

УДК 627.8

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАБОТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТОРМОЖЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Е.А. Сироткин, Е.С. Бодрова, А.А. Мирошниченко

THE PROCESS OPTIMIZATION OF THE WIND TURBINE MECHANICAL BRAKE SYSTEMS

E.A. Sirotkin, E.S. Bodrova, A.A. Miroshnichenko

Аннотация. В статье рассмотрены основные виды систем торможения ветроэнергетических установок, а также особенности эксплуатации ветроагрегатов, требующие наличия данных систем торможения. Особенно уделено внимание механическим системам торможения, сформулированы требования к температурным режимам работы таких систем. Представлены свойства фрикционного материала, предназначенного для работы в агрессивных атмосферных условиях. Приведено математическое описание термодинамических процессов нагрева и охлаждения тормозных элементов системы. Представлены результаты компьютерного моделирования и оптимизации работы системы торможения на примере вертикально-осевой ветроэнергетической установки.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка; ВЭУ; фрикционное торможение.

Abstract: The article considers the main types of wind turbine brake systems, as well as the features of operating wind turbines, which require the presence of these brake systems. Particular attention is paid to mechanical brake systems, requirements are formulated for the temperature operating modes of those systems. The friction material properties intended for operation in aggressive atmospheric conditions are presented. The mathematical description of heating thermodynamic processes and cooling of system brake elements is given. The computer simulation and optimization results of the brake system operation for the vertical wind turbine are presented.

Key words: wind power plant; WT; friction brake.

Введение

На сегодняшний день ветроэнергетические установки (ВЭУ) получают все более широкое распространение в системах электроснабжения, в том числе и в автономных энергетических объектах [1]. Однако зачастую климатические условия, в которых размещаются ВЭУ, характеризуются повышенными ветровыми нагрузками, температурными перепадами и другими различными атмосферными воздействиями [2]. В инженерной практике проектирования ветроэнергетического оборудования принято, что ВЭУ достигает своей номинальной мощности по выработке электроэнергии при скорости ветра 11 м/с. В случае, если скорость ветра превышает 11 м/с, то необходимо ограничивать располагаемую на ветроколесе аэродинамическую мощность, чтобы не перегружать электрический генератор и механические элементы конструкции ВЭУ.

Большинство ветроагрегатов имеют встроенные системы управления, которые в том числе отвечают и за управление мощностью ВЭУ. Как правило, такое управление мощностью осуществляется с помощью увеличения электрической нагрузки или при помощи замыкания обмоток генератора с использованием широтно-импульсной модуляции [3]. Однако такие способы управления не позволяют эффективно управлять мощностью ВЭУ в течение длительного времени из-за постепенного перегрева электрического генератора [4]. К тому же, в случае аварийной ситуации (к примеру, возгорание компонентов генератора) остановка ротора ВЭУ будет технически невозможна. Таким образом, необходимо оборудовать ветрогенераторы дополнительными системами ограничения мощности, которые смогут обеспечить стабильную и безопасную эксплуатацию при любых ветровых нагрузках.

В условиях повышенных ветровых нагрузок могут быть актуальны механические системы управления мощностью ВЭУ, элементы которых способны продолжительно работать в высоконагруженных режимах. В работах [5-7] рассмотрены существующие механические системы управления мощностью, можно отметить, что основной принцип, с помощью которого осуществляется отбор избыточной аэродинамической мощности с ротора ВЭУ, это фрикционное торможение ветроколеса. Однако, несмотря на высокую надежность механических систем торможения, необходимо соблюдать рекомендуемый температурный режим фрикционных элементов для предотвращения снижения коэффициента трения, и как следствие, ухудшения эффективности тормозной системы.

Фрикционный материал тормозных элементов

Для того, чтобы определиться с граничными температурными условиями для фрикционных элементов, необходимо подобрать оптимальный состав фрикционного материала. Здесь следует учитывать, в каких атмосферных условиях будет работать ветроэнергетическая установка, и, соответственно ее тормозная система. К примеру, в арктических регионах, где зачастую наблюдаются явления морского соляного тумана, повышенной влажности и пр., необходимо включить в состав фрикционного материала компоненты, имеющие высокие антикоррозионные показатели. В таблице 1 приведен состав такого фрикционного материала. Армирующим материалом колодок выбрана латунная стружка. Обусловлено это тем, что латунная стружка оказывает наименьший износ тормозного диска. В качестве абразивного материала, который очищает трущиеся поверхности, помогая формировать фрикционную пленку на их границах, используется окись алюминия. Модификатором трения во фрикционных накладках является медь (в порошкообразном виде). На рис. 1 приведен график изменения коэффициента трения фрикционного материала в зависимости от температуры нагрева.

