

Литература

1. **Jaklevic R. C., Lambe J., Silver A. H., Mercereau J. E.** Quantum Interference Effects in Josephson Tunneling // *Phys. Rev. Let.* 1964. N. 12 (7). P. 159—160.
2. **Fulton T. A., Gammel P. L., Bishop D. J., Dunkleberger L. N., Dolan G. J.** Observation of Combined Josephson and Charging Effects in Small Tunnel Junction Circuits // *Phys. Rev. Let.* 1989. N. 63(12). P. 1307—1310.
3. **Likharev K. K., Semenov V. K.** RSFQ logic/memory family: a new Josephson-junction technology for sub-terahertz-clock-frequency digital systems // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 1991. N. 1. P. 3—28.
4. **Hamilton C. A., Kautz R. L., Steiner R. L., Lloyd F. L.** A practical Josephson voltage standard at 1 V // *IEEE Electron Device Let.* 1985. N. 6 (12). P. 623—625.
5. **Niemeyer J., Hinken J. H., Kautz R. L.** Microwave-induced constant voltage steps at one volt from a series array of Josephson junctions // *Appl. Phys. Let.* 1984. N. 45 (4). P. 478—480.
6. **Comptes Rendus de la 24e CGPM.** 2011. P. 532—536.
7. **Muller F., Scheller T., Wendisch R., Behr R., Kieler O., Palafox L., Kohlmann J.** NbSi Barrier Junctions Tuned for Metrological Applications up to 70 GHz: 20 V Arrays for Programmable Josephson Voltage Standards // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2013. N. 23(3). 1101005 (5 pp).
8. **Lee J., Behr R., Palafox L., Katkov A., Schubert M., Starkloff M., Bock A. C.** An ac quantum voltmeter based on a 10 V programmable Josephson array // *Metrologia.* 2013. N. 50 (6). P. 612—622.
9. **Benz S. P., Hamilton C. A., Burroughs C. J., Harvey T. E.** AC and DC bipolar voltage source using quantized pulses // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 1999. N. 48(2). P. 266—269.
10. **Klushin A. M., He M., Katkov A. S.** Constant-voltage steps at 0.1 volt from a series array of high- T_c Josephson junctions // *Conf. Digest CPEM 2008. Boulder.* 2008. P. 104—105.
11. **Lacquaniti V., De Leo N., Fretto M., Sosso A., Müller F., Kohlmann J.** 1 V programmable voltage standards based on SNIS Josephson junction series arrays // *Supercond. Sci. and Technol.* 2011. N. 24 (4). 045004.
12. **Behr R., Kieler O., Lee J., Bauer S., Palafox L., Kohlmann J.** Direct comparison of a 1 V Josephson arbitrary waveform synthesizer and an ac quantum voltmeter // *Metrologia.* 2015. N. 52 (4). P. 528—551.
13. **Behr R., Kieler O., Schleußner D., Palafox L., Ahlers F.-J.** Combining Josephson systems for spectrally pure AC waveforms with large amplitudes // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2013. N. 62. P. 1634—1639.
14. **Georgakopoulos D., Budovsky I., Grady S., Hagen T.** Quantum calibration system for digital voltmeters at voltages from 10 nV to 1 kV // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2013. V. 62 (6). P. 1581—1586.
15. **Катков А. С., Ловцюс В. Э.** Компактный эталон сравнения на эффекте Джозефсона с выходным напряжением 10 В // *Измерительная техника.* 2011. № 7. С. 41—45.

Дата принятия: 05.10.2015.

620.179.143

Создание трёхмерной модели намагниченного участка трубопровода для внутритрубной магнитной дефектоскопии

С. А. МАННИНЕН, П. А. КУЗНЕЦОВ

Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», С.-Петербург, Россия, e-mail: victorm@crism.ru

Рассмотрен метод обнаружения и идентификации дефектов внутри трубы, намагниченной переменным током. Разработана трёхмерная компьютерная модель намагниченного участка трубопровода с использованием метода конечных элементов. Модель позволяет рассчитывать распределение магнитного поля внутри трубы при протекании через неё переменного электрического тока. Расчётную модель можно использовать для создания эффективной измерительной системы внутритрубного магнитного дефектоскопа.

Ключевые слова: внутритрубная магнитная дефектоскопия, коррозионные повреждения трубопровода, метод конечных элементов.

