ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

АРЗАМАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

А.А. Гуськов

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

лабораторный практикум по курсу

"Физические основы получения информации"

Часть II

Рекомендовано Ученым Советом Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева в качестве учебного пособия к лабораторному практикуму по курсу "Физические основы получения информации" для студентов очной, очно-заочной и заочной форм обучения по направлению подготовки 200100 – "Приборостроение"

Нижний Новгород 2009

Рецензенты:

кафедра физики, теории и методики обучения физике ГОУ ВПО «Арзамасский государственный педагогический институт им. А.П. Гайдара»; кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер – заведующий лабораторией КИПиА (филиал ООО "Газпром трансгаз Нижний Новгород", Центр по подготовке кадров) *Н.В. Волков*

Гуськов А.А.

Г968 Измерительные преобразователи: лабораторный практикум по курсу "Физические основы получения информации". Ч. II / А.А. Гуськов. – Н. Новгород: НГТУ, 2009. – 112 с.

ISBN 978-5-93272-651-8

Рассмотрены физические основы построения и теория индуктивных и взаимоиндуктивных измерительных преобразователей, электромагнитных силовых (моментных) преобразователей и магнитоэлектрических преобразователей. Приведены описания лабораторных установок и методики проведения экспериментальных исследований статических характеристик и погрешностей рассматриваемых типов преобразователей.

Для студентов очной, очно-заочной и заочной форм обучения высших учебных заведений, обучающихся по направлению 200100 "Приборостроение".

Рис. 48. Табл. О. Библиогр.: 9 назв.

УДК 681.2.08

ISBN 978-5-93272-651-8

© Гуськов А.А., 2009

© НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

	стр
Предисловие	6
1. ИНДУКТИВНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	8
1.1. Назначение и принцип действия индуктивных преобразователей	8
1.2. Схемы построения индуктивных преобразователей	12
1.3. Погрешности индуктивных преобразователей	17
1.4. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. Исследование индуктивных	
измерительных преобразователей	19
1.4.1. Описание лабораторной установки	19
1.4.2. Метолика провеления эксперимента	20
1.4.3. Контрольные вопросы	22
2. ВЗАИМОИНДУКТИВНЫЕ (ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ) ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	23
2.1. Взаимоиндуктивные преобразователи с подвижным ротором	23
2.1.1. Принцип действия преобразователей с подвижным ротором 2.1.2. Схемы построения взаимоиндуктивных преобразователей	23
	27
	27
	55
2.2.1. Схема построения преобразователя, дифференциальная по потоку	33
2.2.1. Схема построения преобразователя, дифференциальная по ЭДС	35
2.3. Нулевые сигналы и моменты тяжения взаимоиндуктивных	
преобразователей	40
2.4. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. Исследование	
взаимоиндуктивных измерительных преобразователей	
с подвижным ротором	45
2.4.1. Описание лабораторных установок	45
2.4.2. Методика проведения эксперимента	47
2.4.3. Контрольные вопросы	49

2.5. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. Исследование					
взаимоиндуктивных измерительных преобразователей					
с подвижной катушкой	50				
2.5.1. Описание лабораторной установки	50				
2.5.2. Методика проведения эксперимента	51				
2.5.3. Контрольные вопросы	53				
3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛОВЫЕ (МОМЕНТНЫЕ)					
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	54				
3.1. Принцип действия электромагнитных преобразователей	55				
3.2. Схемы построения электромагнитных преобразователей	61				
3.3. Материалы элементов электромагнитных преобразователей					
3.4. Нулевые моменты электромагнитных преобразователей	70				
3.5. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. Исследование					
электромагнитных моментных преобразователей	73				
3.5.1. Описание лабораторной установки	73				
3.5.2. Методика проведения эксперимента	75				
3.5.3. Контрольные вопросы	76				
4. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	77				
4.1. Принцип действия магнитоэлектрических преобразователей	77				
4.2. Магнитоэлектрические преобразователи					
гальванометрического типа	78				
4.3. Магнитоэлектрические логометры	80				
4.3.1. Принцип действия логометров	80				
4.3.2. Типы конструкций логометров	83				
4.3.3. Логометрические схемы электрических дистанционных					
передач	89				
4.4. Магнитоэлектрические силовые (моментные) преобразователи	92				
4.4.1. Силовой преобразователь со стержневым магнитом	92				
4.4.2. Преобразователь с многополюсным магнитом	94				
4.4.3. Преобразователь с полудуговым магнитом	95				
4.4.4. Преобразователь с плоской катушкой	94				
4.5. Погрешности магнитоэлектрических преобразователей	97				

4.6. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. Исследование	
магнитоэлектрических логометров	100
4.6.1. Описание лабораторной установки	100
4.6.2. Методика проведения эксперимента	102
4.6.3. Контрольные вопросы	103
4.7. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ. Исследование	
магнитоэлектрических моментных преобразователей	104
4.7.1. Описание лабораторной установки	104
4.7.2. Методика проведения эксперимента	107
4.7.3. Контрольные вопросы	108
Список рекомендованной литературы	109
Приложение	110

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие направлено на закрепление теоретических знаний по определенным разделам курса и применение полученных знаний на лабораторном практикуме при проведении экспериментальных исследований преобразователей, расчете их характеристик, погрешностей, анализе полученных результатов. Вторая часть пособия содержит четыре раздела: в первом и втором рассматриваются измерительные преобразователи (ИП) линейных и угловых перемещений (индуктивные и взаимоиндуктивные), в третьем и четвертом – преобразователи, основанные на силовом взаимодействии магнитного поля с ферромагнитным телом или проводником с током (электромагнитные и магнитоэлектрические силовые и моментные преобразователи, магнитоэлектрические гальванометры, логометры). В каждом из разделов содержатся основные теоретические сведения (физика проходящих в ИП процессов преобразования, варианты схем построения, основные характеристики преобразователей, области применения), а также методические указания к выполнению экспериментальных исследований (лабораторного практикума по соответствующей тематике).

