

УДК 621.586

В.Ф. Безотосный, доцент, канд. техн. наук,

В.В. Козлов, доцент, канд. техн. наук,

О.В. Набокова, инженер

Запорожский национальный технический университет

Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, ЗНТУ,

кафедра "Теоретическая и общая электротехника"

E-mail: kafedra_tze@zntu.edu.ua

СИСТЕМА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ

Рассмотрены вопросы контроля неэлектрических и электрических параметров материалов электромагнитными методами. Предлагается система автоматического неразрушающего контроля механических напряжений в деталях радиоэлектронной аппаратуры.

***Ключевые слова:** контроль неразрушающий, параметр неэлектрический, преобразователь аналого-цифровой.*

Введение

Одним из направлений научной работы кафедры "Теоретическая и общая электротехника" Запорожского национального технического университета (ЗНТУ) является проблема контроля неэлектрических и электрических параметров материалов электромагнитными методами. Результаты некоторых из них приведены ниже.

Цель исследований – контроль параметров материалов электромагнитными методами.

1. Расчеты электромагнитных преобразователей при одновременном намагничивании нескольких слоев ферромагнитных материалов с различными свойствами

Электромагнитные преобразователи нашли широкое применение для контроля электромагнитных свойств материалов, их структуры, толщины покрытий и прочее. Особый интерес в этом плане представляет рассмотрение преобразователей с направленным магнитным потоком, которые позволяют получить однородный магнитный поток в области контроля исследуемого материала, что значительно повышает точность контроля. Часто необходимо рассчитывать преобразователи при намагничивании двухслойных ферромагнитных материалов.

Типичная конструкция преобразователя, которая применяется для намагничивания двухслойных материалов, выполнена из трех магнитопроводов с размещенными на них обмотками. Такое конструктивное исполнение преобразователя позволяет получить однородный магнитный поток как в зоне контроля материала, так и через магнитопровод с измерительной обмоткой.

Для расчетов выходного сигнала преобразователя необходимо прежде всего определить магнитное сопротивление двухслойного среды, потому что магнитные сопротивления магнитопровода и зазора могут быть определены по известным соотношениям.

При расчете магнитного сопротивления двухслойного материала приняты допущения, что: напряженность магнитного поля не изменяется по поверхности контролируемого материала вдоль активной базы преобразователя, а изменяется только по глубине материала; потоком, который проходит в области материала, за пределами объема между полюсами среднего магнитопровода можно пренебречь.

Для обоснования принятых допущений были проведены эксперименты с применением игольчатого датчика, выполненного из двух электродов с расстоянием между ними на порядок меньше, чем активная база преобразователя. Игольчатый датчик перемещался по поверхности материала вдоль активной базы преобразователя. В качестве контролируемого материала использовалась пластина размером 20×20×0,5 см, изготовленная из стали Ст.3. Результаты экспериментов показали, что при любой силе и частоте тока, выходной сигнал игольчатого датчика вдоль активной базы преобразователя изменяется не более чем на 4 %.

Экспериментами также доказано, что при проникновении электромагнитной волны в материал ферромагнитного покрытия происходит фазовый сдвиг между прямой и отраженной волнами. При этом модуль амплитуды прямой волны на несколько порядков больше модуля амплитуды отраженной волны, что позволяет определять постоянные интегрирования для всех реальных ферромагнитных покрытий.

Проведенными исследованиями получены соотношения глубины проникновения электромагнитного поля в первый и второй ферромагнитные слои и их магнитных сопротивлений. Дальнейший расчет накладных электромагнитных преобразователей с локализованным магнитным потоком для двухслойных ферромагнитных материалов выполняются согласно методикам, разработанными авторами ранее [1].

