

6
A-43
МИНИСТЕРСТВО ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ СССР
КИЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

На правах рукописи

А. Н. ПЛАХОТНЮК

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ГЛУБИНЫ НАКЛЕПАННОГО СЛОЯ
В СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ С ПОМОЩЬЮ
МНОГОЧАСТОТНОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА**

**СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 258
„ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ“**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Киев — 1939

МИНИСТЕРСТВО ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ СССР

КИЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

На правах рукописи

А.Н. ПЛАХОТНЮК

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЛУБИНЫ НАКЛЕПАННОГО СЛОЯ В
СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ С ПОМОЩЬЮ МНОГОЧАСТОТ-
НОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА

Специальность 258

"Приборы и устройства автоматики и телемеханики"

Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Киев-1969

В В Е Д Е Н И Е

Задача всемерного повышения качества, надежности и долговечности современных летательных аппаратов и других не менее важных устройств не может быть успешно решена без разработки новых эффективных методов и автоматических средств для экспрессного 100% контроля материалов и изделий без разрушения.

В силу ряда преимуществ методов, основанных на электрических измерениях неэлектрических величин и, в частности, электромагнитного (токовихревого) метода, последнему отводится важное место в решении поставленной задачи. Электромагнитный контроль опирается на глубокую связь физико-механических характеристик металлических изделий с их электромагнитными параметрами.

Серьезным препятствием при использовании электромагнитного метода для неразрушающего контроля различных качественных характеристик ферромагнитных изделий при существующем одномерном представлении контролируемого свойства является значительная неопределенность измерений, обусловленная влиянием случайных вариаций мешающих факторов. Применение многомерного (многочастотного) метода измерения позволяет существенно увеличить количество полезной информации в выходном сигнале измерительной схемы в результате подавления влияния факторов-помех. Настоящая работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям многочастотного метода измерений применительно к контролю глубины наклепанного слоя в стальных изделиях, упрочненных поверхностным механическим наклепыванием.

Надежность летательных аппаратов, работающих при

больших динамических нагрузках, определяется, в основном, качеством поверхностных слоев металла отдельных наиболее ответственных деталей. В результате поверхностного упрочнения пластическим деформированием металла, например, центробежно-шариковой обработкой (способ М.И.Кузьмина), значительно повышается усталостная прочность (в 1,5-3 раза), износостойкость (в 3,5 + 4 раза) и коррозионная стойкость деталей (в 2+2,5 раза). Отсутствие надежных и быстродействующих методов контроля глубины наклепанного слоя без разрушения является серьезным препятствием при оценке качества готовой продукции, а также при внедрении и совершенствовании данной технологической операции.

Основной целью настоящей работы являлось:

1. Разработка многочастотного (многомерного) метода измерения применительно к непрерывному неразрушающему контролю глубины наклепа ферромагнитных изделий, т.е. контролю в таких условиях, когда практически отсутствует какая-либо информация о количестве, природе и степени влияния мешающих факторов.

2. Разработка и исследование способов определения оптимальных частот, параметров обучения и погрешностей при многочастотном (многомерном) измерении глубины наклепа.

3. Исследование возможностей технической реализации предлагаемого метода в виде прибора для неразрушающего электромагнитного контроля глубины наклепа стальных изделий.

4. Изготовление прибора для решения конкретной задачи контроля и испытание его в условиях производства.

Диссертация состоит из 183 страниц машинописного текста, 3 глав, 42 иллюстраций, 13 таблиц, 5 приложений и списка литературы в количестве 85 печатных работ.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЧАСТОТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ КОНТРОЛЕ ГЛУБИНЫ НАКЛЕПА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Принципиальным основанием для электромагнитного контроля глубины наклепанного слоя в ферромагнитных изделиях является изменение совокупности электромагнитных характеристик металла при его пластическом деформировании в слое в результате механического поверхностного наклепывания. При наклепе ферромагнитных сталей существенно возрастают концентрации микродефектов: неподвижных дислокаций, вакансий и атомов внедрения, - это приводит к изменению удельного электросопротивления металла и его доменной структуры. У наклепанной стали уменьшается магнитная проницаемость на всех участках кривой намагничивания, возрастает коэрцитивная сила, уменьшается остаточная индукция. Все эти изменения в полной мере проявляются при динамическом намагничивании стали в звуковом и ультразвуковом диапазонах частот и характеризуются изменением комплексной магнитной проницаемости (по В.К.Аркадьеву) и зависимостью ее составляющих от частоты тока намагничивания.

Вследствие нестабильности технологических режимов плавки (химсостава), термообработки (закалки, отпуска и т.д.), механической обработки (резания, шлифования и т.д.) и наклепывания в упрочненных изделиях имеют место вариации электромагнитных свойств металла, макро-и микрогеометрии поверхности, которые приводят к неопределенности при электромагнитном контроле глубины наклепа.

Так, при измерении по способу сравнения с эталоном выходное напряжение электромагнитного датчика на K -ой частоте

$$\dot{U}_K = \Phi(j\omega, X_1, \dots, X_i, \dots, X_n) \quad (1)$$

определяется множеством различных факторов X_i ($i = 1, \dots, n$), в том числе:

контролируемым $X_1 = h$ - глубиной наклепа и мешающими X_2, \dots, X_n - воздушным зазором, электропроводностью, магнитной проницаемостью и т.п. Влияние мешающих факторов может быть значительно подавлено при использовании метода многочастотных измерений. В этом случае при линейном преобразовании факторов в электрические сигналы различных частот контролируемый параметр X_1 находится в результате решения системы уравнений:

$$U_k = \sum_{i=1}^n a_{ki} X_i, \quad (k=1, \dots, n) \quad (2)$$

где a_{ki} - передаточный коэффициент i -го фактора на k -ой частоте.