The method of detection and identification of defects inside the tube, magnetized by alternating current is considered. The 3D computer model of the magnetized part of the pipeline was developed using the finite element method. The model allows to calculate the magnetic field distribution inside the tube while flowing through it an alternating electrical current. The developed calculation model may be used to create an effective measurement system for intratubal magnetic defectoscope.

Key words: intratubal magnetic defectoscopy, pipeline corrosion damage, finite element method.

В настоящее время методы магнитной дефектоскопии получили широкое распространение в связи со значительным развитием измерительной и компьютерной техники [1]. Первичные индукционные, феррозондовые и другие преобразователи магнитного поля встраиваются в измеритель-

ные системы, позволяющие регистрировать и обрабатывать сигналы в режиме реального времени [2].

В основе методов магнитной дефектоскопии лежит намагничивание ферромагнитных объектов и измерение на их поверхности поля рассеяния от дефекта. Если в результате

измерений построить карту распределения поля рассеяния, то по её виду можно определить характер и расположение дефекта.

Одним из перспективных направлений применения данного подхода является диагностика трубопроводов [3—5], внутри которых необходимо выявление и оценка различного рода повреждений, в том числе коррозионных. Суть метода заключается в намагничивании участка трубы протекающим по её стенкам переменным током. При таком способе намагничивания магнитное поле внутри однородной неповреждённой трубы не возникает. Однако в случае механического повреждения трубы, внутри неё в районе дефекта появляется нескомпенсированное магнитное поле. Измерив магнитное поле вдоль внутренней поверхности трубы, можно обнаружить дефект, а по высоте и ширине магнитного пика — оценить поперечные размеры и глубину дефекта. Использование в данном методе переменного тока позволяет исключить влияние постоянного геомагнитного поля и остаточной намагниченности участка трубы. При этом частота намагничивающего тока не должна быть слишком большой из-за возрастания негативного влияния скин-эффекта. В связи с тем, что при составлении карты распределения поля рассеяния могут возникать различного рода помехи, представляется целесообразным проведение компьютерного моделирования данного метода с последующим сравнением экспериментальных результатов.

Цель данной работы заключается в создании трёхмерной компьютерной модели намагниченного участка трубопровода, позволяющей рассчитывать распределение магнитного поля внутри трубы при протекании через неё переменного электрического тока. Создание такой модели необходимо для определения границ применимости метода внутритрубой магнитной дефектоскопии с намагничиванием переменным током, а также для отладки программного обеспечения, выполняющего анализ измерительных данных при обнаружении дефектов.

Описание измерительной установки. Для экспериментальной проверки данного метода была создана измерительная установка (рис. 1), представляющая отрезок трубы длиной 9 000 мм, диаметром 1 000 мм и толщиной стенки 10 мм. Через трубу пропускали переменный электрический ток частотой 300 Гц и амплитудой 100 А.

Магнитное поле внутри трубы измеряли с помощью индукционного датчика — катушки диаметром 11 мм и высотой 9 мм, расположенной перпендикулярно радиусу направляющей окружности цилиндра на расстоянии 20 мм от внутренней поверхности трубы. Катушку можно перемещать в двух направлениях вблизи внутренней цилиндрической поверхности трубы: вдоль направляющей окружности или образующей цилиндра. В результате движения катушки была построена экспериментальная двухкоординатная магнитограмма — зависимость электрического сигнала, принимаемого катушкой от угловой (при перемещении вдоль направляющей окружности) и линейной (при перемещении вдоль образующей) координат цилиндрической системы. На внутреннюю поверхность трубы был нанесён контрольный дефект в виде углубления сферической формы диаметром 150 мм и глубиной 5,5 мм.

Описание компьютерной модели. Трёхмерная компьютерная модель намагниченного участка трубопровода создана с использованием метода конечных элементов в интерактивной среде COMSOL Multiphysics. Модель включает участок цилиндрической трубы с дефектом, а также внутрен-

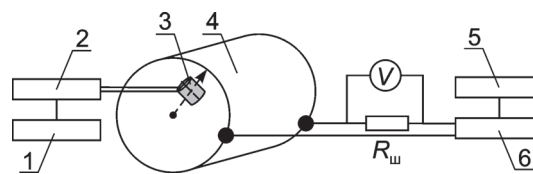


Рис. 1. Схема измерительной установки:

1 — осциллограф; 2, 6 — усилители; 3 — измерительная катушка; 4 — участок трубы; 5 — генератор

нюю и часть внешней воздушной области. Намагничивающий переменный ток протекает по стенке трубы вдоль её оси. Задача была решена в линейном приближении, при расчётах магнитная проницаемость материала трубы предполагалась постоянной. Результатом моделирования является распределение индукции магнитного поля на контрольной цилиндрической поверхности внутри трубы на заданном расстоянии от её внутренней поверхности, соответствующем расстоянию до датчика измерительной системы.

