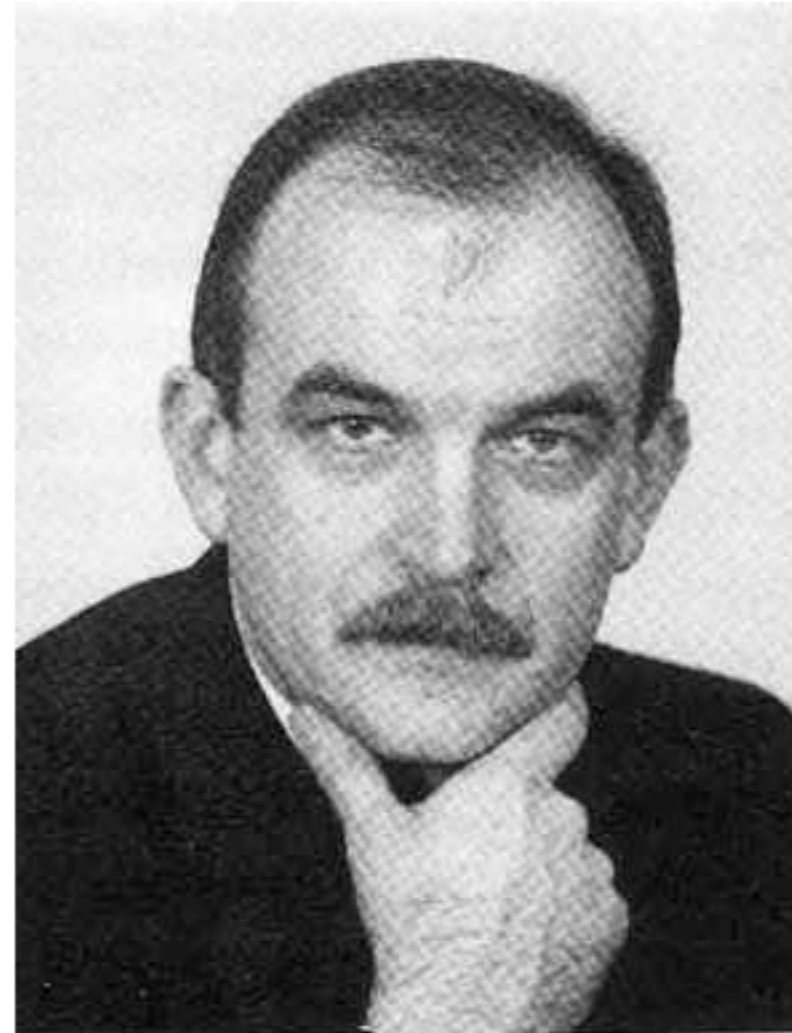




ЧАПЛЫГИН ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ

Кандидат технических наук,
Основные направления научной деятельности: разработка геотехнологий и автоматизированных систем мониторинга строительных объектов.
Автор более 70 научных работ.



ШОКАРЕВ ВИКТОР СЕМЕНОВИЧ

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, директор Запорожского отделения ГП НИИСК, член Международного общества по механике грунтов и геотехническому строительству.

Основные направления научной деятельности: строительство, реконструкция и эксплуатация зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, техническое диагностирование строительных конструкций, разработка геотехнологий и автоматизированных систем мониторинга строительных объектов.

Автор более 150 научных работ.
E-mail: zoniisk@mail.ru

УДК 681.3(083)

СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ФИЗИКО – МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАТЕРИАЛА СТЕРЖНЕВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ (ИНДУКТИВНЫХ) ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Ключовые слова: розрахункова модель, напружено-деформований стан, просадка, деформації ґрунту, реконструкція, основа.

Приводиться спосіб зменшення впливу зовнішніх заважаючих факторів на фізико – механічні і електромагнітні параметри матеріалу стержневого магнітопроводу вимірювальних перетворювачів електромагнітних датчиків: магнітної проникності, магнітострикції, температури, напруженості електромагнітних полів.

Приводится способ уменьшения влияния внешних мешающих факторов на физико – механические и электромагнитные параметры материала стержневого магнитопровода измерительных преобразователей электромагнитных датчиков: магнитной проницаемости, магнитострикции, температуры, напряженности электромагнитных полей.

