

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Р.О. Мазманян, докт.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: mazmanian@ied.org.ua

В статье рассмотрены некоторые задачи и технические решения, связанные с магнитными измерениями постоянных и переменных магнитных полей электроэнергетического оборудования, осуществляющего взаимные преобразования электрической и других видов энергий. Описаны методы и средства реализации функций управления измерениями, процедурами сбора и предварительной обработки данных мониторинга внутренних и внешних магнитных полей для систем диагностирования, контроля текущего состояния и оценки остаточного ресурса наблюдаемых объектов. Библ. 26, рис. 5.

Ключевые слова: магнитные измерения, мониторинг, сбор данных, электроэнергетическое оборудование.

Выбор характеристик магнитных полей в качестве диагностических параметров обусловлен их непосредственной связью с процессами преобразования энергии и, безусловно, с конструктивными и функциональными особенностями электроэнергетического оборудования, текущим состоянием и режимами его работы. Можно предположить, что совокупные влияния на диагностический параметр приводят к изменениям его значения, а их многообразие вызывает различие в характере этих изменений. Поэтому полученные экспериментальным путем значения параметров могут быть использованы для контроля технического состояния объектов посредством оценки их соответствия требованиям технической документации.

Анализ характера этих изменений используется для описания диагностических признаков, связанных с проявлениями неисправностей, что позволяет упрощенно представить процесс диагностирования как процедуру соотнесения наблюдаемого признака к одному или нескольким классам технического диагноза. Очевидно, что такой подход в оценке состояния технических объектов более сложный в реализации, но, вместе с тем, обеспечивает большую эффективность в обнаружении ранних проявлений признаков отклонений от нормального состояния и большую селективность в случаях множественных неисправностей.

Мониторинг объекта с целью выделения и оценки диагностического признака и сама процедура технического диагностирования чрезвычайно схожи с, несомненно, более ранним по времени возникновением, медицинским диагностированием [1]. Современная медицина наряду с применением лабораторных, инструментальных методов исследования использует анамнез – сведения, полученные путём расспроса обследуемого. В техническом диагностировании информация, полученная посредством наблюдения, также может быть представлена в словесном, описательном виде, однако системный подход к решению проблемы требует использования объективных данных, полученных с помощью измерений. В контроле конструкций и материалов ключевым определением метода является наличие слова «неразрушающий». Характеристика «неинвазивный», т.е. не наносящий ущерб целостности организма или отдельным его участкам метод медицинского диагностирования, обозначает щадящее свойство проводимой процедуры.

Безусловным приоритетом в техническом диагностировании обладают методы мониторинга без нарушения конструкций объектов, внесения изменений в технологический процесс или режимы его работы [2]. В зарубежной технической литературе все чаще используется заимствованный из медицинской практики термин «non-invasive monitoring» [3, 4], который, на наш взгляд, кратко и точно определяет отличительную характеристику используемого метода и реализующей его аппаратуры. Мониторинг внешних магнитных полей электроэнергетического оборудования обладает признаками

неинвазивности и может быть использован не только для диагностирования неисправностей оборудования [5, 6], но и для оценки энергоэффективности вращающихся электрических машин [7].

Особо отметим, что диагностирование сложных объектов, к которым, безусловно, относится большинство электроэнергетического оборудования, требует сбора данных и анализа параметров, различных физических процессов, связанных с преобразованиями энергии [8]. Мониторинг магнитных полей в различных областях их проявления – временной, пространственной и частотной [6, 9, 10], – обеспечит повышение достоверности оценки текущего состояния диагностируемого оборудования в условиях множественных неисправностей, расширит возможности в создании новых методов и средств, обеспечивающих большую безопасность и безаварийность работы.

Проведение исследований, связанных с разработкой методов и средств мониторинга магнитных полей для контроля или диагностирования электроэнергетического оборудования, обеспечением бесперебойной эксплуатации повсеместно используемых электрических машин, представляется **актуальной научной и практической задачей.**

Необходимым условием создания компьютерных систем технического диагностирования является наличие достаточного количества априорных знаний, набор которых определяется объектом диагностирования и решаемой задачей [11]. Выделим два пути получения таких сведений – компьютерное моделирование и экспериментальные исследования. Эти методы дополняют друг друга. Их результаты в формализованном виде станут частью информационного наполнения системы, а полнота и качество этих сведений в значительной степени снизят затраты на исследования и разработку новых, более совершенных комплексов для сбора, самообучения и оценки диагностической информации.

Целью работы, представленной в настоящей статье, является разработка принципов построения и функционирования, методов реализации программно-аппаратных комплексов средств для мониторинга магнитных полей электроэнергетического оборудования как объектов исследований и диагностирования.

Назначением подобных комплексов является преобразование физической величины – диагностического параметра – в электрический сигнал, который после усиления и аналого-цифрового преобразования представляется временной последовательностью данных. Перед отправлением временного ряда в компьютер для дальнейшей обработки, хранения, исследования с целью поиска диагностических признаков и оценки текущего технического состояния или его прогнозов на определенный срок данные могут пройти предварительную фильтрацию, изменение формата их представления и другие необходимые процедуры.

