

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

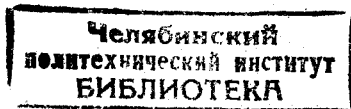
Челябинский политехнический институт  
имени Ленинского комсомола

Аспирант СТАСЯК ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОУПРУГОГО  
ДАТЧИКА КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Специальность 05.13.05 – "Элементы и технические  
средства управления и регулирования"

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Челябинск - 1973

Диссертационная работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок.

Научный руководитель – кандидат технических наук  
доцент С.Д.Левинтов.

Официальные оппоненты:

заслуженный деятель науки и техники РСФСР,  
доктор технических наук, профессор С.П.Лебедев;  
кандидат технических наук, доцент А.В.Баев.

Ведущее предприятие – Ашинский металлургический завод.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1973 г.

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1973 г.

в 15 часов в аудитории 244 на заседании Ученого Совета по присуждению ученых степеней энергетического и приборостроительного факультетов Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола (454044, Челябинск, 44, проспект имени В.И.Ленина, 76).

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета по присуждению ученых степеней энергетического и приборостроительного факультетов при Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола и прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА  
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК,  
ДОЦЕНТ



Н.А.КОРОЛЕВИЧ

Одним из решающих факторов успешного выполнения технико-экономических и социальных задач, поставленных XXIV съездом КПСС перед промышленностью, является осуществление комплексной автоматизации производственных процессов. Комплексная автоматизация требует создания ряда новых систем автоматики, в которые в качестве отдельных узлов входит датчики, контролирующие различные технологические величины, и в частности - крутящий момент на валах рабочих машин.

Весьма перспективными устройствами для измерения крутящего момента являются магнитоупругие измерители, обладающие высокой чувствительностью, простотой и надежностью конструкции. ✓

Целью данной работы является исследование влияния основных конструктивных параметров (количества полюсов возбуждения и связанной с ним величины полюсного деления, координат расположения измерительных полюсов относительно полюсов возбуждения) на вид выходных характеристик, чувствительность, габаритные размеры и вес кольцевого магнитоупругого датчика крутящего момента с удвоенным числом измерительных полюсов, а также анализ влияния величины намагничивающей силы обмотки возбуждения на поток в вале и чувствительность измерителя. ✓

Достижение вышеноставленной цели требует обстоятельного исследования электромагнитных процессов в вале, который является чувствительным элементом датчика.

Научной задачей работы является исследование электромагнитных полей в анизотропных средах, каковыми становятся ферромагнитные тела при приложении к ним механических напряжений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения и содержит 120 страниц машинописного текста, 70 рисунков, одного приложения, список использованной литературы из 87 наименований.

## Глава I. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКЦИИ МАГНИТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Представлен принцип действия и обзор различных конструкций магнитоупругих датчиков момента. В обзоре использованы материалы патентной и периодической отечественной и иностранной литературы.

Принцип действия магнитоупругих датчиков основан на использовании магнитоупругого эффекта — изменения магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием механических напряжений.

Физические основы явления магнитной упругости изложены в трудах С.В.Вонсовского, Я.С.Шура, Р.Бозорта, К.П.Белова и др.

В настоящее время имеется множество конструкций магнитоупругих датчиков крутящего момента, которые можно условно разбить на две группы: датчики, не имеющие явно выраженных полюсов (прецизионные, торсионные, с кольцевыми полюсами, с ферромагнитной лентой) и явнополюсные (дроссельные, трансформаторные, симметричные кольцевые и крестовые, несимметричные крестовые и кольцевые, кольцевые с удвоенным числом измерительных полюсов). Наибольшее распространение получили кольцевые магнитоупругие датчики.

На рис. 1а показан кольцевой магнитоупругий датчик крутящего момента с удвоенным числом измерительных полюсов, предложенный С.Д. Левинтовым и А.М.Борисовым в 1966 г., а на рис. 1б — представлена развертка датчика, демонстрирующая взаимное расположение полюсов возбуждения и измерительных.

Достоинствами кольцевого магнитоупругого датчика крутящего момента с удвоенным числом измерительных полюсов по сравнению с симметричным кольцевым датчиком фирмы **ASEA** является то, что при определенном расположении измерительных полюсов относительно полюсов возбуждения он имеет линейную выходную характеристику во всем диапазоне измеряемых моментов и не требует при измерении знакопеременных моментов фазочувствительного выпрямителя. К настоящему времени такие датчики разработаны при участии автора для валов с диаметрами от 45 до 760 мм и успешно эксплуатируются на ряде заводов страны.