Таблица 1 – Состав фрикционного материала тормозных элементов

Материал	Доля материала (%)	Назначение
Латунь (связующий материал)	8	Матричная основа
Сталь, арамид, стекло	30	Стягивающие волокна
Керамика и оксида железа	8	Наполнители
Медь	15	Модификаторы трения
Графит	15	
Сульфиды металлов	8	Абразив
Алюминий	5	
Другие примеси	11	Матричная основа

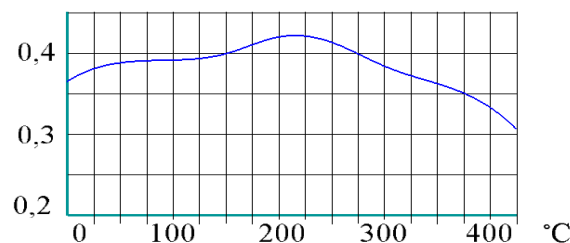


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения фрикционного материала от температуры (по оси ординат – коэффициент трения, по оси абсцисс – температура).

Математическое описание процесса нагрева тормозных элементов

Учитывая динамичность процесса торможения ветроколеса в условиях повышенных ветровых нагрузок, очевидно, что тормозные элементы будут находиться в процессе постоянного нагрева и охлаждения. Причем процесс охлаждения может протекать как во время бездействия тормозной системы (в период нормальных ветровых нагрузок), так и в

период простоя ВЭУ в заторможенном состоянии. Тепловой поток Q между различно нагретыми телами, выраженный через температурный напор, можно описать эмпирической зависимостью Ньютона-Рихмана:

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial}{\partial S} \cdot Q = \alpha \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи (Вт/(м²·К)), S – площадь поверхности нагретого тела.

Количество теплоты, переданного тормозным элементам в процессе торможения, через совершенную работу можно определить с помощью следующего выражения:

$$A_{тр.} = M_{тр.} \cdot \varphi, \quad (2)$$

где $M_{тр.}$ – момент торможения, создаваемый тормозными элементами (колодками), φ – угол поворота, на котором осуществлялся процесс трения-скольжения кулачков по внутренней стенке тормозного барабана.

Нагрев тормозных элементов с учетом отдачи тепла окружающей среде можно записать через выражение:

$$Q = Cm(T_{колодок} - T_{окр.}), \quad (3)$$

где C – удельная теплоемкость тормозных элементов, m – масса тормозных элементов.

Оптимизация работы системы торможения ВЭУ

При проектировании системы торможения ВЭУ возможно заложить функцию, которая устанавливала бы длительность простоя ветроагрегата в заторможенном состоянии. При кратковременных порывах набегающего потока ветра тормозная система может активироваться на малую по времени продолжительность, а при установившейся чрезмерно высокой скорости ветра система должна затормаживать ВЭУ на более длительное время. В таблице 2 приведены вариации временных интервалов блокировки (удержания в заторможенном состоянии) ротора ВЭУ. Для моделирования термодинамического процесса нагрева и охлаждения тормозных элементов использовалась программная среда MATLAB Simulink (рис. 2). Для задания основных параметров системы в качестве примера взята конструкция вертикально-осевой ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт: масса тормозных элементов $m = 5$ кг, удельная теплоемкость тормозных элементов $C = 500$ Дж/(кг·К), коэффициент теплоотдачи $\alpha = 50$ Вт/(м²·К), площадь поверхности тормозных элементов $S = 0,1$ м², создаваемый тормозной момент $M_{тр.} = 900$ Н·м, температура окружающей среды $T_{окр.} = 20$ °С.

Таблица 2 – Вариации временных интервалов блокировки ротора ВЭУ

№	$t_{кратк.}, с$	$t_{длит.}, с$
1	10	60
2	15	60
3	30	120
4	30	180
5	30	300
6	45	300
7	60	120
8	60	180
9	60	300
10	60	500

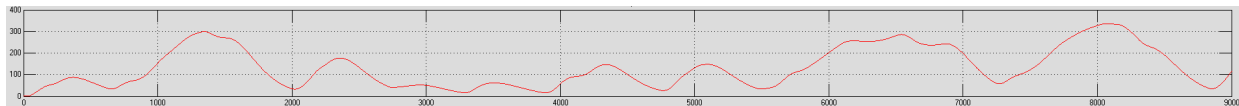


Рисунок 2 – График изменения температуры фрикционных элементов системы торможения ветроэнергетической установки

Заключение

По результатам моделирования было определено, что оптимальным режимом торможения является 5 вариант. Температура тормозных накладок в пиковом режиме не превышала 350 °С. При этом обеспечивалась максимальная выработка электроэнергии с ВЭУ. В случаях 1-4 происходил перегрев тормозных элементов выше 400 °С, в результате чего, коэффициент трения существенно уменьшался. В случаях 6-10 ветроэнергетическая установка продолжительное время находилась в заторможенном состоянии, что негативно сказывалось на ее энергетической эффективности.

