

УДК 621.3

**ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

**О. В. Крюков, А. В. Серебряков, А. Б. Васенин**

ОАО «Гипрогазцентр»

ул. Алексеевская, 26, г. Нижний Новгород, 603950, Россия. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

Рассмотрены результаты разработки и реализации встроенной системы мониторинга и прогнозирования технического состояния электромеханической части ветроэнергетических установок. Представлен метод синтеза алгоритмов оперативного диагностирования состояния установок на основе нейро-нечеткой идентификации процессов в электрической машине и преобразователе частоты. Предложены аппаратные средства на основе интеллектуальных датчиков и результаты компьютерного моделирования работы ветроэнергетических установок при работе в различных режимах, включая комбинированные автономные энергоисточники. Рассмотрены системные вопросы мониторинга установок в рамках концепции Smart Grid.

**Ключевые слова:** диагностика, прогнозирование состояния, электромеханическая часть, ветроэнергетическая установка, автономные комбинированные энергоисточники.

**ДІАГНОСТИКА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

**О. В. Крюков, А. В. Серебряков, А. Б. Васенин**

ВАТ «Гіпрогазцентр»

вул. Олексіївська, 26, м. Нижній Новгород, 603950, Росія. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

Розглянуто результати розробки й реалізації вбудованої системи моніторингу та прогнозування технічного стану електромеханічної частини вітроенергетичних установок. Представлено метод синтезу алгоритмів оперативного діагностування стану установок на основі нейро-нечіткої ідентифікації процесів в електричній машині й перетворювачі частоти. Запропоновано апаратні засоби на основі інтелектуальних датчиків і результати комп'ютерного моделювання роботи вітроенергетичних установок при роботі в різних режимах, що включають також комбіновані автономні енергоджерела. Розглянуто системні питання моніторингу установок у рамках концепції Smart Grid.

**Ключові слова:** діагностика, прогнозування стану, електромеханічна частина, вітроенергетична установка, автономні комбіновані енергоджерела.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Ветроэнергетика сегодня – самая быстроразвивающаяся отрасль в мировом топливно-энергетическом комплексе всех стран. Вопросам разработки принципов построения и управления ветроэнергетическими установками (ВЭУ) [1], технико-экономических аспектов применения их для автономных систем электроснабжения [2] и применения новейших технологических платформ для повышения энергоэффективности работы [3] уделяется большое внимание. Однако вопросы надежности и безаварийности ВЭУ средствами оперативного мониторинга и прогнозирования технического состояния остаются менее изученными. Вместе с тем сегодня разработаны методологические основы встроенной диагностики и прогнозирования электромеханических систем для ряда отраслей промышленности [4], которые можно с успехом применить и для мониторинга ВЭУ.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Особенности ВЭУ. Работа автономных ВЭУ характеризуется специфическими особенностями, среди которых наиболее существенными являются:

- широкий диапазон изменения скорости и нагрузки из-за стохастического характера ветровой энергии и метеорологических условий, вплоть до критических значений;
- преобладание динамических режимов генератора из-за непостоянного и порывистого воздействия ветрового потока, приводящего к вибрации (ВЧ-составляющая) и колебаниям скорости (НЧ-составляющая);
- сложность оптимизации оборудования из-за неадекватности прогнозов условий эксплуатации;

– вопросы совместимости работы генератора с ветроколесом и редуктором, а также с преобразователями и накопителями энергии;

– наличие широкого спектра возможных потребителей электроэнергии с различными требованиями качества напряжения и частоты, значительное колебание нагрузки.

Вместе с тем, главным требованием к автономным системам электроснабжения на базе возобновляемых источников электроэнергии является надежность их длительной работы. В этой связи рассмотрены методологические, аппаратные и алгоритмические возможности обеспечения оперативной диагностики ВЭУ средствами встроенной системы мониторинга и прогнозирования (ВСМП) состояния агрегатов.