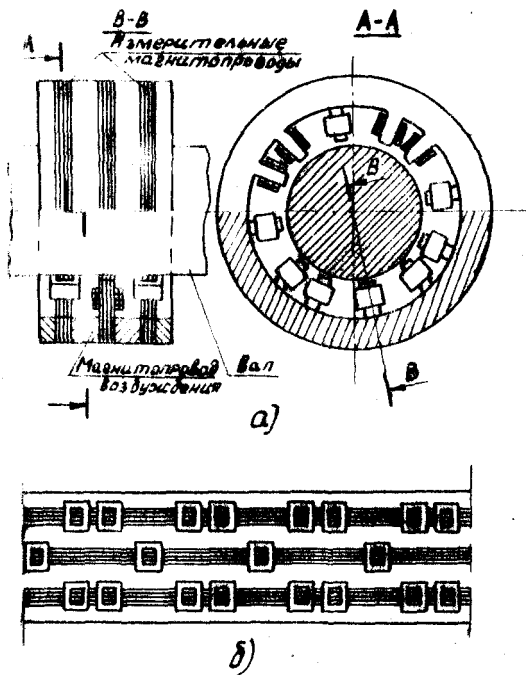


Рис. I

## Глава II. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВАЛЕ

Исследование влияния основных конструктивных параметров датчика на выходную характеристику измерителя требует четкого представления картины электромагнитного поля в вале как при приложении к нему крутящего момента  $M$ , так и при его отсутствии.

Аналитическое исследование электромагнитного поля в вале связано с серьезными математическими трудностями, которые вызваны следующими причинами:

1. Применяемые магнитоупругие датчики имеют весьма сложную геометрическую форму магнитной цепи.

2. Магнитная проницаемость вала даже при отсутствии момента на валу является непостоянной величиной и зависит от напряженности магнитного поля.

3. Питание катушек возбуждения датчика переменным током приводит к возникновению вихревых токов и поверхностному эффекту в вале.

4. При приложении внешних усилий вал в магнитном отношении становится анизотропным. В этом случае магнитная проницаемость вала может быть представлена симметричным тензором второго ранга, который при совмещении осей декартовой прямоугольной системы координат с системой главных осей тензора принимает следующий вид:

$$\bar{\mu} = \begin{vmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{vmatrix}.$$

Главные направления тензора магнитной проницаемости совпадают с главными направлениями тензора механических напряжений  $\bar{\sigma}$ .

С целью упрощения задачи расчета электромагнитного поля в вале были приняты следующие допущения:

1. Магнитная проницаемость магнитопровода возбуждения бесконечно превышает магнитную проницаемость граничащего с ним диэлектрика, электрическая проводимость магнитопровода равна нулю, реальная катушка возбуждения заменяется эквивалентным бесконечно тонким проводящим слоем той же длины и с той же н.с.

2. Магнитный поток втекает в вал только через торцевую поверхность полюсов возбуждения. Потoki выпучивания, которые появляются при наличии воздушного зазора между полюсами возбуждения и валом, учитываются эквивалентным увеличением диаметра полюса.

3. Измерительные полюса не искажают картину электромагнитного поля в вале.

4. Удельная электрическая проводимость вала  $\gamma$  не зависит от времени и постоянна во всех точках.

5. Магнитная проницаемость не зависит от напряженности магнитного поля и при  $M = 0$  одинакова для всех точек вала.

6. Поскольку радиус вала значительно больше глубины проникновения электромагнитной волны, а длина вала намного превышает длину датчика, задача расчета электромагнитного поля в вале сводится к задаче расчета поля в бесконечном проводящем полупространстве с плоской поверхностью раздела сред. Поле в этом полупространстве создается бесконечным количеством полюсов возбуждения чередующейся полярности, оси которых лежат в одной плоскости. Расстояние между осями соседних полюсов равно величине полюсного деления  $2a$  (рис. 2).

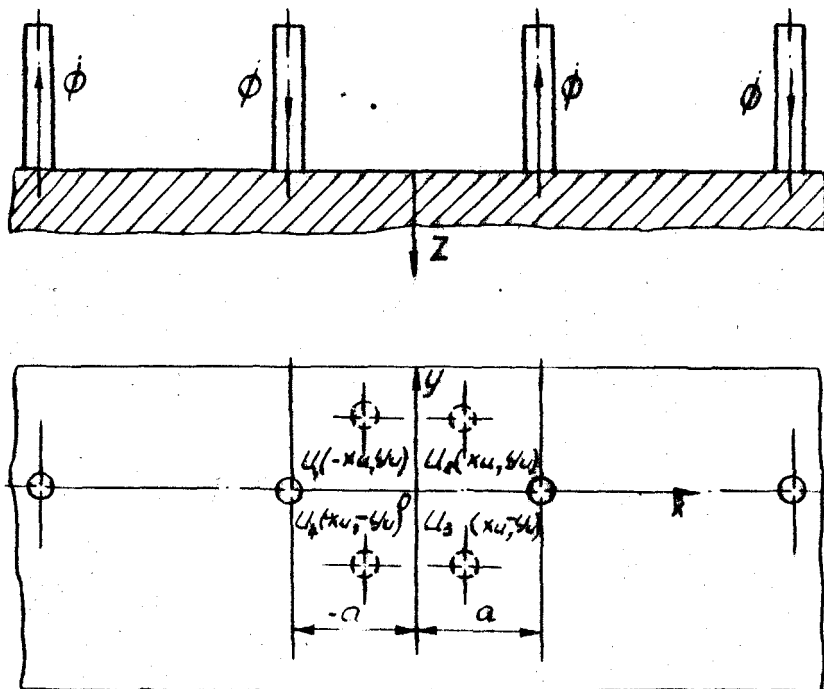


Рис. 2

7. Поскольку переменное во времени электромагнитное поле в вале распространяется только по его поверхности, можно считать, что главные значения тензора магнитной проницаемости целиком определяются механическими напряжениями на поверхности вала. Два главных направления тензора магнитной проницаемости лежат в плоскости, касательной к валу и являются функциями касательных напряжений  $\tau$ . Главное же значение тензора, имеющее направление по радиусу вала, не изменяется при приложении к валу крутящего момента.