2. Экспресс-контроль механических напряжений в деталях и конструкциях рэа с помощью аналого-цифровых преобразователей

Для контроля механических напряжений в ответственных узлах и деталях сложных радиоэлектронных систем, где количество контролируемых точек десятки и сотни, а контроль должен быть диагностическим и оперативным, необходимо использование специализированных или универсальных ЭВМ. В основу построения автоматической системы контроля (АСК) механических напряжений в *m-точках* любой конструкции РЭА или бортовых конструкциях разных объектов, может быть положена разработанная блок-схема. Функциональное назначение электронного коммутатора (ЭК) и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) не требует объяснений. Каждый исходный сигнал АЦП имеет цифровой код, который соответствует значению контролируемого преобразователем параметра. Сигналы с выхода АЦП поступают в арифметическое устройство (АУ), в котором происходит сравнение с верхним и нижним допустимыми значениями каждого параметра. Информация о допустимых пределах хранится в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) персонального компьютера (ПК). Устройство управления (ПУ) служит для обеспечения синхронности работы ЭК, АЦП, АУ и ПЗУ. Результат сравнения поступает на вход логического устройства (ЛУ). Если контролируемый параметр находится в поле допуска, он записывается в ячейку оперативной памяти ПК, а также может быть записано регистрирующим устройством (РП). При выходе контролируемого параметра за пределы поля допуска, сигнал с ЛУ подается в устройство управления, которое конкретизирует номер контрольной точки измерения и значение отклонения механического напряжения от допустимого. При необходимости информация о параметре, вышедшем за поле допуска, с ЛУ подается в подсистему диагностического контроля (ПДК), которая устанавливает причину отклонения.

Одними из основных элементов любой автоматизированной системы контроля являются чувствительные элементы-преобразователи, от чувствительности и надежности которых в первую очередь зависит эффективность работы АСК. Из широкого класса преобразователей, которые могут быть использованы в АСК, следует отдавать предпочтение магнитоупругим (МУ), которые отличаются исключительной надежностью и мощным выходным сигналом. Применение МУ связано с бесконтактным способом определения механических напряжений в напряженных элементах конструкций, а это позволяет разрабатывать АСК с более широкими функциональными возможностями.

Использование разного вида компенсационных схем для устранения первоначального сигнала ограничивает быстродействие и возможности АСК, потому что необходимы дополнительные регулировочные операции при переустановке АСК с объекта на объект. Сэтой точки зрения более эффективны МУ, выполненные по мостовой схеме, позволяющие сразу получать полезную информацию без наложения первоначального сигнала и с минимальным влиянием колебаний окружающей температуры на сопротивление обмоток и соединительных проводов. При отсутствии механических напряжений в области контроля в измерительной обмотке электродвижущая сила (ЭДС) не наводится. Механические напряжения, которые возникают при воздействии на материал усилий, нарушают симметрию магнитного поля относительно измерительного магнитопровода и приводят к ответвлению части потока. Согласование сигнала МУ с блоком цифрового АЦП может осуществляться как на переменном, так и на постоянном токе. Схемы согласования на переменном токе проще, однако согласование при этом имеет ряд существенных недостатков в сравнении с методом согласования на постоянном токе. Фазовый сдвиг сигнала преобразователя относительно напряжения искажения требует установки в выходные цепи каждого преобразователя фазосдвигающий устройств, и индивидуальной настройки их при каждом изменении точек контроля механических напряжений в конструкциях. К тому же эти устройства приводят значительным погрешностям при изменении температуры окружающей среды. Большинство промышленных аналого-цифровых преобразователей предназначено для преобразования постоянного аналогового напряжения, поэтому между блоком ЭК и блоком АЦП есть кольцевой демодулятор (КД).

Разработанная система автоматического контроля механических напряжений в деталях и узлах РЭА и бортовых конструкций может быть успешно использована для контроля статистических и динамических механических напряжений в диапазоне $(0...4)10^7$ Н/м² при линейной зависимости выходного сигнала преобразователя от их значения.

3. Способ компенсации начального сигнала электромагнитных преобразователей

При контроле электромагнитных свойств радиотехнических ферромагнитных материалов и механических воздействий на элементы и узлы РЭА используют электромагнитные дифференциальные преобразователи. При этом актуальной задачей является разработка генераторов для создания пульсирующего магнитного потока в магнитопроводах преобразователей, а также компенсации начальной электродвижущей силы (ЭДС) в измерительной обмотке. При питании электромагнитных преобразователей от промышленной сети стабильность напряжения обеспечивается использованием

феррорезонансных стабилизаторов, магнитопроводы которых работают в режиме насыщения. При этом форма кривой питающего тока изменяется под воздействием третьей гармонической составляющей.