Рассматриваемые во второй части учебного пособия теоретические разделы охватывают шесть лабораторных практикумов, соответствующих программам читаемой дисциплины "Физические основы получения информации" по специальностям 200103.62 – "Авиационные приборы и измерительновычислительные комплексы" и 200106.62 – "Информационно-измерительная техника и технологии", входящих в направление подготовки 200100 – "Приборостроение".

Целью выполнения лабораторного практикума по курсу "Физические основы получения информации" является изучение физических основ построения различных типов преобразователей; изучение назначения преобразователей, их конструктивных особенностей и схем включения; проведение экспериментальных исследований характеристик и параметров преобразователей при различных схемах включения.

В каждом разделе приведены описания установок для выполнения лабораторного практикума, методики проведения экспериментальных исследований, контрольные вопросы для самопроверки по каждой лабораторной работе и общий список рекомендуемой литературы.

Лабораторные работы по исследованию индуктивных ИП, электромагнитных моментных преобразователей, магнитоэлектрических логометров и магнитоэлектрических моментных преобразователей рассчитаны на четыре часа аудиторной работы студентов; работы по исследованию взаимоиндуктивных ИП с подвижным ротором и с подвижной катушкой – на восемь часов. Порядок проведения лабораторного практикума аналогичен описанному в первой части пособия. Работы проводятся бригадами от двух до четырех человек. Количество выполняемых заданий в каждой работе, их объем и входные данные (напряжение и частота питания) устанавливаются преподавателем индивидуально для каждой рабочей бригады студентов.

Прежде чем приступить к проведению эксперимента, рабочей бригаде по соответствующему разделу учебного пособия необходимо изучить физические основы построения преобразователей, методику выполнения лабораторной работы и получить допуск к занятиям (форма допуска – устный опрос).

Результаты экспериментальных исследований оформляются в виде отчета о проделанной лабораторной работе. Отчет должен содержать цель работы, измерительные схемы лабораторных установок в соответствии с выполняемыми заданиями, теоретические зависимости выходных параметров от измеряемых величин, все необходимые расчеты, выводы формул, таблицы полученных экспериментально и теоретически параметров, графики характеристик, а также вывод по работе, который должен включать в себя анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов. При большом объеме однотипных расчетов в отчете допускается привести один из них.

Пример оформления титульного листа и содержание отчета приведены в приложении.

Зачет по лабораторной работе проводится опросом рабочей бригады на следующем занятии.

Закрепление теоретических знаний с помощью проводимого эксперимента должно помочь студентам глубже понять физику проходящих процессов в средствах измерений, научиться анализировать полученные результаты и делать верные выводы.

1. ИНДУКТИВНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Контроль положений и перемещений является важным звеном правильного функционирования большинства разнообразных измерительных приборов и устройств. Для регистрации угловых и линейных перемещений в различного рода приборах широкое применение находят электромагнитные ИП: индуктивные, взаимоиндуктивные (трансформаторные), индукционные, вихретоковые и др. Такие датчики применяются в измерительных приборах и электронной технике, авиационной технике и др.

Достоинствами электромагнитных датчиков является простота конструкции, высокая разрешающая способность к перемещениям, большая надежность и долговечность, благодаря отсутствию электрических контактов, подверженных коррозии, эрозии и истиранию. Одним из достоинств электромагнитных преобразователей является также возможность получения большой мощности преобразователя, что позволяет пользоваться сравнительно малочувствительным указателем на выходе измерительной цепи и регистрировать измеряемую величину без предварительного усиления.

Недостатками электромагнитных датчиков является наличие у них момента электромагнитного взаимодействия (реактивный момент или момент тяжения) между сердечником и катушкой или между статором и ротором датчика при отклонении последнего от нулевого положения и значительный уровень нулевого сигнала. Появление реактивного момента вызывается изменением энергии магнитного поля в воздушном зазоре при повороте ротора. А нулевой сигнал порождается геометрическими погрешностями взаимной установки статора и ротора, а также несимметрией магнитных и электрических цепей обмоток ИП.

В первых двух частях учебного пособия рассматриваются наиболее широко применяемые индуктивные и взаимоиндуктивные ИП перемещений.

1.1. Назначение и принцип действия индуктивных преобразователей

Индуктивный ИП (рис. 1.1) представляет собой катушку с железным сердечником и якорем (ротором), отделенным от сердечника воздушным зазором. Ток *i*, протекающий в катушке, создает магнитный поток Φ , величина которого при постоянном напряжении питания зависит от проводимости магнитной цепи. Магнитная проводимость в основном определяется величиной воздушного зазора δ . При изменении величины воздушного зазора δ изменяется магнитный поток Φ и, следовательно, изменяется индуктивность катушки и полное сопротивление электрической цепи. При этом если амплитуда и частота подаваемого на катушку напряжения питания неизменны, то между величиной

тока в катушке и перемещением ротора установится однозначная зависимость, благодаря чему по величине тока можно судить о величине перемещения.



