

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ СРЕДСТВ ДЕФЕКТОМЕТРИИ

А.Г. Ефимов (ЗАО «НИИИИИ МНПО «Спектр», г. Москва), к.т.н., зам. зав. отделом

Тел. (499) 245-56-18, E-mail: info@nio12.ru

Разработана конструкция вихретокового преобразователя (ВТП) с колебательным контуром, проведены теоретические и экспериментальные исследования взаимосвязи между напряжением, вносимым в дефектоскопический измерительный модуль и параметрами дефекта, рабочим зазором, частотой, углом наклона ВТП. Рассмотрены различные методы цифровой фильтрации сигнала ВТП и аппроксимации полученных значений. Представлены разработанные средства вихретокового контроля.

Процесс производства различного класса изделий и их безопасной эксплуатации невозможен без контроля их качества неразрушающими методами. Важное место среди них занимает вихретоковый метод, который обеспечивает высокую надежность обнаружения поверхностных дефектов, высокую скорость контроля и возможность бесконтактного съема информации. Принцип вихретокового метода основан на возбуждении в контролируемом изделии вихревых токов и последующем выделении на выходе преобразователя сигнала, амплитуда и фаза которого определяются действующим вторичным полем вихревых токов.

Одними из основных задач неразрушающих методов контроля металлоизделий являются обнаружение дефектов сплошности и оценка их геометрических параметров. Сложность дефектометрической оценки вихретоковым методом связана с существенным влиянием на результаты измерения вариации рабочего зазора, электромагнитных свойств металла, изменения кривизны и шероховатости поверхности, а также других влияющих факторов. При ручном контроле на погрешность измерений наиболее существенно влияют: край изделия, изменение угла наклона вихретокового преобразователя (ВТП), зазор между ВТП и контролируемой поверхностью, локальное изменение шероховатости и кривизны поверхности, магнитные пятна. Неоднозначность дефектометрической оценки обусловлена также формой дефекта и его расположением. В связи с большим числом влияющих факторов и необходимостью применения контрольных образцов, возможности дефектометрической оценки существующими средствами вихретокового контроля весьма ограничены, что определяет актуальность исследований и разработок, связанных с вихретоковой дефектометрией.

В настоящее время в России и за рубежом созданы и используются в промышленности различные типы вихретоковых дефектоскопов, которые позволяют эффективно обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты типа трещин и

оценивать их глубину. Однако точность определения геометрических размеров дефекта напрямую зависит от электромагнитных свойств контролируемого материала и для улучшения метрологических характеристик дефектоскопа контрольные образцы с набором искусственных дефектов различной глубины необходимо изготавливать из материала объекта контроля. Оценку глубины естественного дефекта необходимо осуществлять через сравнение с эталоном. Данную проблему можно решить созданием адаптивного средства неразрушающего контроля, автоматически учитывающего свойства материала и влияющие факторы при определении глубины измеряемого дефекта.

Проведенный анализ показал, что существующие средства вихретокового контроля не обеспечивают требуемую для практики погрешность измерений из-за воздействия мешающих факторов. При этом актуальными являются вопросы создания эффективных алгоритмов интерпретации результатов измерения, совершенствования дефектоскопических средств и их метрологического обеспечения.

Изначально в качестве объекта исследований был выбран наиболее часто используемый в портативных вихретоковых дефектоскопах трансформаторный накладной ВТП со стержневым ферромагнитным сердечником (СВТП) (Рис.1). Были проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния корректирующей емкости 4 на характер взаимодействия СВТП и объекта контроля.

С целью эффективного использования преимуществ предложенной конструкции СВТП проводились расчетно-теоретические и экспериментальные исследования влияния мешающих факторов на параметры СВТП.

Для моделирования процесса контроля использовался метод конечных элементов (МКЭ). В качестве неизвестных использовались компоненты векторного потенциала. При моделировании МКЭ производилось преобразование, дискретизация и решение системы уравнений Максвелла для расчетной области. Моделируемые процессы можно описать используя известные уравнения Максвелла:

$$\operatorname{rot}(\vec{H}) = \vec{J}_{\text{полн}} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

где: \vec{B} - индукция магнитного поля,
 \vec{E} - напряженность электрического поля,
 $\vec{J}_{\text{полн}}$ - плотность полного тока,
 t - время.

Векторный магнитный потенциал \vec{A} описывается выражением:

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}) \quad (3)$$

Для напряженности электрического поля при наличии токов проводимости справедливо выражение:

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (4)$$

После проведения преобразований и учитывая что $\vec{B} = \mu \vec{H}$ и $\vec{J} = \sigma \vec{E}$, можем записать дифференциальные уравнения, подлежащие решению:

$$\nabla^2 \vec{A} - \sigma \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\mu \vec{J}_{\text{сноп}} \quad (5)$$

или для моногармонических процессов:

$$\nabla^2 \dot{\vec{A}} + \tilde{k}^2 \dot{\vec{A}} = -\mu \vec{J}_{\text{сноп}} \quad (6)$$

где: μ - магнитная проницаемость материала,

σ - удельная электрическая проводимость,

$$\tilde{k}^2 = -j\omega\mu\sigma.$$

На границе раздела сред граничные условия имеют вид:

$$E_{1t} = E_{2t}; H_{1t} = H_{2t}; B_{1n} = B_{2n}$$

В случае, когда к СВТП не подключалась емкость, ЭДС каждой из измерительных обмоток вычислялась как:

$$e(t) = -\sum_{i=1}^W \frac{\partial \Phi_i}{\partial t}, \text{ где} \quad (7)$$

Φ_i - магнитный поток через i -ый виток,

W - число витков.

В случае если параллельно СВТП подключается емкость, система уравнений дополнялась законом Ома для участка цепи и уравнением связи индуктивных элементов цепи и их реализацией в конечно-элементной модели. Для электрической схемы вторичные обмотки преобразователя фактически заменялись источниками напряжения с внутренним активным и реактивным сопротивлением. Уравнение связи для этих элементов:

$$\Delta V = R_O I + \frac{W}{S_O} \int_S \frac{\partial \Phi}{\partial t} dS \quad (8)$$

где: ΔV - падение напряжения на обмотке,

R_O - активное сопротивление провода,

I - ток в обмотке,

S_0 - площадь поперечного сечения СВТП,

Конечно-элементные модели состояли из 8-ми, 5-ти и 4-х узловых элементов первого порядка. 8-ми узловые элементы первого порядка (гексаэдры) использовались для описания объекта контроля и преобразователя, т.е. областей, требующих повышенной точности вычисления. Для моделирования окружающего пространства вплоть до границы модели использовались 4-х узловые тетраэдры. 5-ти узловые элементы (пирамиды) использовались для стыковки гексаэдрической и тетраэдрической сеток.

