

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Омский государственный технический университет

Методические указания
по выполнению РГР и курсового проектирования
по дисциплине «Электромагнитный контроль»

Омск-2015

Составители: Е. А. Фаина

Рецензент: А. К. Ельцов

Методические указания к РГР и курсовому проектированию по дисциплине «Электромагнитный контроль» предназначены для студентов направлений 200100.62 и 12.03.01 «Приборостроение». Содержат основные теоретические сведения необходимые для расчетов параметров вихретокового контроля изделий. Приведены необходимые для проектирования графики, пример выполнения расчетов в программе Mathcad.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Омского государственного технического университета.

Оглавление

Требования к содержанию разделов и оформлению пояснительной записки к курсовому проекту (работе)	4
Требования к РГР	6
Выбор датчика ВТК и его конструкции.....	7
Мешающие и контролируемые параметры. Тип отстройки мешающего параметра. Выбор структурной схемы прибора	9
Определение геометрических параметров преобразователя и рабочей частоты контроля	11
Проходные датчики	11
Накладные датчики	13
Измерение толщины покрытий, изоляции	14
Контроль электропроводности при мешающем зазоре	15
Контроль толщины листа	16
Расчет электрических параметров ВТП.....	19
Расчет напряжения холостого хода и вносимого напряжения.....	20
Выбор точки компенсации	22
Расчет погрешностей и чувствительности	24
Варианты заданий	25
Пример программы по расчету ВТП в Mathcad.....	28

Требования к содержанию разделов и оформлению пояснительной записки к курсовому проекту (работе)

Курсовой проект должен состоять из пояснительной записки и графической части. Объем курсового проекта (работы) должен иметь:

- а) пояснительную записку объемом в 25-40 страниц машинописного текста без учета приложений;
- б) не менее 2 листов формата А1 графических разработок, в зависимости от сложности, масштаба, а также с учетом затрат времени на макетирование и др. работы, связанные с выполнением работы (проекта).

Рекомендуется следующая последовательность текстовых материалов:

- титульный лист;
- задание;
- аннотация;
- содержание;
- введение
- основная часть;
- заключение;
- библиографический список;
- приложения (при необходимости).

Примерное содержание и объем пояснительной записки курсового проекта:

1. Введение.....	5-10%
2. Основная часть.....	40-60 %
3. Заключение.....	5-10 %
4. Библиографический список.....	5-10%
5. Приложение (при необходимости).....	5-10 %

Состав пояснительной записки

Правила оформления текстовых документов должны соответствовать требованиям ГОСТ 2.105 или ГОСТ 7.32, а графический материал по ЕСКД. Аннотация содержит краткий обзор содержания работы и имеет объем, как правило, 1000-1700 знаков, включая пробелы. В аннотацию включается:

- тема работы;
- какие вопросы рассмотрены;
- практическая часть (что сделано);
- структура работы (данные об объеме работы, количестве разделов, приложений, использованных источников);
- сколько графических объектов и/или приложений содержит работа (графики, схемы, рисунки, таблицы и другой иллюстративный и информативный материал);

- данные о использованных источниках.

Во введении определяется отрасль науки и техники, к которой относится объект проектирования, аргументированно обосновывается актуальность и необходимость разработки; в последней части введения в явном виде формулируется цель проекта (работы).

В основной части необходимо:

1.1. Проанализировать различные структурные (функциональные) схемы построения приборов контроля, которыми решается поставленная задача. По окончании анализа схем, необходимо обоснованно выбрать одну из них, доказав ее преимущества в решении данной задачи перед остальными схемами.

1.2. Рассмотреть различные варианты датчиков, применяемых в качестве первичного преобразователя контролируемого параметра (границы применения, параметры и характеристики, погрешности, варианты исполнения корпуса) и обоснованно выбрать из них оптимальный.

1.3. Провести анализ различных вариантов электрических принципиальных схем предварительного усиления и обработки сигнала с преобразователя (привести их параметры и характеристики, преимущества и недостатки). Сравнивая их между собой, обоснованно выбрать оптимальный для данной задачи вариант. В случае применения преобразователя в составе автогенератора, вместо схемы предварительного усиления и обработки сигнала следует аргументированно выбрать схему автогенератора.

В результате должна быть выбрана структурная (функциональная) схема прибора контроля, выбраны тип и конструкция преобразователя (датчика), электрическая схема устройства предварительного усиления и обработки сигнала или автогенератора.

2. Рассчитать параметры основных элементов конструкции преобразователя и схемы усилителя или автогенератора, исходя из предъявляемых к ним требований, проанализировать функцию преобразования информативного параметра (в аналитическом или численно-аналитическом виде) и принцип действия преобразователя совместно со схемой устройства предварительного усиления и обработки сигнала или автогенератора.

3. Выделить факторы, оказывающие наибольшее влияние на результат контроля с помощью разработанного прибора и обусловленные как неидеальностью характеристик прибора, так и изменяющимися внешними условиями. Рассчитать погрешность, которая возникает при проведении контроля разработанным прибором, учитывая перечисленные факторы.

4. Обоснованно предложить и изобразить на рисунке возможную реализацию оформления корпуса прибора. Изложить инструкцию по эксплуатации (технология контроля) разработанного прибора применительно к контролю данного в задании объекта.

В заключении перечисляются основные результаты, полученные в ходе выполнения проекта (работы), сравниваются требования задания и реальные параметры объекта проектирования. Особенно подчеркиваются результаты, содержащие новые технические решения, оригинальные математические и теоретические положения.

Дополнительный материал, полученный в процессе работы и представляющий интерес, а также программное обеспечение, расчеты, графики, таблицы, акты внедрения и апробации методик контроля, акты испытаний контрольных образцов и т.д., не вошедшие в разделы ПЗ, при необходимости оформляются в виде приложений и помещаются в конце ПЗ после списка использованных источников.

В графической части должен быть приведен чертеж общего вида рассчитанного преобразователя с указанием габаритных, а также всех рассчитанных размеров, и чертеж выбранной электрической принципиальной схемы усилителя (автогенератора) с преобразователем. К чертежу электрической принципиальной схемы необходимо составить спецификацию, которая прикладывается к пояснительной записке.

Требования к РГР

Результат выполнения расчетно-графической работы должен быть оформлен в виде отчета. Общий объем отчета не должен превышать 10—15 листов и содержать следующие разделы:

- титульный лист;
- задание;
- содержание;
- введение
- основная часть;
- заключение;
- библиографический список;
- приложения (при необходимости).

Требования к содержанию разделов те же, что и для курсового проекта за исключением основной части. В основной части приводится обоснованный выбор вихретокового преобразователя (ВТП), метод выделения информативного параметра, расчет геометрических и

электрических параметров преобразователя, частоты контроля, вносимого напряжения, чувствительности и погрешности контроля. В отчет включаются годографы вносимого напряжения, зависимости амплитуды и фазы вносимого напряжения от подаваемого и контролируемого параметров, график чувствительности, листинг программы по расчету напряжения. В графическую часть включается только конструкция преобразователя.

Подробные примеры по расчету и проектированию преобразователей приведены в [5, с. 161-178]. Ниже изложен порядок расчета ВТП.

Выбор датчика ВТК и его конструкции

Существующие типы и виды вихретоковых преобразователей рассмотрены в [1, 3]. Датчики подбираются в зависимости от задачи. Они могут отличаться друг от друга типом, конструкцией, диапазоном рабочих частот, материалам. Конструкции ВТП определяются их назначением, условиями применения, диапазоном частот тока возбуждения и другими факторами. Поэтому они весьма разнообразны. Размеры катушек колеблются от нескольких миллиметров до 500 мм. Конструкция ВТП обычно содержит следующие составные части: одну или несколько катушек; корпус для размещения катушек; средства стабилизации положения катушек относительно ОК; средства для размещения ВТП в заданном положении относительно ОК; в процессе контроля; разъемы, кабели.

В настоящее время разработано большое количество типов и разновидностей ВТП. Прежде всего, по типу преобразования параметров ОК в выходной сигнал ВТП подразделяются на параметрические и трансформаторные. Параметрический ВТП имеет лишь одну возбуждающую обмотку, параметры которой (активное и индуктивное сопротивление) зависят от параметров ОК, температуры окружающей среды и расстояния между ВТП и ОК. Трансформаторный ВТП помимо возбуждающей обмотки имеет еще и измерительную обмотку, ЭДС которой зависит от параметров ОК. Преимущество параметрических ВТП заключается в их простоте, а недостаток, который значительно слабее выражен в трансформаторных ВТП, - в зависимости выходного сигнала от температуры преобразователя.

По способу соединения катушек (обмоток) ВТП делят на абсолютные и дифференциальные. Абсолютным называется ВТП, выходной сигнал которого определяется абсолютными значениями параметров ОК в зоне контроля. Дифференциальным ВТП принято называть, по существу, совокупность двух абсолютных ВТП. В дифференциальном ВТП обмотки возбуждения включены последовательно согласно, а измерительные -

встречно. Выходной сигнал такого ВТП определяется разностью значений параметров объекта, измеряемых в зоне расположения измерительных обмоток.