Обобщенная функциональная спецификация системы мониторинга. Собственно система мониторинга представляет комплекс электрически и информационно связанных между собой аппаратных компонентов системы и специализированного программного обеспечения, размещаемого



Рис. 1

во встроенных цифровых системах обработки данных. Здесь прослеживается отчетливое преобладание системной составляющей комплекса, определяемой цифровыми методами управления и обработки информации в виде последовательностей данных, над «приборной» его частью, которая обеспечивает усиление и преобразование электрических сигналов, несущих диагности-

ческую информацию.

В функциональной спецификации (рис. 1) предусмотрена возможность одновременного преобразования физической величины в электрический сигнал несколькими первичными магнитоизмерительными преобразователями. Использование однотипных преобразователей обеспечит поступление данных для получения оценок пространственного распределения диагностического параметра во внутренней или внешней областях наблюдаемого объекта. В этом случае результаты могут быть использованы для пространственной локализации или селекции множественных неисправностей. Разнотипные первичные преобразователи обеспечат возможность одновременного проведения измерений диагностического параметра в областях с существенно отличающимися характеристиками измеряемой величины – диагностического параметра.

Первичные измерительные преобразователи в системах мониторинга магнитных потоков. Исследование магнитных потоков электроэнергетического оборудования, а тем более их мониторинг реализуемы только с помощью первичных измерительных преобразователей, отвечающих конструктивным особенностям и условиям эксплуатации диагностируемого оборудования. Особые требования, например, к размерам преобразователя, могут быть вызваны необходимостью обеспечения высокого пространственного разрешения проводимых измерений.

Для измерения переменных магнитных полей электроэнергетического оборудования в ряде случаев применение индукционных датчиков [7, 12] может быть достаточно эффективным благодаря их постоянной готовности к измерениям, отсутствию необходимости в управлении, простоте изготовления, возможности оценки метрологических свойств по расчетным значениям, надежности в эксплуатации. В рассматриваемых комплексах программно-аппаратных средств мониторинга целесообразно предусмотреть возможность подключения датчиков этого типа для использования в качестве сенсоров диагностических параметров переменных магнитных полей как на этапе исследований объектов диагностирования, так и в системах технического диагностирования.

Современные магнитоизмерительные преобразователи основаны на различных физических принципах [13]. Значительно улучшенные метрологические характеристики в широком диапазоне изменений параметров измеряемой величины обеспечивают гальваномагнитные преобразователи на основе эффекта Холла в интегральном исполнении, которые находят широкое применение в приборостроении и автоматике [14, 15]. Однако при проведении экспериментальных исследований с целью определения диагностических признаков различного электроэнергетического оборудования необходимо обеспечить измерение индукции внешних и внутренних магнитных полей в возможно более широком диапазоне значений. Поэтому в качестве чувствительного элемента может быть использована, например, германиевая пластина с ортогонально размещенными выводами.

Применение подобного преобразовательного элемента в качестве датчика вызывает необходимость принятия специальных мер для исключения составляющей погрешности, вызванной неэквипотенциальным расположением выводов на пластине датчика. Метод коммутации выводов (**spinning current**) [16] заключается в поочередном подключении ортогональных пар выводов датчика к источнику управляющего тока и к усилителю сигнала, что обеспечивает автоматическую нейтрализацию напряжения смещения, вызванного технологической неточностью его изготовления.

Функция преобразования датчика Холла для прямоугольной изотропной пластины из полупроводникового материала описывается произведением управляющего тока I_c , индукции магнитного поля \mathbf{B} , косинуса угла Θ между вектором \mathbf{B} и нормалью к плоскости датчика Холла

$$V_H = R_H \cdot \frac{I_c \cdot B}{d} \cdot \varphi(l, b, B) \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

где R_H – коэффициент Холла для ненагруженного преобразователя; l , b , d – длина, ширина и толщина пластины соответственно; $\varphi(l, b, B)$ – зависимость напряжения Холла от соотношения размеров пластины и электродов [17].

Современная интегральная микроэлектроника предлагает широкий выбор магнитоизмерительных устройств, содержащих интегрированные аппаратные и программные средства для построения измерительных систем различного назначения. Встроенные усилительно-преобразовательные устройства, цифровые средства управления и обработки данных совместно с новейшими магниточувствительными элементами позволили создать ряд одно-, двух- и трехосевых магниторезистивных датчиков [18] и функционально завершенных измерителей на их основе [19]. Подобные преобра-

зователи в интегральном исполнении применяются в бортовом оборудовании беспилотных аппаратов для пространственного ориентирования по магнитному полю Земли. Как возможные области их применения компании-изготовители этих датчиков особо выделяют электроэнергетику [20]. Вместе с производством широкой номенклатуры компонентов и средств для магнитных измерений выпускаются также линейные сборки измерителей, предназначенные для использования в системах точного позиционирования при перемещениях [21]. Такие сборки пригодны и для определения одномерного пространственного распределения индукции внешних магнитных полей различного электроэнергетического оборудования.

Представляется целесообразным предусмотреть возможность конфигурирования комплексов с несколькими измерительными трактами для одновременного сбора данных мониторинга с помощью многоосевых датчиков [20]. Новейшие магниторезистивные преобразователи не требуют подачи специальных управляющих сигналов [18]. Управление другими аналоговыми датчиками может быть связано лишь с выработкой регулярных импульсов для запуска встроенных индукторов сброс/намагничивание магниточувствительных элементов [20]. Непрерывные аналоговые сигналы всех рассмотренных типов датчиков могут быть, при необходимости, синхронно оцифрованы многоканальными аналого-цифровыми преобразователями.

