

**КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ
МЕТОДОМ ВЫСШИХ ГАРМОНИК**

И. Г. ЛЕЩЕНКО

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ ЭИ и ИИТ ТПИ)

Особый интерес для научных и производственных целей представляет разработка методов и средств контроля качества ферромагнитных материалов и изделий, обладающих сильно выраженными нелинейными характеристиками при перемагничивании. В настоящее время для этих целей широкое распространение получает метод вихревых токов с использованием в качестве измерительной информации высших гармоник э. д. с. датчиков контроля и измерений [1]. Этот способ электромагнитного контроля качества изделий и измерения различных неэлектрических величин, получивший название метода высших гармоник (МВГ), основан на использовании нелинейных свойств ферромагнитных изделий и гармонического анализа электромагнитных параметров датчика [2]. В зависимости от схемы включения датчика и его конструкции чаще всего используется гармонический состав э. д. с. вторичной обмотки, однако, не меньшие возможности могут быть получены при гармоническом анализе намагничивающего тока однообмоточного датчика, питаемого в режиме заданного напряжения.

В отличие от известных электромагнитных способов контроля качества изделий и материалов (токовихревого, осциллографического, по характерным точкам динамической петли перемагничивания и др.) МВГ обладает значительно большей информационной способностью к изменениям тех или иных параметров контролируемого участка изделия.

Известно, что симметричная динамическая петля перемагничивания ферромагнетика является носителем многомерной информации о свойствах того слоя изделия, в которое проникает электромагнитное поле. Применение подмагничивания постоянным полем и особенно переменным полем другой частоты приводит к дополнительному увеличению получаемой информации о свойствах перемагничиваемого участка изделия. Как показали наши исследования, наиболее полные сведения об одном или одновременно о нескольких контролируемых параметрах могут быть достигнуты МВГ при питании датчиков модулированным по амплитуде или частоте током [1].

Преимущества МВГ состоят не только в количественном повышении информации, что уже определяет его перспективность для многопараметрового неразрушающего контроля, но и в том, что при этом увеличивается чувствительность к контролируемым параметрам, и открываются более широкие возможности электромагнитных методов контроля качества изделий и материалов для целей структуроскопии, дефектоскопии и измерения неэлектрических и магнитных величин. Последнее обстоятельство обусловлено неодинаковой зависимостью основной и высших гармоник сигнала датчика от одних и тех же пара-

метров ферромагнетика [3, 4]. Вопросы исследования и применения МВГ нашли отражение в кандидатских диссертациях М. М. Шеля, К. В. Маркевича, А. М. Грузнова, Г. М. Куракина, Д. И. Якиревича, А. Д. Покровского, В. В. Черняка, В. Д. Сартакова и З. С. Кулышевой, а также в работах раннего периода [5, 6 и др.].

Характерной особенностью метода является также то, что высшие гармоники появляются в самом ферромагнетике, и, следовательно, снимаемая информация не зависит от коэффициента заполнения измерительной катушки в сравнительно однородных магнитных полях, а изменение э. д. с. гармонических составляющих связано с изменением структуры изделия или его участка, с появлением различных типов дефектов, от изменения геометрических размеров и электропроводности. Наличие внутренних локальных дефектов приводит к появлению в этой зоне высших гармоник, которые используются для выявления этих дефектов МВГ, при этом чувствительность к дефектам может быть значительно повышенной, так как в области дефекта, как правило, возникают концентрации внутренних напряжений. При перемагничивании ферромагнитного изделия одновременно двумя полями разных амплитуд и частот, соизмеримых и несоизмеримых по своему значению, появляются новые полезные эффекты, которые начали широко использоваться для целей дефектоскопии, структуроскопии и измерения неэлектрических величин [1, 7 и др.]. Наличие электродинамических сил взаимодействия между намагничивающей катушкой и контурами вихревых токов приводит в сильных полях к микроколебаниям частиц металла с двойной частотой и к искажению распределения поля вихревых токов, что также сказывается на контроле качества изделий МВГ, и начинается широкое применение этого эффекта в дефектоскопии различных материалов и изделий [8].