The way of reduction of influence of external preventing factors on physico – mechanical and electromagnetic parameters of a material rod magnetoprovod measuring converters of electromagnetic detecting devices is resulted: magnetic permeability, magnetostriktion, temperatures, intensity of electromagnetic fields.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ.

Для обеспечения безопасной эксплуатации зданий и сооружений, например, в процессе восстановления их планово – высотного положения необходимо непрерывное получение достоверной информации о параметрах напружено - деформированного состояния их конструктивных элементов, из которых можно выделить основные: угол наклона зданий; механические напряжения и деформации, действующие в конструктивных элементах строительных объектов, а также величину и характер распределения осадок и напряжений, действующих в ленточном фундаменте и грунтовом основании под его подошвой.

Контроль вышеуказанных параметров требует оснащения зданий и сооружений автономными и дистанционными автоматизированными информационно – измерительными системами (ДИИС) с большим количеством электромагнитных датчиков (ЭД), содержащих измерительные преобразователи (ИП) с различным принципом работы для получения первичной информации о кон-

тролируемых параметров.

В статье рассматривается способ повышения метрологических характеристик ДИИС с индуктивными ИП, разработанных на основе базовой структурной схемы ее построения, приведенной в [1] с использованием комплекта нормативных документов на информационно – измерительные системы и датчики с учетом постановления Кабинета Министров Украины от 30.03.1996 г. №391. «Об утверждении Положения о государственной системе мониторинга окружающей среды».

В разработанной ДИИС впервые частично решена проблема уменьшения влияния основных параметров внешней среды на выходные сигналы измерительных преобразователей, что позволило увеличить точность контроля электромагнитными датчиками.

Однако дальнейшее повышение метрологических характеристик разработанной ДИИС с электромагнитными датчиками контроля крена, осадок, механических напряжений и др. [2] также требует решения основной проблемы уменьшения влияния основных внешних факторов на физико – механические и электромагнитные параметры ферромагнитных материалов стержневых магнитопроводов ИП.

В статье рассматривается способ отстройки от влияния основных внешних факторов: температуры окружающей среды и изменений напряженности электромагнитных полей на материал стержневых магнитопроводов измерительных преобразователей.

Анализ публикаций. В настоящее время большая часть известных публикаций, посвященных решению данной проблемы, касается в основном разработки способов и принципов построения ИП для автономных и дистанционных измерительно – информационных систем [1 - 6] с частичной отстройкой от влияния температуры окружающей среды на электрическое сопротивление индуктивных обмоток преобразователей и не известны работы, в которых рассматриваются способы уменьшения или устранения влияния и изменений напряженности магнитного поля на физико – механические и электромагнитные параметры материала стержневых магнитопроводов ИП. Следовательно изменения этих параметров будут уменьшать точность контроля ДИИС параметров напряженно – деформированного состояния (НДС) зданий и сооружений и их конструктивных элементов.

Нерешенные части общей проблемы. С учетом анализа известных опубликованных работ в области рассматриваемой проблемы [1 - 6] следует выделить нерешенную часть общей проблемы, связанную с разработкой способов уменьшения влияния внешних мешающих факторов на физико – механические и электромагнитные параметры материала магнитопроводов преобразователей.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

Целью статьи является разработка способа уменьшения влияния температуры окружающей среды и напряженности электромагнитного поля на физико – механические и электромагнитные параметры материала магнитопровода преобразователей.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА.