Управление мониторингом магнитных потоков. Решение проблемно ориентированной задачи построения средств мониторинга заключается в создании комплексов, **аппаратные компоненты** которых помимо электрических связей объединены **программными средствами**.

Выбор аппаратных компонентов для предварительной цифровой обработки сигналов и программируемых средств управления определяется целями поставленной задачи, структурами ее реализующими, типом объекта диагностирования и характером эксплуатационных воздействий на него.

Управление измерениями и сбором данных о диагностических параметрах магнитных потоков электроэнергетического оборудования программно реализуются выполнением следующих функций:

- управление режимом *spinning current* преобразователя Холла;
- коммутируемое подключение аналоговых сигналов к входам аналого-цифрового преобразователя;
- задание формата выходных данных;
- запуск и ожидание подтверждения выполненного преобразования;
- сохранение данных в оперативной памяти микропроцессора;
- дальнейшее преобразование данных измерений в формат протокола канала обмена данными через последовательный порт микропроцессора в режиме ведомого (Slave);
- инициация в качестве ведущего (Master) передачи данных в персональный компьютер по завершении очередного преобразования сигналов.

Аппаратная реализация комплексов, предназначенных для непрерывного или периодического мониторинга магнитных потоков электроэнергетического оборудования, состоит из автономного аппаратно-программного блока и персонального компьютера, которые соединены каналом связи, обеспечивающим обмен данными и командами.

Примерная конфигурация аппаратно-программного блока комплексов определяется набором следующих составляющих:

- первичные измерительные преобразователи для контроля индукции постоянных и переменных магнитных полей в широком диапазоне значений;
- многоканальный усилительно-преобразовательный тракт, включающий инструментальные или операционные усилители **OP AMPS** и аналого-цифровой преобразователь **ADC**;
- встроенные цифровые и вычислительные устройства с программным обеспечением для реализации функциональной спецификации;
- проводной или беспроводный канал связи.

На рис. 2, а показана обобщенная схема подсистемы автоматической компенсации смещения нуля измерительно-преобразовательного тракта с датчиком Холла, которая использует для реализации функций управления первичным преобразователем ресурсы двух встроенных устройств с программным обеспечением – микроконтроллера **MCU** и программируемого логического устройства **Control Logic**. Обобщенная блок-схема микроконтроллера содержит 8/16 или 32-битный процессор [23]. Основная функция центрального процессора **CPU** и его ядра **Core** заключается в выполнении кода (предварительной обработки данных – **DATA PREPROCESSING**, например), записанного в память программ, управлении периферийными устройствами и модулями. Некоторые из них представлены на

рис. 2, а: **I/O** – порты ввода/вывода, **SRAM** – статическая память с произвольным доступом для хранения данных, **DMA** – контроллер прямого доступа к памяти, **USART** – универсальный синхронный и асинхронный приемник и передатчик для связи с персональным компьютером.

