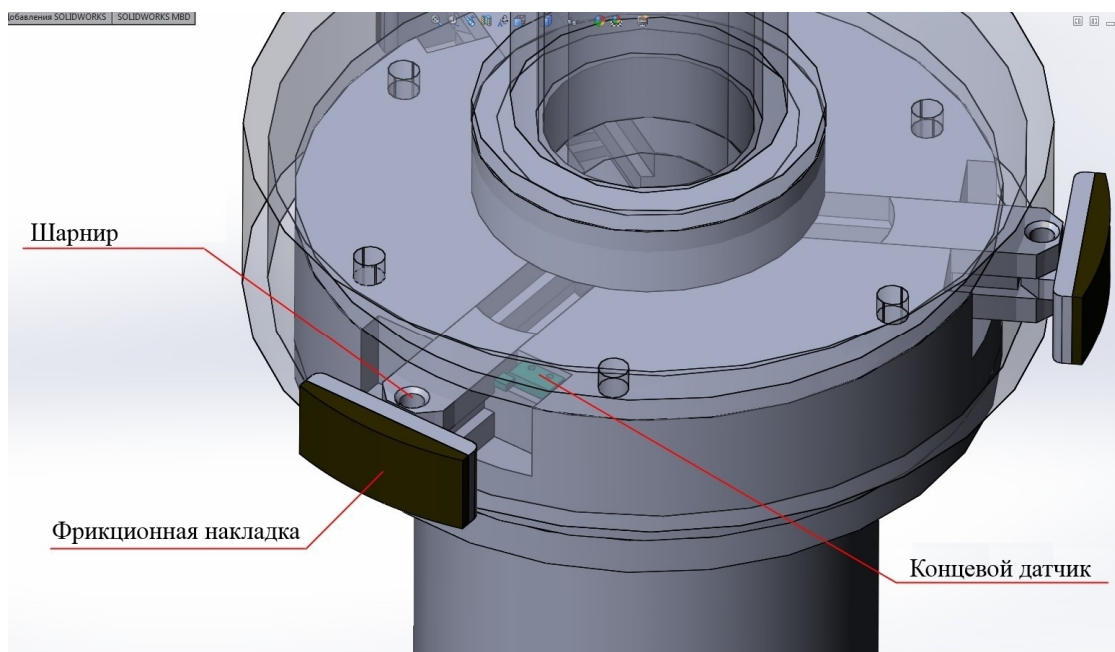


Рис. 3. Компьютерная модель трехкулачкового блока тормозной системы ВЭУ

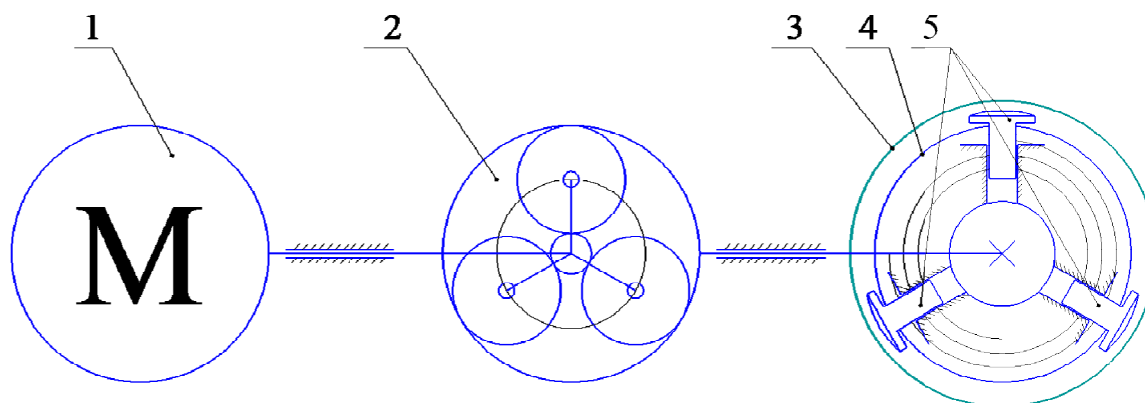


Рис. 4. Кинематическая схема электромеханической системы торможения: 1 – электрический привод; 2 – планетарный редуктор; 3 – контактная стенка на ступице; 4 – спиральный диск; 5 – фрикционные кулачки

Преимуществами такой ветроустановки являются отсутствие необходимости ориентации на ветер, низкие показатели вибрационных и звуковых излучений, относительно высокий коэффициент использования энергии ветра (до 0,4) [18].