На рис.2 приведена модель поверхностного дефекта типа несплошности в проводящем образце, которая была использована при моделировании. Учитывая симметрию образца и СВТП, моделирование проводилось для сектора пространства в 90 градусов, причем линия раздела проходила через ось симметрии дефекта. Данный подход к построению модели позволил значительно уменьшить количество машинного времени, необходимое для численных расчетов.

На рис.3а приведены векторы плотности тока на поверхности объекта контроля для сектора пространства в 90° относительно оси преобразователя. На рис.3б дано распределение модуля плотности тока для полупространства, образованного плоскостью, проходящей через ось симметрии СВТП, установленного над дефектом.

На рис.4а. приведено полученное с помощью моделирования значение нормированного модуля внесенных параметров для СВТП в зависимости от частоты тока возбуждения. На рис 4б, представлена зависимость фазы сигнала, как основного информативного параметра дефекта от его обобщенной глубины для различных частот тока возбуждения. Данные получены для образца, изготовленного из стали 45.

Чтобы обеспечить достоверность сравнительного анализа данных моделирования и экспериментальных данных, был решен вопрос метрологического обеспечения. При проведении экспериментальных исследований были использованы образцы из комплекта образцов искусственных дефектов и зазоров для вихретоковой дефектоскопии КОИДЗ-ВД, внесенного в Государственный реестр средств измерений под №40696-09 (Рис. 5). Образцы, входящие в этот комплект позволяют оценить погрешность измерения глубины дефекта от воздействия различных мешающих факторов, таких как форма и электрофизические характеристики объекта контроля, соотношение различных параметров дефекта.

Основные технические характеристики КОИДЗ ВД

Диапазон номинальных значений глубины дефектов, мм	от 0,1 до 10
Пределы допустимой погрешности значения глубины дефектов, мм	от $\pm 0,01$ до $\pm 0,25$
Диапазон номинальных значений ширины раскрытия дефектов, мм	от 0,05 до 0,25
Пределы допустимой погрешности значения ширины раскрытия дефектов, мм	от $\pm 0,01$ до $\pm 0,05$
Диапазон номинальных значений длины дефектов, мм	от 11 до 100
Пределы допустимой погрешности значения длины дефектов, мм	от $\pm 0,5$ до ± 1
Диапазон номинальных значений толщины образцов зазоров, мм	от 0,2 до 10
Пределы допустимой погрешности значения толщины образцов, мм	от $\pm 0,02$ до $\pm 0,5$
Диапазон номинальных значений радиуса кривизны криволинейных поверхностей с дефектами, мм	
- выпуклой	от 13 до 510
- вогнутой	10

На Рис.6а приведена экспериментально полученная зависимость фазы сигнала СВТП от обобщенной глубины дефекта для различных частот возбуждения. На рис. 6б отражено влияние величины корректирующей емкости на амплитуду сигнала СВТП, нормирование проведено по максимальному значению.

Анализируя данные рис. 6а, можно сделать вывод о том, что экспериментальные данные подтверждают результаты, полученные при моделировании МКЭ. Данные рис. 6б устанавливают связь между величиной корректирующей емкости, амплитудой входного сигнала СВТП и частотой экстремума модуля внесенных параметров. Использование корректирующего контура, состоящего из встречно включенных сигнальных обмоток и емкости, подключенной параллельно им, позволяет добиться увеличения амплитуды выходного сигнала СВТП в 5-10 раз при значениях частоты тока возбуждения от 100 кГц до 1 МГц, что облегчает задачу корректного детектирования фазы и значительно улучшает соотношение сигнал/шум.

Анализируя полученные данные можно сделать следующие выводы:

- 1) Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили установить взаимосвязь между напряжением, вносимым в дефектоскопический измерительный модуль и параметрами дефекта, рабочим зазором, частотой, углом наклона СВТП.

- 2) Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали преимущество накладного СВТП с измерительной обмоткой, включенной в параллельный колебательный контур по сравнению с традиционной конструкцией ВТП.
- 3) Проведенные эксперименты подтвердили достоверность результатов расчетов, выполненных методом конечных элементов, так как расхождение расчетных и экспериментальных данных в абсолютном значении не превысило 20%, при сохранении всех основных закономерностей.
- 4) При работе со значительным зазором предпочтительной является частота, соответствующая максимуму модуля внесенных параметров, так как это позволяет обеспечить не только наилучшее соотношение сигнал/шум, но и максимальный отклик на дефект, как по амплитудной, так и по фазовой составляющей сигнала.
- 5) При выборе в качестве основного информативного параметра фазы и работе с минимальным зазором с ростом частоты наблюдается увеличение чувствительности и улучшение линейности фазовой характеристики при величине обобщенной глубины дефекта при $h^* < 1.5$,

$$\text{где } h^* = h_{\text{деф.}} / D_{\text{преобр}} \quad (9)$$

Введение в состав преобразователя корректирующей емкости позволило значительно повысить соотношение сигнал/шум. Дальнейшего улучшения можно добиться за счет использования различных методов цифровой фильтрации. Традиционными методами, широко применяемыми в современных дефектоскопах являются: метод скользящего среднего, оконная функция, Вейвлет - и Фурье- преобразования. Однако к недостаткам двух последних методов следует отнести необходимость использования значительных вычислительных мощностей и невозможность их использования в режиме реального времени.

Одним из перспективных методов цифровой фильтрации является цифровой адаптивный фильтр. Данный вариант предпочтителен, так как он не требует вмешательства оператора для подстройки под имеющиеся шумы и одинаково хорошо работает во всем диапазоне частот возбуждения ВТП и практически не искажает сигнал ВТП. Также к преимуществам адаптивной фильтрации следует отнести простоту аппаратной реализации и возможность работы в режиме реального времени.