8. Так как при той степени анизотропии, которая создается в валах рабочих машин вследствие приложения крутящего момента, потоки рассеяния малы, в расчете магнитного поля на поверхности вала составляющая вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ , перпендикулярная поверхности проводящего магнитно-анизотропного тела, принята равной нулю.

Для проводящей изотропной среды при синусоидальном во времени изменении поля с частотой  $\omega$  дифференциальные уравнения проекций вектора магнитной индукции в цилиндрической системе координат имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \dot{B}_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{B}_r}{\partial r} - \frac{\dot{B}_r}{r^2} + \frac{\partial^2 \dot{B}_r}{\partial z^2} &= j\omega \chi_M \dot{B}_r, \\ \frac{\partial^2 \dot{B}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{B}_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 \dot{B}_z}{\partial z^2} &= j\omega \chi_M \dot{B}_z, \\ \dot{B}_\varphi &= 0. \end{aligned} \right\} (I)$$

Здесь и ниже  $\dot{A}$  обозначает комплексную амплитуду синусоидально изменяющейся величины  $A \sin(\omega t + \varphi)$ .

При втекании потока  $\Phi$  через удлиненный полюс с диаметром  $d$  и соблюдении условий:

$$\left. \begin{aligned} \dot{B}_r &\rightarrow 0 \quad \text{при } z \rightarrow \frac{d}{2} \text{ и } r \rightarrow \infty, \\ \dot{B}_z &= 0 \quad \text{при } r > \frac{d}{2} \text{ и } z = 0, \\ \dot{B}_z &\rightarrow 0 \quad \text{при } z \rightarrow \frac{d}{2} \text{ и } r \rightarrow \infty, \end{aligned} \right\}$$



а также при постоянстве составляющей  $\dot{B}_z$  по всей площади круга касания полуса с проводящим полупространством решение уравнений (I):

$$\dot{B}_z = \frac{2\dot{\Phi}}{\pi d} \int_0^{\infty} J_1\left(\frac{d}{2}\beta\right) \cdot J_0(r\beta) e^{-z\sqrt{j\omega\gamma M + \beta^2}} d\beta, \quad (2)$$

$$\dot{B}_r = \frac{2\dot{\Phi}}{\pi d} \int_0^{\infty} \frac{J_1(d/2 \cdot \beta)}{\beta} \cdot J_1(r\beta) e^{-z\sqrt{j\omega\gamma M + \beta^2}} d\beta, \quad (3)$$

где  $J_1(\dots)$ ,  $J_0(\dots)$  - функции Бесселя первого и нулевого порядка;

При  $Z = 0$  и  $r > \frac{d}{2} > 2,5 \cdot \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma M}}$  - вещественная величина.

$$\dot{B}_r = \frac{\dot{\Phi}}{2\pi r} \sqrt{j\omega\gamma M}. \quad (4)$$

Следовательно, на поверхности проводящего изотропного полупространства вне круга касания полуса с этим полупространством поле подобно полю заряженной оси с линейной плотностью  $Q$ . В данном случае роль  $Q$  играет  $\dot{\Phi} \sqrt{j\omega\gamma M}$ .

Используя допущение 8 и решение (4), будем считать, что поле на поверхности проводящего магнитно-анизотропного полупространства при уединенном полюсе возбуждения подобно полю бесконечно длинной заряженной оси в анизотропной среде с линейной плотностью  $Q$ . В данном случае роль  $Q$  будет играть  $\dot{\Phi} \sqrt{j\omega\gamma \sqrt{M_{x_1, M_{y_1}}}}$ , где  $M_{x_1}$  и  $M_{y_1}$  главные значения тензора магнитной проницаемости.

При совмещении прямоугольной декартовой системы координат  $(x_1, y_1)$  с главными направлениями тензора магнитной проницаемости дифференциальное уравнение для потенциала плоскопараллельного поля в анизотропной среде имеет следующий вид

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{M_{y_1}}{M_{x_1}} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y_1^2} = - \frac{\rho(x_1, y_1)}{M_{x_1}}, \quad (5)$$

где  $\rho(x_1, y_1)$  - удельная плотность заряда.

Методом разделения переменных получено решение дифференциального уравнения (5) для заряженной оси, находящейся внутри бесконечно длинной призмы при нулевых граничных условиях. Основываясь на этом решении путем удаления грани призмы в бесконечность получены решения уравнения (5) для заряженной оси

- а) находящейся внутри полуполосы,
- б) находящейся внутри полосы,
- в) находящейся над проводящей поверхностью,
- г) уединенной.

