

Ячейка может исследоваться на макете в трех режимах: *a* – открытая цепь (правое положение реле S1); *b* – разряд через резистор Rn (левое положение S2 и S1); *v* – заряд (правое положение S2 и левое S1). Источник постоянного напряжения DC заряжает батарею напряжением 4.2 В.

На рисунке 4 представлен исходный сигнал напряжения на выходе батареи при нагрузочном тестировании и его приближение, полученное с помощью нейросети на этапе обучения. Сигналы идентичны в высокой степени. Пики ошибок достигают двух процентов. В целом же, на основной протяженности сигнала, они составляют порядка половины процента.

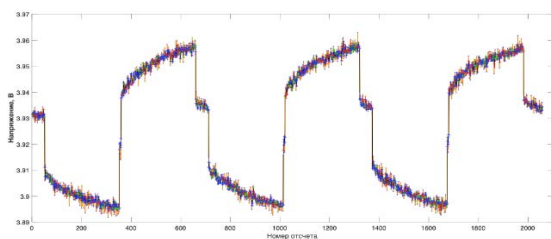


Рисунок 4 – Сигнал напряжения на выходе батареи при нагрузочном тестировании и его приближение, полученное с помощью нейросети на этапе обучения

Следует отметить, что представленная выборка включает в себя лишь несколько периодов заряда-разряда и хорошо подходит для кратко-

срочного прогнозирования. Отдельно следует выделить работу с большими циклами (полный заряд-разряд батареи) и работу на участках насыщения (сверху и снизу), где небольшим изменениям заряда соответствуют значительные изменения напряжения.

Использование модели на основе регрессионной нейронной сети непосредственно во время работы электрического транспортного средства позволяет получать необходимую информацию о состоянии ячейки батареи в ближайшее время (до 4000 секунд для приведенной конфигурации) при текущем нагрузочном профиле, а также при его вариациях.

На основе этой информации алгоритмы системы управления батареями электрического транспортного средства могут принимать более эффективные в долгосрочном периоде решения по балансировке ячеек. При этом нейронная сеть замыкается таким образом, что предсказанные ею данные о напряжении ячейки подаются обратно на вход вместе с новыми отсчетами тока согласно выбранному нагрузочному профилю. Предсказательная способность такой системы ограничена в силу накопления ошибки. С течением времени расхождение между предсказанной последовательностью и реальным напряжением возрастает.

УДК 621.317.08

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН МЕТОДОМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ Смирнова Н.В.¹, Пономарев А.В.²

¹Севастопольский государственный университет
Севастополь, Российская Федерация

²Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
Ижевск, Российская Федерация

Электрические машины разнообразного назначения находят самое широкое приложение при создании объектов производственной инфраструктуры в различных предметных областях, в том числе и в приборостроении. При этом задача разработки новых и совершенствования существующих методов и средств функционального диагностирования электрических машин: электрогенераторов, электродвигателей, инверторов, электромашинных усилителей, индукционных регуляторов, является важной и актуальной задачей.

В настоящее время разработан значительный арсенал методов функционального диагностирования электрических машин, которые по физической сущности анализируемого информационного процесса можно разбить на следующие группы:

1. Анализ вибрационных и акустических сигналов, генерируемых функционирующей электрической машиной.

2. Анализ магнитных потоков, создаваемых функционирующей электрической машиной.

3. Анализ электромагнитных и температурных полей.

4. Исследование электрических параметров (динамики изменений тока, напряжения и потребляемой мощности) электрической машины в процессе ее работы.

Отметим, что каждый из существующих методов функционального диагностирования электрических машин, обладая своими достоинствами и недостатками, имеет и свою наиболее результативную область приложения. Например, недостатком метода анализа виброакустического сигнала является требование непосредственного доступа к электрической машине, выполнение которого часто просто невозможно, например, на АЭС.

Наиболее перспективными методами функционального диагностирования электрических машин является методы пятой группы.

Эти методы основаны на следующей простой физической гипотезе, согласно которой те или иные неисправности (электрические и/или механические) электрической машины и связанного с ней оборудования должны вызывать изменения магнитного потока. Изменения магнитного потока, в свою очередь, должны вызывать изменения тока, напряжения, потребляемой (генерируемой) мощности функционирующей электрической машины. Как показали экспериментальные исследования, эта гипотеза блестяще подтверждается на практике.