Адаптивные фильтры в настоящее время нашли применение во многих радиотехнических и телекоммуникационных системах [1-4]. Одним из наиболее частых применений адаптивной фильтрации является очистка сигналов от шума. Однако

адаптивные алгоритмы в силу наличия механизмов обратной связи характеризуются повышенной нестабильностью в некоторых областях применения [1, 4]. Это обусловлено сложностью, а иногда и невозможностью их математического описания и анализа.

Общая структура адаптивного фильтра показана на рис. 7.

Входной дискретный сигнал $x(k)$ обрабатывается дискретным фильтром, в результате чего получается выходной сигнал $y(k)$. Этот выходной сигнал сравнивается с образцовым сигналом $d(k)$, разность между ними образует сигнал ошибки $e(k)$. Задача адаптивного фильтра - минимизировать ошибку воспроизведения образцового сигнала. С этой целью блок адаптации после обработки каждого отсчета анализирует сигнал ошибки и дополнительные данные, поступающие из фильтра. Используя результаты этого анализа, алгоритм производит подстройку параметров (коэффициентов) фильтра.

На рис. 8. приведена схема использования адаптивного фильтра для подавления шума.

Был разработан адаптивный фильтр (АФ) (Рис. 9) для подавления шума в аддитивной смеси сигнала и белого шума. При использовании в ВТП дополнительного провода в качестве приемника шума предполагаем, что измерению доступны аддитивная смесь сигнала с шумом $S(t) + r(t)$ и шум $n(t)$. Шумы $r(t)$ и $n(t)$ коррелированы.

Сигнал представляет собой периодическую синусоидальную последовательность. Для моделирования шумов $n(t)$ и $r(t)$ и формирования необходимых шумовых последовательностей была использована авторегрессионная модель марковского процесса:

$$n(k+1) = a \cdot n(k) + r(k), \quad (10)$$

где $r(k) = (12)^{1/2} \cdot (\text{rnd}(1) - 0.5)$ - случайный процесс белого шума с равномерным законом распределения и единичной дисперсией, $a = 0.5$.

На рис.10. Представлен результат работы разработанного цифрового адаптивного фильтра. Видно, что существующие шумы входного синуса ослаблены более чем в 10 раз без искажения формы самого сигнала.

На рис.11-14 представлены результаты, полученные при фильтрации случайного шума с использованием различных методов цифровой фильтрации, что позволяет оценить их эффективность и провести сравнительный анализ. Сигнал получен на образце, изготовленном из стали 10 с искусственными дефектами 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 мм - испытания проводились в цеховых условиях. Шумы обусловлены работой цехового оборудования. Некоторое несовпадение сигналов по временной развертке связано с тем, что

на рисунках представлены выходные данные дефектоскопа, полученные независимо для каждого метода фильтрации на одном и том же образце.

Анализируя данные рис. 12-14 можно сделать следующие выводы:

Метод скользящего среднего улучшает соотношение сигнал/шум, но искажает форму дефекта, использование оконной функции дает меньшее искажение, что позволяет видеть более мелкие дефекты. Адаптивная фильтрация дает минимальные искажения формы сигнала при наилучшем соотношении сигнал/шум, что позволяет выявить все дефекты образца.

Еще одним фактором, повышающим погрешность измерений, является нелинейность характеристики показаний дефектоскопа от глубины дефекта. Существуют различные методы аппроксимации данной нелинейности с целью снижения погрешности измерений. Был проведен их сравнительный анализ. На рис. 15 представлены кривые, полученные для: **1** - аппроксимации по двум точкам (начало и конец диапазона); **2** - аппроксимации по 4-ем точкам (начало и конец диапазона с зазором и без зазора на частоте возбуждения, для которой линейность измеренной характеристики глубины дефекта максимальна); **3** - для идеального случая, **4** - расчет с помощью уравнения окружности (на основании 3-х измеренных значений рассчитывается уравнение сектора окружности, наиболее совпадающего с характеристикой дефектов, разница между уравнением окружности и идеальной кривой принимается в качестве поправки к измеренному значению). Как видно из полученных результатов наилучшие результаты получены при использовании уравнения окружности.

Результатом описанных выше теоретических и экспериментальных исследований стала разработка многоцелевого вихретокового дефектоскопа ВД-90НП (Рис. 16), предназначенного для работы в лабораторных и цеховых условиях депо, ремонтных заводов ОАО «РЖД» и других отраслях промышленности [5,6,7].

Для решения поставленной задачи в дефектоскопе был использован метод адаптивной фильтрации, а также оригинальный алгоритм математической обработки результатов контроля с использованием уравнения окружности, что позволило повысить точность оценки и снизить количество стандартных образцов, необходимых для настройки дефектоскопа, а также значительно снизить влияние непроводящего зазора [8,9,10].

Схемотехнические решения, защищенные патентами РФ, позволили решить задачу дефектометрии изделий с различными электромагнитными свойствами [11,12,13]. Вихретоковый дефектоскоп ВД-90НП зарегистрирован в Реестре Системы добровольной сертификации средств измерений - сертификат под № 08.000.0305).

ЛИТЕРАТУРА

1. Glentis G.O. Efficient Least Squares Adaptive Algorithms for FIR Transversal Filtering /G.O. Glentis, K. Berberidis, S. Theodoridis // IEEE Signal Processing Magazine. – 1999. – V.16; N4. – P. 13-41.
2. Найкин С. Adaptive Filter Theory, 4th edition. – Prentice Hall, 2002.
3. Коуэн К. Ф. Н. Адаптивные фильтры: пер. с англ. / Под ред. К. Ф. Н. Коуэна и П.М. Гранта. – М.: Мир, 1988.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов. – 2-е изд. – СПб.:Питер, 2006.
- 5.Ефимов А.Г. Экспериментальное исследование преимуществ применения мультимодального контроля с использованием вихретокового дефектоскопа ВД-90НП - XVIII всероссийская научно-техническая конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике, Нижний Новгород, 2008, с.16.
- 6.Vladimir F. Muzhitskiy, Alexey G. Efimov, Andrey E. Shubochkin «COMPUTERIZED PORTABLE EDDY-CURRENT FLAW DETECTORS» - 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008, Shanghai, China, p.541.
- 7.Alexander S. Bakounov, Aleksey G. Efimov, Andrey E. Shubochkin «NEW POSSIBILITIES OF EDDY-CURRENT FLAW DETECTORS» - ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS (ULTRASOUND), Kaunas, 2009, Vol.64, No.2, p.32-34.
- 8.Бакунов А.С., Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е. Адаптивное вихретоковое устройство для обнаружения и измерения поверхностных и подповерхностных трещин в деталях из токопроводящих материалов - Патент на полезную модель, заявка рег. № 2009118371 от 18.05.2009, положительное решение от 05.07.09.
- 9.Ефимов А.Г. Сравнительный анализ методов цифровой фильтрации – Контроль. Диагностика, Москва, 2009, №10, с.67-68
10. Шкатов П.Н, Ефимов А.Г. Накладной дифференциальный ВТП с резонансным контуром, использование математического аппарата для моделирования процессов и повышения точности оценки дефектов. Международная научно-техническая конференция "Информационные технологии в науке, технике и образовании", Египет, Хургада, 2009.
11. Мужичкий В.Ф., Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е. Вихретоковое устройство для обнаружения поверхностных и подповерхностных трещин в деталях из