Известные способы отстройки от влияния изменения основных внешних факторов на физико – механические

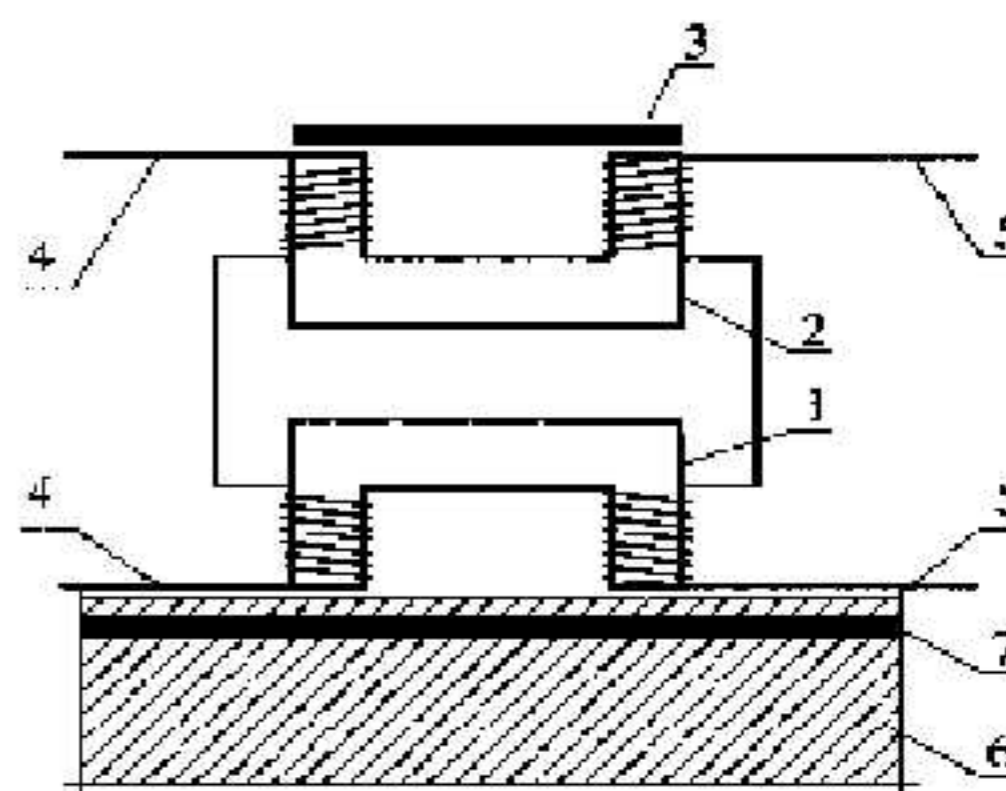


Рис. 1. Схема реализации дифференциального соединения рабочего и эталонного электромагнитных измерительных преобразователей для контроля напряженного состояния арматурных ферромагнитных элементов.

1 – рабочий индуктивный преобразователь; 2 – эталонный преобразователь; 3 – ферромагнитный стержень для изменения индуктивного сопротивления преобразователя 2; 4 – проводка к источнику переменного тока; 5 – проводка к отсчетному устройству; 6 – железобетонный элемент; 7 – арматурный стержень.

ские и электромагнитные параметры материала магнитопровода измерительных преобразователей, а также на электрическое сопротивление индуктивных обмоток, расположенных на магнитопроводе позволяют частично отстроиться только от влияния температуры окружающей среды на сопротивление обмоток индуктивности. Это достигается на основе использования дифференциальной схемы включения обмоток рабочего индуктивного измерительного преобразователя, взаимодействующего с участком контролируемого материала объекта, и эталонного преобразователя, не установленного на объекте. Наиболее характерная дифференциальная схема соединения, приведена на рис. 1 [1].

Использованная дифференциальная схема включения обмоток индуктивностей рабочего и эталонного ИП, приведенная на рис.1, позволяет в определенных пределах уменьшить влияние изменений температуры окружающей среды только на электрическое сопротивление обмотки рабочего измерительного преобразователя. Поэтому проблема отстройки от влияния изменений температуры и напряженности поля внешней среды на параметры материала магнитопроводов ИП остается до конца нерешенной. Для решения этой проблемы рассматриваются физические закономерности, возникающие при взаимодействии электромагнитного потока, формируемого обмотками индуктивности преобразователей с ферромагнитным материалом их магнитопроводов, например, для контрол наклона ленточного фундамента и механических напряжений в нем [3], использованных в ДИИС [2], магнитопроводы которых изготовлены из одного ферромагнитного материала. Поэтому схема взаимодействия для материала ИП будет общей.