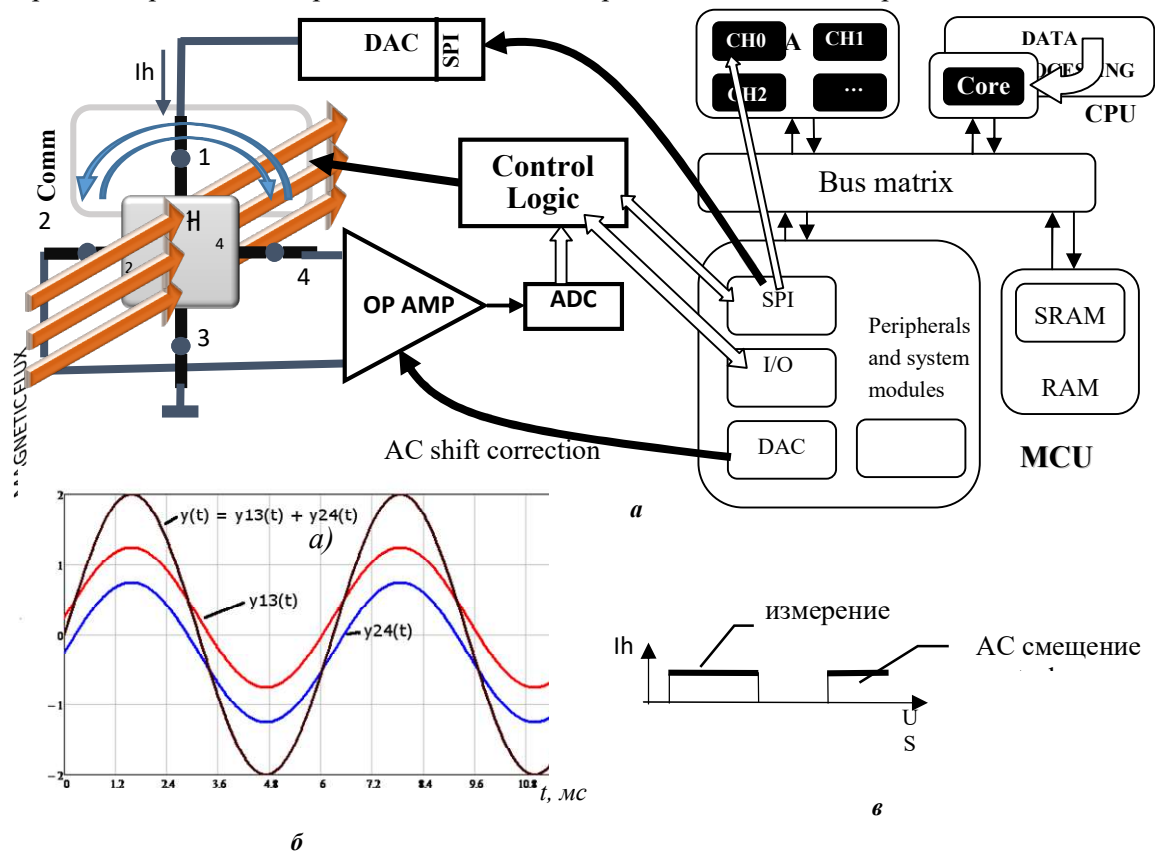


Рис. 2

Программные средства комплекса для мониторинга размещены в памяти программ микропроцессора **MCU** и программируемой логики **Control Logic** [24]. Их действие обеспечивает в режиме реального времени сбор, хранение и обработку диагностической информации, полученной в процессе нормальной эксплуатации или стендовых испытаний диагностируемого оборудования.

Аппаратные компоненты, участвующие в реализации метода *spinning current*, и их взаимодействие показаны на рис. 2, а.

Коммутатор пар выводов 1,3 и 2,4 **Comm** гальваномангнитного датчика **H** подключает их к источнику тока – цифро-аналоговому преобразователю **DAC** с токовым выходом и ко входу операционного усилителя **OP AMP**. Управление переключениями коммутатора **Comm** осуществляется через выходы одного из портов встроенным таймером микропроцессорного устройства **MCU**. В этом режиме сигналы, пропорциональные значению магнитной индукции, с пар выводов 1,2 и 3,4 датчика **H** через усилитель **OP AMP** подключаются к аналого-цифровому преобразователю **ADC**. Данные мониторинга последовательно поступают на один из входов (**CH0** на рис. 2, а) канала прямого доступа к памяти **DMA** микроконтроллера **MCU** и далее, через системную шину, запоминаются в оперативной памяти **SRAM**. Усиленные сигналы $y(t)$, индексированные номерами пар выводов, показаны на рис. 2, б. После препроцессинга удвоенный по значениям несмещенный результат измерений образует выходной массив данных, полученный из исходного последовательным суммированием двух соседних элементов. Выходной неиндексированный сигнал $y(t)$ также представлен на рис. 2, б.

Другая составляющая погрешностей измерений вызвана смещением нуля собственно усилительно-преобразовательного тракта. Из функции преобразования датчика Холла (1) следует, что при $I_c = 0$ определяется текущее значение смещения нуля измерительно-преобразовательного тракта. Автоматическую компенсацию этой составляющей можно осуществить с помощью простейшего программно реализованного интегрального регулятора, что обеспечит существенное снижение погрешностей измерений магнитной индукции. Управление режимом сводится к периодическому обнулению управляющего тока заданием нулевого значения на входном регистре цифро-аналогового

преобразователя DAC микроконтроллера без прерывания режима **spinning current** (рис. 2, в).

Связь аппаратно-программного блока с персональным компьютером осуществляется по единому формату представления данных/команд стандарта IEEE.488.2 через проводную линию связи или радиоканал со свободным использованием [22].