В последнем случае

$$\varphi = -\frac{Q}{4\pi\sqrt{\mu_{x1}\mu_{y1}}} \ln\left(\frac{\mu_{y1}}{\mu_{x1}}x_1^2 + y_1^2\right) + C_1, \quad (6)$$

где  $C_1$  - постоянная интегрирования.

Методом наложения с использованием формулы (6) получено решение дифференциального уравнения (5) для бесконечной последовательности равных по величине и противоположных по знаку заряженных осей в анизотропной среде

$$\varphi = -\frac{Q}{4\pi\sqrt{\mu_{x1}\mu_{y1}}} \ln \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi\beta_1}{2\alpha}y + \sin \frac{\pi}{2\alpha}(x - \beta_2 y)}{\operatorname{ch} \frac{\pi\beta_1}{2\alpha}y - \sin \frac{\pi}{2\alpha}(x - \beta_2 y)}, \quad (7)$$

где

$$\beta_1 = \frac{\sqrt{\mu_{y1}\mu_{x1}}}{\mu_{y1} \cos^2 \alpha + \mu_{x1} \sin^2 \alpha}; \quad (8)$$

$$\beta_2 = \frac{(\mu_{y1} - \mu_{x1}) \sin 2\alpha}{2(\mu_{y1} \cos^2 \alpha + \mu_{x1} \sin^2 \alpha)}; \quad (9)$$

$\alpha$  - угол между осью  $x$  и главным направлением тензора магнитной проницаемости,  $\mu_{x1}$ .

Поскольку поле на поверхности проводящего магнитно-анизотропного полупространства при уединенном полюсе подобно полю заряженной оси с линейной плотностью  $Q$  в анизотропной среде, то поле на поверхности проводящего анизотропного полупространства

при бесконечном числе полюсов чередующейся полярности будет подобно полю в анизотропной среде, созданному бесконечной последовательностью равных по величине и противоположных по знаку заряженных осей.

При приложении к валу крутящего момента  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  соответственно равны

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{2 \sqrt{M_{x1} M_{y1}}}{M_{x1} + M_{y1}}, \\ \beta_2 &= \frac{M_{y1} - M_{x1}}{M_{x1} + M_{y1}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Выражение для потенциала магнитного поля на поверхности вала вне круга касания полюсов возбуждения принимает следующий вид:

$$\dot{\varphi} = - \frac{\Phi \sqrt{J \cos \gamma}}{4 J \sqrt{M_{x1} M_{y1}}} \ell_n \frac{\operatorname{ch} \frac{J \beta_1}{2 \alpha} y + \sin \frac{J}{2 \alpha} (x - \beta_2 y)}{\operatorname{ch} \frac{J \beta_1}{2 \alpha} y - \sin \frac{J}{2 \alpha} (x - \beta_2 y)}. \quad (11)$$

На рис. 3 приведена картина поля на поверхности вала при  $\frac{M_{y1}}{M_{x1}} = 0,6$ .

На основе выражения (II) получены соотношения, характеризующие зависимость выходного напряжения  $U'$  и чувствительности измерителя  $S'$  от расположения измерительных полюсов.

$$U' = \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{M_{x1} M_{y1}}} \left\{ |A_1| - |A_2| \right\}, \quad (12)$$

$$S' = \frac{\sqrt{M}}{\sqrt{M_{x1} M_{y1}}} \left\{ |A_1| - |A_2| \right\}, \quad (13)$$

где

$$A_1 = \ell_n \frac{\operatorname{ch} \frac{J \beta_1}{2 \alpha} y_u + \sin \frac{J}{2 \alpha} (x_u - \beta_2 y_u)}{\operatorname{ch} \frac{J \beta_1}{2 \alpha} y_u - \sin \frac{J}{2 \alpha} (x_u - \beta_2 y_u)}, \quad (14)$$

$$A_2 = \epsilon_n \frac{\operatorname{ch} \frac{\beta_1}{2\alpha} y_u - \sin \frac{\beta}{2\alpha} (x_u + \beta_2 y_u)}{\operatorname{ch} \frac{\beta_1}{2\alpha} y_u + \sin \frac{\beta}{2\alpha} (x_u + \beta_2 y_u)} \quad (15)$$

Здесь  $x_u$  и  $y_u$  абсолютные значения координат расположения измерительных полюсов  $I_1, I_2, I_3, I_4$  (рис. 2).