Существующий детерминированный подход к проблеме многочастотного электромагнитного контроля при непрерывном измерении величины контролируемого параметра исходит из определения передаточных коэффициентов всех факторов либо теоретически из весьма приближенных уравнений электромагнитного датчика, либо экспериментально, когда все факторы поддаются измерению и управлению.

Такой подход неприемлем при решении задачи неразрушающего электромагнитного контроля глубины наклепанного слоя в ферромагнитных изделиях и многих других задач, когда система контроля "датчик - контролируемый объект" представляется достаточно сложной, чтобы целесообразно было описывать ее уравнениями, или когда практически не удается установить, что собой представляют мешающие факторы, т.е. их природу, количество и степень влияния.

Для решения задач подобного типа предлагается отображать систему многочастотного контроля "датчик-объект" стохастической моделью. В этом случае для комплексного исследования многочастотного (многомерного) метода измерения при неразрушающем контроле глубины наклепа ферромагнитных изделий необходимой и достаточной информацией являются:

а) амплитудно-фазовые частотные характеристики (АФЧХ) в

исследуемом диапазоне частот,

б) известные величины глубины наклепа, измеренные с помощью эталонного разрушающего метода; полученные для представительной выборки образцов контролируемых изделий.

Существующую неопределенность между величиной контролируемого параметра $X = h$ - глубиной наклепа и одномерными выходными сигналами измерительной схемы (датчика), обусловленную случайными вариациями мешающих факторов, можно значительно уменьшить, представив контролируемый параметр h функцией отклика (регрессии) в многомерном пространстве сигналов совокупности m дискретных оптимальных частот

$$h = \Psi(U_1, V_1, \dots, U_k, V_k, \dots, U_m, V_m), \quad (3)$$

где U_k, V_k ($k=1, \dots, m$) - соответственно вещественная и мнимая составляющие сигнала \dot{U}_k , которые могут быть заменены их инвариантами: амплитудой $|U_k|$ и фазой φ_k . Аналитическое выражение функции отклика $\Psi(\dots)$, являющейся, в свою очередь, функцией формирования многомерного сигнала, неизвестно, поэтому, учитывая реальные технические возможности обработки сигналов в устройствах для многочастотного электромагнитного контроля, ограничимся представлением ее полиномом (для упрощения записи используем только вещественные составляющие сигналов U_k , ($k=1, \dots, m$), подразумевая обязательное присутствие мнимых составляющих V_k)

$$h = \beta_0 + \sum_{k=1}^m \beta_k U_k + \frac{1}{2} \sum_{k \neq l}^m \beta_{kl} U_k U_l + \sum_{k=1}^m \beta_{kk} U_k^2 + \dots, \quad (4)$$

где $\beta_0, \beta_k, \beta_{kl}, \beta_{kk}$ - теоретические коэффициенты регрессии для генеральной совокупности объектов, которые могут встретиться в практике контроля (теоретические параметры обучения многочастотного устройства).

Исследуя представительную выборку образцов объема N , найдем уравнение поверхности отклика, соответствующее

данной выборке:

$$\hat{h} = b_0 + \sum_{k=1}^m b_k U_k + \frac{1}{2} \sum_{k \neq l}^m b_{kl} U_k U_l + \sum_{k=1}^m b_{kk} U_k^2 + \dots, \quad (5)$$

где \hat{h} - выборочная оценка действительного значения контролируемого параметра h , полученная при много-частотном измерении; b_0, b_k, b_{kl}, b_{kk} - выборочные коэффициенты регрессии (параметры обучения), являющиеся оценками $\beta_0, \beta_k, \beta_{kl}, \beta_{kk}$.

Контроль глубины наклепа и многие другие задачи электромагнитного контроля могут быть успешно решены при использовании линейной математической модели (линейной регрессии). Уравнение плоскости отклика в этом случае имеет вид:

$$\hat{h} = b_0 + \sum_{k=1}^m b_k U_k. \quad (6)$$

Присутствие в (6) постоянной составляющей b_0 - смещения плоскости отклика - необходимо, чтобы учесть систематическую ошибку, связанную с величиной контролируемого параметра эталона и неустранимым начальным разбалансом электромагнитного датчика.

Исходя из предложенной стохастической модели системы контроля была разработана методика определения с помощью ЭВМ исходных данных для технической реализации рассматриваемого метода.

При многочастотном измерении глубины наклепа на оптимальной совокупности m частот имеет место минимум минимизируемой квадратичной формы:

$$Q_\varepsilon = \inf \min \left\{ \sum_{\tau=1}^N p(h_\tau) (\hat{h}_\tau - h_\tau)^2 \right\}, \quad (7)$$

где N - объем представительной выборки образцов;
 - неотрицательная функция веса индивидуального измерения / при равнозначных измерениях $p(h_\tau) = \text{const}$ и можно принять $p(h_\tau) = 1$ /. Оценка \hat{h} действительного значения контролируемого параметра h согласно

(7) является эффективной, поскольку погрешности много-частотного измерения - результат совместного действия большого числа случайных факторов, каждый из которых вносит относительно небольшой вклад (центральная предельная теорема).