Рис. 1.1. Схема построения индуктивного ИП

Модуль тока, протекающего в катушке, равен:

$$i = \frac{U_{\rm i}}{Z} = \frac{U_{\rm i}}{\sqrt{(R_{\rm i} + R_{\rm \hat{e}})^2 + \omega^2 L^2}},$$
(1.1)

где $U_{\rm n}$ – напряжение питания, Z – модуль полного сопротивления электрической цепи, $R_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки, $R_{\rm K}$ – активное сопротивление катушки, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота питающего напряжения, с⁻¹, f – частота питающего напряжения, Гц, L – индуктивность катушки.

Индуктивность катушки равна:

$$L = \frac{w\Phi}{i},\tag{1.2}$$

где *w* – число витков катушки, Ф – магнитный поток, создаваемый протекающим в катушке током.

В соответствии с законом Ома для магнитной цепи можно записать:

$$\Phi = \frac{F_{i}}{Z_{i\Sigma}} = \frac{wi}{Z_{i\Sigma}}, \qquad (1.3)$$

где $F_{\rm M} = wi$ – магнитодвижущая сила (ампер-витки), $Z_{\rm M\Sigma}$ – суммарное сопротивление магнитной цепи.

Подставляя (1.3) в (1.2), после преобразования получим выражение для расчета индуктивности:

$$L = \frac{w^2}{Z_{\text{M}\Sigma}}.$$
(1.4)

Обычно выходным параметром является не ток, а падение напряжения на нагрузочном сопротивлении, которое с учетом (1.1) и (1.4) можно представить следующим образом:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = iR_{i} = \frac{U_{i}R_{i}}{\sqrt{(R_{i} + R_{\hat{e}})^{2} + \omega^{2}w^{4}/Z_{i\Sigma}^{2}}}.$$
 (1.5)

При перемещении ротора на величину x изменяется величина воздушного зазора δ и меняется магнитное сопротивление $Z_{M\Sigma}$.

Суммарное сопротивление магнитной цепи складывается из сопротивления воздушного зазора $R_{\rm B}$ и сопротивления магнитопровода Z_{Fe} :

$$Z_{i\Sigma} = R_{\hat{a}} + Z_{Fe} = R_{\hat{a}} + R_{\tilde{n}} + jX_{Fe},$$

где X_{Fe} – реактивная составляющая магнитного сопротивления сердечника, обусловленная потерями на вихревые токи и гистерезис (перемагничивание) магнитопровода. Для повышения линейности характеристики и уровня выходного сигнала (чувствительности) преобразователя стремятся уменьшить магнитное сопротивление сердечника и потери на перемагничивание. Для этого магнитопровод (ротор и статор) изготавливается из ферромагнитного материала, обладающего малой шириной петли гистерезиса. Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод изготавливается шихтованным – набором из отдельных пластин. Пластины магнитопровода тщательно контролируются на изоляцию друг от друга.

Обычно реактивная составляющая магнитного сопротивления гораздо меньше активной составляющей: $X_{Fe} \ll (R_{\hat{a}} + R_{\tilde{n}})$. При таком допущении полное сопротивление магнитной цепи запишется в виде:

$$Z_{i\Sigma} = R_{\hat{a}} + R_{\tilde{n}}. \tag{1.6}$$

Если пренебречь потоками рассеяния и утечки, т.е. считать, что весь магнитный поток сосредоточен в воздушном зазоре, то его магнитное сопротивление определится следующим образом:

$$R_{\hat{a}} = \frac{\delta}{\mu\mu_0 S},\tag{1.7}$$

где δ – длина воздушного зазора, *S* – площадь воздушного зазора, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума), μ – относительная магнитная проницаемость (для воздуха $\mu \approx 1$).

Подставляя (1.7) в (1.6) и далее в (1.4), получим:

$$L = \frac{w^2}{R_{\rm c} + \delta/\mu_0 S}.$$
(1.8)

Подставим выражение (1.8) для определения индуктивности в (1.1):

$$i = \frac{U_{\pi}}{\sqrt{(R_{\mu} + R_{\kappa})^2 + \omega^2 w^4 / (R_{c} + \frac{\delta}{\mu_0 S})}}.$$
 (1.9)

Полное сопротивление магнитопровода можно определить, условно разбив его на *n* участков и просуммировав их магнитные сопротивления:

$$R_{\rm c} = \sum_{j=1}^{n} \frac{l_{\rm c\,j}}{\mu_{\rm c}\mu_0 S_{\rm c\,j}},\tag{1.10}$$

где l_{cj} , S_{cj} – длина и площадь поперечного сечения *j*-го участка магнитопровода, μ_c – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода.