*Теоретическое обоснование.* Суть метода состоит в проектировании ВСМП "сверху вниз" – от системы сбора и оценки информации к первичным датчикам. Сама ВЭУ при этом представляется абстрактной динамической системой, процесс функционирования которой состоит в изменении состояния системы под воздействием внешних и внутренних возмущений. Математическая модель подобной системы определяется как функционал переменных:

$$y = F(T, X, Z, S, S_0, C^*, C, L^*, L), \tag{1}$$

где  $T$  – множество моментов времени  $t$ ;  $X, Z$  – множества входных  $x$  и выходных  $z$  сигналов системы;  $S$  – множество состояний  $s$  системы;  $S_0$  – замкнутая область состояний, ограничивающая возможные перемещения  $s$  в процессе работы;  $C^*(T, X, S) = P^*$ ,  $C(T, X, S) = P$  – операторы переходов, отражающие изменения состояния системы под воздействием внешних и внутренних возмущений;  $L^*(T, X, S) = Y^*$ ,  $L(T, X, S) = Y$  – операторы выходов, описывающие

формирование выходного сигнала под действием внутренних и внешних возмущений.

Для распознавания технического состояния ВЭУ как объекта диагностирования используется множество  $E_i$  (где  $i=0, 1, 2, \dots, N$ ) технических состояний объекта, характеризующих совокупность возможных состояний  $s_i$ . Элементами множества  $E_i$  является исправное  $e_0$  (при  $i=0$ ) и неисправные  $e_i$  (при  $i \neq 0$ ) состояния объекта, вызванные появлением дефекта в  $i$ -й составной части объекта.

Для построения математической модели диагностирования ВЭУ использованы структуры ВЭУ, т.к. они позволяют задать минимально необходимую глубину диагностирования и отразить конструктивные решения реального ВЭУ, позволяющие решить вопросы практической реализации ВСМП.

На основании анализа видов, интенсивности и стоимости отказов в основных узлах ВЭУ процедура определения необходимой глубины диагностирования  $\lambda$  объекта диагностики выполняется таким образом. Максимальная глубина диагностирования соответствует числу наименьших неделимых элементов объекта, т.е. числу ИМС, резисторов, конденсаторов и т.п. в САУ, общее число которых достигает нескольких сотен и более. Такой анализ ВЭУ покажет невозможность задания подобной величины  $\lambda$ . Наиболее оптимальным представляется в качестве неделимых элементов ВЭУ рассматривать: электрогенератор, силовые вентили выпрямителя и инвертора, фильтр в звене постоянного тока, датчики параметров и координат, контроллеры с соответствующими интерфейсами.

*Синтез алгоритма мониторинга.* Для получения математической модели объекта ВЭУ каждый его элемент заменяется логическим блоком, имеющим один выход и существенные для данного выхода входы [4]. При выходе за пределы допустимых значений хотя бы одного из входных сигналов на выходе функционального элемента появляется недопустимый сигнал и элемент модели считается дефектным. В этом случае математическая модель СГ–ПЧ имеет вид, показанный на рис. 1.

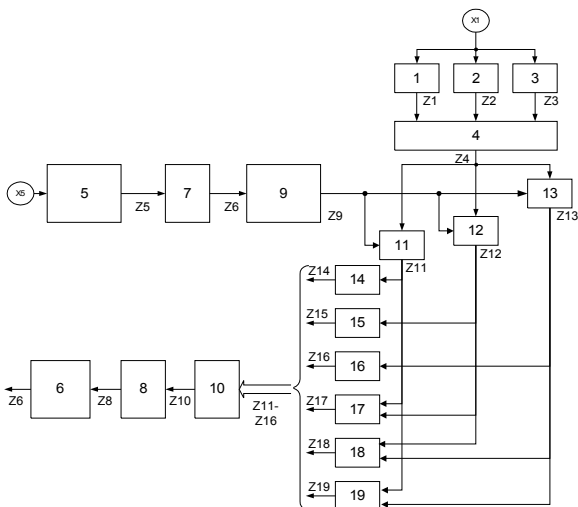


Рисунок 1 – Математическая модель діагностики

Входные и выходные сигналы объекта диагностирования представлены дугами с символами  $x_i$  и

$z_i$ , где  $i$  – индекс элемента логической модели, на вход которого поступают сигналы. Элементы объекта представлены вершинами графа с индексами  $i$ , соответствующими номерам элементов на функциональной модели.