Минимизация квадратичной формы (7) в векторном представлении равносильна минимизации нормы вектора отклонений:

$$\bar{\varepsilon} = \sum_{k=0}^m b_k \bar{U}_k - \bar{h}, \quad (k=0,1,\dots,m) \quad (8)$$

где $\bar{h} = (h_1, \dots, h_N)$ - вектор действительных значений контролируемого параметра выборки; $\bar{U}_0 = (1, \dots, 1)$ - фиктивный вектор; $\bar{U}_k = (U_{k1}, \dots, U_{kN})$ - вектор сигналов всей совокупности образцов на k -ой частоте ($k=1, \dots, m$); $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_\tau, \dots, \varepsilon_N)$, где $\varepsilon_\tau = \hat{h}_\tau - h_\tau$ ($\tau=1, \dots, N$) и $|\bar{\varepsilon}|^2 = Q_\varepsilon$.

Необходимым и достаточным условием минимума $|\bar{\varepsilon}|$ является

$$(\bar{\varepsilon}, \bar{U}_k) = 0, \quad (k=0,1,\dots,m). \quad (9)$$

При этом получим систему $(m+1)$ нормальных уравнений относительно неизвестных параметров обучения b_0, b_1, \dots, b_m :

$$b_0 (\bar{U}_k, \bar{U}_0) + b_1 (\bar{U}_k, \bar{U}_1) + \dots + b_m (\bar{U}_k, \bar{U}_m) = (\bar{U}_k, \bar{h}), \quad (10)$$

$(k=0,1,\dots,m).$

Определителем системы (10) является определитель Грама - $G(\bar{U}_0, \bar{U}_1, \dots, \bar{U}_m)$, вычислив который, решим систему относительно b_0, b_1, \dots, b_m и затем найдем вектор отклонений $\bar{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_\tau, \dots, \varepsilon_N)$ для оптимального сочетания m частот из M (M - количество дискретных частот исследуемого диапазона, для которых получены АФЧ образцов. $M > m$).

В матричной записи система уравнений (10):

$$U U^* B = U H \quad (11)$$

имеет решение в виде:

$$B = (UU^*)^{-1}UH. \quad (12)$$

Откуда найдем $Q_\varepsilon = |\bar{\varepsilon}|^2$:

$$Q_\varepsilon = H^*H - B^*UH. \quad (13)$$

где U^* , B^* , H^* - соответственно транспонированные матрицы U , B и H .

Зная Q_ε и число степеней свободы $\nu = N - m - 1$, определим остаточную дисперсию S_ε^2 , характеризующую абсолютную погрешность многочастотного измерения глубины наклепа исследуемой выборки образцов,

$$S_\varepsilon^2 = \frac{Q_\varepsilon}{\nu}. \quad (14)$$

Считая, что исследуемая выборка является достаточно представительной, вычислим σ^2 - дисперсию для генеральной совокупности контролируемых объектов

$$\sigma^2 = \frac{\nu}{\chi^2} S_\varepsilon^2, \quad (15)$$

где χ^2 (хи-квадрат) соответствует χ^2 - распределению дисперсии выборки относительно генеральной дисперсии σ^2 (распределение К.Пирсона).

Из статистических таблиц найдем значение вероятности p , при которой $\chi^2 \geq \chi_p^2$ соответствует числу степеней свободы ν , т.е. определим доверительный интервал и надежность σ . Затем, принимая доверительную вероятность интервала погрешностей $p = 0,95$, получим предполагаемую абсолютную погрешность многочастотного измерения глубины наклепа для генеральной совокупности в интервале $\pm 2\sigma$.

Более удобным для практики является выражение относительной нормированной погрешности измерения ε :

$$\varepsilon = \frac{|\bar{\varepsilon}|}{|h|}, \quad (16)$$

широко используемое в вычислительной технике для оценки погрешности множества величин. Достоверность интервала погрешностей $\pm \varepsilon$ соответствует $p = 0,68$.

Применение многочастотного (многомерного) метода измерения глубины наклепа дает возможность увеличить полезную информацию в выходном сигнале измерительной схемы. Информационной характеристикой используемой совокупности рабочих частот при однопараметровом контроле является коэффициент детерминации D . Коэффициент детерминации представляет собой оценку взаимосвязи выходного многомерного сигнала и контролируемого параметра, которая определяется отношением дисперсии контролируемого параметра на поверхности отклика к полной дисперсии действительных значений параметра:

$$D = \frac{S^2\{h\} - S_\varepsilon^2}{S^2\{h\}}, \quad (17)$$

где $S^2\{h\}$ - дисперсия действительных значений параметра.

Информационная способность используемой совокупности частот тем выше, чем ближе D к 1.

В практике неравнорушающего контроля, как правило, приходится иметь дело с многопараметровыми объектами и при измерении одного из них, положим, глубины наклепа (однопараметровый контроль), естественно возникает вопрос: возможно ли при неизменной совокупности частот многочастотного устройства проводить одновременно измерения нескольких интересующих нас параметров объекта, например: степени наклепа металла в слое, глубины залегания остаточных сжимающих напряжений, площади эпюра, твердости и других важных характеристик качества упрочнения. Многопараметровый контроль, в данном смысле этого слова, также связан с необходимостью подавления влияния случайных вариаций мешающих факторов: макро- и микрогеометрии поверхности контролируемого изделия, структурн и химического состава металла, качества термиче-

ской и механической обработки.