Благодаря перечисленным преимуществам данная ветроустановка может быть установлена вблизи жилых объектов. А также ее можно смонтировать на крыше строения. При этом строению не будут угрожать вибрационные колебания ВЭУ. Учитывая близкое расположение ВЭУ к жилым объектам инфраструктуры, нужно обеспечивать соответствующую безопасность эксплуатации оборудования. В первую очередь нужно предотвратить разрушение лопастей ВЭУ, так как при частоте вращения ротора 180 об/мин разброс лопастей может составить до 50 м по радиусу. Поэтому система торможения должна предотвращать подобные аварийные ситуации и обеспечивать безопасную работу персонала.

На рис. 4 показана кинематическая схема всей системы торможения. При превышении допустимой частоты вращения ротора ВЭУ, при нагреве генератора до максимальной рабочей температуры или в случае возникновения чрезмерных вибраций включается электрический привод системы. Далее мощность от привода через планетарный редуктор передается на спиральный диск (с архимедовой спиралью). На спиральном диске установлены фрикционные кулачки, на которых с нижней части нарезаны специальные гребни. При вращении спирального диска гребни кулачков начинают скользить по спирали и кулачки перемещаются в радиальном направлении. Движущиеся от центра к периферии кулачки упираются в контактную стенку, которая закреплена на ступице ветроколеса и вращается вместе с ней. Таким образом, при соприкосновении кулачков с контактной стенкой начинается процесс трения-скольжения и ветроколесо начинает тормозиться.

Такая электромеханическая система тормо-

жения предназначена для использования в те моменты, когда штатная система управления не способна осуществлять процесс регулирования (например, при ураганном ветре), либо в аварийных ситуациях [19]. Это могут быть и технические отказы штатной системы управления, и внешние воздействия (удар молнии или воздействие электрических устройств) [20]. Поэтому для управления системой предназначается выделенный микроконтроллер, который входит в состав контроллера верхнего уровня, однако может работать и в автономном режиме.

Кроме того, питание этого контроллера и электропривода системы тоже осуществляется от отдельного автономного аккумулятора. Заряд данного аккумулятора происходит параллельно с зарядом основного блока аккумуляторов, входящих в состав всего энергетического комплекса.

Система управления отслеживает состояние трех основных параметров ВЭУ: температура генератора, скорость вращения ветроколеса и вибрационные колебания металлической конструкции. При необходимости система активирует электропривод тормоза по алгоритму и схеме, приведенными на рис. 5 и 6.

Включение и работа электропривода продолжаются до тех пор, пока сила тока в приводе не достигнет значения в 10 А. Это свидетельствует о том, что кулачки давят на контактную стенку с силой 30 000 Н. Далее ротор останавливается, и система выжидает 2 мин, после чего снова активируется электропривод, но уже в реверсивном режиме. Работа привода продолжается до тех пор, пока кулачки не вернуться в исходные положения и не нажмут на концевой выключатель. На систему управления электромеханическим тормозом может быть подан сигнал к торможению от системы управления верхнего уровня (к примеру, это может быть дистанционное торможение ВЭУ, активированное пользователем).