С целью повышения чувствительности и точности измерений электромагнитные преобразователи должны обеспечивать минимальное значение начального выходного напряжения. Для компенсации начального сигнала, то есть разбаланса между ЭДС измерительных обмоток, целесообразно использовать фазовый сдвиг между основными гармоническими составляющими, которые вызывают этот разбаланс. Компенсация достигается плавным изменением фазы между выходными импульсами.

В идеальном случае должны выполняться условия: $E_m' \sim E_m''$ и $\varphi' = \varphi'' + 180^\circ$. Реально угол фазового сдвига достигает нескольких десятков минут и даже нескольких градусов. Разработанный генератор, предназначенный для электромагнитных преобразователей, позволяет не только плавно изменять частоту питания, но и значительно уменьшать начальное исходное напряжение преобразователя из-за изменения фазового сдвига входных импульсов. В его состав входят генератор, формирующий прямоугольные импульсы небольшой длительности (~ 100 мкс), фазосдвигающее устройство, блок согласования, усилитель мощности. Для реализации узлов генератора применены современные схемные решения. Исключение представляет лишь генератор сигналов пилообразной формы, который задает частоту f . Частота прохождения импульсов на выходе генератора определяется скоростью заряжения конденсатора до опорного напряжению компаратора. Скорость заряжения конденсатора определяется значением управляющего напряжения, задаваемое переменным резистором. Напряжение изменяется по линейному закону, так как заряжение происходит при неизменной силе тока. Прямоугольный импульс на выходе одновибратора формируется во время обратного хода пилообразного сигнала. Параметры цепей подбирают таким образом, чтобы длительность прямоугольного импульса на выходе одновибратора была приблизительно 250...300 мкс. Фазовый сдвиг выходных импульсов осуществляется за счет сравнения пилообразного напряжения с напряжением управления.

Генератор с фазовым сдвигом выходных импульсов был использован авторами для совместной работы с электромагнитными преобразователями измерения усилий и толщины покрытий и может быть рекомендован для работы с любыми электромагнитными преобразователями дифференциально-трансформаторного типа. На протяжении продолжительного периода эксплуатации генератор показал высокую надежность и стабильность работы.

4. Неразрушающий экспресс-контроль твердости деталей после термической обработки

Неразрушающие магнитные методы определения твердости деталей известны. Однако для деталей с незначительной рабочей поверхностью известные методы контроля дают значительные погрешности измерений, вызванные влиянием размагничивающего фактора, геометрии детали и воздействием магнитных полей рассеяния распространяющихся в нерабочих областях. Предлагается использовать для измерения твердости электромагнитные преобразователи накладного типа с локализованным магнитным потоком, при этом точность измерения существенно повышается. Преобразователь имеет П-образный магнитопровод, выполненный из трех параллельно расположенных частей, обмотку намагничивания, намотанную на все три части магнитопровода, и измерительную, намотанную только на среднюю его часть. Магнитный поток, созданный обмоткой замыкается через исследуемую деталь, а результаты измерений фиксируются измерительным прибором. Влияние магнитных потоков в магнитопроводе друг на друга исключено, потому что его средняя часть отделена от крайних электропроводными прокладками.

Контроль твердости ведется в объеме исследуемого объекта, намагниченного магнитным потоком, который проходит по средней части магнитопровода. Наличие корректирующих боковых потоков исключает возможность отвлечения измерительного потока в нерабочие области детали, благодаря чему значительно повышает точность измерений.

Магнитопровод был изготовлен из листовой электротехнической стали типа Е330. Сечение магнитопровода 5×10 мм, ширина активной базы 15 мм, количество витков 100×2 и 500 для обмоток намагничивания и измерительной соответственно (провод ПЭВ-2 Ø0,15 мм).