В зависимости от расположения ВТП по отношению к объекту контроля их делят на проходные, накладные и комбинированные. Отличительная особенность проходных ВТП в том, что в процессе контроля они проходят либо снаружи объекта, охватывая его, либо внутри объекта, либо погружаются в жидкий объект. Обычно проходные ВТП имеют однородное магнитное поле в зоне контроля, в результате чего радиальные смещения однородного объекта контроля не влияют на выходной сигнал преобразователя. Для этого длина возбуждающей обмотки катушки ВТП должна не менее чем в 3-4 раза превышать ее диаметр, а длина измерительной обмотки, размещенной в середине возбуждающей обмотки, должна быть значительно меньше длины последней. Однородное поле получают также, применяя возбуждающую обмотку в виде колец Гельмгольца, и измерительную – в виде короткой катушки. С помощью проходных ВТП получают интегральную оценку контролируемых параметров по периметру объекта, поэтому они обладают меньшей чувствительностью к небольшим (локальным) изменениям свойств. Виды проходных ВТП и их назначение приведены в табл. 1.

Особую разновидность представляют собой экранные преобразователи, отличающиеся тем, что их измерительные и возбуждающие обмотки разделены контролируемым объектом. Различают накладные экранные ВТП и проходные экранные преобразователи.

1. Виды и назначение проходных ВТП

Проходные ВТП	
наружные	для контроля линейно-протяженных объектов (провода, прутков, труб и т.п.)
внутренние	для контроля труб внутренние поверхности труб, баллонов, а также стенки отверстий в различных деталях.
погружные	для контроля жидких электропроводящих
экранные	- для контроля труб
щелевые	для контроля проволоки

Накладные ВТП размещают вблизи поверхности ОК, обычно они представляют собой одну или несколько катушек, к торцам которых

подводится поверхность объекта. Накладные преобразователи могут иметь катушки круглые коаксиальные, прямоугольные, прямоугольные крестообразные, катушки со взаимно перпендикулярными осями. С их помощью контролируют объекты с плоскими поверхностями и объекты сложной формы. Они также применяются, когда требуется обеспечить локальность и высокую чувствительность контроля. Экранные накладные ВТП можно использовать при контроле листов, пластин, лент и других изделий, к которым возможен двусторонний доступ. Применение этих ВТП позволяет практически исключить влияние смещений ОК относительно возбуждающей и измерительной катушек. Накладные преобразователи выполняют с ферромагнитными сердечниками и без них. Благодаря ферромагнитному сердечнику (обычно ферритовому) несколько повышается абсолютная чувствительность преобразователя и уменьшается зона контроля за счет локализации магнитного потока.

Комбинированные преобразователи представляют собой комбинацию проходных возбуждающих катушек и накладных измерительных катушек.

Мешающие и контролируемые параметры. Тип отстройки мешающего параметра. Выбор структурной схемы прибора

Интенсивность и распределение вихревых токов в объекте зависят от его геометрических размеров, электрических и магнитных свойств материала, от наличия в материале нарушений сплошности, взаимного расположения преобразователя и объекта, т.е. от многих параметров. Это определяет большие возможности метода как средства контроля различных свойств объекта, но в то же время затрудняет его применение, так как при контроле одного параметра другие являются мешающими табл. 2.

2. Мешающие и контролируемые параметры ВТК

Параметры	
Контролируемые	Мешающие
1) измеряются размеры Т, L, зазоры	Изменение структурного состояния σ, μ , взаимного положения ВТП и ОК
2) структуроскопия σ, μ	Изменения размера, взаимного положения ВТП и ОК
3) дефектоскопия	Влияют все перечисленные факторы

Сигнал ВТП имеет как минимум 2 составляющие – амплитуду и фазу (в случае трансформаторного преобразователя) или индуктивность и активное сопротивление (в случае параметрического ВТП). Для разделения параметров используют отдельное или совместное измерение фазы и амплитуды сигнала. Способы подавления мешающего фактора:

- Амплитудный способ (Рис. 1а) применяется тогда, когда линии влияния подавляемого параметра близки к дугам окружностей, а угол между контролируемым параметром и мешающим достаточно большой (от 45 до 90 градусов). Линии контролируемого параметра представляют собой пучок линий, сходящихся в начале координат. Например, для контроля диаметра прутков или толщины диэлектрических покрытий с подавлением влияния УЭП.

- Фазовый способ (рис. 1б) применяется тогда, когда фаза напряжения не зависит от изменения мешающего параметра. Линии влияния подавляемого параметра представляют собой пучок лучей, а угол между мешающим и измеряемым признаками равен 90 градусов. Однако на практике это кривые, $\alpha \approx 20^{\circ} \dots 40^{\circ}$, что приводит к появлению погрешности.

Линии влияния диаметра цилиндра трубы для проходного ВТП и линии влияния зазора для накладного ВТП близки к пучку лучей, исходящих из начала координат, что позволяет реализовать фазовый способ ослабления влияния изменения диаметра и зазора при контроле удельной электрической проводимости без специального компенсатора. Следует помнить, что максимальная чувствительность к электропроводности при фазовом контроле в 1,5 раза меньше, чем при амплитудном контроле. Поэтому при наличии возможности контролировать электропроводность без изменения зазора лучше пользоваться амплитудным методом. Применение фазового метода оправданно в случае изменяющегося зазора.

Фазовый способ также эффективен при контроле накладными экранными ВТП толщины неферромагнитных листов с подавлением влияния изменения σ , а также при контроле толщины листов накладными ВТП с подавлением влияния зазора. Контроль проводящих покрытий тоже проводится фазовым методом.

- Метод проекций или амплитудно-фазовый метод (рис. 1в) основан на измерении проекции вектора напряжения преобразователя на нормаль к годографу напряжения мешающего параметра. Амплитудно-фазовый способ двухпараметрового контроля целесообразно применять в тех случаях, когда линии влияния на комплексной плоскости $U_{вн}$ представляют собой почти параллельные прямые, а угол α между p_k и $p_{п}$ немного отличается от прямого.

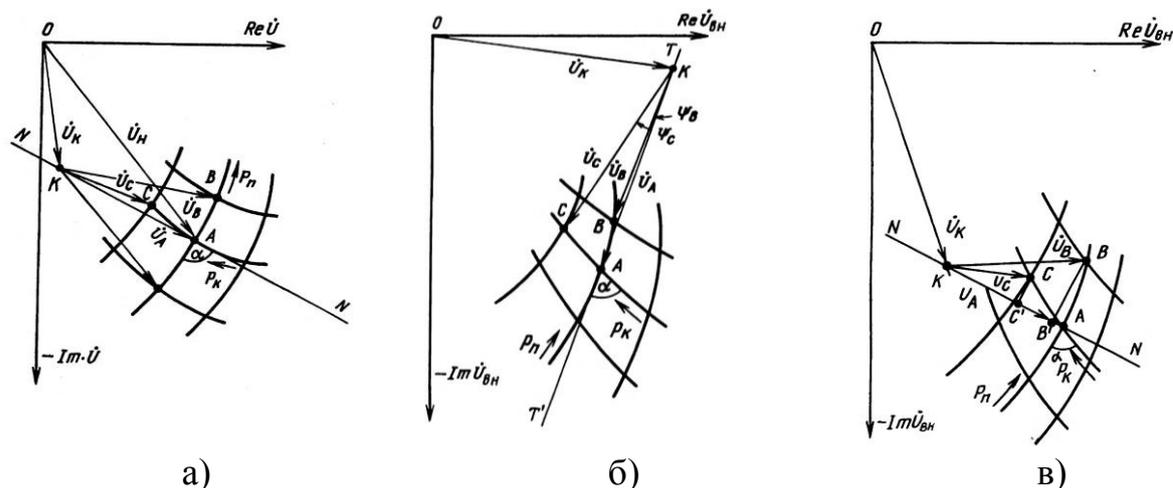


Рис. 1. Способы выделения полезной информации при ВТК: а) амплитудный метод; б) фазовый метод; в) метод проекций.

Полезно знать, что толщиномеры слоев (металлических листов, лент, труб, баллонов, деталей плоской формы) используют фазовые и амплитудно-фазовые методы отстройки.

После того как определен способ выделения полезной информации, вид ВТП и режим контроля, разрабатывается структурная схема прибора на основе структурных схем, рассмотренных в [5, с.469] и [3, с.155].

Определение геометрических параметров преобразователя и рабочей частоты контроля

Проходные датчики

Теоретические основы контроля проходными ВТП подробно изложены в [1]. Для того, чтобы определить частоту контроля, необходимо знать радиус возбуждающей катушки, который определяется геометрией объекта контроля и коэффициентом заполнения.

$$\begin{aligned} \eta &= (R/R_{и})^2, \text{ если } R_{и} \leq R_{в} \\ \eta &= (R/R_{в})^2, \text{ если } R_{и} \geq R_{в}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_{и}$, $R_{в}$ – соответственно радиусы измерительной и токовой обмоток преобразователя. Значение $\eta=1$ соответствует случаю, когда между обмоткой (токовой или измерительной) и объектом контроля отсутствует зазор. На практике коэффициент заполнения принимает значения 0,8, 0,75 и 0,6.

Длина возбуждающей и измерительной катушек определяется из соотношений:

$$\begin{aligned} L_{в} &= (3 \div 4) D_{в} \\ L_{и} &= 0,1 \div 0,3 D_{и} \end{aligned} \quad (2)$$

Рабочая частота контроля связана с обобщенным параметром x следующим выражением:

$$x = R_g \sqrt{\omega \mu_a \sigma}, \quad (3)$$

где σ – удельная электрическая проводимость, $\mu_a = \mu_r \mu_0$ – магнитная проницаемость объекта контроля (ОК), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Обобщенный параметр нужно выбирать исходя из требований к чувствительности контроля и метода выделения полезной информации.