Обычно относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода составляет $\mu_c = 10^3 ... 10^4$, поэтому сопротивление сердечника при прочих соизмеримых параметрах много меньше сопротивления воздушного зазора $R_c \ll R_{\rm B}$, и, если обеспечить условие $\omega L >> (R_{\rm H} + R_{\rm K})$, то выражение для определения индуктивности (1.8) и тока (1.9) принимают следующий вид:

$$L = \frac{w^2 \mu_0 S}{\delta}, \quad i = \frac{U_{\rm i}}{\omega w^2 \mu_0 S_{\rm a}} \delta.$$

Таким образом, с учётом изложенных выше допущений зависимость между током в катушке и величиной воздушного зазора является линейной.

Графики зависимостей индуктивности и тока в катушке от величины воздушного зазора представлены на рис. 1.2.

Реальная статическая характеристика индуктивного ИП $i = i(\delta)$ или $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}(\delta)$ отличается от линейной наличием нелинейности при малых воздушных зазорах за счет начального тока i_0 , когда магнитное сопротивление сердечника сравнимо с сопротивлением воздушного зазора, и наличием тока

насыщения *i*_н при больших воздушных зазорах, когда активное сопротивление электрической цепи становится сравнимо с индуктивным сопротивлением катушки.



Рис 1.2. Зависимости индуктивности и тока в катушке от величины воздушного зазора

Наличие нелинейности уменьшает диапазон измеряемых перемещений. Теоретически расширение абсолютных значений измеренных перемещений можно достичь, увеличивая начальное значения воздушного зазора δ_0 . Однако при этом нарушается пропорциональность зависимости $R_{\rm B}(\delta)$ (см. формулу (1.7)). Это происходит из-за того, что магнитный поток утечки становится сравним с величиной рабочего магнитного потока. Поэтому нецелесообразно увеличение воздушного зазора в индуктивных ИП до величины большей, чем (0,5...1,5) ширины полюса.

1.2. Схемы построения индуктивных преобразователей

На рис. 1.3 приведены примеры схем построения индуктивных ИП.

Преобразователи (рис. 1.3, *a*, *б*) предназначены для измерения малых перемещений (не более одного миллиметра), преобразователи (рис. 1.3, *в*, *г*) – для измерения больших перемещений (до 10 мм и более).

Существенным недостатком рассмотренных конструкций является наличие сил тяжения между статором и ротором (или между катушкой и сердечником). Эта сила пропорциональна квадрату магнитодвижущей силы и обратно пропорциональна квадрату воздушного зазора:

$$F_T \sim \frac{(wi)^2}{\delta^2}$$
.

12



Рис. 1.3. Примеры схем построения индуктивных ИП

Поэтому, чтобы удержать ротор на необходимом расстоянии требуется приложить значительные усилия, которые будут препятствовать перемещению ротора при наличии входного воздействия. При этом возрастает порог чувствительности и появляется обратное воздействие преобразователя на полезный сигнал (входной сигнала должен обладать достаточной мощностью, чтобы преодолеть силы тяжения и переместить ротор).

Для устранения указанных недостатков применяют симметричные конструкции и дифференциальные схемы построения ИП. На рис. 1.4 представлен дифференциальный индуктивный ИП.

Преобразователь содержит два П-образных сердечника и две катушки, включенные в мостовую схему. Положение ротора, при котором воздушные зазоры правой и левой магнитных цепей равны между собой, называется нулевым или нейтральным. При отклонении ротора от нулевого положения на него со стороны левого и правого сердечников будут действовать неравные силы тяжения, однако, при малых по сравнению с воздушным зазором перемещениях ротора, результирующая сила тяжения будет значительно меньше, чем при недифференциальной схеме (рис. 1.1). При нейтральном положении ротора выходное напряжение ИП равно нулю. При отклонении ротора от нулевого положения сопротивление воздушных зазоров под полюсами ИП изменяется, в результате чего меняется значения магнитных потоков в полюсах магнитопровода, и меняется значение индуктивностей, что приводит к появлению на выходной диагонали мостовой схемы напряжения, пропорционального перемещению ротора относительно статора. Выходное напряжение такого преобразователя определяется по формуле:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = \frac{U_{\vec{1}}Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{U_{\vec{1}}}{2}, \qquad (1.11)$$

где *Z*₁, *Z*₂ – полные сопротивления катушек.



Рис. 1.4. Схема построения дифференциального индуктивного ИП

Полные сопротивления катушек определяются следующим образом:

$$Z_1 = R_{\kappa} + j\omega L_1, \ Z_2 = R_{\kappa} + j\omega L_2, \qquad (1.12)$$

где L_1 , L_2 – индуктивности катушек.

Подставляя значения (1.12) в выражения для выходного напряжения (1.11), после преобразований получим:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = \frac{U_{\bar{1}} j\omega(L_2 - L_1)}{2R_{\hat{e}} + j\omega(L_1 + L_2)}$$

14

Функция преобразования дифференциального ИП (рис. 1.4) принципиально нелинейна, так как индуктивность катушки от величины воздушного зазора зависит нелинейно. Погрешность линейности ограничивает диапазон измерений, в связи с чем максимальное измеряемое перемещение составляет порядка 20...30 процентов от начального воздушного зазора δ_0 .

Для измерения угловых перемещений может быть применен индуктивный ИП типа микросин (рис. 1.5). На полюсах датчика размещено по одной обмотке, которые включены в мостовую дифференциальную схему. На рис. 1.5, *а* показана мгновенная полярность магнитных потоков датчика, а на рис. 1.5, δ – электрическая схема включения катушек преобразователя.



