



О.Н. Пчельникова-Гротова

Московский авиационный институт
(Национальный исследовательский университет)

МОНИТОРИНГ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ВЕТРОГЕНЕРАТОРОВ АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В статье рассматриваются вопросы дистанционного наблюдения за работой и обнаружения неисправностей ветрогенераторов энергоустановок, расположенных в труднодоступных территориях. В качестве объекта исследования выбран электрогенератор на двойном питании, для получения информации о возможных неисправностях которого предложено применить сигнатурный анализ токов с использованием вектора Парка. Для проверки возможности использования предложенного метода были разработаны модели элементов ветрогенератора в системе Matlab Simulink. Положительная оценка результатов моделирования позволила разработать IoT-систему дистанционного мониторинга ветрогенераторов автономных ветроэнергетических установок.

Возобновляемая энергетика, ветрогенератор, сигнатурный анализ электрических сигналов, вектор Парка.

Ветроэнергетика является одной из самых быстро развивающихся технологий возобновляемой энергетики. По последним данным Ассоциации развития возобновляемой энергетики (АРВЭ) [1] в России мощности по производству энергии ветра на суше и на море выросли с 98,86 МВт в 2014 г. до 2566,66 МВт в 2024 году, более чем в 25 раз за последние 10 лет.

Зачастую ветроэлектростанции (ВЭС) расположены на значительном удалении от потребителей, в труднодоступной местности, что делает контрольные визиты туда затруднительными. Информация о состоянии ветрогенераторов, генерируемой ими мощности и возможных неисправностях является актуальной.

Автономные ВЭС работают в сложных условиях повышенной влажности, вибрации и больших токов. У современных ветряков прочные лопасти и умные алгоритмы управления, которые защищают их от многих факторов. Но генератор все еще остается уязвимым, так как существуют сложности с его регулярным обслуживанием.

Предлагаемая система мониторинга ветрогенераторов предназначена для своевременного обнаружения изменений в состоянии станции. Ее основная цель – спрогнозировать потенциальные неисправности, что-

бы предотвратить ухудшение работы электростанции и связанный с ним экономический ущерб. Процедура мониторинга подразумевает постоянное наблюдение за отдельными показателями состояния генератора, их сравнение с показателями, полученным в нормальном режиме эксплуатации, и выявление дефектов [2].

Основные неисправности электрогенераторов на двойном питании (DFIG), используемых в ветряных турбинах, можно классифицировать как неисправности обмотки статора, сломанный стержень ротора или треснувшие концевые кольца ротора, эксцентриситеты воздушного зазора, изгиб вала, короткие замыкания обмотки ротора, а также неисправности подшипников и редукторов [3]. Наиболее существенными неисправностями являются те, что связаны с подшипниками электрогенератора, клеткой ротора, а также с изменением зазора между ротором и статором.

Для выявления характерных частотных составляющих, свидетельствующих о возможных неисправностях DFIG, предложено применить сигнатурный анализ тока с использованием вектора Парка [4], позволяющего получать дополнительную информацию за счет совместного анализа токов всех трех фаз двигателя (рис. 1).

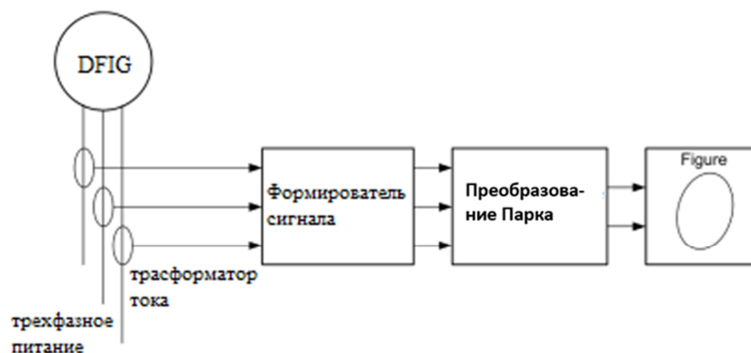


Рис. 1. Схема измерения тока в обмотках генератора

При этом способе диагностики электрогенератора переменного тока и связанных с ним механических устройств в течение заданного интервала времени проводят запись значений токов, выделяют анализируемые характерные частоты, преобразуют полученный сигнал из аналоговой в цифровую форму, а затем осуществляют спектральный анализ полученного сигнала и сравнение значений амплитуд на характерных частотах с уровнем сигнала на частоте сети, что позволяет на ранней стадии выявлять повреждения в обмотках статора и ротора [5].