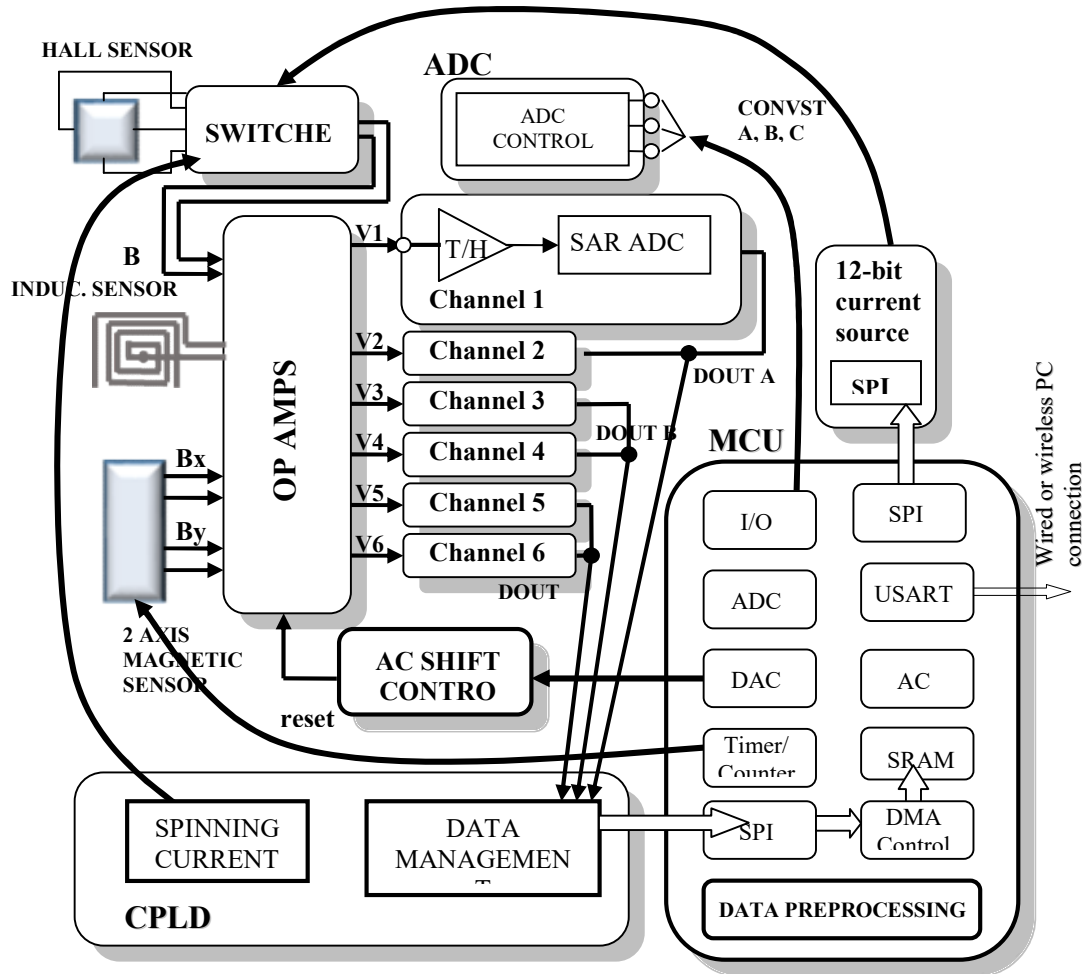


Рис. 3

Обобщенная схема автономного аппаратно-программного блока управления процедурами сбора и передачи данных мониторинга показана на рис. 3. Здесь представлено распределение вычислительных ресурсов между встроенным микроконтроллером и программируемой логикой CPLD [25], используемых для реализации функций компенсации смещения. Применение программируемой логики, несмотря на разнообразие управляющих сигналов, вызвано их строгой событийной последовательностью, объемы которых зависят только от конечного числа значений сигналов, характеризующих текущее состояние управляемых компонентов. Это освобождает микроконтроллер MCU от непроизводительного расходования вычислительных ресурсов, которые могут быть использованы для обработки данных и их передачи в персональный компьютер, что, собственно, будет способствовать оптимизации решения задачи мониторинга магнитных полей в системах диагностирования и контроля электроэнергетического оборудования.

Интегрирование аппаратных и программных средств. Программное обеспечение персонального компьютера совместно с автономным блоком управляет сбором и обработкой данных мониторинга, их протоколированием, хранением на энергонезависимом носителе и визуализацией в удобном для восприятия виде, подготовкой к выработке технического диагноза – оценки текущего состояния исследуемого оборудования.

Представленные в статье методы реализации программно-аппаратных комплексов, принципы построения и функционирования были положены в основу создания экспериментального образца, предназначенного для проведения исследований, связанных с обнаружением диагностических признаков в параметрах внешних магнитных полей вращающихся электрических машин.

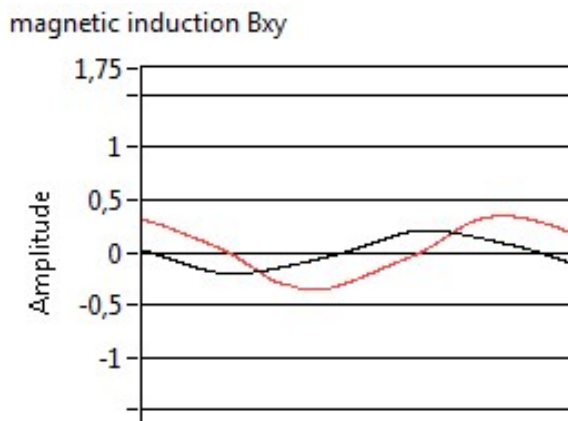


Рис. 4

Разработанные в среде LabVIEW программные средства предназначались для спектрального анализа одномерных и двумерных данных результатов мониторинга. Распределение спектральной плотности мощности сигналов, полученных при регистрации внешнего вращающегося магнитного поля на поверхности статора трехфазного асинхронного двигателя по соответствующим направлениям показано на рис. 5 а, б.