Рис. 1.5. Индуктивный ИП типа микросин: *а*) принципиальная схема; *б*) электрическая схема включения катушек

В центральном (нулевом) положении ротора сопротивления плеч моста равны между собой и выходное напряжение в диагонали моста равно нулю.

При повороте ротора датчика на некоторый угол магнитная проводимость воздушных зазоров под полюсами датчиков изменятся, в результате чего произойдет перераспределение магнитных потоков в полюсах магнитопровода статора. При этом изменятся индуктивности катушек, и на выходной диагонали моста появится сигнал:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = \frac{U_{\bar{i}}Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{U_{\bar{i}}Z_3}{Z_3 + Z_4},$$

где Z₁, Z₂, Z₃, Z₄ – полное сопротивление соответствующей катушки.

При идентичности катушек и симметрии преобразователя при повороте ротора магнитные проводимости воздушных зазоров, а следовательно, и сопротивления катушек остаются попарно равны: $Z_1 = Z_3$, $Z_2 = Z_4$. При этом выходной сигнал ИП примет вид:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = U_{\tau} \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = U_{\tau} \frac{j\omega(L_2 - L_1)}{2R_{\hat{e}} + j\omega(L_1 + L_2)}.$$
(1.13)

Если пренебречь активным сопротивлением катушек по сравнению с реактивным, то выражение (1.13) для выходного сигнала индуктивного ИП типа микросин (рис. 1.5) преобразуется к следующему виду:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = U_{\bar{i}} \frac{L_2 - L_1}{L_1 + L_2}.$$
 (1.14)

Так как измеряемая величина (угол поворота ротора) связана не с длиной воздушного зазора, а с его площадью, то функция преобразования (1.14) преобразователя типа микросин принципиально линейна. Ее нелинейность обычно не превышает единиц процентов и обусловлена наличием потоков рассеяния через ребра и боковые поверхности полюсов, а также влиянием активного сопротивления катушек.

Расчет индуктивных ИП сводится к определению параметров катушек индуктивностей (числа витков, диаметра намоточного провода, сопротивления), расчету магнитной цепи (определение магнитных потоков и магнитной проводимости) и расчету электрической цепи (определение полного сопротивления электрической цепи и выходного сигнала преобразователя).

Магнитной цепью называют контур, по которому замыкается магнитный поток, создаваемый протекающим в катушке током. Задачей расчета магнитной цепи является вычисление магнитных потоков в различных частях магнитной системы, обусловленных наличием магнитодвижущей силы, создаваемой током катушки. В основу расчета магнитной цепи положены законы, которые по форме аналогичны законам электрической цепи. К ним относятся закон Ома для магнитных цепей, первый и второй законы Кирхгофа.

В силу аналогии между законами для электрических и магнитных цепей приемы расчета магнитных цепей полностью совпадают с приемами расчета электрических цепей, целью которого является определение тока в каждой ветви цепи. При расчете магнитной цепи составляется эквивалентная схема (схема замещения магнитной цепи), которая изображается аналогично электрической схеме. Источнику электродвижущей силы и электрическому сопротивлению цепи в схеме замещения магнитной цепи соответствует источник магнитодвижущей силы (катушка) и магнитное сопротивление (или магнитная проводимость). Величины и направления потоков магнитной цепи соответствуют величинам и направлениям токов электрической цепи.

1.3. Погрешности индуктивных преобразователей

В общем случае полное сопротивление электрической цепи индуктивного ИП перемещений, изображенного на рис. 1.1, равно:

$$Z = R_{\rm H} + R_{\rm K} + j \frac{\omega w^2}{R_{\rm B} + R_{\rm c} + j X_{Fe}} =$$

$$= R_{\rm H} + R_{\rm K} + \frac{X_{Fe} \omega w^2}{(R_{\rm B} + R_{\rm c})^2 + X_{Fe}^2} + j \frac{\omega w^2 (R_{\rm B} + R_{\rm c})}{(R_{\rm B} + R_{\rm c})^2 + X_{Fe}^2}.$$
(1.15)

Если модуль полного сопротивления (1.15) подставить в формулу (1.5), а магнитные сопротивления воздушного зазора $R_{\rm B}$ и магнитопровода $R_{\rm c}$ заменить выражениями (1.7) и (1.10), то получим функцию преобразования рассматриваемого ИП. Погрешности индуктивного ИП определяются функцией преобразования через возможные приращения ее составляющих:

$$\begin{split} \Delta U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} &= \frac{\partial U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}}{\partial U_{i}} \Delta U_{i} + \frac{\partial U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}}{\partial w} \partial w + \frac{\partial U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}}{\partial R_{\hat{e}}} \Delta R_{\hat{e}} + \frac{\Delta U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}}{\partial R_{i}} \Delta R_{i} + \\ &+ \frac{\partial U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}}{\partial X_{Fe}} \Delta X_{Fe} + \frac{\partial U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}}{\partial R_{\hat{a}}} \Delta R_{\hat{a}} + \frac{\partial U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}}}{\partial R_{\hat{b}}} \Delta R_{c}. \end{split}$$

Изменение амплитуды и частоты питающего напряжения ΔU_{i} , $\Delta \omega$ могут быть обусловлены нестабильностью источника питания.

Изменение числа витков Δw может обусловливаться наличием короткозамкнутых витков, либо погрешностями технологического процесса изготовления катушки.