токопроводящих материалов - Патент на полезную модель №63068 от 13.05.2007, опубл. 10.05.2007.

12. Мужичкий В.Ф., Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е., Вихретоковое устройство для обнаружения поверхностных и подповерхностных трещин в деталях из токопроводящих материалов - Патент на изобретение №2312333, опубл. 10.12.2007.
13. Бакунов А.С., Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е Вихретоковый дефектоскоп ВД-90НП - 3-я международная научно-техническая конференция и выставка «Современные методы и приборы контроля качества и диагностика состояния объектов», Могилев 2009, с.15

АВТОРЕФЕРАТ

к статье

«Разработка адаптивных вихретоковых средств дефектометрии»

автора А.Г. Ефимова

Представлены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований взаимодействия с объектом контроля (ОК) первичного преобразователя дефектометрической информации, выполненного в виде трехобмоточного трансформаторного накладного ВТП со стержневым ферромагнитным сердечником (СВТП). Было проведено моделирование указанного взаимодействия с использованием метода конечных элементов. Было исследовано влияние корректирующей емкости, включенной в колебательный контур сигнальных обмоток ВТП, на взаимодействие ВТП с ОК. Сравнительный анализ результатов численного моделирования и полученных экспериментальных результатов показал корректность построенной модели.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан, изготовлен и внесен в Государственный реестр средств измерений под №40696-09 комплект образцов искусственных дефектов и зазоров для вихретоковой дефектоскопии КОИДЗ-ВД.

С целью повышения соотношения сигнал/шум были рассмотрены различные методы цифровой фильтрации, такие как: адаптивная фильтрация, метод скользящего среднего, оконная функция. Наилучшие результаты были получены с помощью метода адаптивной фильтрации.

Для снижения погрешности измерения глубины дефекта был проведен сравнительный анализ различных методов аппроксимации нелинейности результатов измерений. Был предложен оригинальный метод аппроксимации с помощью уравнения окружности, для которого были получены наилучшие результаты.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования были использованы при разработке средств вихретоковой дефектоскопии. В частности был разработан многоцелевой портативный вихретоковый дефектоскоп ВД-90НП.

Подписи к рисункам

статьи «Разработка адаптивных вихретоковых средств дефектометрии»

автора А.Г. Ефимова

Рис. 1. СВТП с корректирующей емкостью, где 1 – ферритовый стержень, 2 – обмотка возбуждения, 3- сигнальные обмотки, 4 – корректирующая емкость.

Рис. 2. Модель для МКЭ с наложенными сетками, где 1 – СВТП, 2 – воздушный зазор, 3 – объект контроля, 4 – дефект.

Рис. 3. Графическое отображение плотности тока при моделировании МКЭ.

Рис. 4. Результаты, полученные при моделировании МКЭ.

Рис. 5. Комплект образцов искусственных дефектов и зазоров КОИДЗ-ВД.

Рис 6. Результаты экспериментальных исследований.

Рис. 7. Общая структура адаптивного фильтра.

Рис. 8. Подавление шума с помощью адаптивного фильтра.

Рис. 9. Адаптивный фильтр.

Рис. 10. Результат работы адаптивного фильтра.

Рис. 11. Исходный сигнал от дефектов без обработки.

Рис. 12. Сигнал от дефектов после фильтрации методом скользящего среднего.

Рис. 13. Сигнал от дефектов после фильтрации с использованием оконной функции.

Рис. 14. Сигнал от дефектов после адаптивной фильтрации.

Рис. 15. Сравнение точности измерения глубины дефектов для различных методов математической обработки, где $H_{г*}$ и $H_{м*}$ - обобщенные действительная и измеренная глубины дефектов.

Рис. 16. Внешний вид и структурная схема вихретокового дефектоскопа ВД-90НП.

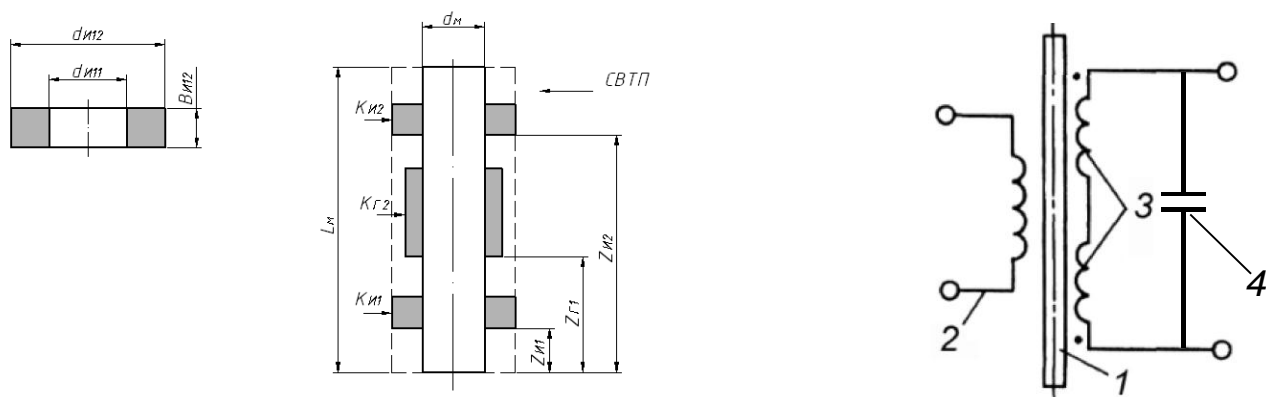


Рис. 1.