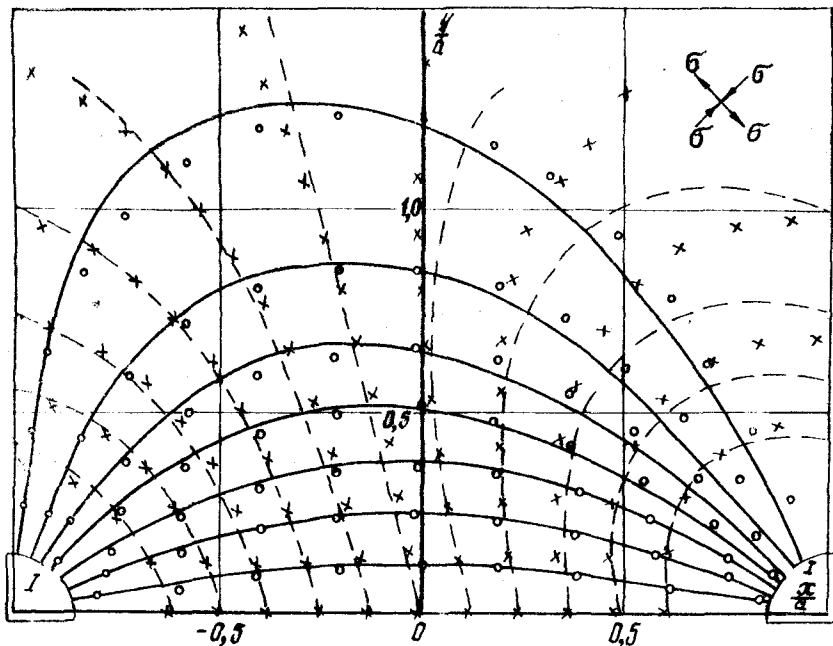


Рис. 3. Картина поля на поверхности вала

- |       |                       |                     |
|-------|-----------------------|---------------------|
| —     | — силовые линии       | } расчетные         |
| - - - | — потенциальные линии |                     |
| O     | — силовые линии       | } экспериментальные |
| X     | — потенциальные линии |                     |

Анализ соотношений (I2) - (I5) показал:

I. В большом диапазоне изменения касательных напряжений выходная характеристика датчика линейна. Нелинейность выходной характеристики, обусловленная измерительной схемой, появляется лишь при относительно больших значениях касательных напряжений. Чтобы обеспечить линейность выходной характеристики во всем диапазоне измеряемых  $\tau \leq \tau_n$ , необходимо, чтобы координаты измерительных полюсов удовлетворяли условию:

$$\frac{y_{11}}{x_{11}} \leq \left| \frac{M_{x1}(\tau_n) + M_{y1}(\tau_n)}{M_{y1}(\tau_n) - M_{x1}(\tau_n)} \right|. \quad (I6)$$

2. Чувствительность измерителя существенно зависит от расположения измерительных полюсов. Область, в которой чувствительность близка к максимальной, определяется следующими координатами:

$$0,1 \leq \frac{y_{11}}{x_{11}} \leq 0,4,$$

$$0,5 \leq \frac{y_{11}}{x_{11}} \leq 0,8.$$

### Глава III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВАЛЕ

Использование ряда допущений при теоретическом анализе поля в вале потребовало обстоятельной экспериментальной проверки и установления области применения полученных соотношений.

Экспериментальные исследования магнитного поля в вале и влияния конструктивных параметров на характеристики измерителя производились в лаборатории на специально изготовленном датчике, состоящем из вала, ярма, полюсов возбуждения и измерительных. Вал - полый, из низкоуглеродистой стали с наружным диаметром 210 мм и толщиной стенки 2 мм. Ярма - цилиндрическое, витое из листов электротехнической стали. Длина ярма 200 мм, наружный диаметр 360 мм, внутренний - 350 мм. Полюса возбуждения из листов электротехнической стали имеют высоту 65 мм и сечение близкое к кругу диаметром 24 мм. Измерительные полюса цилиндрические, дли-

ной 69 мм и диаметром 6 мм, изготовлены сплошными из низкоуглеродистой стали.

Конструкция исследованного датчика позволяет изменять число полюсов возбуждения  $P$  (а следовательно, и полюсное деление  $2\alpha$ ) и положение измерительных полюсов относительно полюсов возбуждения.

На вале создавался крутящий момент в пределах от 0 до 5,5 кНм, что соответствует  $T_m = 44 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$ .

При исследовании определялись:

- 1) распределение магнитного потока по длине вала,
- 2) напряженность магнитного поля на поверхности вала,
- 3) магнитные силовые линии и линии равного магнитного потенциала,
- 4) в.д.с., индуцированные в каждой измерительной обмотке.

Распределение магнитного потока по длине вала находилось по величине в.д.с. индукторных катушек, укладываемых в отверстия, просверленные в вале.

Магнитные силовые линии на поверхности вала определялись методом игольчатых электродов, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга и прижимаемых к поверхности вала.

Линии равного магнитного потенциала определялись с помощью жесткого магнитного потенциаломера с ферритовым сердечником.

Напряженность поля на поверхности вала измерялась с помощью жесткого магнитного потенциаломера и плоской катушки.

Все измерения велись по первой гармонике.

Выходное напряжение измерителя определялось по разности действующих значений в.д.с. измерительных обмоток, а чувствительность — как отношение выходного напряжения к величине касательных механических напряжений.

Эксперименты проводились при трех величинах полюсного деления  $2\alpha$  и трех значениях намагничивающей силы обмотки возбуждения обеспечивающих  $H_0 < H_m$ ;  $H_0 \approx H_m$ ;  $H_0 > H_m$  ( $H_m$  — напряженность магнитного поля, соответствующая максимальному значению магнитной проницаемости,  $H_0$  — напряженность магнитного поля в точке с координатами  $(0, 0)$ ).