Электромагнитные потери ΔX_{Fe} могут быть обусловлены энергетическими потерями на нагревание магнитопровода за счёт возникающих в нём вихревых токов (токи Фуко), а также потерями на перемагничивание материала магнитопровода, которые определяются площадью петли гистерезиса. Для снижения потерь такого рода необходимо выбирать материал с узкой петлей гистерезиса и выполнять магнитопровод из отдельных пластин, изолированных между собой.

Активное сопротивление катушки R_{κ} и нагрузочное сопротивление R_{μ} может изменяться под воздействием внешних факторов, кроме этого при высоких частотах сопротивление R_{κ} будет также увеличиваться за счёт проявления поверхностного эффекта.

Из внешних факторов наибольшее влияние на изменение активного сопротивления катушек преобразователя оказывает температура. Изменение температуры преобразователя возможно за счет изменения температуры окружающей среды, а также за счёт нагрева катушки электрическим током и нагрева магнитопровода за счёт возникающих в нём вихревых токов.

Изменение магнитного сопротивления воздушного зазора и магнитопровода определяется приращением геометрических параметров и магнитной проницаемости:

$$\Delta R_{\hat{a}} = \frac{\partial R_{\hat{a}}}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial R_{\hat{a}}}{\partial S_{\hat{a}}} \Delta S_{\hat{a}} = \frac{1}{\mu_0 S_{\hat{a}}} \Delta \delta - \frac{\delta}{\mu_0 S_{\hat{a}}^2} \Delta S_{\hat{a}},$$

$$\Delta R_{\rm c} = \frac{\partial R_{\rm c}}{\partial \mu_{\rm \tilde{n}}} \Delta \mu_{\rm \tilde{n}} + \frac{\partial R_{\rm c}}{\partial l_{\rm c}} \Delta l_{\rm c} + \frac{\partial R_{\rm c}}{\partial S_{\rm c}} \Delta S_{\rm c} = -\frac{l_{\rm c}}{\mu_{\rm c}^2 \mu_0 S_{\rm c}} \Delta \mu_{\rm \tilde{n}} + \frac{1}{\mu_{\rm c} \mu_0 S_{\rm c}} \Delta l_{\rm c} - \frac{l_{\rm c}}{\mu_{\rm c} \mu_0 S_{\rm c}^2} \Delta S_{\rm c} .$$

Изменение геометрических размеров $\Delta \delta$, Δl_c , ΔS_c , $\Delta S_{\hat{a}}$, так же как и активного сопротивления, возможно за счёт изменения температуры (тепловых деформаций) в процессе работы преобразователя.

Изменение магнитной проницательности $\Delta \mu_c$ материала магнитопровода кроме внешних факторов (температура, механическое напряжение в материале и др.) обусловливается также значением индукции *B* в материале, т.е. значением суммарного магнитного потока Φ в магнитопроводе. Относительная магнитная проницаемость определяется в соответствии с кривой намагничивания для рабочей точки характеристики:

$$\mu_{\rm c} = \frac{B}{H} = \frac{\Phi}{S_{\rm c}H},$$

где Н – напряженность магнитного поля, создаваемого катушкой.

С увеличением магнитного потока индукция приближается к критическому значению (индукции насыщения), пропорциональность между напряженностью H и индукцией B нарушается, при этом относительная магнитная проницаемость резко уменьшается и материал теряет свои магнитные свойства. Поэтому в процессе работы индуктивных ИП необходимо обеспечить такой режим работы, при котором индукция в материале имеет среднее значение, соответствующее линейному участку кривой намагничивания. При этом относительная магнитная проницаемость материала постоянна и имеет максимальное значение.

1.4. Лабораторный практикум

Исследование индуктивных измерительных преобразователей

Целью выполнения лабораторного практикума является изучение теоретических основ работы индуктивных ИП угловых и линейных перемещений, их схем построения и погрешностей, а также проведение экспериментальных исследований индуктивных ИП.

Результаты экспериментальных исследований оформляются в виде отчета о проделанной лабораторной работе. Отчет должен содержать цель работы, измерительную схему лабораторной установки, теоретические зависимости выходного напряжения от параметров ИП, все необходимые расчеты, таблицы и графики характеристик, а также вывод по работе, который должен включать в себя анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов. Пример оформления титульного листа и содержание отчета представлены в приложении.

При большом объеме однотипных расчетов в отчете допускается привести один из них.

1.4.1. Описание лабораторной установки

В работе исследуется индуктивный датчик перемещения с неподвижной катушкой и подвижным сердечником; схема построения ИП соответствует рис. 1.3, *в*. Лабораторная установка представлена на рис. 1.6.

Лабораторная установка выполнена в виде основания, на котором жестко закреплены катушка индуктивности 4 и микровинт 6 с ферромагнитным сердечником 5. Катушка включена в мостовую схему. Питание схемы осуществляется от источника переменного напряжения $U_n = 36$ B, f = 400 Гц, которое подается на контакты 1.

При вращении микровинта сердечник 5 ввинчивается в катушку 4. Ее индуктивность изменяется, следовательно, изменяется и ее сопротивление. Равновесие моста нарушается и на выходе моста появляется напряжение. Контроль напряжения производится с помощью внешнего вольтметра с пределом измерения не менее 10 В или осциллографа, который подключается к разъему 2 или контактам 3.