В отличие от однопараметрового контроля (глубины наклепа), когда поиск оптимальных совокупностей частот производится комбинационным перебором отдельных сочетаний частот с целью найти удачное минимальное сочетание, при многопараметровом контроле оптимальной совокупностью являются базисные частоты, т.е. те m частот из M , векторы которых образуют полный базис в подпространстве сигналов и определяют его размерность.

Полноту базиса, образуемого совокупностью m частот из M , можно характеризовать объемом $V_{2(m+1)}$ $(m+1)$ -мерного гиперпараллелепипеда, построенного на нормированных векторах сигналов, при добавлении произвольной $(m+1)$ -ой частоты из M :

$$V_{2(m+1)} = \sqrt{G(\bar{U}_1, \dots, \bar{U}_k, \dots, \bar{U}_m, \bar{U}_{m+1})}, \quad (18)$$

где $G(\dots)$ - определитель Грама нормированных векторов сигналов $\bar{U}_k = (U_{k1}, \dots, U_{k2}, \dots, U_{kn})$, $(k=1, \dots, m, m+1)$. Критерий оценки сочетания m частот по $V_{2(m+1)}$ может быть интерпретирован как характеристика информационной способности любой прибавляемой $(m+1)$ частоты из M к заданной совокупности.

Определив, таким образом, базисные частоты, можно рассчитать параметры обучения и погрешности многочастотного измерения при многопараметровом контроле.

В матричной записи система уравнений относительно параметров обучения:

$$U_{\Sigma} U_{\Sigma}^* B = U_{\Sigma} X^*, \quad (19)$$

где U_{Σ} - матрица сигналов базисных частот, X^* - транспонированная матрица контролируемых параметров представительной выборки образцов.

Откуда матрица параметров обучения:

$$B = (U_{\Sigma} U_{\Sigma}^*)^{-1} U_{\Sigma} X^*. \quad (20)$$

Погрешности измерения параметров $\bar{X} = (X_1, \dots, X_i, \dots, X_n)$ рассчитываются аналогично случаю однопараметрового контроля.

В соответствии с разработанной методикой на ЭВМ "Урал-2" по критерию (18) были рассчитаны оптимальные (базисные) частоты для многочастотного измерения различных качественных характеристик изделий из стали 30ХГСА, наклепанных центробежно-шариковым способом (табл.1).

Таблица 1

№	Частоты, кгц	Объем гиперпараллелепипеда V_2
1	1; 2	1,0
2	1; 2; 10	0,42
3	1; 2; 10; 20	0,11
4	1; 2; 10; 20; 16	0,0075
5	1; 2; 10; 20; 16; 7	0,0000084

Как видно из таблицы 1, размерность подпространства сигналов (количество базисных частот) практически не превышает четырех. (Информативность прибавляемой частоты относительно заданной совокупности частот тем выше, чем V_2 ближе к 1).

П. ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МНОГО-ЧАСТОТНОГО КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ НАКЛЕПА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Экспериментальные исследования наиболее распространенных современных методов измерения глубины наклепа: метода рекристаллизационного отжига, микротвердости и метода получения эпюры остаточных макронапряжений, с

целью выявления точного и объективного эталонного метода для разрушающего контроля глубины наклепа в представительных выборках образцов исследуемых марок сталей 30ХГСА и 40ХНМА показали, что их применение не позволяет получить результаты удовлетворительной повторяемости и достоверности.

В связи с этим автором была разработана эффективная методика электромагнитного измерения глубины наклепа стальных изделий при послойном электрохимическом травлении наклепанной поверхности с периодическим контролем поверхностной структуры металла накладным электромагнитным датчиком.

Исследования показали, что для представительных выборок образцов, имеющих различные технологические характеристики: вариации химсостава в пределах допуска, вариации режимов термообработки (сталь 30ХГСА - $t_{зак} = 870 \pm 10^\circ\text{C}$, $t_{отп.} = 570 \pm 30^\circ\text{C}$, твердость HRC = 30±35,5 ед.; сталь 40ХНМА - $t_{зак.} = 950 \pm 30^\circ\text{C}$, $t_{отп.} = 570 \pm 30^\circ\text{C}$, твердость HRC = 33,5 ± 36,5 ед.),

вариации режимов механической обработки (шлифования) и наклепывания центробежно-шариковым способом при различных технологических натягах упрочнителя ($e = 0,05 \pm 0,25$ мм), глубина наклепанного слоя составляет для стали 30ХГСА - 270±520 мк, для стали 40ХНМА - 250±460 мк. Параллельно с измерением глубины наклепа электромагнитным методом для образцов были получены эпюры остаточных напряжений 1-го рода. Установлено, что для всей совокупности образцов обеих марок стали (более 50 штук) глубина наклепанного слоя в 1,1±1,8 раза превышает глубину распространения остаточных сжимающих напряжений 1-го рода. Статистическая обработка результатов показала, что коэффициент корреляции между глубиной наклепа и глубиной залегания остаточных сжимающих напряжений в наклепанных образцах (размеры образцов 20x70x150 мм) составляет $R = 0,72$ для стали 30ХГСА и $R = 0,73$ для стали 40ХНМА, т.е. примерно 50% вариаций ($D = R^2 \cong 0,5$)

глубины залегания остаточных сжимающих макронапряжений связаны с глубиной наклепа. Установлено, что глубина наклепа практически прямо пропорциональна величине технологического натяга упрочнителя при наклепывании, однако эта связь корреляционная, вследствие влияния других технологических и структурных факторов.