В ходе токовой диагностики на основе метода Парка сначала проводятся замеры токов по каждой фазе с учетом отставания и вычисляются компоненты вектора Парка i_d , i_q в двухфазной вращающейся системе координат dq .

$$i_d = i_a \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} - i_b \frac{1}{\sqrt{6}} - i_c \frac{1}{\sqrt{6}}; \quad (1)$$

$$i_q = i_b \frac{1}{\sqrt{2}} - i_c \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (2)$$

где i_a , i_b , i_c – токи статора генератора в трехфазной вращающейся системе координат abc .

При допущениях, что асинхронный генератор идеализирован и является трехфазной симметричной активно-индуктивной нагрузкой, справедливы уравнения:

$$i_d = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right) i_m \sin(\omega t); \quad (3)$$

$$i_q = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right) i_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (4)$$

где i_m – максимальное амплитудное значение тока фазы, А; ω – угловая частота питания, рад/с; t – время, с.

Тогда длина вектора Парка PI в системе координат dq равна

$$PI = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}. \quad (5)$$

Векторная диаграмма определения PI методом Парка показана на рисунке 2.

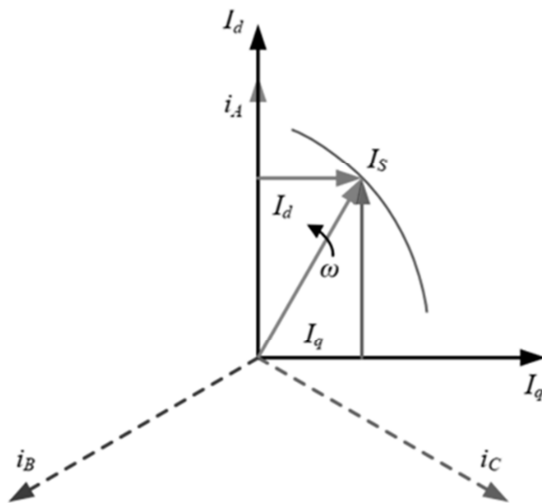


Рис. 2. Векторная диаграмма метода Парка

В аномальных условиях работы DFIG длина вектора PI изменяется, и описываемая вектором Парка кривая отличается от идеальной окружности в соответствии с имеющей место неисправностью.

Таким образом, форма описываемой концом вектора траектории (годографа) определяет диагностические признаки, соответствующие разным неисправностям. При наличии повреждений в обмотке статора форма годографа становится эллиптической, причем насколько сильно повреждена обмотка можно определить по эксцентриситету эллипса годографа, а конкретную фазу повреждения по ориентации осей эллипса. При наличии обрывов в пазах статора круговая траектория годографа утолщается, т.е. становится размытой. Эксцентриситет воздушного зазора характеризуется особой, некруговой формой годографа.

Для проверки возможности использования предложенного метода при проектировании системы мониторинга ВЭС в системе Matlab Simulink [6] были разработаны модели элементов ветрогенератора DFIG.

Сначала была разработана модель ветротурбины на основе математического описания ее аэродинамики [7]. Механическая мощность P (Вт) рассчитывается по формуле

$$P = \frac{\rho A v^3 C_P}{2}, \quad (6)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; A – площадь сечения турбины, м²; v – скорость ветра, м/с; C_P – коэффициент использования мощности (отношение мощности турбины к мощности ветра).