Переменный резистор 7 предназначен для регулировки нулевого сигнала при определенном взаимном положении сердечника и катушки.



Рис. 1.6. Лабораторная установка "Индуктивный ИП перемещений":

1 – клеммы напряжения питания, 2, 3 – выходные разъемы, 4 – катушка,

5 – сердечник, 6 – микрометрический винт, 7 – регулировочный резистор

1.4.2. Методика проведения эксперимента

1. Подключить к гнездам "~ $U_{\text{пит}}$ " установки источник переменного напряжения, предварительно установив его выходное напряжение $U_{\text{п}} = 36 \text{ B}$ и частоту f = 400 Гц.

2. К гнездам "*U*_{вых}" подключить вольтметр переменного напряжения и (или) осциллограф.

3. Вращая ручку микровинта, установить сердечник в положение, соответствующее максимальному перемещению (25 мм).

4. Тумблер включения установки переключить в положение "ВКЛ".

5. С помощью регулировочного резистора установить минимально возможный выходной сигнал, контролируя его значение по вольтметру или осциллографу.

6. Вращая ручку микрометрического винта снять статическую характеристику $U_{\text{вых}} = f(x)$ через 1 мм (два оборота ручки микровинта) в диапазоне перемещений x = 0...25 мм (нулевое положение x = 0 мм соответствует положению микровинта 25 мм).

7. Построить график зависимости $U_{\text{вых}} = f(x)$.

8. Относительно средней точки (x = 12 мм) по графику выделить участок, близкий к линейному. Считая, что выходной сигнал на выделенном участке зависит от входного перемещения линейно:

$$U_{\rm pac} = U_0 + K_{\rm cp} x, \tag{1.16}$$

определить среднюю крутизну характеристики K_{cp} , нулевой сигнал U_0 , абсолютную ΔU_i и относительную γ_i погрешность линейности в каждой точке характеристики по следующим формулам:

$$K_{\tilde{n}\tilde{0}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (U_i - U_{\min})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - x_{\min})}, \quad U_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (U_i - K_{cp} x_i),$$
$$\Delta U_i = U_{paci} - U_i, \quad \gamma_i = \frac{\Delta U_i}{U_{paci}} 100\%,$$

где n – количество точек выделенного линейного участка, x_{\min} – минимальное значение перемещение, соответствующее линейному участку, U_{\min} – минимальное измеренное значение на выбранном интервале, U_i , $U_{pac i}$ – измеренное и расчетное значение выходного напряжения в *i*-ой точке характеристики, определяемое по формуле (1.16).

За первую точку (x_1, U_1) следует брать начальную точку выделенного линейного участка (x_{\min}, U_{\min}) .

Результаты расчетов свести в таблицу:

Входное пере-	Измеренное зна-	Расчетное значение	Погрешность линейности	
лещение x, MM	<i>U</i> , В	$U_{\rm pac}, { m B}$	$\Delta U, \mathbf{B}$	γ, %

9. Построить график зависимости расчетного значения выходного сигнала от перемещения. Определить допустимый диапазон перемещений относительно точки, соответствующей середине выделенного линейного участка, при ограничении допустимого значения относительной погрешности линейности $\gamma_{\text{доп}}$: а) $|\gamma_{\text{доп}}| \le 5 \%$, б) $|\gamma_{\text{доп}}| \le 10 \%$.

10. Провести анализ причин, обусловливающих наличие нелинейности статической характеристики исследуемого индуктивного преобразователя. Сделать вывод по работе.

1.4.3. Контрольные вопросы

1. Какое физическое явление положено в основу работы индуктивных ИП?

2. В каких областях и для измерения каких величин используются индуктивные ИП?

3. Предложите варианты построения дифференциальных индуктивных ИП для измерения линейных и угловых перемещений.

4. Назовите основные причины, обусловливающие наличие погрешностей индуктивных ИП.

5. Проведите сравнительный анализ индуктивных ИП линейных перемещений, представленных на рис. 1.3, по основным характеристикам.

6. Предложите пути повышения чувствительности индуктивного ИП типа микросин при ограничении:

а) габаритных размеров;

б) потребляемой мощности;

в) габаритных размеров и потребляемой мощности.

2. ВЗАИМОИНДУКТИВНЫЕ (ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ) ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Взаимоиндуктивные (трансформаторные) преобразователи осуществляют преобразование перемещений подвижной части прибора в электрический сигнал и используются в автоматических приборных устройствах, приборах первичной информации — электромеханических датчиках давления газа или жидкости, датчиках угловой скорости гироскопического типа, датчиках угловых ускорений летательных аппаратов, а также в датчиках линейных ускорений, гироскопических датчиках углового положения летательных аппраратов и гироскопических стабилизаторах.

Из всего многообразия конструктивного исполнения взаимоиндуктивных преобразователей перемещения, применяемых в современном приборостроении, можно выделить две основные схемы построения: преобразователи с подвижным ферромагнитным ротором и преобразователи с подвижной катушкой (рамкой). И те и другие обеспечивают преобразование как линейных, так и угловых перемещений.