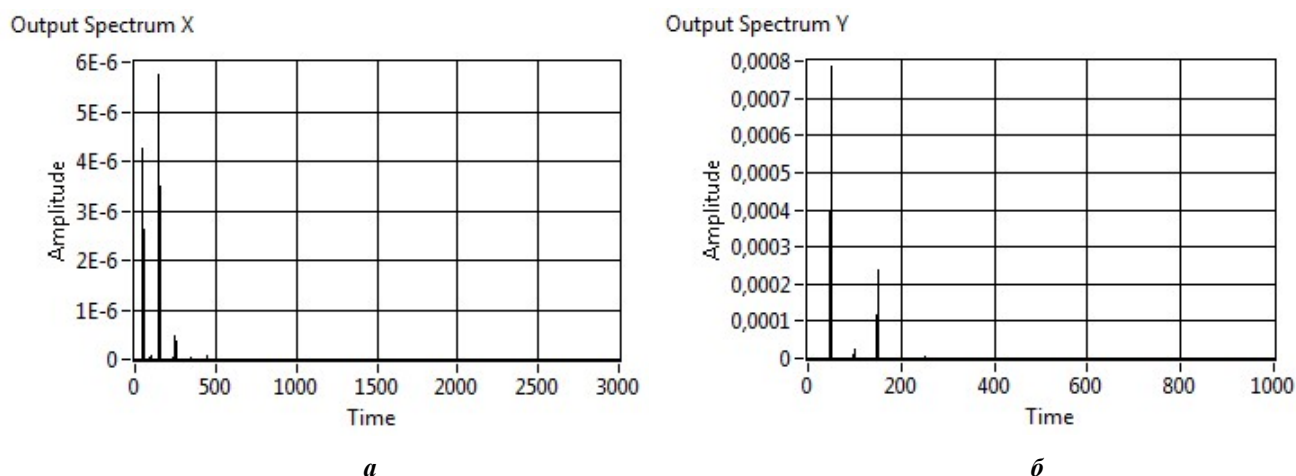


Рис. 5

Потребность в расширении функциональной спецификации комплекса по итогам анализа экспериментальных данных, связанная с применением и других методов цифровой обработки для выявления диагностических признаков в параметрах магнитного поля, обеспечивается легко реализуемыми дополнениями в разработанном программном обеспечении.

Дальнейшее совершенствование комплексов связывается с созданием технических средств реализации ранее разработанной концепции пространственного 2D мониторинга в системах диагностирования электроэнергетического оборудования [9].

Выводы

1. В работе приведена многоуровневая функциональная спецификация комплекса, то есть перечень основных функций, которые реализуются аппаратными и программными его компонентами. Описаны возможные пути согласования их информационного взаимодействия в разрабатываемых комплексах для мониторинга электроэнергетического оборудования.

2. Обоснован выбор первичных измерительных преобразователей с учетом особенностей мониторинга внешних и внутренних магнитных полей объектов наблюдения.

3. Предложены методы и способы программно-аппаратной реализации функции компенсации нулевого смещения, вызванного напряжением неэквипотенциальности гальваномангнитных преобразователей и дрейфом усилительно-преобразовательного тракта.

4. Обосновано разделение вычислительных ресурсов между программируемыми вычисли-

тельными (микроконтроллер) устройствами и цифровыми логическими приборами с программируемой структурой (CPLD).

5. Результаты экспериментальных исследований разработанного комплекса подтвердили выполнение заданной функциональной спецификации. Комплекс предназначен для сбора данных и регистрации индукции внешнего магнитного поля при экспериментальных исследованиях с целью поиска диагностических признаков в системах компьютерного диагностирования электрических вращающихся машин.

1. Заблудовский П.Е., Крючок Г.Р., Кузьмин М.К., Левит М.М. История медицины. Москва: Медицина, 1981. 352 с.
2. Петухов В. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения. *Новости электротехники*. 2008. № 1 (50). С. 33–37.
3. Emec S., Kruger J., Seliger G. Online Fault-monitoring in Machine Tools Based on Energy Consumption Analysis and Non-invasive Data Acquisition for Improved Resource-efficiency. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 40. Pp. 236-243.
4. Irfan M., Ibrahim R., Asirvadam V.S., Alwadie A.S., Sheikh M.A. An Assessment on the Non-Invasive Methods for Condition/ Monitoring of Induction Motors Fault Diagnosis and Detection. *InTechOpen*. 2017. Ch. 4. Pp. 87-129. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/67917>
5. Алексеенко А.Ю., Бродский О.В., Веденеев В.Н., Тонких В.Г., Хомутов С.О. Диагностика и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля. *Вестник Алтай. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова*. 2006. № 2. С. 79-83.
6. dos Santos H.F., Rigoni M., de A.Elias R., Feler L.A., Wengerkievicz C.A.C., Batistela N.J., Sadowski N., Kuo-Peng P., Bastos J.P.A. Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2017. Vol. 16. No 1. Pp 70-89.
7. Zidat F., Lecoite J-Ph., Morganti F., Brudny J-F., Jacq T., Frédéric St. Non Invasive Sensors for Monitoring the Efficiency of AC Electrical Rotating Machines. *Sensors*. 2010. No 10(8). Pp. 7874-7895.
8. Mitsubishi Electric Develops Unique Technology for Electromagnetic-field and Large-coupled Analysis of Turbine Generators. URL: http://emea.mitsubishielectric.com/en/news-events/releases/global/2017/0524-g/pdf/170524-g_3114_en_g.pdf (accessed 10.05.2019)
9. Мазманян Р.О. Пространственный 2D мониторинг в диагностировании электроэнергетического оборудования. *Промышленная энергетика*. 2015. № 2. С.17-20.
10. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации. *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2013. № 7. С. 127-137.
11. Титко О.І. Наукові заходи та засоби забезпечення надійності і ефективності роботи енергетичних електричних машин. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2004. № 2(8). С. 158-159.
12. Поляков С.В., Резников Б.И., Щенников А.В., Копытенко Е.А., Самсонов Б.В. Линейка индукционных датчиков магнитного поля для геофизических исследований. *Сейсмические приборы*. 2016. Т. 52. № 1. С. 5-27.
13. Крупа Н.Н., Скирта Ю.Б., Шарай И.В. Малогабаритные датчики магнитного поля на основе тонкой фольги из аморфных кобальтовых сплавов ММ-3Co, ММ-5Co и мартенситных кристаллов NiMnGa. *Успехи физики металлов*. 2014. Т. 15. С. 101-120.
14. Allegro Hall-Effect Sensor ICs. URL: <https://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Allegro-Hall-Effect-Sensor-ICs.aspx>. (accessed 10.05.2019)
15. Infineon. Pocket guide 2018. Infineon Technologies AG. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Sensor_Solutions%20Pocket%20Guide-PC-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462636cc8fb016422aea1671cc0. (accessed 10.05.2019)
16. Steiner R., Maier Ch., Haberli A., Steiner F.-P., Baltas H. Offset reduction in Hall devices by continuous spinning current method. *Sensors and Actuators*. 2000. A, 85. Pp. 9-17.
17. Брайко В.В., Гринберг И.П., Ковальчук Д.В., Таранов С.Г. Гальваномагнитные преобразователи в измерительной технике. М.: Энергоатомиздат. 1984. 360 с.
18. MultiDimension Technology. URL: <http://www.dowaytech.com/en/> (accessed 10.05.2019)
19. Asahi Kasei Microdevices (AKM). URL: <https://www.akm.com/akm/en/featured/>. (accessed 10.05.2019)
20. Honeywell. Aerospace. URL: <https://aerospace.honeywell.com/en/products/navigation-and-sensors/small-size-axis-analog-magnetic-sensors>. (accessed 10.05.2019)
21. Voss A., Bartos A. Scalable linear magneto resistive sensor arrays. *GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme*. 2016-05-10 - 2016-05-11 Pp. 195-199. DOI: 10.5162/sensoren2016/3.3.2
22. 488.2-1992 IEEE Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands for Use With IEEE Std 488.1-1987, IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation. URL: [http://webuser.unicas.it/misure/MAQ_OLD%20\(VO\)/Dispense/DISP_7STANDARD%20IEEE%20488_2%20192.pdf](http://webuser.unicas.it/misure/MAQ_OLD%20(VO)/Dispense/DISP_7STANDARD%20IEEE%20488_2%20192.pdf) (accessed 10.05.2019)