Входные внешние сигналы обозначены  $x_1, (x_2, x_3), x_5$ . Связь между внешними и внутренними сигналами описывается системой логических уравнений для технических состояний элементов системы  $e_{1 \div e_{19}}$ .

Таким образом, задача построения алгоритма диагностирования формулируется следующим образом. Через разбиение множества  $E$  на  $\lambda$  непересекающихся множеств  $E_v$  (где  $v=1,2,\dots,\lambda$ ) задана требуемая глубина диагностирования объекта. Следует определить минимальную совокупность элементарных проверок  $Z_j$  и последовательность их реализации для обеспечения заданной глубины диагностирования объекта.

Для этого совокупность элементарных проверок алгоритма диагностирования должна различать каждую пару технических состояний объекта диагностирования, принадлежащих разным подмножествам  $E_v$  и  $E_m$ , ( $m \neq v$ ) его состояний, т.е. обладать свойствами обнаружения дефектов.

Совокупность  $P$  элементарных проверок алгоритма диагностирования является полной, если она обеспечивает диагностирование с заданной глубиной, и избыточной, если удаление из нее любой одной элементарной проверки ведет к уменьшению глубины диагностирования. Полные избыточные совокупности с наименьшим числом элементарных проверок называют минимальными. Определение минимальных совокупностей элементарных проверок осуществляется по таблицам функций неисправностей.

Таким образом, для выделения неисправного состояния любого элемента ВЭУ по графу причинно-следственных связей (рис. 2) достаточно воспользоваться одной из двух минимальных совокупностей элементарных проверок.

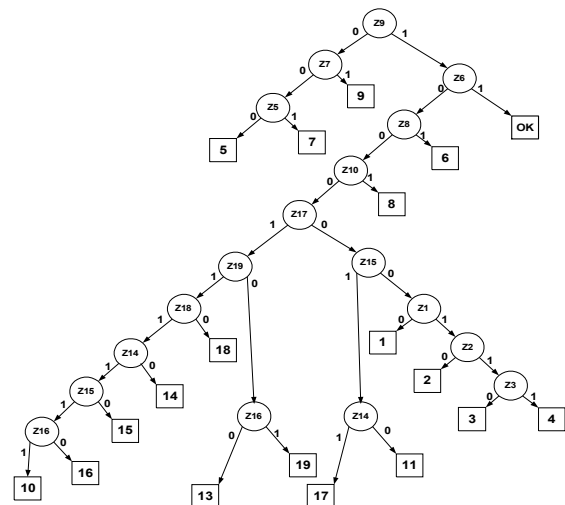


Рисунок 2 – Алгоритм ВСМП системи СГ–ПЧ,

Доказано, що використання цього методу дозволяє скоротити не менше ніж на 15 % загальне число елементів ВЭУ, підлягаючих перевірці без зменшення глибини діагностики. При великому числі елементів вииграш ще суттєвіший, але з великого обсягу ручної роботи в цьому випадку цілорозумно звернутися до машинним методам синтезу алгоритмів діагностування [4].

*Алгоритми прогнозування.* Як було показано вище, ВСМП ВЭУ повинні забезпечувати не тільки діагностування, але і прогнозування настання аварійних режимів.

Для вибору принципу побудови ВСМП ВЭУ найбільш цілорозумним є принцип *експертних систем* [4], які оперують з двома типами даних: експертні і реальні. Набір даних для розглянутих типів систем спеціальним чином упорядковується і зберігається в ПЗУ (експертні) і ОЗУ (реальні) і називається відповідно базою експертних даних (БЭД) і базою реальних даних (БРД).