Значение коэффициента C_P было получено с помощью приближенного аппроксимационного уравнения, составленного на основе экспериментальных измерений [8].

$$C_P = C_1 \times \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \beta^{C_5} - C_6\right) e^{C_7/\lambda_i}, \quad (7)$$

где β – угол атаки лопасти; λ – быстроходность, равная отношению скорости лопастей v_b к скорости ветра v , C_1 , C_2 , ..., C_7 – постоянные, зависящие от аэродинамических характеристик турбины.

В процессе разработки к элементу базовой библиотеки Simulink, представляющему асинхронную машину DFIG, был подключен источник трехфазного напряжения и прибор для измерения напряжения, а также силовой электронный преобразователь. Затем к модели DFIG была подсоединена модель ветротурбины, в основу которой были положены уравнения (6), (7).

Для управления системой мониторинга была разработана модель блока управления DFIG, основанная на стратегии векторного управления [9].

Контроль токов DFIG в модели блока управления проводился по схеме, показанной на рисунке 3.

Анализ токов методом Парка проводился в блоке Vector Park (рис. 4) системы мониторинга, в который поступала информация о токах статора DFIG. В блоке реализована математическая модель, соответствующая выражениям (1)–(5), результатом которой являются годографы векторов токов Парка. Усилители, расположенные в начале схемы, служат для имитации повреждений в обмотках статора и подшипниках.