Расчётная область была разделена с помощью тетраэдрической сетки переменного шага на отдельные конечные элементы, внутри которых все физические характеристики постоянны. Вблизи внутренней поверхности трубы и дефекта шаг сетки минимальный. При удалении от поверхности трубы во внутренней и внешней областях моделирования шаг сетки постепенно увеличивался, что позволило значительно сэкономить вычислительные ресурсы. Таким образом, построена дискретная модель краевой задачи, состоящая из множества кусочно-непрерывных функций, определённых на конечном числе подобластей. Решение задачи найдено, исходя из условия минимума энергетического функционала итерационным способом с помощью пакета COMSOL Multiphysics.

Разработанная компьютерная модель полностью параметризована и позволяет задавать и изменять: наружный диаметр, толщину стенки и длину участка трубы; диаметр, глубину, линейную и угловую координаты дефекта; частоту и силу намагничивающего тока; зазор между датчиком и поверхностью трубы; относительную магнитную проницаемость материала трубы. Для построения и параметризации модели, а также для обработки и представления результатов вычислений использовали язык программирования пакета MATLAB. Результаты моделирования экспортируются в рабочую среду MATLAB для дальнейшей обработки и сохраняются в текстовом файле в виде таблицы, номер столбца которой соответствует угловой координате точки на контрольной поверхности, а номер строки — линейной координате.

Сравнение результатов расчёта и эксперимента. Для проверки адекватности разработанной модели были выполнены расчёты и измерения распределения магнитного поля вблизи контрольного дефекта. Сначала смоделирован участок трубы длиной 500 мм, внутренним диаметром 1 000 мм, с толщиной стенки 10 мм. На внутренней поверхности трубы был задан контрольный дефект в виде углубления сферической формы размерами, соответствующими контрольному дефекту на экспериментальном макете трубопровода. Для смоделированного участка трубы с дефектом было вычислено распределение индукции магнитного поля внутри трубы и построена двухкоординатная магнитограмма тангенциальной компоненты индукции магнитного поля (рис. 2). Тангенциальная составляющая индукции магнитного поля была выбрана при построении расчётной магнитограммы из-за возможности её сравнения с результатами экспери-

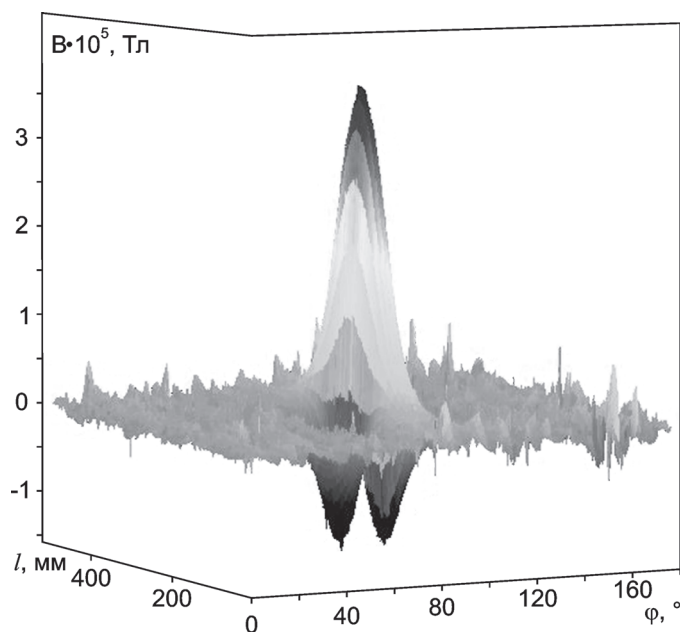


Рис. 2. Расчётная двухкоординатная магнитограмма контрольного дефекта; B — индукция магнитного поля; L, φ — линейная и угловая координаты, соответственно

мента, поскольку именно она измеряется в описанной ранее экспериментальной установке (см. рис. 1).