Следует заметить, что весьма перспективным для практики поверхностного упрочнения наклепыванием является исследование электромагнитного разрушающего метода, как самостоятельного и более универсального метода измерения глубины наклепа стальных изделий, при непосредственной его связи с натурными испытаниями деталей на усталость.

В работе представлен анализ влияния эталонов на точность многочастотных измерений при снятии АФЧХ и при неразрушающем контроле глубины наклепа приборами. Установлено, что наилучшим эталоном является тот, величина контролируемого параметра и структурные характеристики которого приближаются к средним значениям параметров и характеристик изделий выборки, т.е. при котором наблюдаются минимальные по абсолютным значениям математические ожидания (средние) выходных сигналов.

По предложенному выше алгоритму на ЭВМ "Урал-2" были рассчитаны оптимальные совокупности частот, параметры обучения и предполагаемые погрешности многочастотного (многомерного) метода измерения при неразрушающем контроле глубины наклепа изделий из сталей 30ХГСА и 40ХНМА и линейной обработке информации, поступающей с электромагнитного датчика.

Относительная нормированная погрешность многочастотного измерения глубины наклепа на оптимальной совокупности m частот из M равна

$$\varepsilon = \inf \min | \beta_0 \bar{U}_0 + \sum [\beta_k \bar{U}_k + \beta_k^{(i)} \bar{V}_k] - \bar{h} |, \quad (22)$$

при $m < M$ ($m=1,2,\dots$)
 где $\bar{U}_0, \bar{U}_k, \bar{V}_k$ - нормированные векторы сигналов (ве-

\bar{h} - действительные и мнимые составляющие), нормированный вектор действительных значений глубины,
 $b_0, b_k, b_k^{(j)}$ - параметры обучения.

Результаты расчетов в сокращенном виде представлены в табл.2.

Таблица 2

№	Марка стали	Вариант	Оптимальные сочетания частот, кгц	Относительная нормированная погрешность ϵ	Коэффициент детерминации D
1	30ХГСА	1	5	0,078	0,77
2	30ХГСА	1	10; 18	0,059	0,87
3	30ХГСА	1	3; 10; 18	0,040	0,94
4	30ХГСА	1	3; 5; 10; 18	0,036	0,96
5	30ХГСА	1	2; 5; 10; 14; 18	0,028	0,97
6	40ХНМА	1	12	0,104	0,62
7	40ХНМА	1	3; 40	0,085	0,75
8	40ХНМА	1	2; 12; 40	0,083	0,76
9	40ХНМА	1	2; 12; 20; 40	0,083	0,76
10	30ХГСА	П	20	0,085	0,73
11	30ХГСА	П	3; 20	0,072	0,80
12	30ХГСА	П	3; 12; 20	0,067	0,84
13	30ХГСА	П	3; 12; 18; 20	0,061	0,86
14	30ХГСА	П	3; 5; 12; 18; 20	0,056	0,88

(1 вариант соответствует контролю при зазоре между датчиком и деталью, обусловленном естественными микронеровностями наклепанной поверхности 50±90 мк.

П вариант - при дополнительном искусственном зазоре до 100 мк).

При достоверности $P = 0,95$ интервал погрешностей не

превышает $\pm 2 \epsilon$.

Для повышения точности многочастотного измерения при линейной обработке сигналов датчика необходимо увеличивать количество рабочих частот, что значительно усложняет и снижает надежность многочастотных приборов. Помимо этого повышение точности измерения при линейной обработке сигналов ограничивается вследствие необратимой потери части информации в выходном многомерном измерительной схеме. В связи с этим автором предложен и разработан метод многочастотного измерения при нелинейном формировании многомерного сигнала. Контролируемый параметр (глубина наклепа) представляется более естественной гладкой поверхностью отклика, в данном случае поверхностью второго порядка:

$$\hat{h} = b_0 + \sum_k^m [b_k U_k + b_k^{(j)} V_k] + \sum_k^m [b_{kk} U_k^2 + b_{kk}^{(j)} V_k^2] + \frac{1}{2} \sum_{k \neq l}^m b_{kl} U_k U_l + \frac{1}{2} \sum_{k \neq l}^m b_{kl}^{(j)} V_k V_l + \frac{1}{2} \sum_{k, l}^m b_{kl}^{(e)} U_k V_l. \quad (23)$$

При моделировании процесса измерения на ЭВМ "Раздан-2" для случая контроля глубины наклепа стали 30ХГСА (1 вариант) было установлено, что при ограниченном количестве частот (двух-трех) погрешность измерения снижается более, чем в 2 раза (таблица 3).

Таблица 3

№	Марка стали	Вариант	Оптимальные сочетания частот, кгц	Погрешность ϵ
1	30ХГСА	1	5	0,077
2	30ХГСА	1	10 ; 18	0,027
3	30ХГСА	1	7; 10; 18	0,022

В технике неразрушающих испытаний материалов и изделий весьма важным элементом является датчик. При многочастотном контроле электромагнитный датчик приме-

няется для возбуждения и регистрации возмущений электромагнитного поля при взаимодействии с контролируемым объектом и служит чувствительным преобразователем информации - неэлектрических величин контролируемых и мешающих факторов объекта в многомерные электрические сигналы.

В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований накладных датчиков с магнитопроводами различных конструкций и материалов. Установлены наиболее приемлемые форма и материал сердечников, основные размеры и схема соединения датчиков для много-частотного измерения глубины наклепа в конкретных условиях.