Впервые на возможность использования высших гармоник в сигнале э. д. с. вторичной обмотки датчиков для анализа структурно-механических свойств ферромагнитных материалов и изделий было указано Н. С. Акуловым в 1934 г. [5]. Было замечено, что амплитуды и фазы э. д. с. высших гармоник зависят от магнитной проницаемости, коэрцитивной силы, электропроводности и режима перемагничивания, а, следовательно, и от механических свойств контролируемых изделий. Позднее, в 1935—1939 годах, было опубликовано только несколько работ, в которых сообщалось о методах и приборах неразрушающего контроля с использованием высших гармоник [7]. Однако отсутствие техники гармонического анализа около 25 лет сдерживало развитие этого столь эффективного способа контроля качества изделий, хотя в неявной форме работы развивались по описанию петель гистерезиса и по исследованию осциллографического метода по фигурам Лиссажу. И только благодаря работам Р. Е. Ершова и ранее упомянутых авторов диссертаций, МВГ нашел признание и стал быстро развиваться.

В составленном нами справочно-библиографическом указателе литературы по теории и практике контроля и измерений МВГ приведены в хронологическом изложении все известные нам доклады, статьи, диссертации и другие материалы с рефератами или аннотациями к ним [7].

Зарубежных работ по исследованию МВГ для контроля качества изделий очень мало, что указывает на ведущую роль в данном направлении ученых нашей страны [7].

Анализ опубликованных и находящихся в стадии исследования работ по МВГ позволяет сформулировать следующие основные направления развития этого метода.

1. Разработка и исследование теоретических и физических основ МВГ, состоящих из аналитического представления зависимости индук-

ции от напряженности магнитного поля для реальной формы петли перематывания, исследования распространения электромагнитного поля в ферромагнитных средах, расчета амплитуд и фаз гармоник вторичной э. д. с. с учетом вихревых токов в зависимости от свойств материала, геометрических размеров, наличия дефектов и т. п. при питании датчиков как синусоидальным и несинусоидальным током, так и с применением подмагничивания постоянным и переменным полем для разных конструктивных исполнений датчиков.

2. Разработка методов и средств повышения разрешающей способности и чувствительности к тем или иным контролируемым параметрам за счет выбора рациональных конструкций датчиков, формы, амплитуды и частоты намагничивающего тока, гармонического анализа э. д. с. вторичной обмотки или разности э. д. с. при дифференциальной схеме включения датчиков, использования рациональных способов уменьшения влияния мешающих факторов и т. д.

3. Теоретические и экспериментальные исследования МВГ для целей измерения различных неэлектрических величин (давлений, вибраций, механических напряжений, параметров движения и др.) и свойств ферромагнитных материалов и изделий. Разработка соответствующей измерительной аппаратуры.

4. Разработка и исследование методов и средств многопараметрового контроля и анализа измеряемой информации.

Теоретическое направление работ по МВГ, особенно для сильных магнитных полей и с учетом вихревых токов, в силу известных трудностей математического описания нелинейных процессов в ферромагнетиках далеко отстает от экспериментальных исследований и практического применения МВГ для целей дефектоскопии, структуроскопии и измерения неэлектрических величин. В настоящее время имеется лишь немного работ и то применительно к простейшим аппроксимациям, которые показывают явные преимущества МВГ по сравнению с остальными электромагнитными способами и подтверждают качественно полученные результаты.

Практическое использование МВГ для контроля различных параметров ферромагнитных изделий ранее было дано в статье М. М. Шеля [1], поэтому в данной работе целесообразно лишь обобщить достигнутые результаты ведущими коллективами в стране и указать на возможные пути исследования и применения МВГ.

Основное направление работ, проводимых в Институте физики СО АН СССР под руководством Р. Е. Ершова, связано с развитием теории распространения электромагнитного поля основной и высших гармоник, разработкой методов и средств повышения чувствительности метода при питании датчиков несинусоидальными токами различных форм. Практическое применение МВГ — контроль структуры, измерения магнитных характеристик и дефектов тонких магнитных пленок, твердости сталей, толщины закаленного слоя и др. [1, 9].

В ИркутскНИИ ХИММАШе под руководством М. М. Шеля разрабатывается и исследуется теория МВГ и распространение электромагнитного поля в ферромагнитной среде применительно к датчикам проходного и накладного типов [1, 10]. Решен ряд важных задач по теории и практике применения магнитоупругого эффекта в МВГ для контроля и измерения механических напряжений в металлах [4, 10].