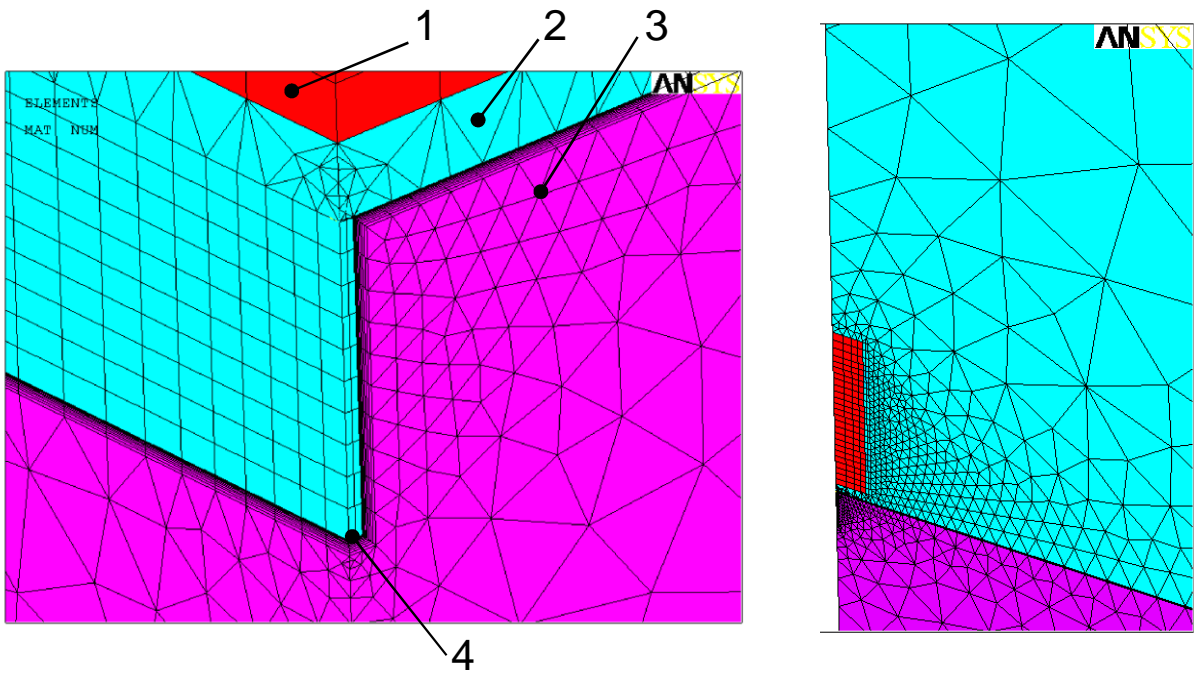
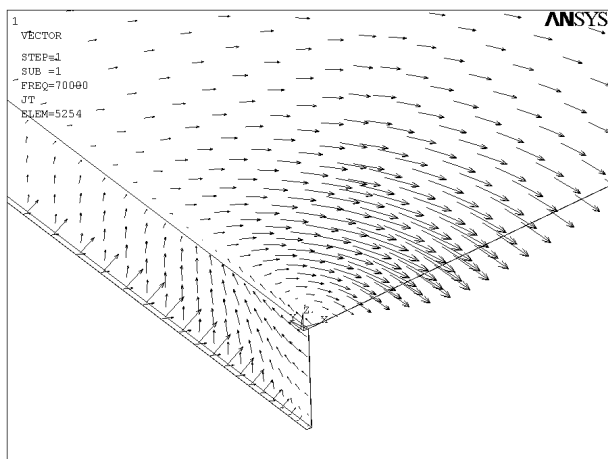
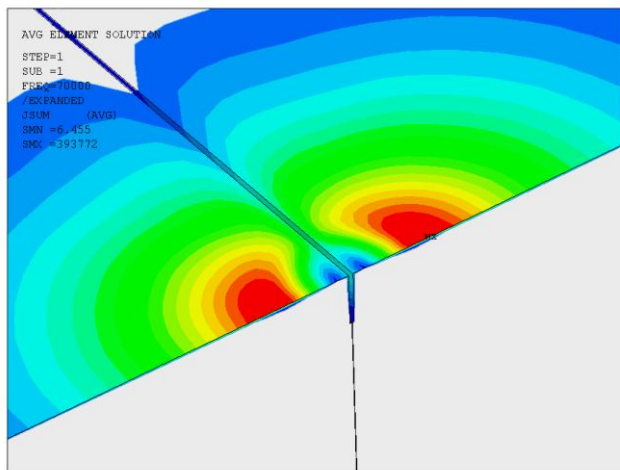


Рис. 2.



а)



б)

Рис. 3.

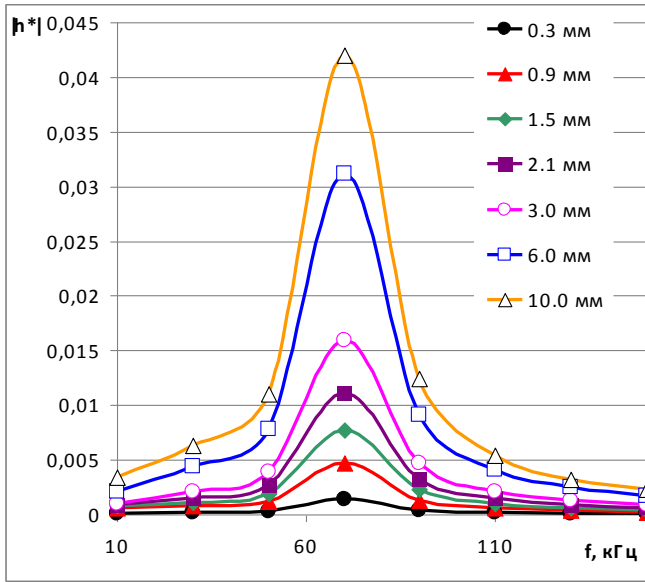
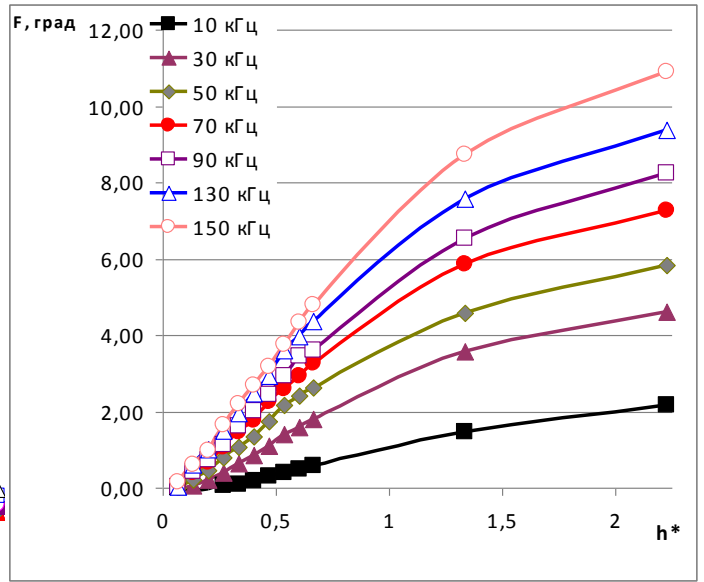