Теоретический анализ накладного датчика с магнитопроводом броневго типа показал, что существует реальная возможность частотного и амплитудно-фазового разделения информации при независимом электромагнитном измерении электропроводности σ и магнитной проницаемости μ ферромагнетиков, поскольку их передаточные коэффициенты являются линейно-независимыми:

$$\left. \begin{aligned} \dot{a}_{z\sigma} &= \frac{\pi N^2}{b\sigma} \left(\frac{\chi}{\sigma} \right) \frac{\partial \sigma}{\partial \chi} \\ \dot{a}_{z\mu} &= \dot{a}_{z\sigma} + \frac{\pi N^2 \chi}{b\sigma} \end{aligned} \right\}, \quad (21)$$

где b - размер базы датчика, N - число витков обмотки; $\chi = j\omega\sigma\mu b^2$ - обобщенный параметр; ω - частота; σ - функция обобщенных параметров.

В результате расчета $\dot{a}_{z\sigma}$ и $\dot{a}_{z\mu}$ для стали ($\sigma = 3,85 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$, $\mu_z = 80$) в диапазоне частот $1 \div 10^5$ гц установлено, что примерно на частоте 50 кгц $|\dot{a}_{z\sigma}| = |\dot{a}_{z\mu}|$, ниже 50 кгц $|\dot{a}_{z\sigma}| < |\dot{a}_{z\mu}|$, выше - $|\dot{a}_{z\sigma}| > |\dot{a}_{z\mu}|$. Угол между векторами $\dot{a}_{z\sigma}$ и $\dot{a}_{z\mu}$, равный 180° при 100 кгц, с понижением частоты уменьшается до 90° . Выше 100 кгц угол между $\dot{a}_{z\sigma}$ и $\dot{a}_{z\mu}$ остается постоянным и равным 180° . Установлено, что в

интервале $0,1 \div 1$ кгц имеется частота, на которой $\text{Re}(\dot{a}_{z\sigma}) = 0$. Полученные соотношения для датчика с магнитопроводом существенно отличаются от результатов, имеющих место при рассмотрении процесса с позиций плоской электромагнитной волны.

Среди прочих материалов, представленных в данной работе, следует отметить разработку методик получения АФЧХ в звуковом и ультразвуковом диапазоне частот. Применительно к снятию АФЧХ на ультразвуковых частотах автором был разработан способ фазовых измерений напряжений с помощью трех вольтметров. В работе приводится подробный анализ погрешностей измерения фазы напряжений тремя вольтметрами и даются рекомендации по их снижению.

Ш. ПРИБОР ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ГЛУБИНЫ НАКЛЕПА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработан прибор для непрерывного неразрушающего контроля глубины наклепанного слоя в стальных изделиях. Прибор представляет собой двухчастотное электронное устройство (рабочие частоты 3 и 20 кгц), осуществляющее автоматическую линейную обработку информации, поступающей в виде четырехмерных сигналов с электромагнитного датчика. Прибор предназначен для контроля глубины наклепа стальных изделий (до 550 мк), упрочненных центробежно-шариковым способом, и позволяет отстраиваться от влияния мешающих факторов: небольших изменений зазора (кривизны) между датчиком и изделием (до 200 мк) и неоднородностей структуры металла в наклепанном слое.

Измеренная величина глубины наклепа контролируемого изделия по прибору:

$$\hat{h} = b_0 + b_1 U_1 + b_1^{(j)} V_1 + b_2 U_2 + b_2^{(j)} V_2, \quad (24)$$

где U_1, V_1 и U_2, V_2 - соответственно, веществен-

ная и мнимая составляющие комплексного сигнала датчика на частотах f_1 и f_2 ;
 $b_0, b_1, b_1^{(j)}, b_2, b_2^{(j)}$ - параметры обучения прибора. В приборе линейная амплитудно-фазовая обработка двух-частотного сигнала реализуется по схеме:

$$\hat{h} = b_0 + m_1(U_1 \cos \alpha_1 + V_1 \sin \alpha_1) + m_2(U_2 \cos \alpha_2 + V_2 \sin \alpha_2), \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{где } m_1 &= \sqrt{b_1^2 + b_1^{(j)2}} ; & m_2 &= \sqrt{b_2^2 + b_2^{(j)2}} ; \\ \cos \alpha_1 &= \frac{b_1}{m_1} ; & \cos \alpha_2 &= \frac{b_2}{m_2} ; \\ \sin \alpha_1 &= \frac{b_1^{(j)}}{m_1} ; & \sin \alpha_2 &= \frac{b_2^{(j)}}{m_2} . \end{aligned}$$

Блок-схема прибора представлена на рис.1. Генераторы синусоидальных напряжений 1 и 2 выполнены на частотах $f_1 = 3$ кГц и $f_2 = 20$ кГц. Напряжения с генераторов подаются в сумматор 3, где происходит формирование двух-частотного сигнала и от которого питается стабилизированным током дифференциальный датчик 6. Напряжения подаются также на фазорегуляторы 4 и 5, на выходе которых можно получить напряжения, сдвинутые по фазе от 0 до 180° . Выходной двухчастотный сигнал с измерительной обмотки датчика усиливается в 7 и подается на синхронные детекторы 8 и 9. В результате синхронного детектирования на выходе детекторов получим, соответственно,
 на 8 - $U_1 \cos \alpha_1 + V_1 \sin \alpha_1$ и
 на 9 - $U_2 \cos \alpha_2 + V_2 \sin \alpha_2$,
 где α_1 и α_2 - фазы опорных напряжений. Далее выходные сигналы с синхронных детекторов умножаются на коэффициенты m_1 и m_2 в 10 и 11 и алгебраически суммируются в 12. В измерительном устройстве 13 вносится поправка на постоянную составляющую b_0 и по индикатору производится отсчет глубины наклепа. (Соотношение сигналов на частотах f_1 и f_2 регулируются также величиной составляющих тока в датчике).