Благодарность. Статья выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов (СП-71.2018.1).

Acknowledgment. The work was supported by RF President scholarship for young scientists and postgraduate students (SP-71.2018.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Gogoberidze G., Abramov V.M., Karlin L.N., Lednova J., 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. V. 3 (5), pp. 253-260.
2. Larionov A., Role of energy efficiency in improving the quality of housing projects. International Journal of Applied Engineering Research. 2016. V. 11 (6), pp. 4433–4439.
3. Соломин Е.В., Сироткин Е.А., Бодрова Е.С., Чиненов М.С. Дублирующая электромеханическая система торможения ветроэнергетической установки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2018. Т. 18. № 2. С. 55-61.
4. Hansen A.D., Sørensen P., Iov F., Blaabjerg F., Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators. Renewable Energy. 2006. V. 31 (7), pp. 935–951.
5. Коробатов Д.В., Мартьянов 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.
6. Korobotov D.V., Sirotkin E.A., Troickiy A.O., Solomin E.V. Wind Turbine Power Plant Control, IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, pp. 1-5.
7. Сироткин Е.А., Особенности технологии управления ветроэнергетическими установками // Материалы 68-й научной конференции ЮУрГУ. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет, 2016. С. 849-858.

REFERENCES

1. Gogoberidze G., Abramov V.M., Karlin L.N., Lednova J., 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. V.3(5), pp. 253-260.
2. Larionov A., Role of energy efficiency in improving the quality of housing projects. International Journal of Applied Engineering Research. 2016. V.11(6), pp. 4433–4439.

3. Solomin E.V., Sirotkin E.A., Bodrova E.S., Chinenov M.S. *Dubliruyushchaya elektromekhanicheskaya sistema tormozheniya vetroenergeticheskoy ustanovki* [Backup electromechanical brake system for the wind turbine]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika*. 2018. V. 18, No. 2, pp. 55–61.
4. Hansen A.D., Sørensen P., Iov F., Blaabjerg F., Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators. *Renewable Energy*. 2006. V. 31 (7), pp. 935–951.
5. Korobatov D.V., Martyanov A.S., Solomin E.V., Sirotkin E.A. *Effektivnye metody regulirovaniya moshchnosti ustroystv na osnove vie* [Efficient Power Control Methods of Devices Based on RES]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya*. 2016. No. 11-12, pp. 69–78.
6. Korobatov D.V., Sirotkin E.A., Troickiy A.O., Solomin E.V. Wind Turbine Power Plant Control, IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines, pp. 1-5.
7. Sirotkin E.A. *Osobennosti tekhnologii upravleniya vetroenergeticheskimi ustanovkami* [Technology Features of the Wind Turbine Control]. *Materialy 68-y nauchnoy konferentsii YuUrGU. Chelyabinsk, Yuzhno-Ural'skiy gosudarstvennyy universitet*. 2016, pp. 849-858.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сироткин Евгений Анатольевич

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия, аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения».

E-mail: e.srtkn@outlook.com.

Sirotkin Yevgeny Anatolyevich

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, Postgraduate student of the Electrical Stations, Grids and Power Supply Systems Department.

E-mail: e.srtkn@outlook.com.

Бодрова Елена Сергеевна

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия, аспирант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения».

E-mail: bodrovaes@susu.ru.

Bodrova Elena Sergeevna

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, Postgraduate student of the Electrical Stations, Grids and Power Supply Systems Department.

E-mail: bodrovaes@susu.ru.

Мирошниченко Алексей Александрович

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия, магистрант кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения».

E-mail: alex.miroshnichenko@mail.ru.

Miroshnichenko Alexey Alexandrovich

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, Master student of the Electrical Stations, Grids and Power Supply Systems Department.

E-mail: alex.miroshnichenko@mail.ru.

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с авторами статьи:
454080, Челябинск, пр. Ленина 76, ауд. 257, +7 (351) 267-93-18