Рис. 4 а)



б)



Рис. 5.

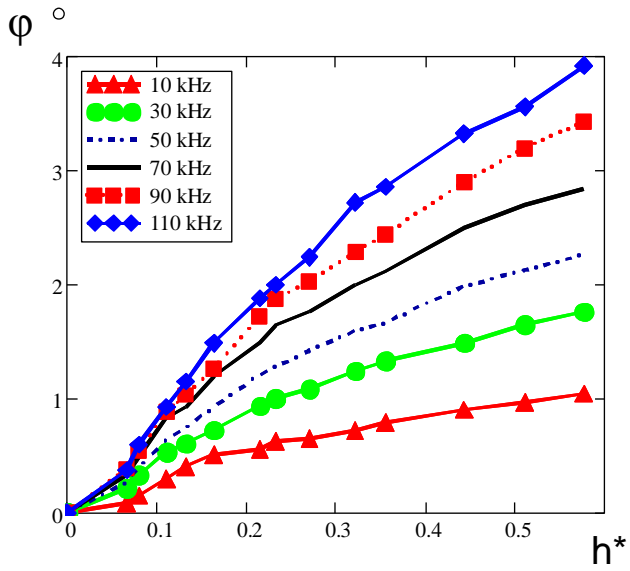
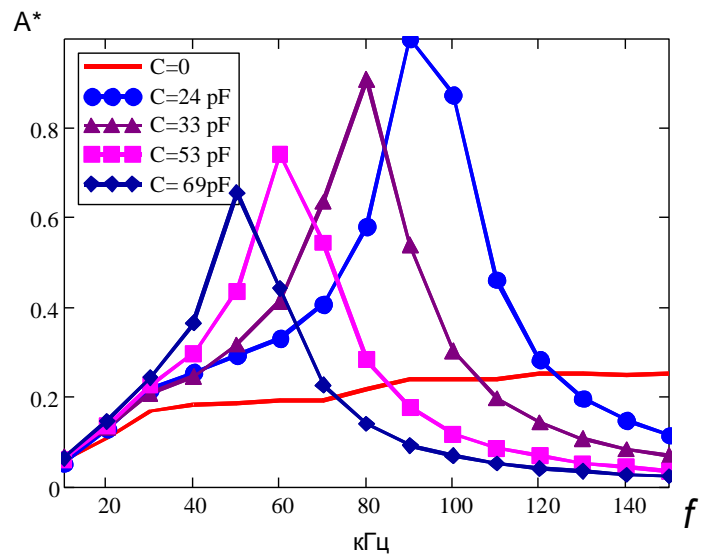


Рис 6.

а)



б)

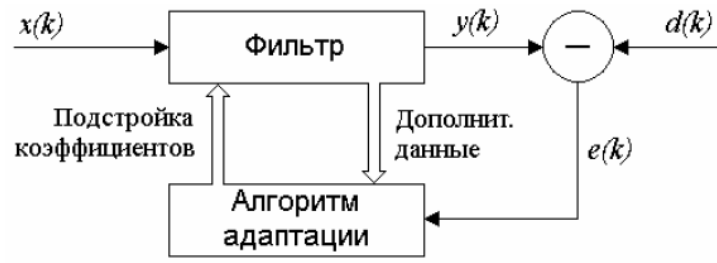


Рис. 7.

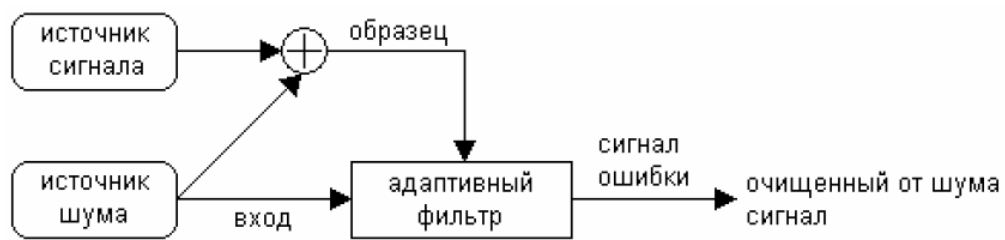


Рис. 8.

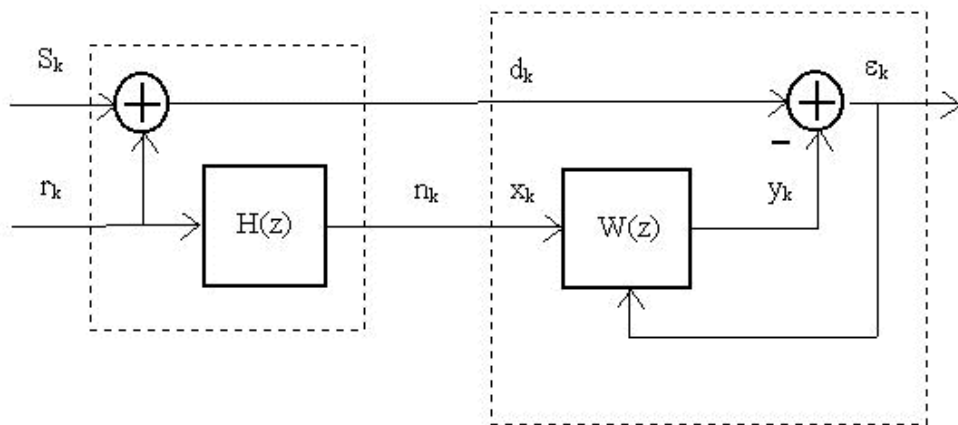


Рис. 9.