Для сравнения результатов моделирования и эксперимента были построены срезы экспериментальной и расчётной магнитограмм вдоль кривых, проходящих через центр дефекта. Линейный срез — вдоль прямой, параллельной оси цилиндра, угловой срез — вдоль дуги направляющей окружности цилиндра. Поскольку тангенциальная составляющая индукции магнитного поля несколько раз изменяет знак вблизи дефекта, а индукционный датчик экспериментальной установки, фиксирующий действующее значение магнитного потока, не способен различить направление поля, то при построении расчётных срезов была использована абсолютная величина тангенциальной составляющей индукции магнитного поля. На рис. 3 показана зависимость расчётного поля и амплитуды измеренного сигнала от координаты на угловом и линейном срезах. Поскольку амплитуда изме-

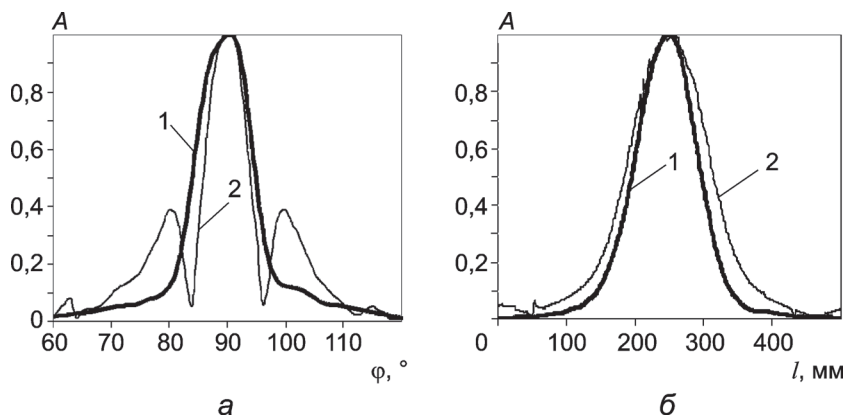


Рис. 3. Нормализованные угловой (а) и линейный (б) срезы экспериментальной (1) и расчётной (2) магнитограмм, проходящие через центр дефекта:

A — нормализованная амплитуда; L, φ — линейная и угловая координаты, соответственно

ренного сигнала и результаты вычислений магнитной индукции представляют разные физические величины, для сравнения графики нормализованы на единицу по максимальному пиковому значению. Расчётный линейный срез пика магнитограммы повторяет экспериментальные данные. Однако на расчётном угловом срезе присутствуют два боковых пика, отделённых от главного. Разделение пиков связано с переходом через нуль при изменении знака тангенциальной составляющей индукции магнитного поля. Отсутствие данных пиков на экспериментальной магнитограмме вызвано усреднением сигнала из-за поперечных размеров катушки или способа обработки измеренного сигнала. При этом общая ширина пика углового среза и в этом случае приблизительно соответствует экспериментальным данным.

Заключение. Разработанная модель намагниченного участка трубопровода позволяет получить соответствующее действительности распределение магнитного поля внутри трубы. Эта модель может быть использована для создания эффективной измерительной системы внутритрубного магнитного дефектоскопа и разработки алгоритмов обнаружения и распознавания дефектов для магнитной дефектоскопии с переменным намагничиванием.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» и является составной частью прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по теме «Прикладные научные исследования по созданию нового бесконтактного магнитного метода неразрушающего контроля трубопроводов с переменным намагничиванием металла и экспериментальная разработка на базе данного метода опытного образца контрольно-измерительного внутритрубного робототехнического комплекса, обеспечивающего решение проблемы своевременной диагностики коррозионных повреждений подземных трубопроводов тепловых сетей малых диаметров (Ду200, Ду400) без их вскрытия в сфере энергетики и ЖКХ» (уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI58114X0004).

Литература

1. Дубов А. А. Диагностика трубопроводов, оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла. Сборник статей и докладов. М.: Энергодиагностика, 1999.
2. Горбаш В. Г., Делендик М. Н., Павленко П. Н. Неразрушающий контроль в промышленности. Магнитный контроль // Наука и практика. 2011. № 2. С. 48—63.
3. Синев А. И., Морозов А. К. Дефектоскопия магистральных трубопроводов на современном уровне // Сфера Нефтегаз. 2010. № 2. С. 172—173.
4. Воробьев Я. В., Волгина Н. И., Хуснутдинов Л. А., Камаева С. С. Использование ферромагнитных свойств металла для диагностирования технического состояния и прогнозирования ресурса стальных трубопроводов // Технология металлов. 2010. № 1. С. 46—49.
5. Абакумов А. А., Абакумов А. А. (мл.) Магнитные интроскопы и технология диагностирования коммунальных трубопроводов // Энергосбережение. 2004. № 1. С. 50—54.

Дата принятия: 23.12.2015.