Существенными преимуществами пятой группы методов функционального диагностирования, в сравнении с другими группами, является, во-первых, отсутствие необходимости обеспечения доступа к объекту диагностирования, и, во-вторых, возможность функционального диагностирования как электрической, так и механической частей электрической машины, а также связанного с ней механического оборудования. В этой группе методов для решения задачи функционального диагностирования объекта исследуется гармонический состав энергетических спектров электрических сигналов электрических машин (сигналов напряжения, тока, потребляемой (вырабатываемой) мощности), анализируется спектральный состав амплитуды и фазы вектора Парка. Методами анализа электрических сигналов функционирующих (работающих) электрических машин можно с высокой достоверностью диагностировать статический и динамический эксцентриситет, несоосность валов, обрыв стержней, дефекты подшипников, дефекты обмоток статора.

В настоящее время развитие методов и средств диагностирования сложных объектов, в том числе и электрических машин, происходит на основе внедрения цифровых технологий (Digital Technologies – DT – технологий) [1]. В результате внедрения – DT – технологий был запущен процесс цифровизации функционального диагностирования объектов – процесс перехода при диагностировании объектов от методов аналоговой обработки сигналов (АОС) к методам цифровой обработки сигналов (ЦОС). Отметим, что процессы АОС и ЦОС имеют много общего, но имеют и существенные отличия, не учет которых может приводить к серьезным ошибкам.

Переход от АОС к ЦОС в процессе цифровизации функционального диагностирования на основе энергетических спектров электрических сигналов электрических машин базируется на дискретном преобразовании Фурье.

Прямое дискретное преобразование Фурье (ДДФ) (алгебраическая форма).

$$S_N(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn}; \quad (1)$$

$$W_N = \exp(-j \frac{2\pi}{N}), \quad k = \overline{0, (N-1)},$$

где $x(n)$ – электрический дискретный сигнал, заданный в виде последовательности на N – интервале, т. е. $n = \overline{0, N-1}$, $W_N^{kn} = \text{def}_N(k, n)$, $k = \overline{0, (N-1)}$, $n = \overline{0, (N-1)}$ – дискретные экспоненциальные функции (ДЭФ), $S_N(k)$ – бины ДДФ.

Обратное дискретное преобразование Фурье (ОДФ) (алгебраическая форма).

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} S_N(k) W_N^{-kn}. \quad (2)$$

Отметим три важных момента относительно ДДФ.

Во-первых, несмотря на то, что сигнал $x(n)$ и спектр $S_N(k)$ заданы на N – интервалах, они (сигнал и спектр) периодически продолжают на всю временную и частотную оси соответственно. Свойство периодичности ДДФ объясняется тем, что ДДФ равно дискретно-временному преобразованию (ДВПФ) периодического дискретного сигнала. Отметим, что если сигнал периодичен, то его спектр, полученный методом ДДФ, дискретен. Если спектр сигнала периодичен, то сигнал, полученный методом обратного ДДФ, дискретен. Если сигнал дискретен, то спектр периодичен, а если спектр дискретен, то сигнал периодичен.

Во-вторых, k – значение бина (коэффициента) ДДФ является линейным косвенным измерением бина ДДФ

В-третьих, погрешность γ измерения частоты гармонической составляющей сигнала методом ДДФ равна половине расстояния Δf между соседними бинами ДДФ в энергетическом спектре $G_N(k)$:

$$G_N(k) = N \cdot |S_N(k)|^2; \quad \gamma = \Delta f / 2; \quad \Delta f = F_D / N, \quad (3)$$

где F_D – частота дискретизации сигнала $x(n)$.

Теоретический и экспериментальный анализ ДДФ выявил ряд негативных эффектов, сопровождающих его применение. Это, прежде всего, эффекты утечки, наложения и частотола. Можно показать, что негативные эффекты ДДФ функционально связаны со свойствами его базиса и вытекают из природы дискретного преобразования Фурье.