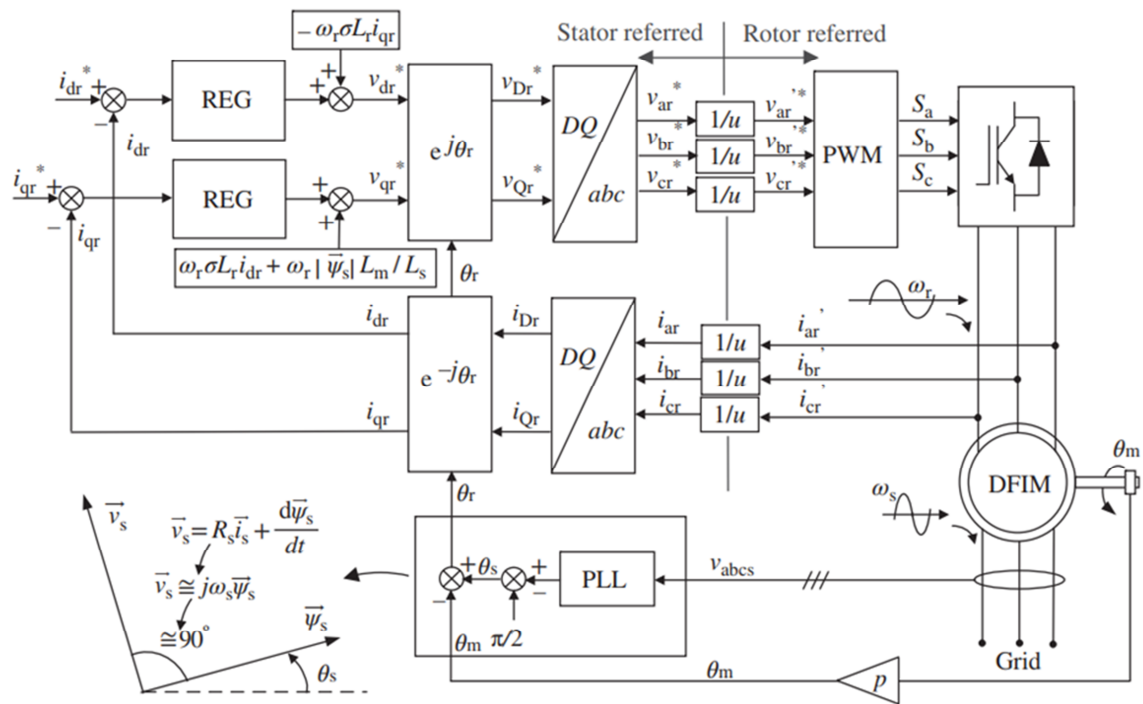


Рис. 3. Модель контроля токов DFIM

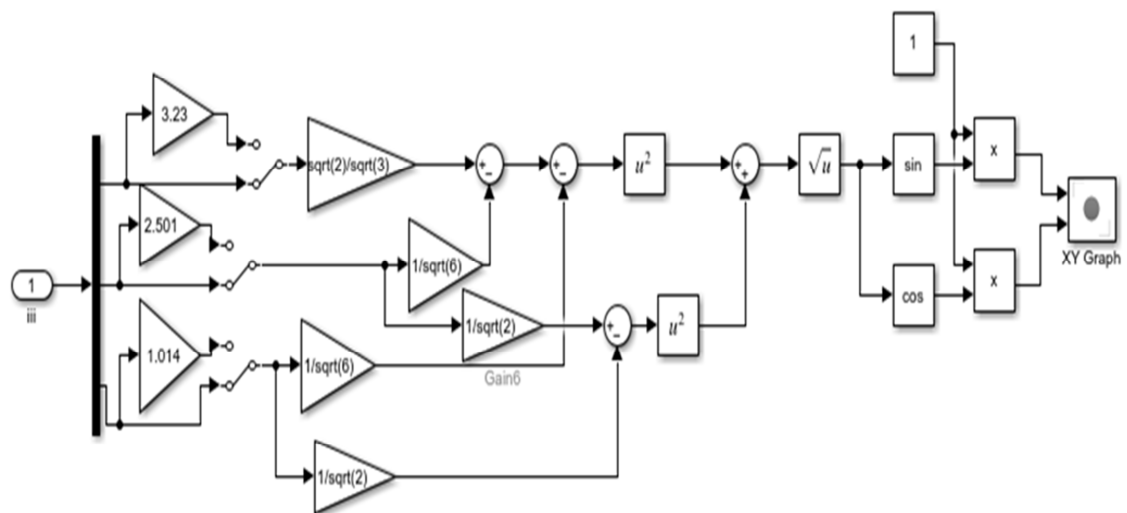


Рис. 4. Модель блока Vector Park

Таблица

Результаты моделирования дефектов ветрогенератора

	Вид дефекта		
	Исходное состояние генератора	Повреждение обмоток статора	Повреждение подшипников
Годограф вектора Парка			

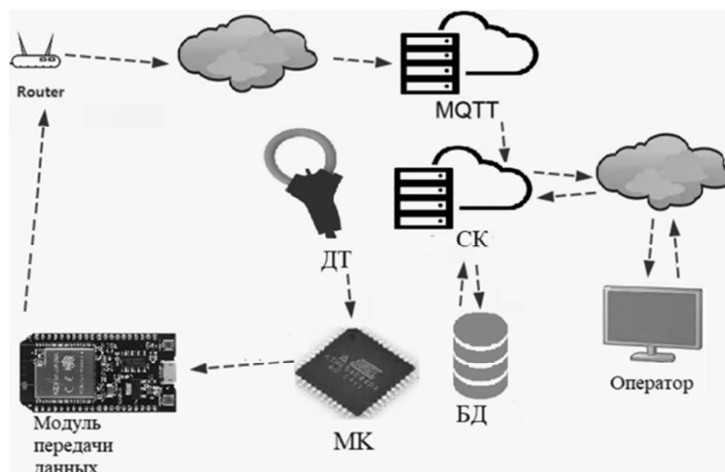


Рис. 5. Архитектура системы мониторинга дефектов автономных ветроустановок

Результаты моделирования обнаружения дефектов ветрогенератора с помощью предложенного метода представлены в таблице.

Результаты моделирования подтвердили возможность использования предложенного метода для дистанционного мониторинга ветрогенераторов автономных ВЭС.

Концепция интернета вещей (IoT) [10] позволяет организовать сеть для передачи данных от автономной ВЭС до потребителя энергии. Для обнаружения дефектов при работе автономного ветрогенератора разработана IoT-система мониторинга DFIG (рис. 5), в состав которой входят: Router – роутер ZBT WE1626 MAGIC; MQTT – протокол обмена сообщениями; ДТ – датчик тока; СК клиент-серверное приложение на фреймворке Spring Boot; МК – микроконтроллер ATmega328P; БД – база данных временных рядов.