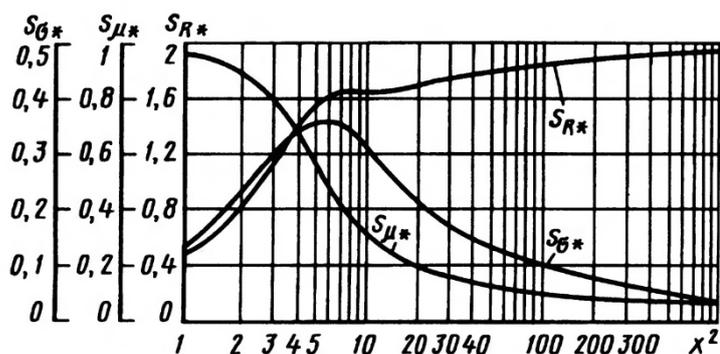


Рис. 2. Зависимости модулей относительной чувствительности от x^2 при $\eta=1$ и $\mu_r=1$.

Если измеряется радиус и проводимость является мешающим фактором, то исходя из графика чувствительности выбираются большие значения, например $x^2 = 200$.

Если контролируется удельная электрическая проводимость (УЭП), а радиус- мешающий фактор, то выбирается x^2 соответствующий максимуму чувствительности – 6,25.

Если объект контроля – труба, то значение обобщенного параметра выбирается из табл. 3.

3. Чувствительность проходных преобразователей к изменению параметров труб.

Чувствительность		Тип проходного ВТП					
		Наружный			Внутренний		
		$\alpha_{12} = R1/R2$					
		0,6	0,8	0,9	0,6	0,8	0,9
К изменению внешнего радиуса R2	$S_{R2 \max}$	2	3	5,45	0,4	1,9	4,2
	x	3	4	5	1	3	4,5
К изменению внутреннего радиуса R1	$S_{R1 \max}$	0,25	1,2	3,55	2	2,05	4,4
	x	2,5	3,2	4,5	1,5	3	4,3
К изменению проводимости	$S_{\sigma \max}$	0,39	0,44	0,48	0,3	0,42	0,45
	x	2,6	3,5	4,5	2	3	4

При вычислении частоты в качестве проводимости и радиуса ОК берется усредненное значение. Максимальная рабочая частота контроля вычисляется по формуле:

$$f_{\text{раб_max}} \leq \frac{1}{\pi \delta^2 \sigma \mu_a} \quad (4)$$

где δ - глубина проникновения электромагнитного поля, которая должна быть не менее толщины стенки трубы.

Диаметр провода для катушки возбуждающей катушки $d_{\text{пв}}$ определяется по ГОСТ 2773-51, 6334-52, 7262-54, либо выбирается в пределах от 0,1 до 0,3мм. Диаметр обмоточных проводов с учетом толщины изоляции:

$$d_{\text{пв_изол}} = (1,05 \dots 1,1) d_{\text{пв}} \quad (5)$$

Число витков катушки при однослойной намотке:

$$w_{\text{в}} = \frac{L_d}{d_{\text{нв}}} \quad (6)$$

При многослойной намотке число витков:

$$w_{\text{в}} = \frac{L_d \cdot n}{d_{\text{нв_изол}}}, \quad (7)$$

где n -число слоев обмотки соленоида. На практике выбирают $n < 5$, при этом общее число витков соленоида $w_{\text{в}}$ достаточно в диапазоне 200-400.

Диаметр провода измерительной обмотки $d_{\text{пр}}^{\text{и}}$ выбирается в пределах (0.1-0.15)мм, а диаметр провода с изоляцией определяется по (5).

Максимальное число слоев измерительной обмотки определяется геометрическими параметрами ВТП. Для обработки сигналов необходимое количество витков колеблется в пределах 100-300. Увеличение количества витков ведет к росту комплексного сопротивления и собственной емкости измерительной обмотки, что затрудняет ее согласование с входными измерительными цепями, особенно при работе на высоких частотах, где возможно влияние резонансных явлений. В качестве обмоточных проводов выбираются широко распространенные медные эмалированные провода типа ПЭЛ, ПЭВ-2 или аналогичные.

Накладные датчики

Расчет накладных ВТП подробно рассмотрен в [2]. При контроле накладным ВТП вносимое напряжение $U_{\text{вн}}^*$ зависит от параметра γ и относительного зазора h^* , которые рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} h^* &= (h_{\text{и}} + h_{\text{в}}) / R_{\text{в}}, \quad \gamma = R_{\text{и}} / R_{\text{в}}, \quad \text{при } R_{\text{и}} < R_{\text{в}} \\ h^* &= (h_{\text{и}} + h_{\text{в}}) / R_{\text{и}}, \quad \gamma = R_{\text{в}} / R_{\text{и}}, \quad \text{при } R_{\text{в}} < R_{\text{и}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где h^* – расстояние от объекта контроля до обмоток ВТП или максимальная толщина изоляционного покрытия, т.к. изменение толщины покрытия равносильно изменению зазора.

При малых γ ($\gamma < 0,2$) ЭДС измерительной катушки мала и, кроме того, при небольших размерах датчика изготовление такой измерительной катушки весьма затруднительно. Поэтому на практике обычно применяют преобразователь с параметром $\gamma = 0,5$ и концентрическим расположением катушек.

При выборе зазора следует руководствоваться условием максимальной чувствительности контроля и помнить, что с увеличением зазора увеличивается зона контроля, но при этом абсолютные значения вносимого напряжения существенно уменьшаются, и поэтому обработка сигналов, несущих полезную информацию сильно затрудняется. Зазор следует выбирать как можно меньше, но при этом помнить, что малые значения зазора трудно конструктивно реализовать. Часто h^* принимают равным 0.5. Для того, чтобы вычислить радиусы катушек ВТП и рабочую частоту контроля необходимо знать значения обобщенного параметра β и приведенной толщины T^* . Ниже приведены наиболее типичные ситуации контроля и рекомендации по выбору этих параметров.

Измерение толщины покрытий, изоляции

Из опыта проектирования известно, что при $\beta > 20$ резко снижается чувствительность к изменению электропроводности σ . Например, при $\beta = 100$, $\gamma = 0,5$, $h^* = 0,1$ чувствительность к зазору превышает в 100 раз чувствительность к электропроводности. Поэтому при выполнении предварительных расчетов обычно выбирают $\beta = 30$, $h^* = 0,5$.

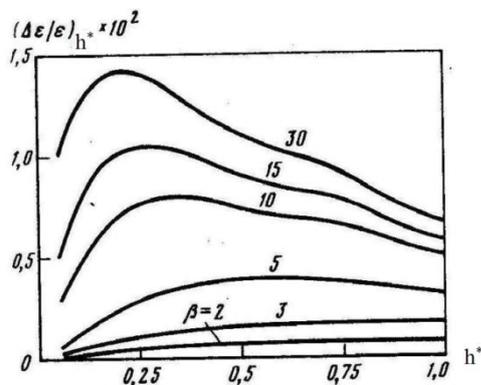


Рис.3. Относительное приращение сигнала на один процент изменения зазора, $\gamma = 0,5$.

Выбрать значение обобщенного вихретокового параметра β можно из графика рис. 3. по максимуму чувствительности к толщине покрытия S_{h^*} . Исходя из выбранного значения отношения γ и величины относительного зазора h^* , по формулам (8) рассчитываются радиусы измерительной и токовой катушек преобразователя.

Контроль электропроводности при мешающем зазоре

Для определения наилучших условий контроля σ без отстройки от влияния мешающих факторов необходимо знать чувствительность S_σ в зависимости от обобщенного параметра β для ряда значений h^* .

Если УЭП измеряется амплитудным способом, то обобщенный параметр определяется по графику рис. 4. На рис. 5. показана зависимость максимального значения чувствительности S_σ и соответствующие значения оптимального обобщенного параметра при различных значениях зазора.

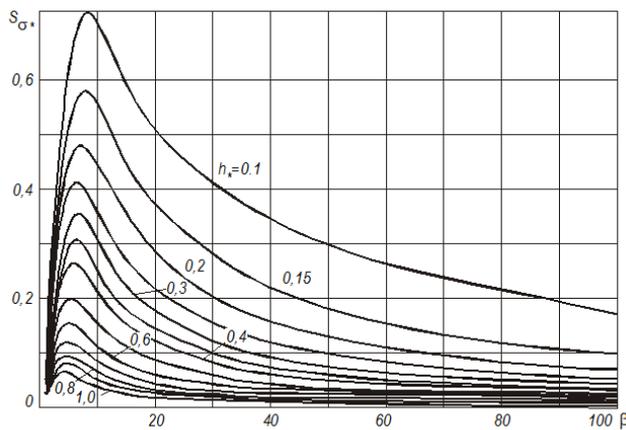


Рис. 4. Чувствительность к электропроводности

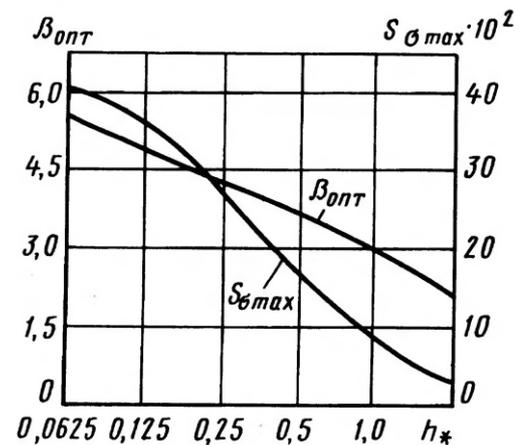


Рис. 5. Оптимальные значения обобщенного параметра и соответствующие им значения максимальной чувствительности к удельной электрической проводимости

Исследования чувствительности показали, что имеется максимум модуля чувствительности S_σ при всех значениях зазора и определенных значениях β_{opt} . Однако при этом чувствительность вихретокового преобразователя к электропроводности S_σ сильно зависит от зазора. Область значений $\beta = 2,5 \dots 5,0$ будет оптимальной для контроля σ с подавлением влияния изменений зазора.