В качестве примера рассмотрена схема взаимодействия электромагнитного потока Φ , формируемого катушкой индуктивности L , размещенной на П – образном ИП с магнитопроводом из ферромагнитного материала с электропроводностью γ и магнитной проницаемостью μ (рис. 1).

При изменении температуры окружающей среды

изменяется электрическое сопротивление R_t обмотки индуктивности, которое определяется формулой

$$R_t = R_0 [1 + \alpha_0 (t - t_0)], \quad (1)$$

где R_0 – сопротивление при температуре; t^0 – температурный коэффициент сопротивления для меди; ($\alpha = 0,0043$), из которой изготовлена обмотка индуктивности ИП. При изменении температуры окружающей среды t^0 одновременно изменяется и магнитное сопротивление магнитопровода Z_M , материал которого характеризуется температурным коэффициентом β магнитной проницаемости μ , которая влияет на величину магнитного потока Φ . Так как переменный ток возбуждения, проходящий по обмотке индуктивности, имеет значительную частоту, то в материале магнитопровода возникают потери от вихревых токов, что приводит к абсолютному и относительному изменению потока Φ , определяемого аналитическим уравнением [7]

$$\left(\frac{d\Phi}{\Phi}\right)_t = \left(\frac{d\mu}{2\mu}\right)_t - \left(\frac{d\gamma}{2\gamma}\right)_t + \left(\frac{dP}{P}\right)_t - \left(\frac{dl}{l}\right)_t \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость; γ – удельная проводимость материала магнитной цепи; P – периметр поперечного сечения стержневого магнитопровода ИП; l – длина магнитопровода в направлении магнитных силовых линий.

Из уравнения (2) следует, что влияние изменений температуры внешней среды на электромагнитные свойства материала магнитопровода преобразователя и его геометрические размеры частично компенсируются. Можно подобрать соответствующие температурные коэффициенты β магнитной проницаемости μ и коэффициент электрического сопротивления α для ферромагнитного материала с электропроводностью γ , чтобы выполнялось условие

$$\left(\frac{d\Phi}{\Phi}\right)_t = \left(\frac{d\mu}{2\mu}\right)_t - \left(\frac{d\gamma}{2\gamma}\right)_t \quad (3)$$

которое соответствует полной отстройке от влияния температуры на материал магнитопровода.

В качестве такого материала согласно [7] для магнитопроводов преобразователей, например, для ИП контроля наклонов ленточного фундамента может быть использована электротехническая сталь, содержащая 4,5% кремния, температурный коэффициент β магнитной проницаемости которой составляет величину $\beta = -8,8 \cdot 10^{-4}$, а температурный коэффициент электрического сопротивления $\alpha = 9 \cdot 10^{-4}$, обратные по знаку и практически равные по величине. Поэтому относительные изменения магнитного потока $(d\Phi/\Phi)_t$ от температуры будут незначительны и, следовательно, такой магнитопровод может быть использован и при более значительных изменениях температуры. Так как действие температуры не ограничивается влиянием только на магнитную проницаемость μ и электропроводность γ ферромагнитного материала, то рассмотрим возможности отстройки от влияния температуры окружающей среды на физические параметры структуры строения ферромагнитного материала

на атомном уровне [8]. Это актуально для работы ИП в составе электромагнитных датчиков, устанавливаемых на конструктивных элементах атомных станций, когда при их аварийном состоянии происходит резкое увеличение температуры окружающей среды и напряженности электромагнитного излучения. Поэтому рассмотрим физику влияния температуры и напряженности поля на обобщенный параметр структурного состояния ферромагнитного материала магнитопровода ИП.

В работе [8] теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что в ферромагнитных материалах при действии на них напряженности электромагнитного поля H возникает относительное изменение геометрических размеров намагниченного участка материала, например, стержневого, которое характеризуется линейным коэффициентом линейной магнитострикции λ , определяемым соотношением:

$$\lambda = \Delta l / l, \quad (4)$$

где Δl – величина изменения начального геометрического размера l .