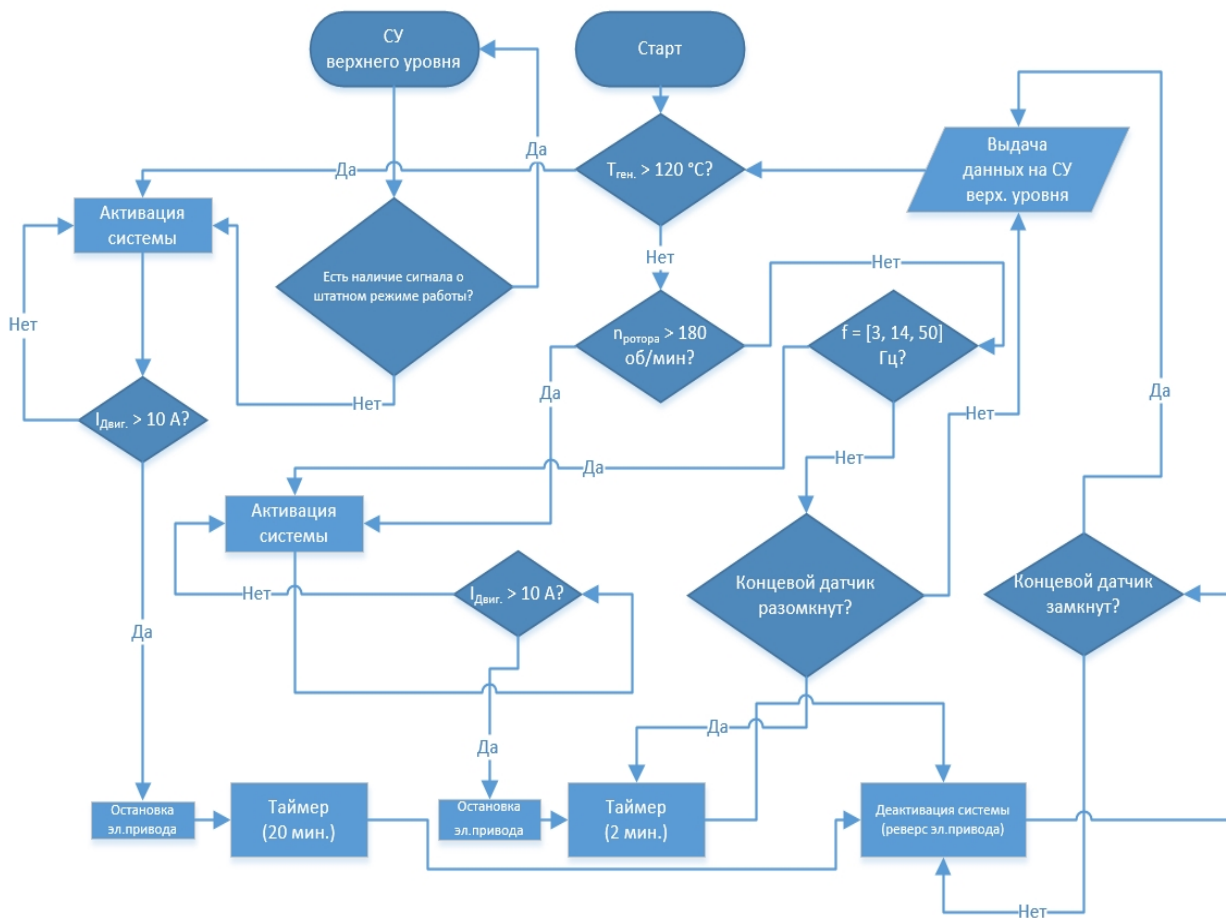


Рис. 5. Алгоритм работы электромеханической системы торможения

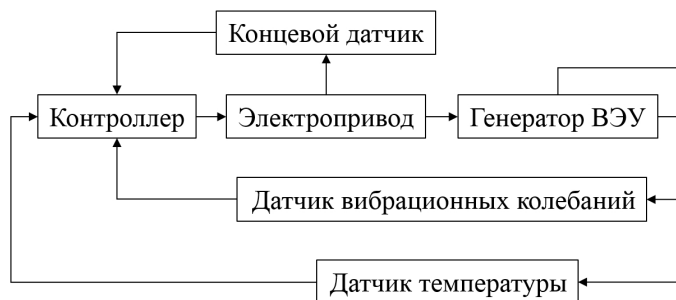


Рис. 6. Схема взаимосвязей электрических компонентов системы торможения ВЭУ

Заключение

Рассмотренная электромеханическая система торможения обладает всеми необходимыми конкурентными преимуществами в технических аспектах. Надежные механические звенья позволяют выдерживать высокие температурные нагрузки, т. е. могут поглощать большее количество избы-

точной мощности на роторе ВЭУ. Механические звенья способны работать при высокой нагрузке, что делает возможным торможение ветроустановки даже при ураганных скоростях ветра. Таким образом, на данный момент электромеханический способ (в качестве дублирующего) является самым оправданным.