С точки зрения функционального диагностирования электрических машин наиболее нежелателен эффект частотола ДДФ, поскольку он не позволяет получить ответ на вопрос: каковы значения энергетического спектра между бинами ДДФ? В силу того, что спектральный анализ для качественной диагностики электрических машин необходимо проводить с погрешностью не более

0,01–0,02 Гц, необходимо каким-то образом увеличивать число бинов ДПФ. Для решения выявленной проблемы предложено обобщение ДПФ в виде параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П).

Прямое ДПФ-П (матричная форма).

$$S_{N,\theta} = \frac{1}{N} F_{N,\theta} X_N; \quad 0 \leq \theta < 1; \quad (4)$$

где $X_N = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$ – задание дискретного сигнала $x(n)$, $n = 0, \overline{N-1}$, в виде вектора N -мерного линейного пространства; T – знак транспонирования;

$S_{N,\theta} = [s(0, \theta), s(1, \theta), \dots, s((N-1), \theta)]^T$ – вектор бинов ДПФ-П, полученных путем измерения спектра в системе параметрических дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ-П), которая задается матрицей $F_{N,\theta}$.

$$F_{N,\theta} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \dots & (N-1) \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ (N-1) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & W_N^\theta & \dots & W_N^{\theta(N-1)} \\ 1 & W_N^{(1+\theta)} & \dots & W_N^{(1+\theta)(N-1)} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & W_N^{(N-1+\theta)} & \dots & W_N^{(N-1+\theta)(N-1)} \end{bmatrix} \end{matrix} \end{matrix}; \quad (5)$$

УДК 621.3.049

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С СОВМЕЩЕНИЕМ ПРОЦЕДУР КАЛИБРОВКИ

Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Свистун А.И.¹, Тявловский К.Л.¹, Шадурская Л.И.¹, Жуковский П.В.², Тявловский А.К.¹

¹Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

²Люблинский технический университет
Люблин, Польша

Сущность оптических методов заключается в регистрации абсолютной и относительной интенсивностей спектральных линий, полуширины, формы контуров спектральных линий и т.п. Важной задачей при разработке принципов построения систем оптической диагностики является оценка возможностей первичных преобразователей системы на основе фотоэлектрических преобразователей. Расширение функциональности измерительных приборов и систем технической диагностики связано с применением оптико-электронных элементов, в частности, оптических волоконных чувствительных элементов [1–3], а также фотодетекторов с расширенными функциональными возможностями [4]. Их применение в контроле производственных процессов и изделий связано с рядом преимуществ:

- химическая инертность;
- малый вес и размеры;

где ДЭФ-П определяются следующим соотношением:

$$def_{N,p}(k, n, \theta) = W_N^{(k+\theta)n} = \exp\left[-j \frac{2\pi}{N} (k + \theta)n\right];$$

$$k = \overline{0, (N-1)}, \quad n = \overline{0, (N-1)}, \quad 0 \leq \theta < 1.$$

В работе доказано, что для уменьшения погрешности измерения частот гармонических компонент сигнала в R раз, применение БПФ-П в сравнении с БПФ позволяет сократить число операций в $\frac{(\log_2 N + \log_2 R)}{\log_2 N}$ раз, а по необходи-

мому объему оперативной памяти в R раз.

Одно из актуальных приложений предложенного метода технического диагностирования – применение в современных системах автоматизированной интеллектуальной диагностики электрических машин.

Литература

1. Systems Analysis of Discrete Two-Dimensional Signal Processing in Fourier Basis // Advances in Signal Processing. Theories, Algorithms, and System Control. Editor: Margarita Favorskaya, Lakmi C. Jain. // Springer, 2020.

– нечувствительность к электромагнитным помехам и возмущениям, отсутствие генерируемых электромагнитных помех, способных влиять на другие цепи;

– безопасность эксплуатации, ввиду электрической изоляции и малой мощности оптического излучения;

– устойчивость и надежность, определяющие малые эксплуатационные затраты.

Дополнительные преимущества обеспечивает возможность интегрирования в одну систему оптического волоконного сенсора и волоконно-оптической линии связи [5].

В общем случае выходной сигнал оптического сенсора является сигналом со случайными нефиксированными параметрами различной физической природы, изменяющимися в некотором диапазоне значений. Большинство оптических сенсоров для определения значения измеряемой