В работе [9] теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что для ферромагнитных материалов магнитопроводов ИП, на которые действует направленный электромагнитный поток Φ с напряженностью электромагнитного поля H , величина возникающей магнитной проницаемости μ определяется соотношением

$$\mu \approx \chi_\alpha \approx \frac{2 I_s^2}{\pi^2 \lambda \sigma_0} \frac{l}{\delta} \quad (5)$$

где χ_α – магнитная восприимчивость; l – длина волны, на которой меняется механическое напряжение; I_s – намагниченность насыщения; δ – толщина доменных стенок, разделяющих области в ферромагнитном материале с намагниченностью насыщения; λ – магнитострикция ферромагнитного материала в направлении магнитного потока с напряженностью электромагнитного поля H ; σ – результирующие механические напряжения, действующие в ферромагнитном материале.

В ферромагнитных материалах магнитопроводов ИП после технологического процесса их изготовления неизбежно возникают остаточные напряжения σ , поэтому в формуле (5) при расчете их магнитной проницаемости μ необходимо учитывать σ [9].

Если длина волны l , на которой меняется σ , достаточно большая, то μ , а следовательно и χ_α , принимают высокие значения согласно уравнению (3), что соответствует большой подвижности доменных стенок [9].

При $l < \delta$ согласно внутри доменных стенок происходят осциллирующие изменения напряжения σ , в результате магнитная восприимчивость χ_α принимает высокое значение. Поэтому χ_α (примерно равная магнитной проницаемости) принимает минимальное значение при $l \approx \delta$, тогда магнитная проницаемость μ_α может быть рассчитана из уравнения, приведенного в [9]

$$\mu_\alpha \approx \chi_{\alpha, \min} = \frac{2 I_s^2}{\pi^2 \lambda \sigma} \quad (6)$$

Как следует из уравнения (6), если λ была бы постоянной величиной, то с учетом, что намагниченность насыщения I_s для конкретного ферромагнитного материала величина постоянная, можно ввести расчетный коэффициент K_H , определяемый выражением:

$$K_H = \frac{2 I_s^2}{\pi^2 \lambda}, \quad (7)$$

который имеет постоянную величину.

С учетом коэффициента K_H для магнитной проницаемости μ из выражения (4) при фиксированном значении напряжений σ в материале магнитопровода ИП получим