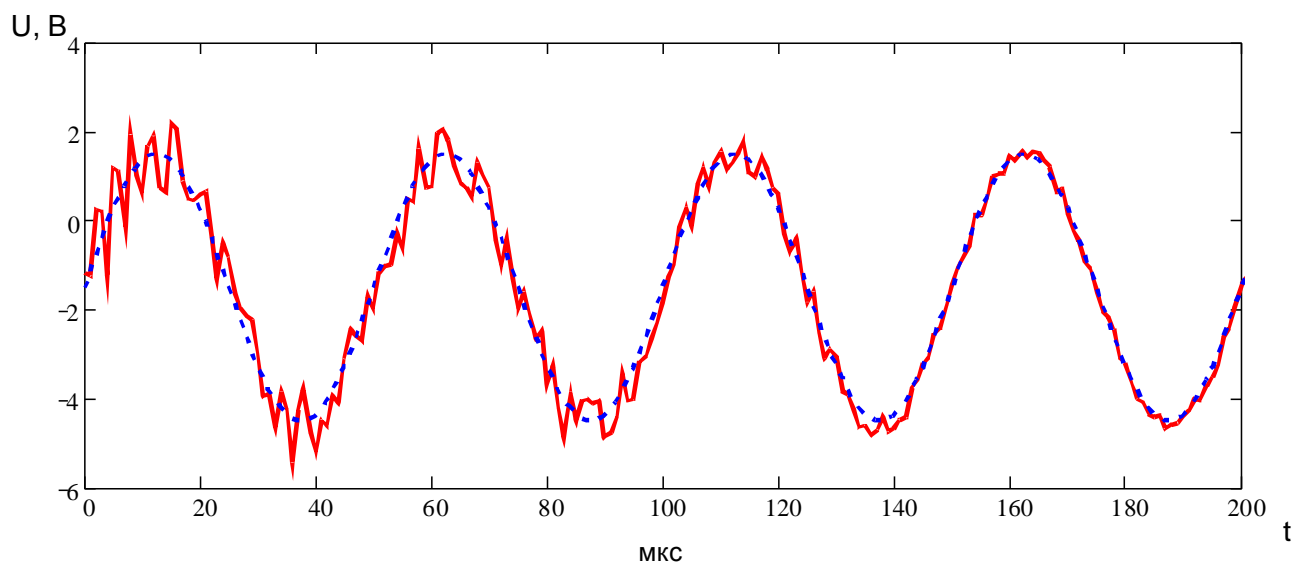


Рис. 10.

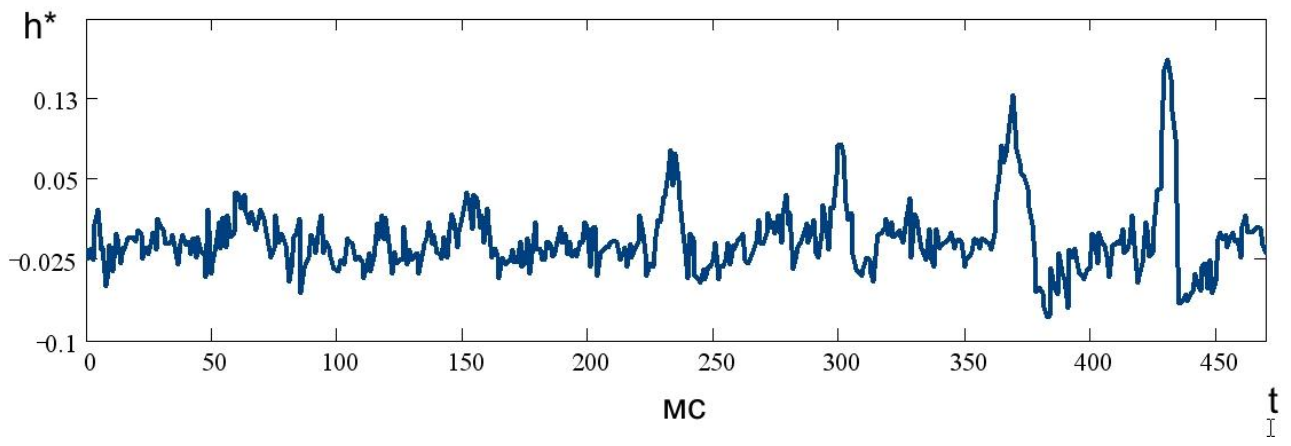


Рис. 11.

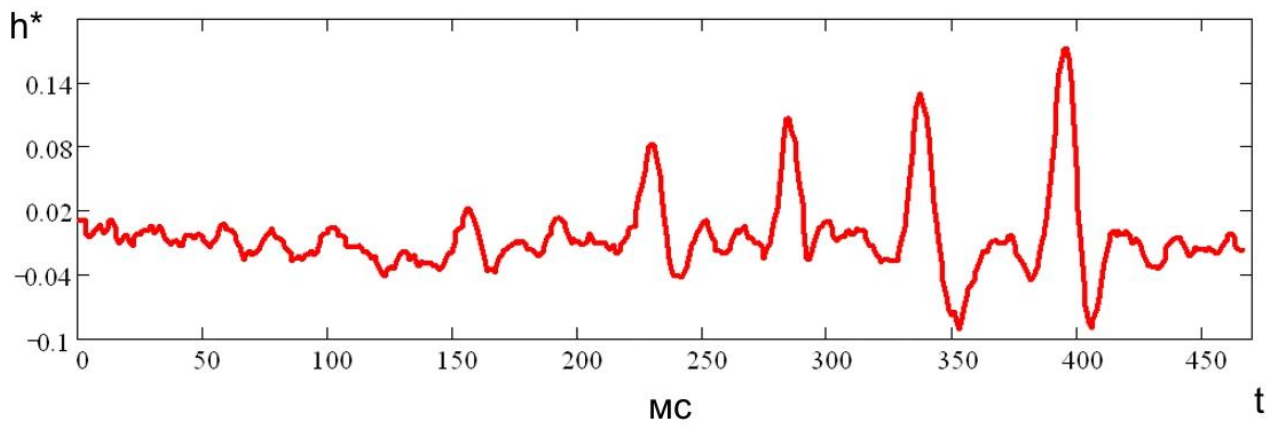


Рис. 12.