Статья выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов (СП-71.2018.1) и Правительства РФ (Постановление № 211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02.А03.21.0011.

Литература/References

1. Gogoberidze G., Abramov V.M., Karlin L.N., Lednova J. and Malakhova J. Marine Economic Potential Assessment for Environmental Management in the Russian Arctic and Subarctic Coastal Regions/ *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management SGEM*, 2014, no. 3 (5), pp. 253–260. DOI: 10.5593/sgem2014/b53/s21.034
2. Dudin M.N., Sekerin V.D., Gorohova A.E., Bank S.V. and Danko T.P. Arctic Zone: Global Strategic Priorities for Integrated Development and Infrastructure Policy. *Man in India*, 2016, 96 (7), pp. 2297–2313.
3. Dudin M.N., Ivashchenko N.P., Frolova E.E., Abashidze A.H. and Smbatyan A.S. Innovative Approach to the Development of the Logistics System of Supply of the Arctic Region Space. *International Journal of Economics and Financial*, 2016, iss. 6 (4), pp. 1965–1972.
4. Boute A. Renewable Energy Federalism in Russia: Regions as New Actors for the Promotion of Clean Energy. *Journal of Environmental Law*, 2013, 25 (2), pp. 261–291. DOI: 10.1093/jel/eqt005
5. Gore O., Viljainen S., Makkonen M., Kuleshov D. Russian Electricity Market Reform: Deregulation or Re-regulation? *Energy Policy*, 2012, no. 41, pp. 676–685. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.11.031
6. Larionov A., Nezhnikova E. Role of Energy Efficiency in Improving the Quality of Housing Projects. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, no. 11 (6), pp. 4433–4439.
7. Runkle B.K., Wille C., Gažovič M., Wilmking M., Kutzbach L. The Surface Energy Balance and Its Drivers in a Boreal Peatland Fen of Northwestern. *Russia Journal of Hydrology*, 2014, no. 511, pp. 359–373. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.056
8. Cole S. NASA-NOAA Satellite Reveals New Views of Earth at Night. Available at: https://www.nasa.gov/mission_pages/NPP/news/earth-at-night.html (accessed 17.01.2018).
9. Sevastyanov S., Kravchuk A. The Russian Approach to National Security in the Arctic. *Korean Journal of Defense Analysis*, 2017, no. 29 (1), pp. 131–150.
10. Schubert B. WorldWind Explorer Project. Available at: <http://worldwind.earth/> (accessed: 18.01.2018).
11. Никитин А.Д. Моделирование переходных процессов при работе автономной ветроустановки с резервным источником энергии. Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2016. Т. 16, № 1. С. 36–41. DOI: 10.14529/power160106 [Nikitin A.D., Akifeva N.N. Simulation of Transient Processes at Operation of Stand-Alone Wind Turbine with Backup Power Source. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 36–41. (in Russ.) DOI: 10.14529/power160106]
12. Datta R., Ranganathan V.T. A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, no. 18 (1), pp. 163–168. DOI: 10.1109/TEC.2002.808346
13. Hansen A.D., Sørensen P., Iov F., Blaabjerg F. Centralised Power Control of Wind Farm with Doubly Fed Induction Generators. *Renewable Energy*, 2006, no. 31 (7), pp. 935–951. DOI: 10.1016/j.renene.2005.05.011
14. Bossanyi E.A. Wind Turbine Control for Load Reduction. *Wind Energy*, 2003, no. 6 (3), pp. 229–244. DOI: 10.1002/we.95
15. Teodorescu R., Blaabjerg F. Flexible Control of Small Wind Turbines with Grid Failure Detection Operating in Stand-Alone and Grid-Connected Mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, no. 19 (5), pp. 1323–1332. DOI: 10.1109/TPEL.2004.833452
16. Abrahamsen A.B., Mijatovic N., Seiler E., Sørensen M.P., Koch M., Nørgard P.B., Pedersen N.F., Træholt C., Andersen N.H., Østergard J. Design Study of 10 kW Superconducting Generator for Wind Turbine Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2009, no. 19 (3), art. no. 5067256, pp. 1678–1682. DOI: 10.1109/TASC.2009.2017697
17. Коробатов Д.В., Мартыанов А.С., Соломин Е.В., Сироткин Е.А. Эффективные методы регулирования мощности устройств на основе ВИЭ. Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 11-12 (199-200). С. 69–78. DOI: 10.15518/isjaee.2016.11-12.069-078 [Korobatov D.V., Martyanov A.S., Solomin E.V., Sirotkin E.A. [Efficient Power Control Methods of Devices Based on RES]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology], 2016, no. 11-12, pp. 69–78. (in Russ.) DOI: 10.15518/isjaee.2016.11-12.069-078]
18. Соломин Е.В., Сироткин Е.А., Козлов С.В. Электромеханическая система аварийного торможения ветроэнергетической установки. Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1 (30). С. 19–23. [Solomin E.V., Sirotkin E.A., Kozlov S.V. [Electro-Mechanical System of Emergency Braking for Wind Turbine]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 1, pp. 19–23. (in Russ.)]
19. Wang K., Hansen M.L., Moan T. Dynamic analysis of a floating vertical axis wind turbine under emergency shutdown using hydrodynamic brake, *Energy Procedia*, 2014, no. 53 (C), pp. 56–69. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.215
20. Yankov P.V., Van Den Bossche A., Valchev V.C., Successive Resistive Braking Circuit for Permanent Magnet Wind Turbine Generators. *Proceedings of EPE-PEMC 2010 – 14th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2010*, art. no. 5606915, pp. T1127–T1131. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606915