23. Бродин, В.Б.; Шагурин, И.И. Микроконтроллеры. Архитектура, программирование, интерфейс М.: ЭКОМ, 1999. 400 с.
24. ISE In-Depth Tutorial UG695. (v13.1) March 1. 2011. Pp. 91-116. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx13_1/ise_tutorial_ug695.pdf (accessed 10.05.2019)
25. Brown S., Rose J. Architecture of FPGAs and CPLDs: A Tutorial. URL: <http://www.eecg.toronto.edu/~jayar/pubs/brown/survey.pdf> (accessed 10.05.2019)
26. National Instruments. URL: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html> (accessed 10.05.2019)

УДК 631.362

ПРОГРАМНО-АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНІТОРИНГУ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Р.О. Мазманян, докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: mazmanian@ied.org.ua

Розглянуто деякі завдання і технічні рішення, пов'язані з магнітними вимірюваннями постійних і змінних магнітних полів електроенергетичного обладнання, що здійснює взаємні перетворення електричної та інших видів енергії. Описано методи та засоби реалізації функцій управління вимірюваннями, процедурами збору і попередньої обробки даних моніторингу внутрішніх та зовнішніх магнітних полів для систем діагностування, контролю поточного стану і оцінки залишкового ресурсу спостережуваних об'єктів.

Ключові слова: магнітні вимірювання, моніторинг, збір даних, електроенергетичне обладнання.

COMPLEX FOR ELECTRIC POWER EQUIPMENTS MAGNETIC FIELDS MONITORING

R.O. Mazmanian

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: mazmanian@ied.org.ua

Using characteristics of magnetic fields as diagnostic parameters is due to their direct interconnection with energy conversion processes, structural and functional features of electric power equipment, current state and modes of its operation. The cumulative effects on the diagnostic parameter lead to changes in its value, and their diversity causes differences in the nature of these changes.

Analysis of the nature of these changes is used to describe diagnostic signs associated with the exposure of faults, which provides greater efficiency in detecting early signs of deviations from the normal state and greater selectivity in case of multiple faults.

At the same time, monitoring of external magnetic fields of electric power equipment in various areas of their occurrence — temporal, spatial and frequency — is implemented without the objects destructing, changing the technological process or modes of their operation.

The aim of the work is to develop principles of construction and operation, methods for implementing a set of tools for studying electric power equipment through continuous or periodic monitoring of magnetic fields and the use of monitoring results in technical diagnostics systems.

Summary:

1. A multi-level functional specification of a system has been developed, which is implemented by its hardware and software components;

2. The choice of primary measuring transducers is substantiated with factoring in the features of monitoring external and internal magnetic fields of observing objects;

3. Methods and means for software and hardware implementation of the zero-bias compensation function caused by the non-equipotentiality of the Hall transducers and the drift of the amplifier-converter circuit are proposed;

4. The division of computing resources between programmable computing (microcontroller) devices and digital logic devices with programmable structure (CPLD) has been grounded.

5. Experimental studies of the developed system confirmed the implementation of the given functional specification. The system provides registration of induction of external and internal magnetic fields, data collection and its visualization for identification of diagnostic characteristics of electrical rotating machines.

Key words: magnetic measurements, monitoring, data acquisition, electric power equipment.