Если УЭП контролируется фазовым способом (рекомендуется при изменяющемся зазоре), то обобщенный параметр контроля и зазор выбираются из графиков на рис. 6 [3, стр. 189].

Из рис. видно, что, начиная с $h^*=0,6$, фаза сигнала при изменении зазора остается постоянной. В области средних значений обобщенного зазора $h^*=0,1 \div 1,0$ максимум чувствительности к приращению удельной электрической проводимости соответствует $\beta = 3 \div 6$, т.к. в этом случае зависимость фазы относительного вносимого напряжения от УЭП линейная.

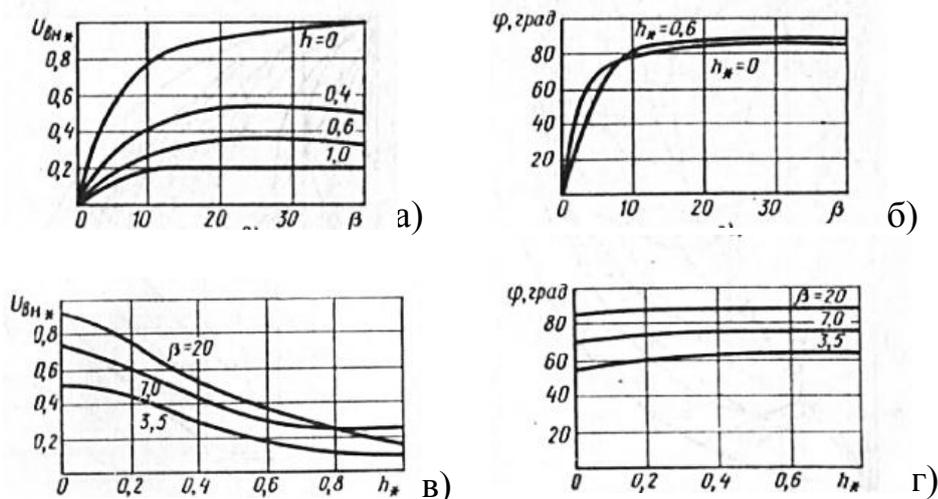


Рис. 6. Зависимости модуля вносимого напряжения $U_{вн*}$ и аргумента φ от β (а, б) и h^* (в, г).

Контроль толщины листа

Если задана зона контроля $D_{зк}$, из нее можно определить радиус возбуждающей катушки, а затем параметр T^* : Обобщенный параметр определяется по графикам чувствительности, рассчитанным для различных значений T^* и h^* . Относительная толщина определяется выражением:

$$T^* = \frac{T}{R} \quad (9)$$

где R – радиус большей из катушек.

$$D_{зк} = (2 \div 3) D_{ср} \quad (10)$$

Из параметра γ определяется значение радиуса измерительной катушки. Под $D_{ср}$ понимается среднее значение диаметра катушки, которая имеет больший радиус. Как правило, это диаметр возбуждающей катушки.

Наибольшая чувствительность к изменению толщины ОК достигается при условии $T^*\beta^2 \approx 3$, особенно в случае тонкого листа и больших значений β . Зная значение T^* можно найти обобщенный параметр. При контроле толщины следует помнить, что для случая малых толщин (T много меньше 1) раздельный контроль T и УЭП невозможен вообще.

Если зона контроля не задана, то есть два пути. Первый - задать приближенно значение зоны контроля. На практике ее значение редко превышает 50 мм и, как правило, берется в пределах 5-20 мм. В некоторых случаях оценить приближенно зону контроля позволяет геометрия ОК. Так известно, что для контроля толщины (T) немагнитного листа с подавлением влияния УЭП необходимо выбрать радиус преобразователя (R) и глубину

проникновения поля $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}}$ таким образом, чтобы $R \approx T$ и $\delta \approx T$.

Второй способ - обобщенный параметр определяется по графикам чувствительности в зависимости от метода получения информации. Например при амплитудно-фазовом методе контроль толщины с отстройкой от проводимости оптимален при $T^*\beta^2 = 1,5$ и $h^* = 0,5$.

Если применяется фазовый метод отстройки, то для определения максимума чувствительности и обобщенного параметра можно воспользоваться графиками на рис. 7:

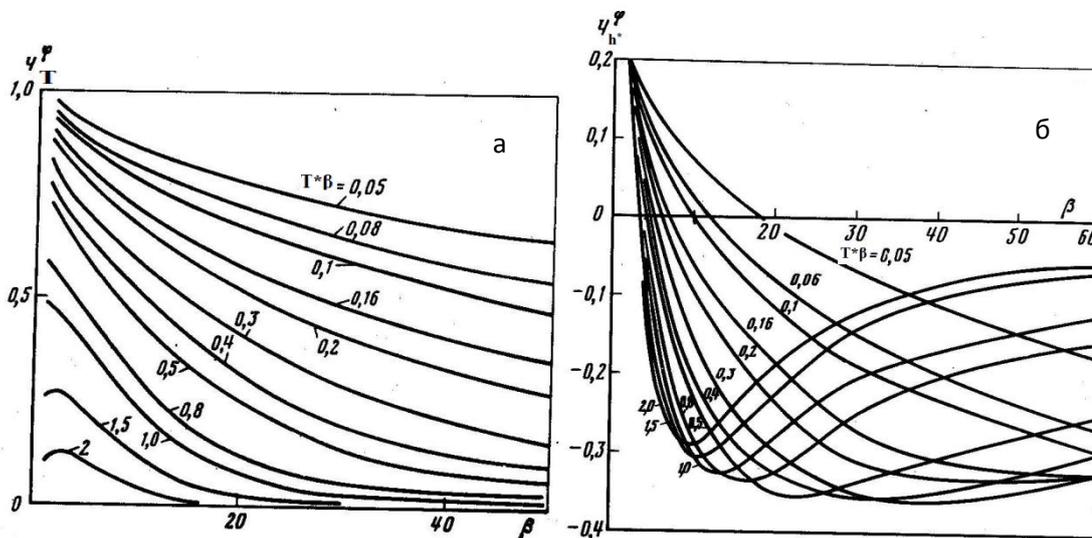


Рис. 7. Относительная чувствительность преобразователя при фазовом методе: а) к толщине пластины; б) к зазору; $h^* = 0,1$, $\gamma = 0,5$

График чувствительности УЭП аналогичен зависимости чувствительности от толщины. Из графиков б) видно, что все кривые при определенных значениях β проходят через нулевую линию. Это

обстоятельство можно использовать при отстройке мешающего зазора при контроле толщины.

Если применяется амплитудный метод отстройки УЭП, то параметр можно определить из графиков при $h^*=0.5$. При контроле толщины следует помнить, что для случая малых толщин (T много меньше 1) отдельный контроль T и УЭП невозможен вообще.

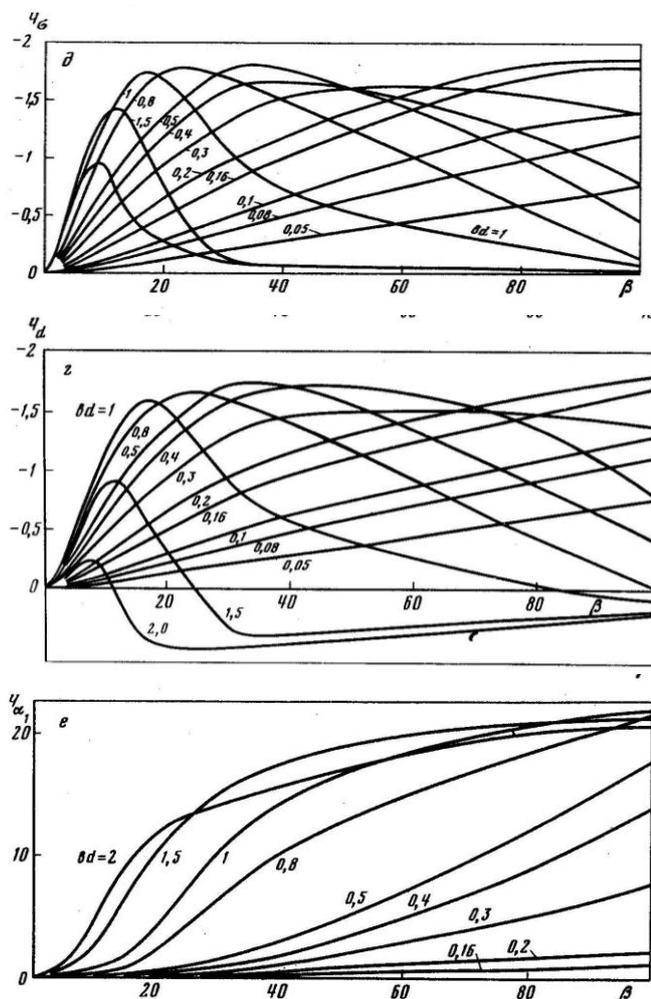


Рис 8. Чувствительность преобразователя а) к толщине пластины; б) к УЭП; в) к зазору. $\gamma=0,5$.