$$\mu = K_H \frac{1}{\sigma}. \quad (8)$$

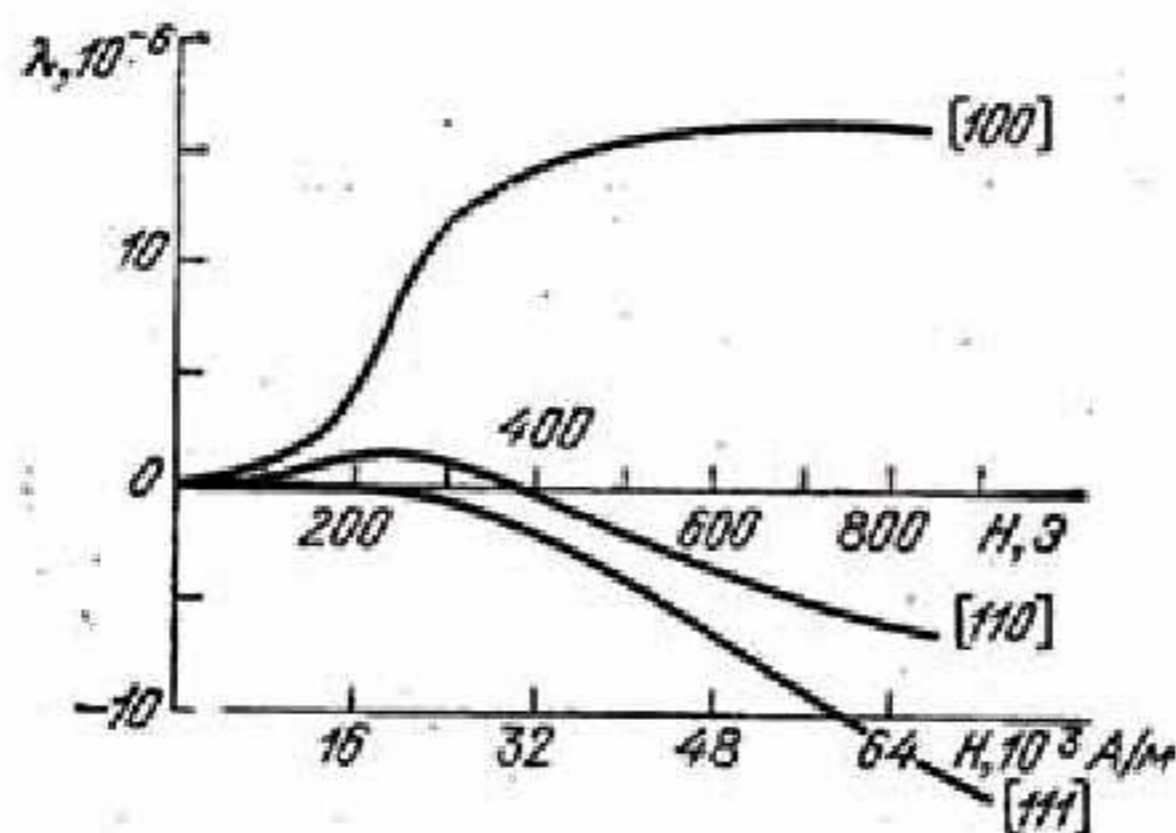


Рис. 2. Зависимость величины магнитострикции λ от напряженности магнитного поля H при намагничивании в направлении различных кристаллографических осей [100], [110], [111].

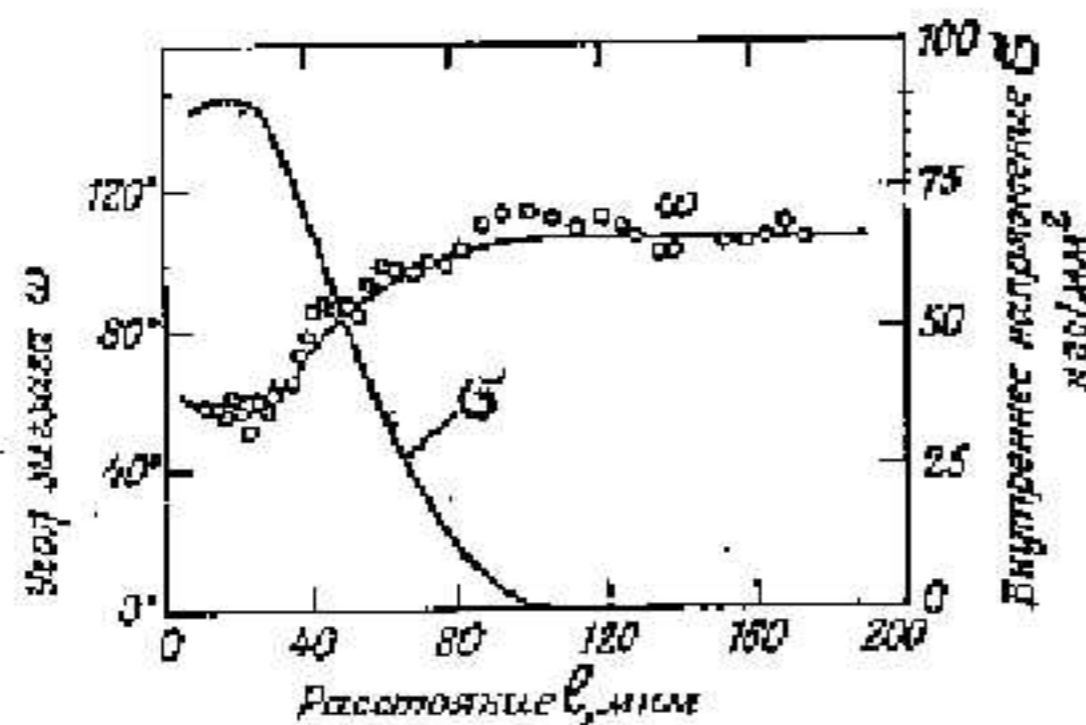


Рис. 3. Зависимость механических напряжений σ от расстояния между царапинами l и угла зигзага ω в доменной структуре.