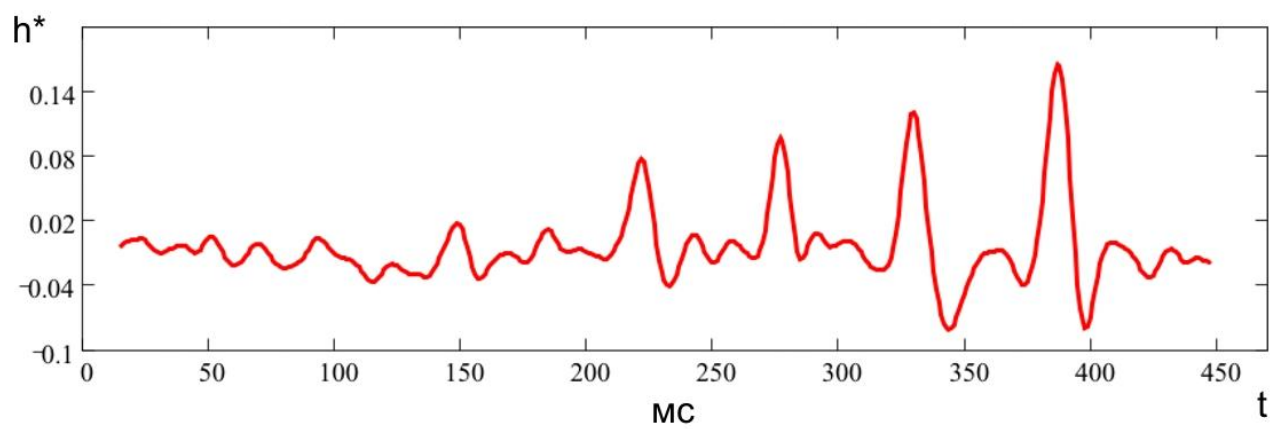


Рис. 13.

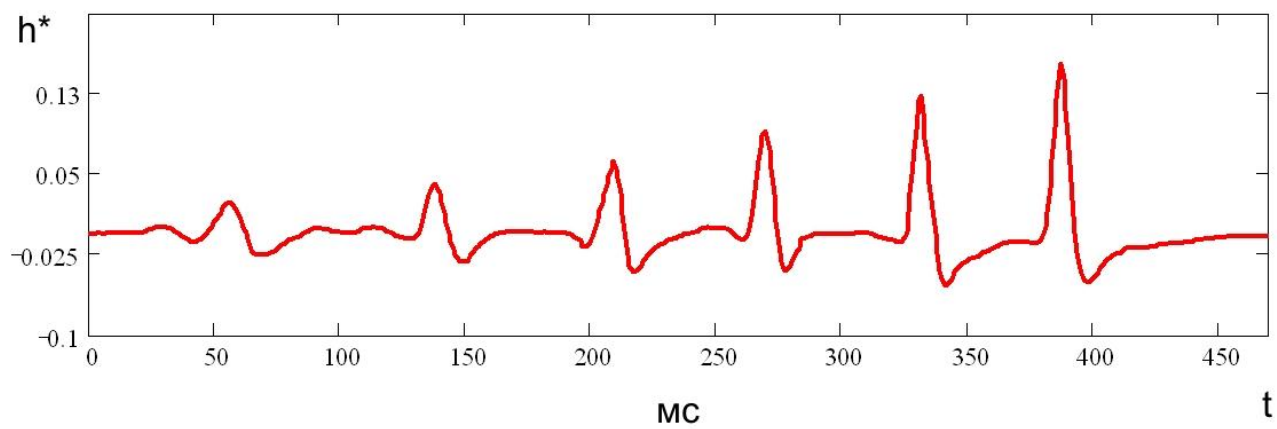


Рис. 14.

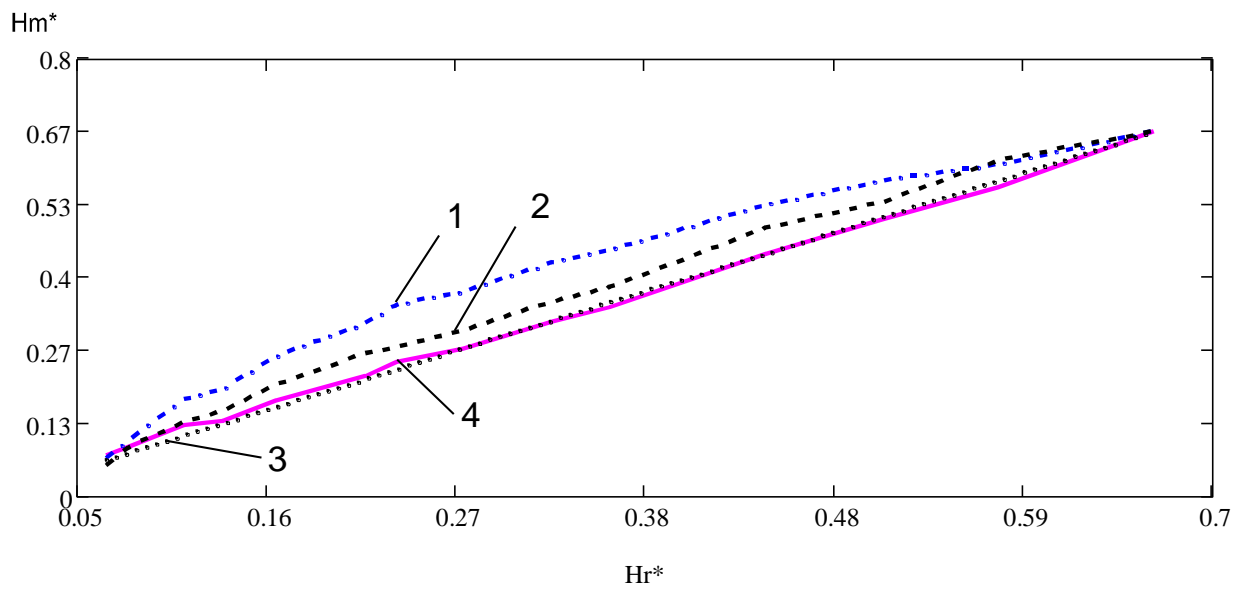


Рис. 15.



Рис. 16.