После того как определены радиусы катушек, вычисляется их длина из соотношения

$$0,1 < l/D < 0,3 \quad (11)$$

Количество витков в катушках НВТП от единиц до нескольких десятков. Минимальный диаметр провода d_B возбуждающей обмотки находят, задавшись током возбуждения (обычно $J_B=20 \div 200$ мА), по допустимой плотности тока в обмотке $J_{доп}$, зависящей от условий охлаждения обмоток (обычно $J_{доп}=2 \div 10$ А/мм², а для однослойных обмоток малого диаметра - до 100 А/мм²). Диаметр $d_{и}$ провода измерительных обмоток

обычно лежит в пределах 0,02—0,05 мм. Чем больше радиус провода, тем большее значение тока по нему проходит, тем сильнее сигнал.

Расчет электрических параметров ВТП

Активное сопротивление обмотки соленоида:

$$R = \rho \frac{l}{S_{пр}}, \quad (12)$$

где: ρ - удельное электрическое сопротивление (для медного провода $\rho = 0,0147 \cdot 10^{-6}$ Ом · м); l - длина провода в обмотке соленоида, метров; $S_{пр}$ - сечение провода обмотки, м².

Индуктивность возбуждающей катушки

$$L_0 = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot W \varepsilon^2 \cdot D \varepsilon \cdot \Phi(\alpha), \quad \alpha = \frac{L \varepsilon}{D \varepsilon} \quad (13)$$

где Φ - табличный коэффициент, в функции от отношения α . Значения Φ приведены в [6, стр. 256].

Собственная емкость является паразитным параметром катушки индуктивности, ограничивающим возможности ее применения. Ее возникновение обусловлено конструкцией катушки индуктивности: емкость существует между отдельными витками катушки, между витками и сердечником, витками и экраном, витками и другими элементами конструкции. Все эти распределенные емкости можно объединить в одну, называемую собственной емкостью катушки C_L .

Собственную емкость однослойных катушек можно оценить по формуле [6, стр. 249]

$$C_L = (0,5 \dots 1,5) D_k, \quad \text{пФ}, \quad (14)$$

где D_k – диаметр каркаса.

Собственную емкость многослойных катушек рассчитывают из выражения

$$C_L = \pi D_{ср} (8,5 \varepsilon + 8,2) 10^{-1}, \quad \text{пФ}, \quad (15)$$

где $D_{ср}$ – средний диаметр катушки, см; ε – диэлектрическая проницаемость изоляции провода катушки. Если изоляция лак, то ε можно принять равной 3.

Находим резонансную частоту паразитного контура

$$f_{рез} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_L}} \quad (16)$$

Должно выполняться условие $f_{раб} \ll f_{рез}$. Если же $f_{раб}$ и $f_{рез}$ близки друг к другу (например $f_{рез}$ всего в 1,5-2 раза превышает $f_{раб}$), то работа ВТП в околорезонансной зоне приведет к тому, что истинные значения вносимых

напряжений (за счет резонансного сдвига фазы и амплитуды) будут значительно отличаться от расчетных и будут нестабильными во времени. В этом случае для увеличения $f_{рез}$ необходимо уменьшить индуктивность измерительных обмоток $L_{и}$ путем уменьшения количества витков, либо уменьшить паразитную емкость. Лучше реализовать второй способ и уменьшить $C_{пар}$. Для этого в блоке ВТП в непосредственной близости от измерительных обмоток размещают специальный входной согласующий усилитель с малой входной емкостью $C_{пар} \leq 5 \text{ ПФ}$ и с низким выходным сопротивлением, обеспечивающим работу на длинный соединительный кабель без резонансных явлений в области рабочей частоты.

Комплексное сопротивление обмотки соленоида:

$$\dot{Z} = R + i \cdot 2\pi f_{раб} L_0, \quad |\dot{Z}| = \sqrt{R^2 + (2\pi f_{раб} L_0)^2} \quad (17)$$

Ток в возбуждающей обмотке соленоида

$$I = U_g / |\dot{Z}|, \quad (18)$$

где U_g – напряжение генератора синусоидального напряжения, обычно выбирается в диапазоне (3...10) вольт. Необходимо также рассчитать плотность тока J (А/мм²) в обмотке соленоида:

$$J = I / S_{np} \quad (19)$$

Существует ограничение на предельную плотность тока в обмотке, превышение которой приводит к недопустимому разогреву обмоток и последующему разрушению провода. Допустимая плотность тока J определяется конструкцией обмотки – количеством слоев обмотки, наличием пропитывающих компаундов, наличием экрана – т.е. условиями теплообмена обмотки с окружающим пространством. Допустимая плотность тока $J = (10...20) \text{ А/мм}^2$ для открытых однослойных обмоток и $J = (5...10) \text{ А/мм}^2$ для многослойных обмоток. Если плотность тока превышает допустимые пределы, необходимо уменьшать амплитуду генератора U_g и провести повторный расчет.

Расчет напряжения холостого хода и вносимого напряжения

Гармоническое напряжение в измерительной обмотке наводится как магнитным потоком вихревых токов (вносимое напряжение – информативная составляющая), так и непосредственно возбуждающим магнитным потоком (напряжение холостого хода U_0 – неинформативная составляющая). Выражения для этих величин имеют различный вид в зависимости от ОК и вида преобразователя.

Проходной датчик

Начальное напряжение при отсутствии ОК определяется как

$$E_0 = 2\pi f_{\text{раб}} \pi (R_{\text{и}})^2 W_{\text{в}} \mu_0 W_{\text{и}} / l_{\text{в}}, \quad (20)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $f_{\text{раб}}$ – рабочая частота, герц; $W_{\text{и}}$ – число витков измерительной обмотки; $R_{\text{и}}$ – радиус измерительной обмотки, метров; H_0 – напряженность поля в центре соленоида, А/м

Вносимое напряжение для внутреннего проходного ВТП

$$U_{\text{вн}}^* = -j\eta \frac{1}{1 - \frac{2}{R_m} P_m},$$

где m – слой с внутренним радиусом R_m , P_m – функция определяемая по таблицам для конкретного вида ОК (см. справочник под ред. Клюева стр. 378).

В частности для отверстий в массивном ОК:

$$U_{\text{вн}}^* = -j\eta \frac{1}{1 - \frac{2K_1(x)}{xK_0(x)}}$$

Вносимое напряжение наружного ВТП

$$\dot{U}_* = j \left[1 - \eta + \eta \mu_r \mu_{\text{эф1}} \right] \frac{\mu_{\text{эф1}}}{\mu_0} = \frac{\dot{\Phi}_{\text{и}}}{\dot{\Phi}_0} = \frac{2I_1(x)}{xI_0(x)}$$

Формулы для определения магнитной эффективной проницаемости и функции P_m приведены в [стр. 378]

Накладной ВТП

Начальное напряжение $\dot{U}_0 = \omega \cdot 34 \cdot 10^{-7} (\kappa - 0.3) w_{\text{в}} w_{\text{и}} \sqrt{R_{\text{в}} R_{\text{и}}} \dot{I}$

Первое приближение $\dot{U}_{\text{вн}}^* = j\dot{U}_0 \left(e^{-3c/2R} + e^{-3(h_{\text{в}}+h_{\text{и}})/2R} \varphi(\lambda) \right) \Big|_{\lambda=3/2R}$

Второе приближение

$$\dot{U}_{\text{вн}}^* = j\dot{U}_0 \left(e^{-3c/R} + 0.42e^{-c/R} \right) + j\dot{U}_0 \left(e^{-3(h_{\text{в}}+h_{\text{и}})/R} \varphi(\lambda) \Big|_{\lambda=3/R} + 0.42e^{-(h_{\text{в}}+h_{\text{и}})/R} \varphi(\lambda) \Big|_{\lambda=1/R} \right)$$

c – расстояние между катушками, R – большее из значений $R_{\text{и}}$ и $R_{\text{в}}$, κ – коэффициент аппроксимации, при значениях $0,5 < \kappa < 1$ приближенные формулы дают хорошие результаты, φ – функция влияния, $q = \sqrt{\lambda^2 - \underline{k}^2}$, λ – параметр интегрального преобразования, $\underline{k} = \sqrt{-i\omega\mu_a\sigma}$. Функция φ характеризует влияние на вносимое напряжение толщины и электромагнитных свойств контролируемой пластины, она зависит от радиуса возбуждающей обмотки накладного ВТП.

Для проводящего полупространства (1) и для листа (2) функция φ имеет вид:

$$1) \quad \varphi(q\lambda) = \frac{q - \mu_r \lambda}{q + \mu_r \lambda}$$

$$2) \quad \varphi(q\lambda) = \frac{(\mu_r \lambda - q)e^{T_*q} - (\mu_r \lambda + q)e^{-T_*q}}{(\mu_r \lambda + q)e^{T_*q} - (\mu_r \lambda - q)e^{-T_*q}}, \text{ где } T_* = T / R_g$$

Формулы для вычисления функции влияния в остальных случаях приведены в [3, стр. 380]

Выбор точки компенсации

Амплитуда или фаза напряжения ВТП могут незначительно зависеть от подавляемого параметра, если рабочая точка из начала координат будет смещена в точку К комплексной плоскости $U_{вн}$, положение которой определяется способом отстройки мешающего параметра. Если способ контроля амплитудный, то положение точки К находится на пересечении нормалей к годографу мешающего параметра (рис. 1а) Если отстройка мешающего параметра осуществляется фазовым методом, то положение точки К находится на пересечении касательных к годографу мешающего параметра (рис. 1б). Для метода проекций точка компенсации переносится в точку соответствующую номинальным значениям $p_{к0}$ и $p_{п0}$ рис. (1в).