Получена математическая зависимость значения выходного сигнала преобразователя от электромагнитных свойств контролируемого материала при локальном намагничивании сплавов РЭА (сталь 47 и прочие), также получены экспериментальные зависимости сигнала от твердости после термической обработки согласно технологии (активная поверхность изделия 25×30 мм).

Исследования показали, что годным изделиям, твердость которых должна лежать в диапазоне 53-58 единиц соответствует значение выходного сигнала от 70 до 150 мкА (режим термической обработки: нагрев под закалку в соляных ваннах при температуре $820 \pm 20^\circ\text{C}$ на протяжении 4 мин., охлаждение в масле и воде, отпуск при температуре $200 \pm 10^\circ\text{C}$ на протяжении 1 часа). Бракованные изделия лежат вне пределов значений выходного тока. При этом частота тока намагничивания 400 Гц, а его величина

40 мА. Как показали исследования, увеличение силы или частоты тока не приводит к заметному повышению чувствительности измерений, а характер передаточной зависимости остается неизменным.

Коэффициент корреляции между твердостью контролируемых изделий и ЭДС на выходе преобразователя равняется 0,96, что подтверждает достоверность контроля с помощью использованного преобразователя.

При переходе к экспериментам с изделиями другой конфигурации и размеров или изготовленных из другого материала, необходимо предлагаемыми расчетами и предварительными экспериментами определить область выходных напряжений преобразователя для годных изделий и проверить метод (при массовом производстве) с помощью известных методов (Бринелля или Роквелла). Для градуирования авторами был использованный прибор типа ТКП-1.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать предлагаемый преобразователь и методику измерений для 100%-ного неразрушающего контроля качества термической обработки разных деталей, а сам метод контроля считать экспрессным, потому что время контроля не превышает 1 с.

5. Использование частотно-балансового метода в системах управления оборудованием по силовому параметру

Перспективным направлением измерения сило-моментных параметров электромагнитными (магнитоупругими) преобразователями является переход от аналоговой формы представления информации к частотному. Последнее позволяет повысить разрешающую способность измерений, точность, за счет отстройки от ряда мешающих факторов, помехозащищенность при передаче информации и упростить согласование с ПК [2].

Обратимся к исследованию частотно-балансового метода сило-измерений. Прежде всего сформирована блок-схема и рассмотрены процессы при токо-вихревом частотно-балансовом методе. Физический процесс лежащий в основе метода, рассмотрен на примере работы модификации наиболее известного на сегодняшнее время магнито-анизотропного преобразователя [3].

Рассмотрен характер изменения выходного сигнала измерительного и компенсационного преобразователей при изменении частоты тока намагничивания. Доказано, что токо-вихревой частотно-балансовый метод позволяет практически полностью отстроиться от колебаний (девиации) значения тока намагничивания, а то, что выходная информация используется в виде частоты тока, позволяет обеспечивать авто компенсацию девиации частоты, потому что при нахождении балансовой (f_B) частоты отклонение частоты автоматически будет скомпенсировано. Использование полезной информации в виде частоты позволяет эффективно применять цифровые измерительные приборы высокой точности и разрешающей способности (по сравнению с аналоговыми) без предварительной обработки информации.

Для расчетов частоты токо-вихревого баланса рассмотрена электрическая схема замещения магнитной цепи преобразователя.

При проведении дальнейших расчетов приняты следующие допущения:

– в основном магнитопроводе напряженность магнитного поля во всех точках пластин соответствует линейному участку зависимости $d = f(H)$;

– по всей толщине пластин действует напряженность H_0 , а нелинейное распределение напряженности в материале учтено коэффициентом изменения магнитной проницаемости K_μ . Для расчетов коэффициента K_μ рассмотрен участок основного магнитопровода, ограниченный шириной полюсов δ и расстоянием между ними Δ .

Получены графики зависимости балансовой частоты от значений контролируемых усилий ($f_B = \varphi(\sigma)$) и зависимости изменения выходного сигнала измерительного преобразователя от усилий ($U_D = \varphi(\sigma)$).