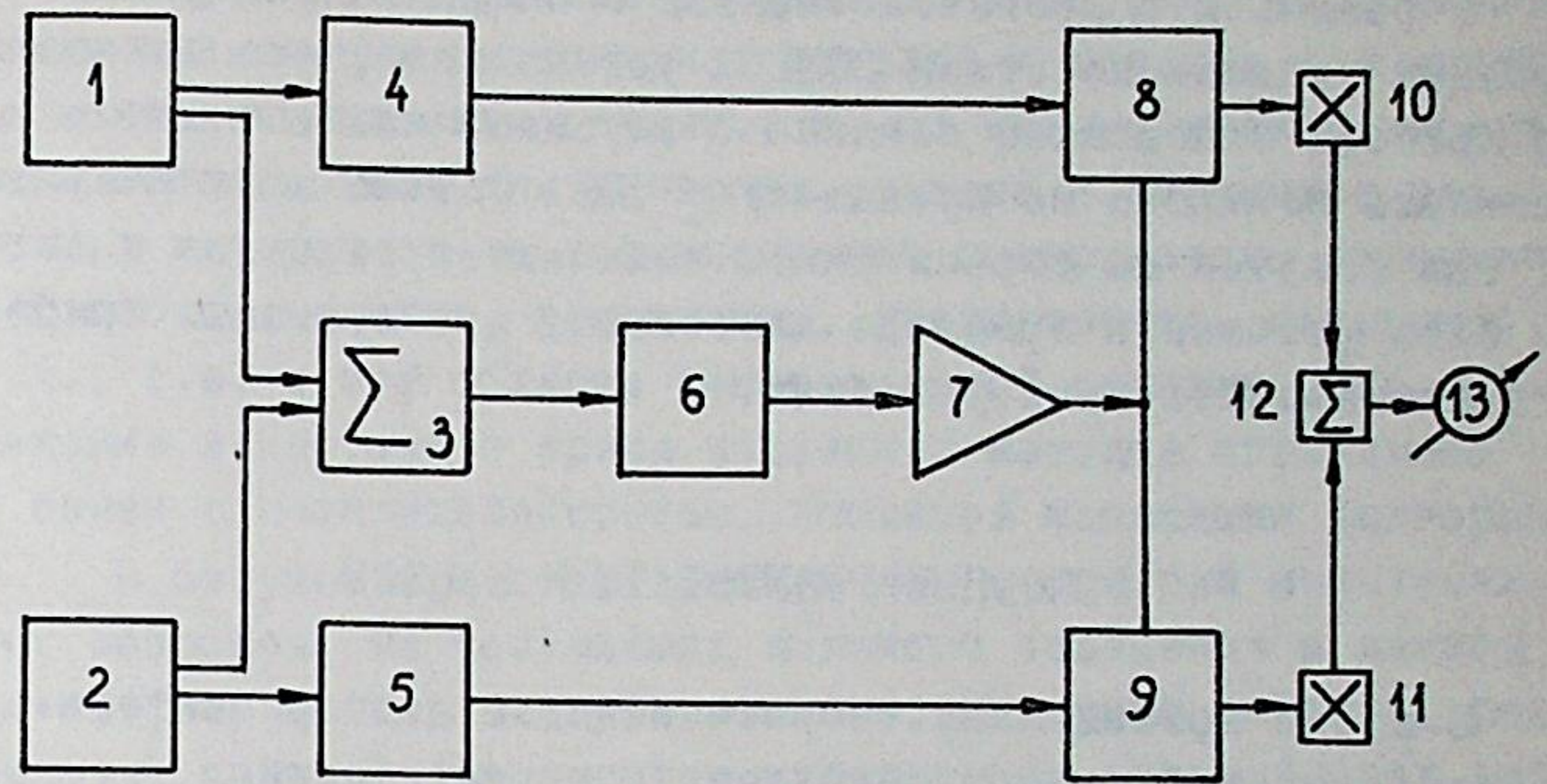


Рис. 1. Функциональная блок-схема прибора.

Расчетные параметры обучения прибора при контроле глубины наклепа стали 30ХГСА (П):

$$f_1 = 3 \text{ кГц} \quad \begin{cases} b_1 = 1,14, \\ b_1^{(j)} = 0,301, \\ \alpha_1 = 3^\circ 40'. \end{cases} \quad f_2 = 20 \text{ кГц} \quad \begin{cases} b_2 = 0,96, \\ b_2^{(j)} = 1,24, \\ \alpha_2 = 26^\circ 25'. \end{cases} \quad \frac{m_2}{m_1} = 0,11$$

(Указанные параметры соответствуют нормированным сигналам при равных составляющих тока возбуждения датчика на частотах f_1 и f_2). Коэффициент детерминации (информативность) данной совокупности частот: $D = 0,8$.

Относительная нормированная погрешность контроля глубины наклепа: $W_1 = \pm \epsilon \cdot 100\% \cong \pm 7\%$ ($p = 0,68$).