Так как магнитная проницаемость ферромагнитного материала определяется напряженностью H магнитного поля, то уравнение (8) действует только до определенного значения H_c . Следовательно, если реальное значение магнитной проницаемости μ больше μ_c , то λ изменяется от действия напряженности внешнего электромагнитного поля H .

Ранее проведенными теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что зависимость $\lambda = \varphi(H)$ для ферромагнитного материала определяется характером кривой, приведенной на рис. 2 [8].

Из рис.2 следует, что в области напряженности магнитного поля до величин порядка 100 Э величина λ может быть принята постоянной, то есть на структуру на атомарном уровне ферромагнитного материала стержневого магнитопровода измерительного преобразователя изменения напряженности поля и температуры не влияют.

Для реализации установленной физической закономерности необходимо согласно соотношения (8) и рис. 2, чтобы в магнитопроводе ИП действовало фиксированное напряжение, например, сформированное технологическим способом, и чтобы магнитопровод ИП не воспринимал деформации конструкций объекта.

С целью формирования фиксированной величины механических напряжений σ может быть использован способ, основанный на нанесении царапин на поверхности ферромагнитного материала [9]. На рис. 3 приведены характерные зависимости величины создаваемых напряжений по этому способу от расстояния между царапинами [9].

На рис. 4 показан характер доменной структуры, получаемой после нанесения царапин. Толщина стенок δ доменов в этом случае соответствует длине волны, на которой меняются механические напряжения.

В работе [9] установлено, что вдоль царапины возникают домены зигзагообразной формы. Поэтому в доменных стенках направление спинов устойчиво и смещение атомов не происходит при изменении напряженности электромагнитного поля в диапазоне до 100 Э (рис.2).

Таким образом в качестве комплексного электромагнитного параметра, на который не влияют изменения температуры и напряженности магнитного поля, является магнитная проницаемость μ ферромагнитного материала при условии, что напряженность не превышает величины порядка 100 Э, а механические напряжения в магнитопроводе постоянны.

Если на контролируемый материал будет действовать большая величина напряженности H магнитного поля, выходящая за установленный диапазон, ограниченный начальным участком (рис. 2), то доменная структура изменится. В этом случае необходимо провести коррекцию результатов контроля электромагнитным датчиком, то есть необходим способ оценки влияния H на λ в условиях постоянной величины σ , которая может быть установлена методом нанесения царапин согласно рис. 3, 4.

ВЫВОДЫ:

1. В качестве информационного параметра для оценки влияния изменения температуры окружающей среды и напряженности электромагнитного поля на электромагнитные свойства ферромагнитного