Введем обозначения (рис. 9):

- $y_A = \text{Im}(U_{вн}^*(p_{к0}, p_{п0}))$, $x_A = \text{Re}[U_{вн}^*(p_{к0}, p_{п0})]$ – мнимая и действительная части вносимого напряжения в точке с номинальными (средними) значениями p_k и p_p ;
- $y_B = \text{Im}(U_{вн}^*(p_{к0}, p_{п_max}))$, $x_B = \text{Re}[U_{вн}^*(p_{к0}, p_{п_max})]$ – мнимая и действительная части вносимого напряжения в точке с номинальным значением p_k и максимальным p_p ;
- $y_C = \text{Im}(U_{вн}^*(p_{к_max}, p_{п0}))$, $x_C = \text{Re}[U_{вн}^*(p_{к_max}, p_{п0})]$ – мнимая и действительная части вносимого напряжения в точке с максимальным значением p_k и номинальным p_p ;
- $y_D = \text{Im}(U_{вн}^*(p_{к_max}, p_{п_max}))$, $x_D = \text{Re}[U_{вн}^*(p_{к_max}, p_{п_max})]$ – мнимая и действительная части вносимого напряжения в точке с максимальным значением p_k и максимальным p_p ;
- $y'(x_A) = (y_B - y_A) / (x_B - x_A)$ $y'(x_C) = (y_D - y_C) / (x_D - x_C)$;
- $U_{комп} = x_K + i y_K$ – напряжение компенсации.

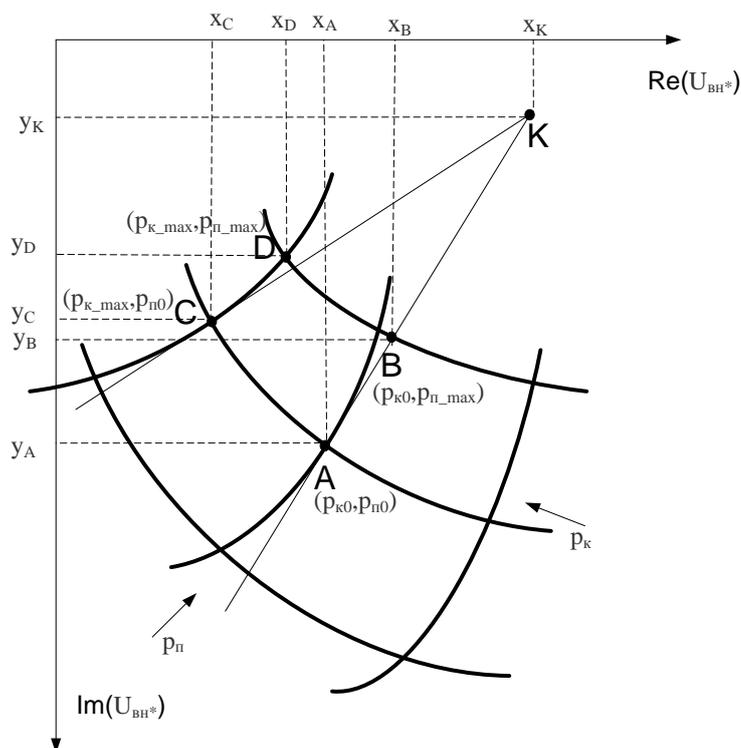


Рис 9 . Пояснение к расчету точки компенсации.

Тогда уравнения касательных запишутся в виде:

$$y1(x) = y'(x_A) (x - x_A) + y_A$$

$$y2(x) = y'(x_C) (x - x_C) + y_C$$

Уравнение нормали к линиям влияния подавляемого параметра:

$$y1(x) = - (x - x_A) / y'(x_A) + y_A$$

$$y2(x) = - (x - x_C) / y'(x_C) + y_C$$

После того как касательные (нормали) будут построены, необходимо найти точку их пересечения, которая находится из равенства $y1(x_K) = y2(x_K) = y_K$.

Получим систему уравнений

$$y_K - y'(x_A) x_K = y_A + y'(x_A) x_A$$

$$y_K - y'(x_C) x_K = y_C + y'(x_C) x_C,$$

которую можно представить в виде

$$A \cdot \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix} = B \quad A = \begin{pmatrix} 1 & -y'(x_A) \\ 1 & -y'(x_C) \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} y_A + y'(x_A)x_A \\ y_C + y'(x_C)x_C \end{pmatrix}$$

Тогда координаты точки компенсации можно определить

$$\begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix} = B \cdot A^{-1}$$

Полученные значения действительной и мнимой части компенсационного напряжения надо отнять от вносимого напряжения ($U_{вн*}$ -

$U_{\text{комп}})$ и только после этого приступить к расчету погрешности контроля и чувствительности.

Расчет погрешностей и чувствительности

Чувствительность равна отношению приращения напряжения при изменении контролируемого или мешающего параметров и определяется по формуле

$$S_p = \Delta U / \Delta p \text{ - амплитудный метод отстройки}$$

$$S_p = \Delta \varphi / \Delta p \text{ - фазовый метод отстройки}$$

В случае амплитудно-фазового метода при расчете чувствительности в формулы подставляется проекция вносимого напряжения на нормаль к подавляемому параметру.

Часто при контроле рассчитывают относительную комплексную чувствительность

$$\underline{S}_{p^*} = \frac{\partial \dot{U}_*}{\partial p_*} \cong (\Delta \dot{U}_* / \Delta p) p_0$$

где $p^* = p/p_0$, p_0 - номинальное значение для параметра p .

Абсолютная погрешность за счет изменения мешающего параметра рассчитывается по формуле

$$\Delta = S_m \cdot \Delta p_m / S_k,$$

где S_m – чувствительность к мешающему параметру, Δp_m – изменение мешающего параметра, S_k – чувствительность к контролируемому параметру. Выражение () можно записать в виде:

$$\Delta p_k = \frac{(p_{k_max} - p_{k_min}) \cdot dU_{p_n^*}}{dU_{p_k^*}} \quad \Delta p_k = \frac{(p_{k_max} - p_{k_min}) \cdot d\varphi_{p_n^*}}{d\varphi_{p_k^*}}$$

p_{k_max} и p_{k_min} – максимальное и минимальное значение контролируемого параметра, $dU_{p_n^*}$ и $d\varphi_{p_n^*}$ - приращение амплитуды и фазы сигнала вызванное изменением подавляемого параметра, $dU_{p_k^*}$ и $d\varphi_{p_k^*}$ - приращение амплитуды и фазы сигнала вызванное изменением контролируемого параметра. Приращение сигналов можно рассчитать из выражения для относительной чувствительности:

$$dU = S_{p_max} \cdot \Delta p_m / p_{ном},$$

где S_{p_max} – максимальное значение чувствительности (определяется по графику чувствительности). Приращение полезного сигнала, вызванное изменением толщины пластины

$$\Delta U_{*T} = S_T \cdot \Delta T / T_{\min}$$

Приращение сигнала за счет изменения электропроводности

$$\Delta U_{*\sigma} = S_{\sigma} \cdot \Delta \sigma / \sigma$$

Приращение сигнала за счет изменения зазора

$$\Delta U_{*h} = S_h \cdot \Delta h$$

Относительная погрешность равна

$$\gamma = \frac{\Delta p_k}{p_{k_ном}} \cdot 100\%$$

, где $p_{k_ном}$ – номинальное значение контролируемого параметра (среднее)

Варианты заданий

Вариант	Исходные данные к проекту
1	Толщиномер стенки сосуда. Исходные данные: ОК – сосуд из сплава алюминия с возможным диапазоном изменения значений УЭП от 10 до 25 МСм/м; толщина стенки сосуда $1 \pm 0,2$ мм; условия контроля нормальные; к сосуду имеется односторонний доступ; необходимо измерять толщину стенки сосуда вихретоковым методом с погрешностью не более 5%, диаметр зоны контроля не более 20 мм.
2	Измеритель диаметра отверстий. Исходные данные: ОК – массивная заготовка из алюминиевого сплава марки В95Т с отверстием диаметром от 10 до 15 мм; диапазон рабочих температур от 20 до 40°C; необходимо измерять диаметр отверстия с погрешностью не более 5% вихретоковым методом.
3	Толщиномер покрытия проволоки. Исходные данные: ОК – медная проволока диаметром 0,5 мм с золотым покрытием толщиной от 50 до 100 мкм, которая протягивается в осевом направлении в технологическом процессе; температура проволоки может изменяться в диапазоне от 20 до 50°C. Необходимо контролировать толщину покрытия проволоки вихретоковым методом с погрешностью не более 5%