1. Zabludovskiy P.E., Kruchok G.R., Kuzmin M.K., Levit M.M. History of medicine. Moskva: Meditsina, 1981. 352 p. (Rus)

2. Petuhov V. Diagnostika elektrodvigately. *Novosti elektrotehniki*. 2008. № 1 (50). Pp. 33–37.

3. Emec S., Kruger J., Seliger G. Online Fault-monitoring in Machine Tools Based on Energy Consumption Analysis and Non-invasive Data Acquisition for Improved Resource-efficiency. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 40. Pp. 236-243.
4. Irfan M., Ibrahim R., Asirvadam V.S., Alwadie A.S., Sheikh M.A. An Assessment on the Non-Invasive Methods for Condition Monitoring of Induction Motors Fault Diagnosis and Detection. *InTechOpen*. 2017. Ch. 4. Pp. 87-129. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/67917>
5. Alekseenko A.Yu., Brodskiy O.V., Vedenev V.N., Tonkih V.G., Homutov S.O. Induction motors diagnosis and state prediction with the use of external electromagnetic field parameters. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. I.I. Polzunova*. 2006. № 2. S. 79-83. (Rus)
6. dos Santos H.F., Rigoni M., de A.Elias R., Feler L.A., Wengerkiewicz C.A.C., Batistela N.J., Sadowski N., Kuo-Peng P., Bastos J.P.A. Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2017. Vol. 16. No 1. Pp. 70-89.
7. Zidat F., Lecointe J-Ph., Morganti F., Brudny J-F., Jacq T., Frédéric St. Non Invasive Sensors for Monitoring the Efficiency of AC Electrical Rotating Machines. *Sensors*. 2010. No 10(8). Pp. 7874-7895.
8. Mitsubishi Electric Develops Unique Technology for Electromagnetic-field and Large-coupled Analysis of Turbine Generators. URL: http://emea.mitsubishielectric.com/en/news-events/releases/global/2017/0524-g/pdf/170524-g_3114_en_g.pdf (accessed 10.05.2019)
9. Mazmanian R.O. Spatial 2D monitoring in the diagnosis of electrical power equipment. *Promyshlennaya energetika*. 2015. No 2. Pp. 17-20. (Rus)
10. Sidelnikov L.G., Afanasev D.O. Review of online monitoring methods for induction motors diagnosis. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2013. No 7. Pp. 127-137. (Rus)
11. Titko O.I. Scientific activities and means of ensuring the reliability of power equipment. *Pratsi Instytutu elektrodynamiki NAN Ukrainy*. 2004. No 2(8). Pp. 158-159. (Rus)
12. Polyakov S.V., Reznikov B.I., Schennikov A.V., Kopytenko E.A., Samsonov B.V. The range of induction-coil magnetic field sensors for geophysical explorations. *Seismicheskie pribory*. 2016. Vol. 52. No 1. Pp. 5-27. (Rus)
13. Krupa N.N., Skirta Yu.B., Sharay I.V. Compact magnetic field sensors based on thin foil from amorphous cobalt alloys MM-3So, MM-5So and NiMnGa martensitic crystals. *Uspekhi fiziki metallov*. 2014. Vol. 15. S. 101-120. (Rus)
14. Allegro Hall-Effect Sensor ICs. URL: <https://www.allegromicro.com/en/Design-Center/Technical-Documents/Hall-Effect-Sensor-IC-Publications/Allegro-Hall-Effect-Sensor-ICs.aspx>. (accessed 10.05.2019)
15. Infineon. Pocket guide 2018. Infineon Technologies AG. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Sensor_Solutions%20Pocket%20Guide-PC-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462636cc8fb016422aea1671cc0. (accessed 10.05.2019)
16. Steiner R., Maier Ch., Haberli A., Steiner F.-P., Baltes H. Offset reduction in Hall devices by continuous spinning current method. *Sensors and Actuators*. 2000. A, 85. Pp. 9-17.
17. Brayko V.V., Grinberg I.P., Kovalchuk D.V., Taranov S.G. Galvanomagnetic transducers in measurement technology. Moskva: Energoatomizdat, 1984. 360 p. (Rus)
18. MultiDimension Technology. URL: <http://www.dowaytech.com/en/> (accessed 10.05.2019)
19. Asahi Kasei Microdevices (AKM). URL: <https://www.akm.com/akm/en/featured/>. (accessed 10.05.2019)
20. Honeywell. Aerospace. URL: <https://aerospace.honeywell.com/en/products/navigation-and-sensors/small-size-axis-analog-magnetic-sensors>. (accessed 10.05.2019)
21. Voss A., Bartos A. Scalable linear magneto resistive sensor arrays. *GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme*. 2016-05-10 – 2016-05-11 Pp. 195-199. (accessed 10.05.2019)
22. 488.2-1992 IEEE Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands for Use With IEEE Std 488.1-1987, IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation. URL: [http://webuser.unicas.it/misure/MAQ_OLD%20\(VO\)/Dispense/DISP_7STANDARD%20IEEE%20488_2%20192.pdf](http://webuser.unicas.it/misure/MAQ_OLD%20(VO)/Dispense/DISP_7STANDARD%20IEEE%20488_2%20192.pdf) (accessed 10.05.2019)
23. Brodin, V.B.; Shagurin, I.I. Microcontrollers. Architecture, programming, interface. Moskva: EKOM, 1999. 400 p. (Rus)
24. ISE In-Depth Tutorial UG695. (v13.1) March 1. 2011
URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx13_1/ise_tutorial_ug695.pdf (accessed 10.05.2019)
25. Brown S., Rose J. Architecture of FPGAs and CPLDs: A Tutorial
URL: <http://www.eecg.toronto.edu/~jayar/pubs/brown/survey.pdf> (accessed 10.05.2019)
26. National Instruments. URL: <http://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html> (accessed 10.05.2019)

Надійшла 13.03.2019
Остаточний варіант 06.05.2019