Работа системы мониторинга состоит из ряда последовательных итераций, каждая из которых начинается с передачи сигналов с датчиков тока на АЦП микроконтроллера, где они обрабатываются и в форме строки json передаются по протоколу UART через маршрутизатор на MQTT-брокер. Далее посредством приложения СК сообщения записываются БД временных рядов. С клиентской части оператора ежесекундно отправляются запросы, которые позволяют получить анализ состояния генератора методом Парка. На клиентской части формируется годограф, позволяющий визуально оценить состояние ветрогенератора и при возникновении дефекта определить его вид и время появления.

Таким образом, разработанная система дает возможность заблаговременно выявить и идентифицировать неисправности ветрогенераторов удаленных ВЭС, позволяет обеспечить их безопасную и экономичную работу, а также вовремя проводить ремонтно-технологические работы и снизить перерасход электроэнергии и экономический ущерб, связанный с ухудшением работы ветрогенератора.

Литература

1. Статистика ВИЭ. Материалы Ассоциации развития возобновляемой энергетики (АРВЭ). – URL:

<https://rreda.ru/industry/statistics/> (дата обращения: 29.05.2025). – Текст : электронный.

2. John Fletcher, Jin Yang. Introduction to Doubly Fed Induction Generator for Wind Power Applications. Paths to Sustainable Energy. – URL: https://cdn.intechopen.com/pdfs/12519/InTech-Introduction_to_the_doubly_fed_induction_generator_for_wind_power_applications.pdf (дата обращения: 29.05.2025). – Text : electronic.

3. Hamatwi, E. Condition monitoring and fault diagnosis of stator and rotor interturn winding faults in a DFIG-based wind turbine system / Hamatwi E., Barendse P. // International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference. –2020. DOI: <https://10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA48453.2020.9040981> (дата обращения: 29.05.2025). – Text : electronic.

4. Jafar Zarei, Javad Poshtan. An advanced Park's vectors approach for bearing fault detection // Tribology International. – 2009. – Vol. 42. – P. 213–219.

5. ГОСТ ISO 20958—2015. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного электрического двигателя. – Москва : Стандартинформ, 2016.

6. Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics) : учебное пособие для высших учебных заведений / Мусалимов, В. М., Запоруев, Г. Б., Калапышина, И. И. [и др.]. – Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2013 – 114 с.

7. Emulation of Wind Turbines / D. Martinello, E. G. Carati, P. J. da Costa, R. Cardoso, C. M. O. Stein. – URL: <https://cdn.intechopen.com/pdfs/50818.pdf> (дата обращения: 29.05.2025). – Text : electronic.

8. Blackwood, M. Arcadii Grinshpan Maximum Efficiency of a Wind Turbine, Undergraduate / M. Blackwood // J. of Mathematical Modeling: One + Two. – 2016. – Vol. 6, № 2. – С. 1–12.

9. Виноградов, А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов ; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.

10. Глушак, Е. В. Введение в Интернет вещей : учебное пособие / Е. В. Глушак, А. В. Куприянов. – Самара : Издательство Самарского университета, 2023. – 104 с.

O.N. Pchelnikova-Grotova
Moscow Aviation Institute
(National Research University)

MONITORING FAILURES OF WIND GENERATORS OF AUTONOMOUS POWER PLANTS

The article considers the issues of remote monitoring of the operation and detection of faults in wind turbines of power plants located in hard-to-reach areas. A dual-powered electric generator was chosen as the object of study. It was proposed to apply signature analysis of currents using the Park vector to obtain information about possible faults. To test the possibility of using the proposed method, models of wind turbine elements were developed in the Matlab Simulink system. A positive assessment of the modeling results allowed us to develop an IoT system for remote monitoring of wind turbines of autonomous wind turbines.

Renewable energy, wind turbine, signature analysis of electrical signals, Park vector.