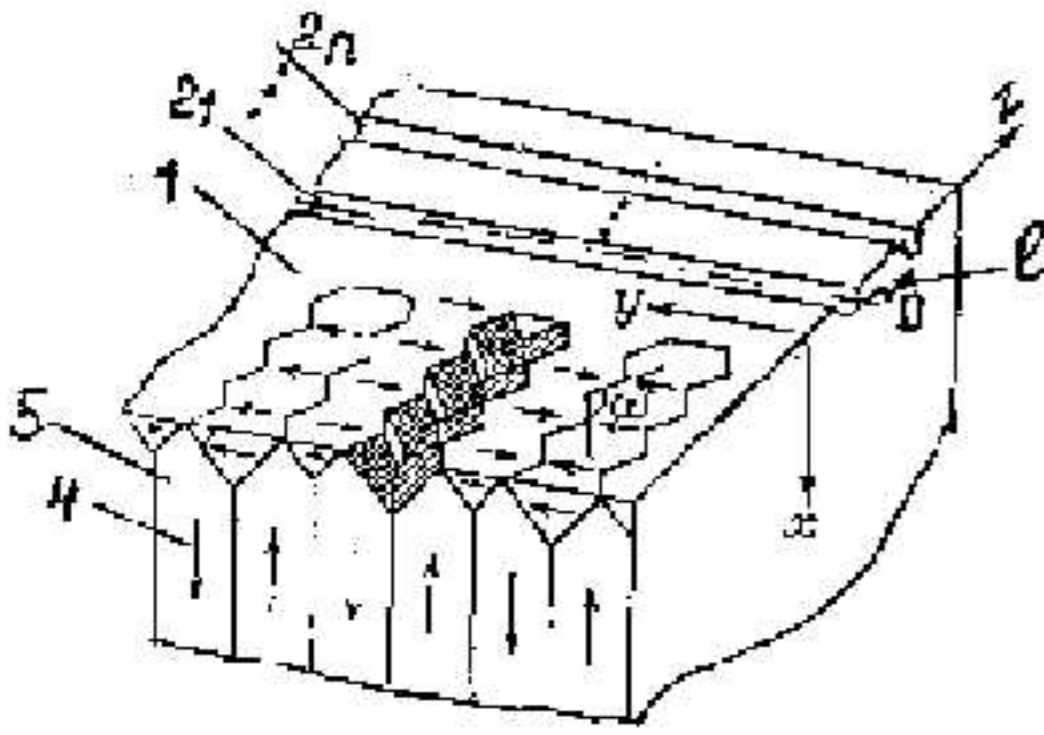


Рис. 4. Характер формирования зигзагообразной доменной структуры в системе координат X, Y, Z при нанесении параллельных царапин $2_1 \dots 2_n$ на поверхности ферромагнетика 1. 3 – зигзагообразные домены 2, с углом зигзага ω ; 4 – вектора доменов 5 в направлении оси X ; l – расстояние между царапинами.

- материала стержневого магнитопровода измерительного преобразователя принята его магнитная проницаемость.
- Для оценки влияния изменений напряженности электромагнитного поля на ферромагнитный материал стержневого магнитопровода эталонного измерительного преобразователя формируют в нем, например, технологическим способом, остаточные механические напряжения фиксированной величины, а катушкой индуктивности создают в магнитопроводе напряженность поля не превышающую величину 100 Э.
 - Если влияние внешней температуры и электромагнитных полей вызывает изменение магнитной проницаемости материала магнитопровода эталонного стержневого измерительного преобразователя до величин, соответствующих значениям напряженности поля в магнитопроводе больших 100 Э, то сравнивают ее с величиной магнитной проницаемости материала магнитопровода, полученной при фиксированной величине механических напряжений и рассчитывают поправку при определении индуктивности рабочего измерительного преобразователя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Землянский А.А. Обследование и испытание зданий и сооружений : Учебное пособие. – М.: Изд – во АСВ, 2001. – 240 с.
- Патент № 75876. Украина. Бюлл. №6, 2006 г. Запорожское отделение научно - исследовательского института строительных конструкций, Частное предприятие «БИЛ» . Шокарев В. С., Чаплыгин В. И., Мальцева Я. В. Электромагнитная измерительно – информационная система неразрушающего контроля параметров напряженно – деформированного состояния инженерных конструкций и сооружений.
- Патент №77761. Украина. Бюлл. №1, 2007 г. Шокарев В. С., Чаплыгин В. И., Хилько С. В. Электромагнитный датчик для контроля величины и направления наклона конструкции.
- Патент № 86305. Украина, Бюлл №7, 2009 г. Шокарев В. С., Чаплыгин В. И., Гречко В. Ф., Волков Д. А., Хилько С. В. Электромагнитный измерительный преобразователь для контроля смещений конструктивных элементов, фундаментов зданий и сооружений и способ его применения.
- Гуманюк М.Н. Магнитоупругие датчики в автоматике. Киев, 1965г. с. 220.
- Шевченко Г.И. Магнитоанизотропные датчики с компенсационной обмоткой . «Измерительная техника», 1964 г. №5, 60с.
- Иванова И.И. О влиянии температуры на магнитный поток измерительных систем и методы уменьшения этого влияния. Труды Ленинградского политехнического института, 1956, №184. с.240.
- Белов К.П. Магнестрикционные явления и их технические приложения. – М.: Наука. Гл. ред. физ - мат. лит. , 1987. 1987. – 160 с.
- Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения: Пер. с японского. – М.: Мир, 1987. – 419 с.