Относительная выборочная погрешность контроля:

$$W_2 = \pm \frac{2 S_\epsilon}{h_{\text{макс.}}} \cong \pm 12\% \text{ при } p = 0,95 \quad (S_\epsilon = 33 \text{ мк};$$

$h_{\text{макс.}} = 550 \text{ мк})$. Расчетная относительная погрешность для генеральной совокупности контролируемых объектов:

$$W_3 = \pm \frac{2 \sigma}{h_{\text{макс.}}} \cong \pm 16\% \text{ при } p = 0,95 \quad (\sigma = 44 \text{ мк};$$

$$h_{\text{макс.}} = 550 \text{ мк}).$$

В результате производственных испытаний прибора на образцах изделий из стали 30ХГСА установлено, что показания прибора однозначно связаны с глубиной наклепа и погрешность контроля не превышает $\pm 10\%$. Однако этот результат был получен на ограниченном количестве образцов и должен быть уточнен в процессе длительной эксплуатации прибора в производственных условиях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В итоге проведенных теоретических и экспериментальных исследований автором предложены и разработаны:

1. Метод непрерывного многочастотного (многомерного) измерения глубины наклепанного слоя ферромагнитных изделий без разрушения.

2. Методика определения с помощью ЭВМ оптимальных частот, параметров обучения и погрешностей многочастотного измерения при однопараметровом и многопараметровом электромагнитном контроле ферромагнитных изделий в условиях неопределенности относительно природы, количества и степени влияния мешающих факторов.

3. Метод многочастотного (многомерного) контроля ферромагнитных изделий при нелинейной обработке информации, получаемой от электромагнитного датчика.

4. Методика разрушающего электромагнитного измерения глубины наклепанного слоя стальных изделий при послойном электрохимическом травлении наклепанной поверхности. С помощью электромагнитного метода проведены исследования глубины наклепа конструкционных сталей 30ХГСА и 40ХНМА, упрочненных центробежно-шариковой обработкой при различных технологических режимах.

5. Прибор для непрерывного неразрушающего автоматического контроля глубины наклепа стальных изделий.

х х х

Полученные в работе результаты говорят о перспективности применения многомерных методов измерения для контроля состояния сложных объектов и, по нашему мнению, могут быть использованы для контроля состава и структуры различных материалов, в толщинометрии поверхностно упрочненных слоев (закалка, цементация, цианирование, покрытия) и т.д., т.е. в той области измерительной техники, где применение в настоящее время косвенных методов ограничено в связи с неопределенностью, вносимой мешающими факторами.

В будущем предстоит решить еще целый ряд немаловажных вопросов, не получивших должного освещения в данной работе; среди них следует назвать, в первую очередь, разработку оптимальных методов определения совокупности рабочих частот при исследовании непрерывного спектра выходных сигналов преобразователя, разработку оптимальных методов обучения многочастотных измерительных устройств; планирование эксперимента при составлении представительной последовательности образцов для исследования и обучения, исследование статистических характеристик распределения контролируемых изделий и т.д. Окончательное решение указанных проблем не является целью настоящей работы и послужит предметом дальнейших исследований.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. А.Н. ПЛАХОТНЮК. Исследование глубины наклепа ферромагнитных изделий без разрушения с помощью многочастотного электромагнитного метода. ИВУЗ, "Физика", 1968, № 10.
2. А.Н. ПЛАХОТНЮК. Измерение фазы на ультразвуковых частотах методом трех вольтметров. "Измерительная техника", 1968, № 3.
3. В.Г. ПУСТЫННИКОВ, А.Н. ПЛАХОТНЮК. Магнитоcontactный преобразователь для многочастотного электромагнитного контроля. "Измерительная техника", 1967, № 10.
4. С.Д. АНИСИМОВ, А.Н. ПЛАХОТНЮК, Г.И. ЧЕРКАССКИЙ. Прибор для электромагнитного контроля глубины наклепа стальных из-

изделий. Передовой научно-технический и производственный опыт. № 2-67-1493/162. ГОСИНТИ, М., 1967.

5. В. Г. ПУСТЫННИКОВ, С. С. СВЕТАШЕВ, Ю. В. ЛИХАЧЕВ, А. Н. ПЛАХОТНЮК. Датчики для контроля металлов вихревыми токами. "Авиационная промышленность", 1966, № 11.

6. В. Г. ПУСТЫННИКОВ, С. С. СВЕТАШЕВ, А. Н. ПЛАХОТНЮК, В. Г. ШИФРИН. Электронные устройства для электромагнитного контроля качества наклепа стальных изделий. Материалы семинара. Электромагнитные методы контроля. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, Москва, 1966.

7. С. Д. АНИСИМОВ, А. Н. ПЛАХОТНЮК, Г. И. ЧЕРКАССКИЙ. Многочастотный прибор для автоматического контроля глубины наклепанного слоя стальных изделий. Тезисы докладов. У Всесоюзная научно-техническая конференция по методам контроля качества материалов и изделий без разрушения. Москва-Свердловск, 1967.

По материалам диссертации сделаны доклады:

1. На семинаре "Электромагнитные методы контроля и их роль в обеспечении надежности изделий", Москва, 1966.
2. На "У Всесоюзной научно-технической конференции по методам контроля качества материалов и изделий без разрушения", Свердловск, 1967.

Подписано к печати 2. I. 1969 г.

Тираж 165 экз.

Печатных листов 1,5. Учетно-издательских листов 1,1.
ПК20002 Типография РВКИУ 1969 Заказ № 2