На рис. 3 показан образец экспериментально ~~полученного~~ магнитного поля на поверхности вала при  $2a = 165$  мм,  $H_0 = 7,5$  А/см и  $\zeta = 44$  мГс.

На рис. 4 приведен пример зависимости чувствительности измерителя от расположения измерительных полюсов при  $2a = 165$  мм и трех значениях  $H_0$ .

На основе экспериментальных исследований установлено:

1. Картина поля на поверхности вала как при  $M = 0$ , так и при  $M \neq 0$  близка к картине поля бесконечной последовательности равных по величине и противоположных по знаку заряженных осей соответственно в изотропной и анизотропной среде.

2. Измерительные полюса не оказывают существенного влияния на магнитное поле в вале. Поэтому расчет поля в вале можно вести без учета наличия измерительных полюсов.

3. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля мало сказывается на распределении магнитного потока на валу. В диапазоне изменения  $H_m \leq H_0 \leq 2,5 H_m$  магнитный поток в вале можно рассчитывать по формуле, выведенной в гл. II для условия постоянства магнитной проницаемости. Погрешность расчета потока в вале составляет не более  $(5 + 7)\%$ . По величине этого потока может быть определена площадь поперечного сечения полюса возбуждения.

4. Во всем диапазоне изменения касательных напряжений  $\tau$  выходные характеристики измерителя линейны. Граница нелинейности выходных характеристик  $\tau_{нл}$  совпадает с расчетным значением по формуле (16).

5. Изменение числа полюсов возбуждения, а следовательно, и полюсного деления датчика момента практически не влияет на чувствительность измерителя. При конструировании датчиков величину полюсного деления нужно выбирать в пределах  $60 + 100$  мм. Дальнейшее увеличение полюсного деления приводит к повышению габаритов и веса датчика. Уменьшение же полюсного деления ниже 60 мм затрудняет размещение обмоток и усложняет изготовление датчика.

6. Если максимальные касательные напряжения таковы, что  $0,5 \leq \mu_{\max} / \mu_{\min} \leq 1$ , то область расположения измерительных полюсов, в которой обеспечивается линейность выходной характеристики изме-

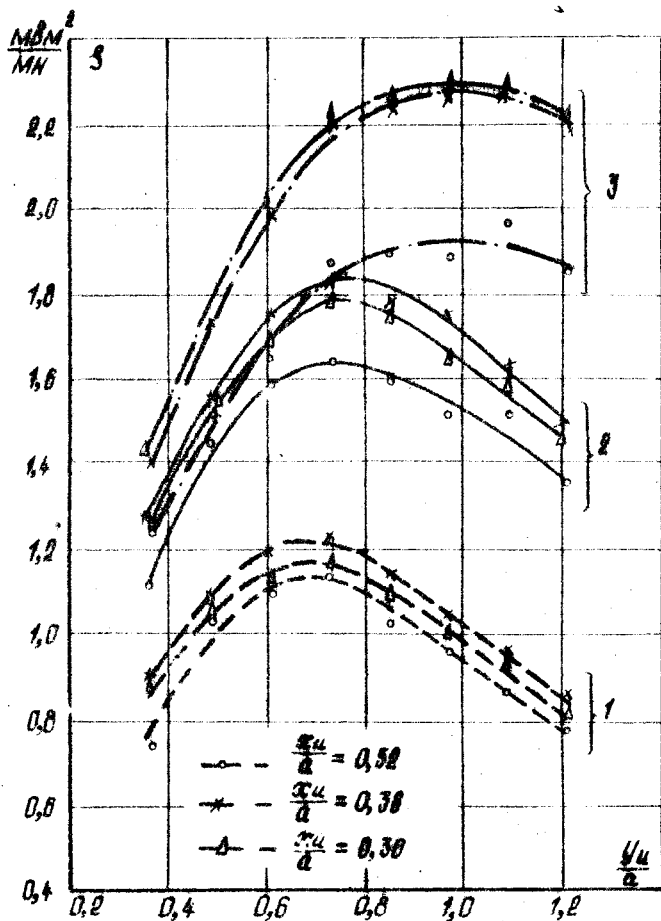


Рис. 4. Зависимость чувствительности измерителя от расположения измерительных полюсов: 1 -  $H_0 = 4,3$  А/см, 2 -  $H_0 = 7,5$  А/см, 3 -  $H_0 = 13,5$  А/см



рителя и его максимальная чувствительность ограничена прямыми:

$$0,3 < \frac{\alpha_u}{\alpha} < 0,4,$$

$$0,6 < \frac{\beta_u}{\beta} < 0,8.$$

Если же при максимальных касательных напряжениях в вале  $\frac{M_{\text{из}}}{M_{\text{из1}}} < 0,5$ , то для определения координат измерительных полюсов необходимо использовать формулу (16).

7. Для исключения влияния магнитоупругого гистерезиса на выходную характеристику измерителя необходимо, чтобы н.с. обмотки возбуждения обеспечивала  $H_0 > (1,5 + 1,8) H_M$ .