Соломин Евгений Викторович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; solominev@susu.ru.

Сироткин Евгений Анатольевич, аспирант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; easirotkin@susu.ru.

Бодрова Елена Сергеевна, аспирант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; bodrovaes@susu.ru.

Чиненов Максим Сергеевич, аспирант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; chinovms@susu.ru.

Поступила в редакцию 15 февраля 2018 г.

DOI: 10.14529/power180207

BACKUP ELECTROMECHANICAL BRAKE SYSTEM FOR THE WIND TURBINE

*E.V. Solomin, solominev@susu.ru,
E.A. Sirotkin, easirotkin@susu.ru,
E.S. Bodrova, bodrovaes@susu.ru,
M.S. Chinenov, chinovms@susu.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article presents data on Russian Federation regions with the highest average annual wind speeds and justifies the profitability of using wind power plants in these regions. Negative factors that can be encountered in the operation of wind power equipment in the zone of increased wind loads are considered. The necessity of application of duplicating braking systems in wind power plants is determined. Analytical comparison of existing methods of wind turbines braking is given, their advantages and disadvantages are revealed. The most reliable and efficient type is the electromechanical braking of a wind wheel, which combines the advantages of the considered analogues while lacking their shortcomings. A description of such electromechanical braking system for a vertically axial wind power plant is given using a computer 3D model created in the SolidWorks software package. The kinematic scheme of the braking system is illustrated, it describes the interconnection of the main components of the system: the electric drive, the reducer, the three-jaw brake unit and the brake drum on the wind turbine rotor. In addition, the article describes the suggested scheme and control algorithm for this braking system, based on the constant monitoring of the main components state and keeping it in acceptable operating ranges. The conclusion about the efficiency of the braking system application under consideration at wind power plants is made.

Keywords: wind energy, wind turbines, brake systems, backup systems.

The work was supported by RF President scholarship for young scientists and postgraduate students (SP-71.2018.1), by Act 211 Government of the Russian Federation, contract № 02.A03.21.0011.

Received 15 February 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Дублирующая электромеханическая система торможения ветроэнергетической установки / Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин, Е.С. Бодрова, М.С. Чиненов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 55–61. DOI: 10.14529/power180207

FOR CITATION

Solomin E.V., Sirotkin E.A., Bodrova E.S., Chinenov M.S. Backup Electromechanical Brake System for the Wind Turbine. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 55–61. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180207