Програмні засоби ВСМП повинні бути відповідним чином скоректовані: при діагностуванні вузлів, стан яких необхідно ще і прогнозувати, в алгоритм діагностики додається прогнозування. В простейшому випадку, коли передбачені чотири результати порівняння БЭД і БРД, алгоритм прогнозування виглядає, як показано на рис. 3.

Як видно, верхній рівень діагностуємого автомата при використанні запропонованого математичного підходу виконує дуже просту функцію опиту датчиків і видає відповідну ітогову інформацію, однак за дуже короткий часовий проміжок (не більше 0,5 періоду несущої частоти широтно-імпульсної модуляції). Ввиду простоти програмної реалізації такого складного алгоритму діагностування і прогнозування і підвищених вимог до швидкодії, апаратна реалізація ВСМП повинна орієнтуватися на сигнальні мікроконтролери з необхідним обсягом енергонезалежної пам'яті для ведення статистики роботи.

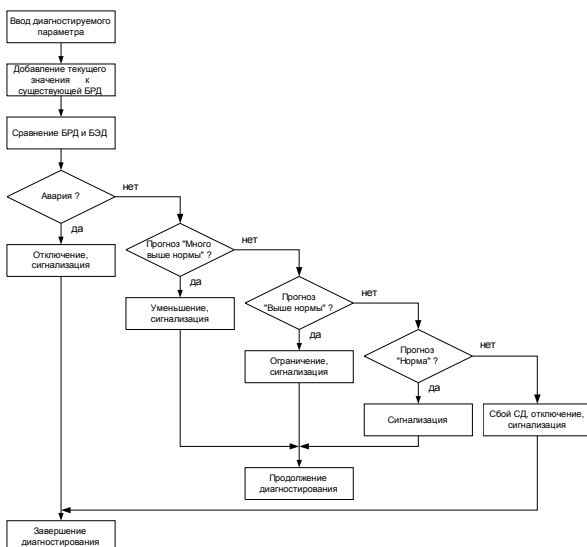


Рисунок 3 – Алгоритм прогнозування

Для забезпечення цілей діагностики структура пристроїв нижнього рівня ВСМП повинна містити наступні вузли: первинний датчик вимірюємого параметра і схему аналізу стану параметра. Крім цього, для прогнозування необхідно також вузол первинного вимірювання з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Функціональна схема такого інтелектуального датчика приведена на рис. 4. В залежності від потребностей на виході датчиків може присутувати інформація о контролюємому параметрі з різною ступенню точності.

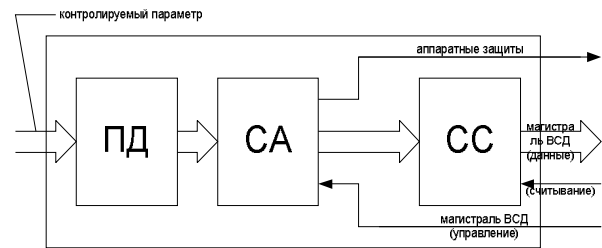


Рисунок 4 – Інтелектуальний датчик.

Інтелектуальні датчики ВСМП ВЭУ при адекватному проектуванні, виготовленні і експлуатації мають високу надійність і уніфіковані. В якості первинних використовуються типові датчики струму і напруги на базі спеціалізованих ІМС. На виході має порт зв'язування з мікропроцесорною системою управління ВЭУ.

Для прогнозу в режимі реального часу використовуються алгоритми нечіткої логіки, яка часто використовується в прогнозуванні. Вона є багаторівневою "м'якою" логікою з мовним синтаксисом, використовуючим лінгвістическіє змінні і рівні – "нульові", "положителний великий", "отрицательний малий" і т.п. Для складання алгоритму прогнозування використовується попередня фазифікація поточних входних (вимірюємых) змінних і їх швидкостей зміни. По отриманим лінгвістическіє величинам поточного значення параметра і швидкості його зміни визначається прогнозуємое значення цього параметра через визначений часовий інтервал.