Группа сотрудников Киевского института гражданской авиации выполняет и успешно решает ряд оригинальных и перспективных задач по экспериментальному исследованию МВГ применительно к контролю структуры, качества сварных соединений [11, 12], оценки напряжений и усталостным характеристикам металлов. Положительно

решается вопрос многопараметрового контроля качества изделий с использованием высших гармоник э. д. с. Проводятся исследования МВГ при импульсном возбуждении намагничивающих устройств.

В Томском политехническом институте под нашим руководством получены положительные результаты по дефектоскопии двухчастотными проходными и накладными датчиками ферромагнитных изделий, измерению твердости и других структурно-механических характеристик сталей по динамическим характеристикам петли перемагничивания и с применением выносной измерительной катушки [1, 12, 13, 14 и др.].

Двухчастотный метод позволяет обнаруживать малые поперечные и локальные дефекты как на поверхности, так и в глубине изделий. Проводятся исследования гармонического анализа тока датчика и коэффициента формы кривых тока и напряжения.

Работы Московского гидромелиоративного института (руководитель Т. Я. Гораздовский) связаны с всесторонними теоретическими и экспериментальными изучениями механических напряжений в металлах из различных ферромагнитных материалов [1, 12, 14], устойчивостью металлических конструкций и усталостными трещинами МВГ.

В Московском энергетическом институте успешно ведутся теоретические и экспериментальные работы по аппроксимациям петель гистерезиса, расчету гармоник э. д. с. датчиков, электронному моделированию и применению МВГ для целей контроля качества изделий [1, 8, 12].

Кроме указанных групп, в ряде научных учреждений и высших учебных заведениях начинают успешно использовать и применять МВГ для целей дефектоскопии, структуроскопии и для измерения различных неэлектрических величин. Важную роль в быстром развитии МВГ имеют работы М. А. Розенבלата, Д. А. Савиновского, И. Д. Маергойза и др. по расчету переменных магнитных полей в ферромагнитных средах с учетом реальной формы петли гистерезиса, влияния вихревых токов, применения подмагничивания постоянным и переменным током.

Объединения усилий электромехаников и специалистов по электромагнитным методам контроля для решения ряда теоретических и практических задач даст несомненно положительный эффект по более эффективному использованию МВГ не только для контроля качества изделий из конструкционных материалов, широко применяемых в промышленности, но и для контроля электротехнических сталей, их магнитных характеристик, потерь и т. п. на различных стадиях производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник материалов Всесоюзного семинара «Метод высших гармоник в вихревой дефектоскопии», изд. ИФ СО АН СССР, Красноярск, 1969.
2. Р. Е. Ершов, М. М. Шель. «Дефектоскопия». № 1, 1969.
3. Р. Е. Ершов. «Изв. вузов». Физика, № 4, 1966.
4. Сборник докладов «Исследования по физике металлов и неразрушающим методам контроля», изд. «Наука и техника», Минск, 1968.
5. Н. С. Акулов. «Заводская лаборатория», № 8, 1934.
6. Н. И. Еремин. «Вестник машиностроения», № 1, 2, 1937.
7. И. Г. Лещенко. Контроль и измерения методом высших гармоник. Изд. ТЦНТИ, Томск, 1970.
8. Ю. М. Шкарлет, Ю. А. Сазонтов и др. В сб.: Электромагнитные методы контроля. Изд. МДНТП, М., 1969.
9. Р. Е. Ершов. «Дефектоскопия». № 1, 1966.
10. М. М. Шель. Неразрушающий контроль методом высших гармоник вихревых токов. Брошюра, Иркутск, 1970.
11. Г. М. Куракин. Автоматическая сварка. № 12, 1968.
12. Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по неразрушающим испытаниям. Москва—Свердловск, 1967.
13. А. М. Грузнов, И. Г. Лещенко, Б. Б. Винокуров. «Изв. ТПИ», Томск, т. 194, 1971.
14. Доклады 2-го Всесоюзного семинара «Неразрушающий контроль ферромагнитных материалов и изделий методами высших гармоник», ред. И. Г. Лещенко, Томск, 1971.