4	<p>Тема: Средство контроля диаметра кругов. Исходные данные: ОК – протяженные круги $\varnothing 14-18$ мм с диапазоном изменения значений УЭП от 8 до 24 МСм/м. Температура ОК стабильна и соответствует нормальным условиям. Необходимо измерять диаметр кругов вихретоковым методом с погрешностью не более 5% с применением параметрического ВТП.</p>
5	<p>Тема: Прибор для контроля УЭП. Исходные данные: ОК - детали из титановых сплавов марок ВТ8, ВТ3 и ВТ14 с участком плоской поверхности 15x15 мм; толщина ОК в данном плоском участке 2 мм. Зазор изменяется в диапазоне от 0 до 0,5 мм. Температура ОК стабильна и соответствует нормальным условиям. Необходимо по значению УЭП вихретоковым методом сортировать детали по маркам сплавов.</p>
6	<p>Тема: Толщиномер покрытия. Исходные данные: ОК – печатная плата размером 150x150 мм с односторонним медным покрытием с номинальной толщиной покрытия 50 ± 10 мкм (фактическая толщина может меняться от 30 до 70 мкм) и нанесенным со стороны медного покрытия слоем изоляционного лака толщиной от 0,3 до 0,5 мм. Температура ОК стабильна и соответствует нормальным условиям. Необходимо контролировать толщину медного покрытия со стороны расположения лака вихретоковым методом с погрешностью не более 5%.</p>
7	<p>Тема: Прибор контроля трубок. Исходные данные: ОК – трубки диаметром от 6 до 8 мм, толщиной стенки 0,5 мм. УЭП трубок может изменяться от 15 до 30 МСм/м. Температура ОК стабильна и соответствует нормальным условиям. Необходимо измерять УЭП трубок вихретоковым методом с погрешностью не более 5%.</p>
8	<p>Тема: Прибор сортировки кругов. Исходные данные: ОК – протяженные круги $\varnothing 16-22$ мм из трех марок бронзы – БрАМц, БрАЖ и БрАЖМц. Температура ОК стабильна и соответствует нормальным условиям. Необходимо по значению УЭП вихретоковым методом сортировать прутки по маркам.</p>
9	<p>Тема: Средство контроля УЭП. Исходные данные: ОК – плоские образцы толщиной от 0,5 до 2 мм, УЭП образцов может изменяться от 15 до 35 МСм/м. Температура ОК стабильна и соответствует нормальным условиям. Необходимо измерять УЭП образцов вихретоковым методом с погрешностью не более 5%.</p>

10	Тема: Толщиномер покрытия трубы. Исходные данные: ОК – труба диаметром 25 мм толщиной стенки 3 мм из жаропрочного сплава 12X18H9T, покрытая слоем хрома толщиной от 50 до 100 мкм; условия контроля нормальные. Необходимо измерять толщину покрытия трубы вихретоковым методом с погрешностью не более 5%.
11	Тема: Средство контроля проволоки. Исходные данные: ОК – нихромовая проволока номинальным диаметром 1 мм; диаметр проволоки может изменяться в диапазоне от 0,9 до 1,1 мм; диапазон рабочих температур от 20 до 40°C; необходимо контролировать отклонения диаметра проволоки с погрешностью не более 5% вихретоковым методом при ее движении в осевом направлении.
12	Тема: Измеритель толщины полосы. Исходные данные: ОК – плоская полоса из магниевого сплава МЛ12 шириной 20 мм в нетермообработанном состоянии; толщина ленты изменяется от 0,3 до 1,5 мм; температура ОК может изменяться от 10 до 30°C; возможен двусторонний доступ к ленте. Необходимо измерять толщину ленты вихретоковым методом с погрешностью не более 5%.
13	Тема: Толщиномер диэлектрического покрытия. Исходные данные: ОК – медная шина шириной 25 мм и толщиной 2 мм, покрытая слоем лака толщиной от 20 до 80 мкм; диапазон рабочих температур от 10 до 50°C; необходимо измерять толщину покрытия шины вихретоковым методом с погрешностью не более 5%
14	Тема: Средство контроля лопаток турбин. Исходные данные: ОК – титановые лопатки толщиной от 1 до 2 мм; необходимо на плоских участках размером не более 20×20 мм измерять толщину участка лопатки вихретоковым методом. Диапазон рабочих температур от 10 до 50°C.
15	Тема: Измеритель УЭП. Исходные данные: ОК – массивная деталь из графита марки МГС с отверстиями диаметром от 12 до 16 мм глубиной не менее 60 мм. Необходимо измерять УЭП в отверстиях графитовой детали с погрешностью не более 5% вихретоковым методом.

16	Толщиномер покрытий. Измерение толщины неферромагнитных металлических покрытий с электропроводностью от 6 до 9,5 МСм/м на неферромагнитных основаниях из цветных металлов с электропроводностью от 16 до 60 МСм/м. Минимальный диаметр оснований $d_{min}=2$ мм, максимальная шероховатость $Rz_{mh}=20$ мкм. Основная допустимая погрешность измерения толщины покрытия ДТП не более 1(1...2) мкм.
17	Измеритель УЭП цветных металлов и сплавов. Исходные данные: УЭП изменяется в диапазоне от 5 до 62 МСм/м с подавлением мешающего влияния изменений зазора до 0,25 мм. Погрешность не более 5%
18	Измеритель УЭП трубы. Исходные данные: труба диаметром 32 мм с толщиной стенки 2 мм из алюминиевого сплава с электропроводимостью 18,4 МСм/м.
19	Толщиномер диэлектрических покрытий Объект контроля: электропроводные немагнитные пластины с лакокрасочным покрытием. Толщина покрытия: 100 – 400 мкм. Электрическая проводимость основания: 0,3 – 3 МСм/м Зона контроля: не более 50 мм. Погрешность измерения толщины: не более 5%. Размеры пластины основания $T = 2 - 10$ мм $b = 50 - 150$ мм $h = 150 - 500$ мм
20	Устройство для контроля диаметра медной проволоки в процессе производства. Диапазон измерения диаметра проволоки: 1 – 3 мм, Погрешность измерения: 10% Электрическая проводимость материала проволоки: 50 – 55 МСм/м

Пример программы по расчету ВТП в Mathcad

Объект контроля: листовой прокат. Диапазон измерения толщины $T=5 \div 15$ мм. Абсолютная погрешность измерения: 1 мм. Электрическая роводимость листа: $0.5 \div 0.7$ МСм/м, Магнитная проницаемость: 1.

Текст программы

Контролируемый параметр $T_{min} := 5 \cdot 10^{-3}$ $T_{max} := 15 \cdot 10^{-3}$ $\mu_a := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

Подавляемый параметр (УЭП) $\sigma_{min} := 0.5 \cdot 10^6$ $\sigma_{max} := 0.7 \cdot 10^6$

Номинальные значения $T_0 := \frac{(T_{max} + T_{min})}{2} = 0.01$ $\sigma_0 := \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} = 6 \times 10^5$

Отношение радиусов катушек $\gamma := 0.5$. Зазор $h := 0.5$. Зона контроля $D_{zk} := 50 \cdot 10^{-3}$ (D_{zk} выбирается таким образом, чтобы глубина проникновения вихревых токов была соизмерима с толщиной ОК).

Радиус и диаметр возбуждающей катушки $R_v := \frac{D_{zk}}{2} = 0.025$ $D_v := 2 \cdot R_v = 0.05$

Радиус и диаметр измерительной катушки $R_i := \gamma \cdot R_v = 0.013$ $D_i := 2 \cdot R_i = 0.025$

Приведенная толщина $\frac{T_0}{R_v} = 0.4$. Обобщенный параметр $\beta := \sqrt{\frac{3}{T}}$

Частота контроля $\omega := \frac{\beta^2}{R_v^2 \cdot \mu_a \cdot \sigma_0} = 1.592 \times 10^4$ $f_p := \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = 2.533 \times 10^3$

Глубина проникновения $\delta := \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_a \cdot \sigma_0}} = 0.013$ соизмерима с толщиной ОК.

Длина измерительной и возбуждающей катушек $L_i := 0.2 \cdot R_i = 0.003$ $L_v := 0.2 \cdot R_v = 0.005$

Ток возбуждения и допустимая плотность тока $I_v := 100 \cdot 10^{-3}$ $J_{доп} := 5$

Радиус провода возбуждающей катушки $r_{ww} := \sqrt{\frac{I_v}{J_{доп} \cdot \pi}} = 0.08$

С учетом изоляции (медный провод ПЭЛ) $r_v := 0.09$ (мм)

Количество витков в одном слое и общее количество витков (в двух слоях)

возбуждающей катушки $n := \text{round}\left(\frac{L_v}{2 \cdot r_v \cdot 10^{-3}}\right) = 31$ $w_v := 2 \cdot n = 62$

Радиус провода измерительной катушки $r_i := 0.05$. С учетом изоляции (медный провод ПЭЛ) $r_{iw} := 0.06$

Количество витков измерительной катушки в одном слое и общее количество витков в двух слоях измерительной катушки

$n := \text{round}\left(\frac{L_i}{2 \cdot r_i \cdot 10^{-3}}\right) = 21$ $w_i := 2 \cdot n = 42$

Длина провода и его сопротивление $l_{пр} := 2 \cdot \pi \cdot R_v \cdot w_v = 9.739$

$$R_{\text{ww}} := 0.0147 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{l_{\text{np}}}{\pi \cdot r_v^2} = 7.158 \times 10^{-6} \quad \alpha := \frac{L_v}{D_v} = 0.1 \quad \Phi := 34.436$$

Диэлектрическая проницаемость изоляции (эмаль) провода $\epsilon_{\text{...}} := 3$

Индуктивность катушки и паразитная емкость

$$L_0 := \mu_a \cdot w_v^2 \cdot D_v \cdot \frac{\Phi}{4 \cdot \pi} = 6.619 \times 10^{-4} \quad C_L := \pi \cdot D_v \cdot \frac{(8.5 \cdot \epsilon + 8.2)}{10} \cdot 10^{-12} = 5.294 \times 10^{-13}$$

$$f_{\text{rez}} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_L}} = 8.503 \times 10^6$$