#### Глава IV. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОУПРУГИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Приведены описания конструкции датчиков и электрические схемы измерителей для валов с диаметрами 320 мм (МММ-320/ЗБ1), 500 мм (МММ-500/ЗБ1) и 220 мм (МММ-220/ЗБ2). Особенностью этих датчиков является то, что у них магнитопроводы возбуждения выполнены из листовой трансформаторной стали, а измерительные — "массивными", из низкоуглеродистой стали. Исследование измерителей производилось на шпинделях реверсивного прокатного стана "кварто-1500" Ашинского металлургического завода (МММ-320/ЗБ1), на промежуточном валу привода рельсобалочного стана "трио-800" Нижне-Тагильского металлургического комбината им. В.И.Ленина (МММ-500/ЗБ1), на шпинделях непрерывного трубопрокатного стана "30-102" Никопольского Южнотрубного металлургического завода (МММ-220/ЗБ2).

Целью исследования измерителей в производственных условиях являлось:

1. Изучение работы измерителей момента в тяжелых условиях эксплуатации.
2. Изучение влияния на выходные характеристики измерителей несимметрии воздушного зазора между торцами полюсов и валом.
3. Изучение влияния на чувствительность измерителя величины воздушного зазора между торцами полюсов датчика и валом.
4. Выяснение влияния скорости вращения вала на выходную характеристику измерителя.

5. Изучение влияния на динамические свойства измерителей частоты тока возбуждения.

Исследование показало:

1. Кольцевые знаочувствительные измерители крутящего момента могут быть использованы как надежное средство контроля нагрузок на валах рабочих машин, а также как средство технологической автоматизации.

2. Относительно небольшая несимметрия воздушного зазора между торцами полюсов и валом (до 1/4 от номинального значения) практически не сказывается на выходной характеристике измерителя.

3. Влияние скорости вращения вала на выходные характеристики измерителя за счет остаточного намагничивания участков вала практически не сказывается, если скорость вращения вала

$\omega_g \leq (0,5 + 0,6) \frac{4\pi f}{p}$  ( $f$  - частота тока возбуждения). Влияние же скорости вращения вала на выходные характеристики измерителей за счет вихревых токов, наводимых в нем при вращении, при достаточно точном изготовлении магнитной системы датчика несущественно.

4. Частоту питающего напряжения обмотки возбуждения датчика необходимо выбирать из условия обеспечения заданных динамических свойств измерителя. При частоте изменения момента на валу до 10 + 15 Гц удовлетворительными динамическими свойствами обладают измерители момента с возбуждением датчика током с частотой 50 Гц. При частотах изменения момента на валу до 100 + 150 Гц следует применять измерители момента с возбуждением током с частотой 400 Гц.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для решения большого числа практически важных задач проектирования магнитоупругих датчиков необходимо исследование магнитного поля в анизотропных средах. В работе получены для анизотропной среды аналитические выражения напряженности и потенциала поля бесконечно длинной заряженной оси, находящейся внутри прямоугольной призмы, внутри полуполосы, между двумя параллельными плоскостями, над проводящей плоскостью и уединенной.

На основе этих решений и принципа наложения получены аналитические соотношения для напряженности и потенциала поля в анизотропной среде, созданного бесконечной последовательностью равных по величине и противоположных по знаку заряженных осей, расположенных в одной плоскости на одинаковом расстоянии друг от друга.

2. На основании теоретических и экспериментальных исследований магнитного поля в вале, создаваемого обмоткой возбуждения кольцевого магнитоупругого датчика, установлено, что картина магнитного поля на поверхности вала как при приложении крутящего момента, так и при его отсутствии, близка к картине поля бесконечной последовательности равных по величине и противоположных по знаку заряженных осей соответственно в изотропной и анизотропной средах.

3. Методика и результаты анализа поля в анизотропном проводящем полупространстве могут быть использованы не только при кручении, но и при других видах нагружения вала, а также при анализе явлений в приставных магнитоупругих датчиках усилителей.

4. Исследования показали, что в диапазоне изменения напряженности магнитного поля  $H_M < H_0 < 2,5 H_M$ , магнитный поток в вале с погрешностью не выше  $(5 + 7) \%$  можно определить по формулам, выведенным для линейной среды.

5. В определенном диапазоне изменения касательных напряжений в вале выходные характеристики кольцевого измерителя момента с удвоенным числом измерительных полюсов линейны при любом расположении измерительных полюсов относительно полюсов возбуждения. Начиная с некоторого значения касательных напряжений, появляется нелинейность выходной характеристики измерителя, обусловленная особенностями применяемой измерительной схемы. Область расположения измерительных полюсов, исходя из условия линейности выходной характеристики измерителя во всем диапазоне изменения касательных напряжений, можно определить по выведенным в работе формулам.

6. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено, что область расположения измерительных полюсов, в которой чувствительность измерителя максимальна и выходная характеристика линейна, определяется следующими координатами:

$$0,3 \leq \frac{I_u}{\alpha} \leq 0,4,$$
$$0,6 \leq \frac{y_u}{\alpha} \leq 0,8.$$

7. Изменение полюсного деления кольцевого датчика практически не влияет на чувствительность измерителя, однако это существенно сказывается на весо-габаритных показателях датчика. С увеличением полюсного деления возрастают габаритные размеры и вес датчика. Уменьшение полюсного деления увеличивает число полюсов, а следовательно и усложняет конструкцию датчика. Оптимальной величиной полюсного деления является  $2\alpha = 60 + 100$  мм. При выборе  $2\alpha$  также должно быть соблюдено условие  $\omega \leq (0,5 + 0,6) \cdot \frac{45f}{P}$ .