В результате сравнения этих зависимостей сделаны выводы, что при контроле усилий балансовым методом (в пределах упругих деформаций материала основного магнитопровода) на 100 Н/м^2 приходится $\Delta f_B = 0,1$ Гц, а при контроле обычным приблизительно $0,06$ мВ. Доказано, что способность частотного метода значительно выше. Погрешность измерения усилий частотно-балансовым методом не превышает $0,3\%$, тогда как обычным превышает 1% . Погрешность расчетов выходных характеристик по предложенной методике не превышает 5% и может быть значительно снижена за счет учета энергетических факторов при расчетах намагниченности материала магнитопровода. Данный способ измерений рационально применять для целого ряда электрических измерений неэлектрических величин.

Таким образом, разработанный метод позволяет значительно повысить точность контроля усилий за счет большой разрешающей способности метода. При этом практически полностью исключается влияние колебаний значения и частоты тока намагничивания. Метод позволяет эффективно использовать цифровую измерительную аппаратуру без преобразований выходной информации. Отмечая преимущества частотно-балансового метода, следует отметить рациональность его применения в системах управления автоматизированным оборудованием.

На кафедре ТОЭ в настоящее время также проводятся интересные исследования способа измерения усилий преобразователями, магнитопровод которых изготовлено с феррорезины с частицами однодоменного ферропорошка [4]. Способ позволяет существенным образом упростить технологию изготовления преобразователей, он рекомендован для контроля частоты и амплитуды вибраций, сило-измерений при значительных линейных деформациях объектов, в качестве тактильных матричных датчиков и прочее.

Заключение

Исследование выполненные сотрудниками кафедры "Теоретическая и общая электротехника" Запорожского национального технического университета, связанные с вопросом контроля неэлектрических и электрических параметров материалов электромагнитными методами позволяют упростить технологию изготовления преобразователей и повысить точность целого ряда электрических измерений неэлектрических величин.

Библиографический список использованной литературы

1. Безотосный В.Ф. Современные подходы и перспективные направления разработки систем управления по силовому параметру / В.Ф. Безотосный, В.В. Козлов, О.В. Набокова // Электротехника і електромеханіка. — 2008. — № 3. — С. 5–6.
2. Чаплыгин В.И. Токовихревой частотно-балансный метод измерения усилий электромагнитными преобразователями / В.И. Чаплыгин, В.Ф. Безотосный, Г.А. Полянский // Электронное моделирование. — Киев, 1977. — С. 215–223.
3. Чаплыгин В.И. Электромагнитный преобразователь усилий / В.И. Чаплыгин, В.Ф. Безотосный // Изв. вузов. Электромеханика. — 1977. — № 10. — С. 1159–1163.
4. Безотосный В.Ф. Учет энергетических факторов при расчете намагниченности ферромагнитных материалов / В.Ф. Безотосный, Э.В. Власенко // Электротехника и электроэнергетика. — 2004. — № 1. — С. 13–17.
5. А.с. СССР 1517506. Способ измерения усилий магнитоупругими преобразователями / В.Ф. Безотосный, А.Т. Рябшапка, В.Н. Гапонов (СССР). — 1989, Бюл. № 48.

Поступила в редакцию 9.04.2013 г.

Безотосний В.Ф., Козлов В.В., Набокова О.В. Система неруйнуючого контролю неелектричних параметрів матеріалів електромагнітними методами

Розглянуто питання контролю неелектричних та електричних параметрів матеріалів електромагнітними методами. Пропонується система автоматичного неруйнуючого контролю механічних напруг у деталях радіоелектронної апаратури.

Ключові слова: контроль неруйнуючий, параметр неелектричний, перетворювач каналового-цифровий.

Bezotosnyy V.F., Kozlov V.V., Nabokova O.V. System of non-destructing control of non-electrical parameters of materials through electromagnetic methods

The questions of the control of non-electrical and electrical parameters of materials by electromagnetic methods are considered in this article. The system of the automatic non-destructing control of mechanical pressures in the details of the radio-electronical equipment is offered.

Keywords: non-destructing control, non-electrical parameters, analog-to-digital converter.