Резонансная частота

$$\text{Напряжение холостого хода } U_0 := \omega \cdot 34 \cdot 10^{-7} \cdot (1 - 0.3) \cdot w_1 \cdot w_v \cdot \sqrt{R_v \cdot R_1 \cdot L_v} = 0.551$$

$$q(\Sigma) := \sqrt{\lambda^2 - \left(\sqrt{-i \cdot \omega \cdot \mu_a \cdot \Sigma} \right)^2} \quad \lambda := \frac{3}{2 \cdot R_v} = 60$$

Функция влияния и вносимое напряжение

$$\varphi(\Sigma, tt) := \frac{(\lambda - q(\Sigma)) \cdot e^{tt \cdot q(\Sigma)} - (\lambda + q(\Sigma)) \cdot e^{-tt \cdot q(\Sigma)}}{(\lambda + q(\Sigma)) \cdot e^{tt \cdot q(\Sigma)} - (\lambda - q(\Sigma)) \cdot e^{-tt \cdot q(\Sigma)}} \quad U_{\text{vn}}(\Sigma, tt) := i \cdot U_0 \cdot \left(e^{-3 \cdot \frac{h}{2} \cdot \varphi(\Sigma, tt)} \right)$$

Диапазон изменения мешающего (УЭП) и контролируемого параметров

$$\text{(толщина)} \quad \sigma := \sigma_{\text{min}}, 1.01 \sigma_{\text{min}} \dots \sigma_{\text{max}} \quad t := T_{\text{min}}, 1.01 T_{\text{min}} \dots T_{\text{max}}$$

Зависимость вносимого напряжения от УЭП при постоянной толщине листа:

$$V1(\sigma) := U_{\text{vn}}(\sigma, T_{\text{min}}) \quad V2(\sigma) := U_{\text{vn}}(\sigma, T_{\text{max}}) \quad V0(\sigma) := U_{\text{vn}}(\sigma, T_0)$$

Зависимость вносимого напряжения от толщины листа при постоянной УЭП

$$u1(t) := U_{\text{vn}}(\sigma_{\text{min}}, t) \quad u2(t) := U_{\text{vn}}(\sigma_{\text{max}}, t) \quad u0(t) := U_{\text{vn}}(\sigma_0, t)$$

Расчет точки компенсации

$$y_a := \text{Im}(U_{\text{vn}}(\sigma_0, T_0)) = -0.089 \quad x_a := \text{Re}(U_{\text{vn}}(\sigma_0, T_0)) = 0.037 \quad x_b := \text{Re}(U_{\text{vn}}(\sigma_{\text{max}}, T_0)) = 0.042$$

$$y_b := \text{Im}(U_{\text{vn}}(\sigma_{\text{max}}, T_0)) = -0.093 \quad y_c := \text{Im}(U_{\text{vn}}(\sigma_0, T_{\text{max}})) = -0.077 \quad x_c := \text{Re}(U_{\text{vn}}(\sigma_0, T_{\text{max}})) = 0.063$$

$$y_d := \text{Im}(U_{\text{vn}}(\sigma_{\text{max}}, T_{\text{max}})) = -0.085 \quad x_d := \text{Re}(U_{\text{vn}}(\sigma_{\text{max}}, T_{\text{max}})) = 0.068$$

$$dy_a := \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \quad dy_c := \frac{y_d - y_c}{x_d - x_c}$$

$$x := 0.06, 0.065 \dots 0.1$$

$$\text{Касательные } y1(x) := dy_a \cdot (x - x_a) + y_a \quad y2(x) := dy_c \cdot (x - x_c) + y_c$$

Координаты точки компенсации

$$A_{\text{ww}} := \begin{pmatrix} 1 & -dy_a \\ 1 & -dy_c \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} y_a + dy_a \cdot x_a \\ y_c + dy_c \cdot x_c \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \end{pmatrix} := A^{-1} \cdot B \quad x_k = -0.066 \quad y_k = -0.069$$

$$\text{Компенсационное напряжение } U_k := x_k + i \cdot y_k$$

$$\text{Скомпенсированное вносимое напряжение } U(\Sigma, tt) := U_{\text{vn}}(\Sigma, tt) - U_k$$

Расчет чувствительности контроля

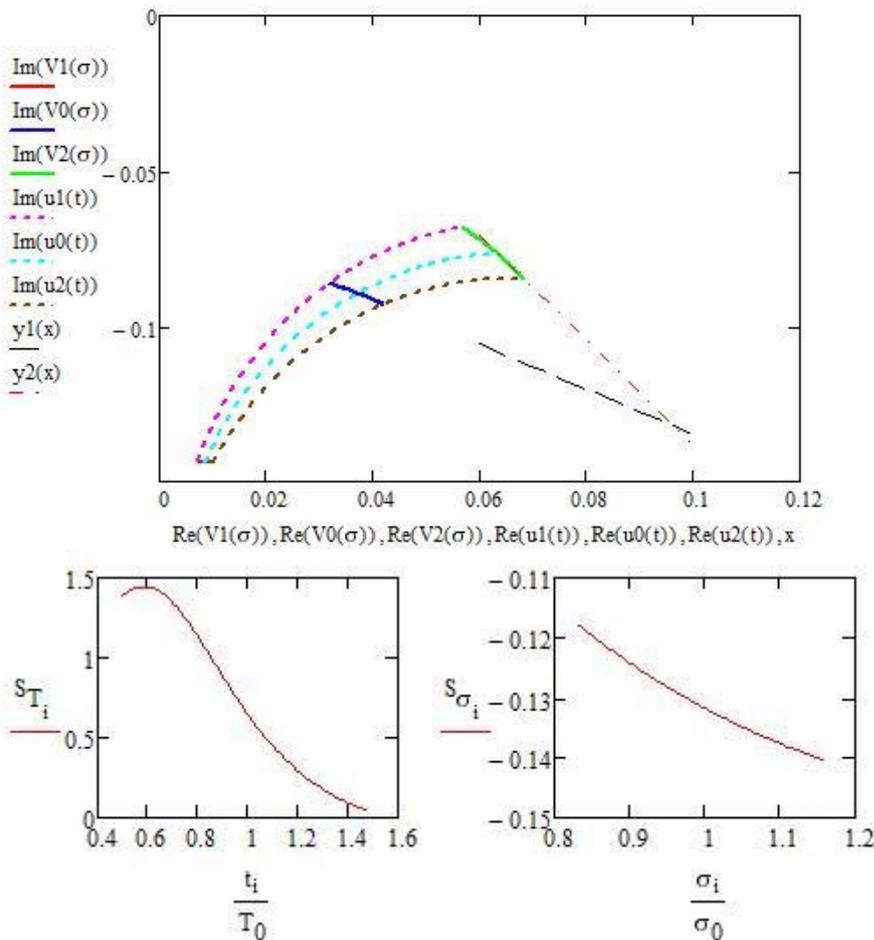
Шаг изменения толщины и проводимости $\underline{dt} := \frac{T_{\max} - T_{\min}}{100}$ $d\sigma := \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{100}$

$$i := 0..99 \quad t_i := T_{\min} + i \cdot dt \quad \sigma_i := \sigma_{\min} + i \cdot d\sigma$$

Чувствительность $i := 0..98$

$$S_{T_i} := \frac{\arg(U(\sigma_0, t_{i+1})) - \arg(U(\sigma_0, t_i))}{\left(\frac{t_{i+1} - t_i}{T_0}\right)} \quad S_{\sigma_i} := \frac{\arg(U(\sigma_{i+1}, T_0)) - \arg(U(\sigma_i, T_0))}{\left(\frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{\sigma_0}\right)}$$

Годограф вносимого напряжение и точка компенсации. Графики чувствительности.



Приращение сигнала за счет изменения толщины пластины

$$dU_t := \max(S_T) \cdot \frac{(T_{\max} - T_{\min})}{T_{\min}} = 2.885$$

Приращение сигнала за счет изменения УЭП

$$dU_\sigma := \max(S_\sigma) \cdot \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{\sigma_0} = -0.039$$

Абсолютная и относительная погрешность

$$\Delta T := (T_{\max} - T_{\min}) \cdot \frac{dU_\sigma}{dU_t} = -1.364 \times 10^{-4} \quad \epsilon_t := \frac{\Delta T \cdot 100}{T_0} = -1.364$$

Список литературы

1. Федосенко Ю. К., Шкатов П. Н., Ефимов А. Г. Вихретоковый контроль: учебное пособие/под общ. ред. В. В. Ключева. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 244 с.:ил. – (Диагностика безопасности).
2. Дякин В.В., Сандовский В.А. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М.: Наука, 1981. – 135с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Ключева. Т. 2: В 2 кн. - М.: Машиностроение. 2003. - 688 с.: ил.
4. Неразрушающий контроль. В 5-ти книгах. Под ред. В.В. Сухорукова - М.: Высш. шк., 1991.
5. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами/ Герасимов В. Г., Останин Ю. А., Покровский А. Д. и др. — М.: Энергия, 1978,— 216 с, ил.
6. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей [Текст]: Справочная книга
7. Соболев В.С., Шкарлет Ю.М. Накладные и экранные датчики.- Новосибирск: Наука 1967.
8. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12е изд. Том I: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с.
9. Герасимов В.Г. Электромагнитный контроль однослойных и многослойных изделий. -М.: Энергия, 1978. -160 с.