8. Для исключения влияния магнитоупругого гистерезиса на выходную характеристику измерителя необходимо, чтобы н.с. обмотки возбуждения датчика обеспечивала напряженность магнитного поля

$H_0 \geq (1,5 + 1,8) H_M$ , но не выше, чем  $2,5 H_M$ . Повышение

$H_0 > 2,5 H_M$  приводит к значительному росту н.с. обмотки возбуждения, в то время как чувствительность измерителя практически не увеличивается.

9. Исследования, проведенные в производственных условиях, показали, что кольцевые магнитоупругие измерители момента являются весьма перспективными средствами измерения крутящего момента на вращающихся валах благодаря неподвижной установке, отсутствию контакта с валом, прочности и надежности конструкции датчиков. Такие измерители могут применяться для измерения не только медленно изменяющихся моментов, но и для измерения моментов, частота изменения которых составляет десятки герц.

Результаты работы докладывались на:

1. XII и XIII научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола, г. Челябинск, 1970 и 1972.

2. На научно-технической конференции по высокотемпературной и магнитоупругой тензометрии, г. Ленинград, 1971.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Измеритель моментов на шпинделях стана холодной прокатки. Бюллетень Черметинформация, № II, 1968 (в соавторстве с Левинтовым С.Д., Борисовым А.М.).

2. Знакочувствительный магнитоупругий измеритель момента. "Электричество", № 8, 1970 ( в соавторстве с Левинтовым С.Д., Борисовым А.М.).

3. Бесконтактные измерители момента на шпинделях реверсивного прокатного стана. Металлургическое оборудование (НИИИНФОРМТЭМАШ), № II, 1971 ( в соавторстве с Левинтовым С.Д., Борисовым А.М., Протасовым А.П.).

4. Применение магнитоупругих торсиометров для технологического контроля и автоматизации рабочих машин. В кн. "Высокотемпературная и магнитоупругая тензометрия". ЛДНТП, Л., 1971 ( в соавторстве с Левинтовым С.Д., Борисовым А.М., Протасовым А.П.).

5. Экспериментальное исследование влияния скорости на выходные характеристики магнитоупругих датчиков момента. В кн. "Исследование электрических машин и автоматизированных электроприводов". Сб. научных трудов ЧПИ № 69, Челябинск, 1970 ( в соавторстве с Левинтовым С.Д., Борисовым А.М.).

6. Экспериментальные частотные характеристики магнитоупругих датчиков момента. В кн. "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Сб. научных трудов ЧПИ № 80, Челябинск, 1970 ( в соавторстве с Борисовым А.М., Левинтовым С.Д., Протасовым А.П.).

7. Магнитоупругий торсиометр. В кн. "Высокотемпературная и магнитоупругая тензометрия". ЛДНТП, Л., 1971 ( в соавторстве с Борисовым А.М., Левинтовым С.Д., Протасовым А.П.).

8. Разработка и внедрение измерителей моментов на шпинделях стана "I400" Ашинского металлургического завода. Отчет по теме 67/4, ЧПИ, депонирован во ВНИИЦ, № гос. рег. 68 065 217, инв. № А 018 865, 1967.

9. Разработка и внедрение измерителей моментов на шпинделях стана "I500" Ашинского металлургического завода. Отчет по теме 69/4, ЧПИ, депонирован во ВНИИЦ, № гос. рег. 69 009 280, инв. № Б 054 313, 1969.

10. Разработка и внедрение магнитоупругого измерителя момента на валу рельсобалочного стана НТМК. Отчет по теме 68/84, ЧПИ, депонирован во ВНИИЦ, № гос.рег. 68 064 169, инв. № Б 100 288, 1969.

11. Разработка магнитоупругих измерителей на шпинделях обломинга № 2 ММК. Отчет по теме 69/114, ЧМ, депонирован во ВНИИ, № гос.рег. 69 034 726, инв. № Б 118 711, 1970.

12. Разработка, исследование и внедрение бесконтактного измерителя момента на валу привода стана "трио-2850". Отчет по теме 71/2, ЧМ, депонирован во ВНИИ, № гос.рег. 72 009 090, инв. № В 168 742, 1971.

13. Разработка, исследование и внедрение бесконтактных измерителей момента на вращающихся валах стана "30-102" Никопольского Южнотрубного завода. Отчет по теме 69/164, ЧМ, депонирован во ВНИИ, № гос.рег. 70 003 765, инв. № Б 209 859, 1972.

Техн. редактор Л.С. Заварухина

---

ФБ04588. 31/1-73 г. Сдано в печать 31/1-73 г. Формат бумаги 60x90 1/16. Объем 1,5 п.л. Отпечатано на ротационной ЧП. Тираж 120 экз. Заказ № 49/128.