В залежності від поточної швидкості зміни сигналу блок оцінки швидкості вимірюємых сигналів може присвоювати три види терм-значень: нульова швидкість, положителна швидкість, отрицательна швидкість. С входу блока оцінки поточного значення сигналу видається терм-значення оцінки контролюємого параметра, яке в залежності від його величини може приймати значення: норма, менше норми, більше норми. С виходу блока оцінки терм-значень видається прогноз величини спостережуємого параметра в вигляді терм-значень, які можуть бути: норма, менше норми, багато більше норми. По входним прогнозуємым терм-значенням блок асоціативної оцінки визначає прогнозуємую ситуацію і генерує адресу, який подається на блок пам'яті. По даному адресу з пам'яті считується вектор управляючих впливів. Данна схема

может быть реализована как на специализированных Fuzzi-контроллерах, так и на классических микроконтроллерах. При этом, как правило, объем памяти программ микроконтроллера, отводимый для задач прогнозирования, не превышает 2 Кбайт.

**ВЫВОДЫ.** 1. Предложена универсальная ВСМП, позволяющая объединить в единый объект диагностирования силовую и управляющую часть электромеханической части ВЭУ и оптимизировать процедуру диагностирования.

2. Разработана методика синтеза алгоритмов мониторинга и прогнозирования ВЭУ на базе СГ–ПЧ, инвариантная к применяемым средствам тестирования элементов.

3. Практическая реализация ВСМП включает в себя корректировку электрических схем ВЭУ, позволяющую оптимизировать диагностирование, и аппаратное использование разработанного интеллектуального датчика параметров состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крюков О.В., Титов В.В. Разработка АСУ автономными ветроэнергетическими установками // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 4. – С. 35–37.
2. Васенин А.Б., Крюков О.В., Титов В.В. Анализ технико-экономических параметров ветроэнергетических установок для объектов ОАО «Газпром» // Приводная техника. – 2011. – № 6. – С. 2–8.
3. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В. Системы электроснабжения на принципах SMART GRID для объектов магистральных газопроводов // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 4. – С. 36–38.
4. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г. Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2012. – № 2. – С. 5–10.

DIAGNOSIS ELECTROMECHANICAL PART OF WIND TURBINES

**O. Kryukov, A. Serebryakov, A. Vasenin**

ОАО “Giprogazcenter”

ul. Alekseevskaya, 26, Nizhniy Novgorod, 603950, Russia. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

The development and realization results of the embedded system of monitoring and forecasting of the technical state of the electromechanical part of wind-driven electrical plants are presented. The synthesis method of algorithms of plants state efficient diagnosis on the basis of neuro-fuzzy processes identification in an electric machine and a frequency converter is presented. Hardware on the basis of smart sensors and computer modeling results of wind-driven electric plants work under operation in different modes including compound autonomous power-suppliers are suggested. System questions of plants monitoring within the limits of Smart Grid concept are considered.

**Key words:** diagnosis, state forecasting, electromechanical part, wind-driven electric plant, autonomous compound power-suppliers.

REFERENCES

1. Kryukov O.V., Titov V.V. ACS development of autonomous wind-driven electric plants // *Automation in industry*. – 2009. – № 4. – PP. 35–37. [in Russian]
2. Vasenin A.B., Kryukov O.V., Titov V.V. Analysis of technical and economic parameters of wind-driven electric plants for Gazprom objects // *Driven equipment*. – 2011. – № 6. – PP. 2–8. [in Russian]
3. Vasenin A.B., Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Power-supply systems on basis of SMART GRID for main gas pipelines’ objects // *Automation in industry*. – 2012. – № 4. – PP. 36–38. [in Russian]
4. Kryukov O.V., Stepanov S.E., Titov V.G. Embedded systems of monitoring of electric drives technical state for security of energy supply of gas transport // *Energy security and energy saving*. – 2012. – № 2. – PP. 5–10. [in Russian]

Стаття надійшла 2.07.2012.  
Рекомендовано до друку  
к.т.н., доц. Каліновим А.П.