2.1. Взаимоиндуктивные преобразователи с подвижным ротором

2.1.1. Принцип действия преобразователей с подвижным ротором

Работа взаимоиндуктивного ИП с перемещающимся ротором основана на принципе дифференциального трансформатора с воздушными зазорами в магнитопроводе. Поэтому взаимоиндуктивные преобразователи часто называют трансформаторными. Рассмотрим принцип действия взаимоиндуктивного

ИП на примере преобразователя с Побразным сердечником, схема построения которого представлена на рис. 2.1.

Преобразователь содержит статор в виде П-образного сердечника, на котором расположены две катушки: обмотка возбуждения (ОВ) и сигнальная обмотка (СО); и ротор, отделенный от статора воздушным зазором.

При подаче напряжения питания на обмотку возбуждения в ней протекает ток i_1 , в результате которого создается переменное магнитное поле. Магнитный поток Ф пронизывает контур сигнальной катушки, и в ней наво-



Рис. 2.1. Схема построения взаимоиндуктивного ИП

дится электродвижущая сила (ЭДС) $e_{\text{вых}}$. Величина наводимой ЭДС зависит от значения магнитного потока, который в свою очередь зависит от параметров магнитной цепи, в частности, от длины воздушного зазора δ .

В соответствии с законом электромагнитной индукции величина наводимой ЭДС определяется скоростью изменения потокосцепления Ψ магнитного потока с контуром сигнальной катушки:

$$e_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = -\frac{d\Psi}{dt}.$$

Магнитный поток пронизывает все витки сигнальной катушки, поэтому потокосцепление $\Psi = w_2 \Phi$, и соответственно, ЭДС сигнальной катушки:

$$e_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},\tag{2.1}$$

где *w*₂ – число витков сигнальной катушки.

Если напряжение питания имеет синусоидальную форму, то мгновенное значение магнитного потока равно:

$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega t,$$

где Φ_0 – амплитудное значение магнитного потока, $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота питающего напряжения, с⁻¹, *f* – частота питающего напряжения, Гц.

После дифференцирования выражение (2.1) преобразуется к виду:

$$e_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = w_2 \Phi_0 \omega \sin \omega t$$
.

В качестве выходной величины взаимоиндуктивных преобразователях перемещений принимают действующее значение наводимой ЭДС:

$$\mathring{A} = \frac{e_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{w_2 \omega \Phi_0}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} w_2 f \hat{O}_0 = 4,44 w_2 f \hat{O}_0, \qquad (2.2)$$

где $e_{\max} = w_2 \omega \Phi_0$ – амплитуда наводимой ЭДС.

В соответствии с законом Ома для магнитной цепи магнитный поток равен:

$$\Phi_0 = F_i G_{\Sigma} = i_1 w_1 G_{\Sigma}, \qquad (2.3)$$

где w_1 – число витков обмотки возбуждения, $F_{\rm M}$ – магнитодвижущая сила, создаваемая протекающим в обмотке возбуждения током, G_{Σ} – суммарная проводимость магнитной цепи.

Если не учитывать краевые потоки рассеяния, потоки утечки и пренебречь сопротивлением магнитопровода, полная проводимость определится только проводимостью *G*_в двух воздушных зазоров:

$$G_{\Sigma} = \frac{G_{\hat{a}}}{2} = \frac{\mu\mu_0 S_{\hat{a}}}{\delta}, \qquad (2.4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума), μ – относительная магнитная проницаемость (для воздуха $\mu \approx 1$), δ – длина воздушного зазора, $S_{\rm B}$ – площадь воздушного зазора,.

С учетом (2.4) и (2.3) функцию преобразования (2.2) можно представить в следующем виде:

$$\mathring{A} = 4,44 f w_1 w_2 i_1 G_{\Sigma} = 4,44 f w_1 w_2 i_1 \frac{\mu_0 S_{\hat{a}}}{2\delta}.$$
(2.5)

Функция преобразования (2.5) нелинейна по отношению к величине воздушного зазора и линейна по отношению к площади воздушного зазора. Поэтому чаще всего взаимоиндуктивные ИП с подвижным ротором проектируются таким образом, что изменение измеряемой величины вызывает изменение площади воздушного зазора, а не его длины.

На рис. 2.2 представлена схема построения трехстержневого взаимоиндуктивного ИП угловых перемещений, в котором естественной входной величиной является площадь воздушного зазора. Трёхстержневой взаимоиндуктивный преобразователь представляет собой дифференциальный трансформатор выполненный на Ш-образном магнитопроводе. На среднем полюсе магнитопровода (статора) располагается обмотка возбуждения с числом витков w_1 , к которой подводится напряжение переменного тока $U_{\rm n}$. Вторичная обмотка, с которой снимается выходное напряжение $U_{\rm вых}$, состоит из двух одинаковых сигнальных катушек с числом витков w_2' и w_2'' , соединённых между собой последовательно встречно (по дифференциальной схеме) и расположенных на крайних полюсах статора.

Магнитный поток Φ_0 , создаваемый катушкой возбуждения w_1 , разделяется на две составляющие Φ_1 и Φ_2 пропорционально магнитным проводимостям $G_{\rm B}$ воздушных зазоров между якорем (ротором) и крайними полюсами статора. Потоки Φ_1 и Φ_2 проходят по левой и правой половине магнитной цепи (через крайние полюса статора). Не учитывая потоки рассеяния и утечки, в соответствии с первым законом Кирхгофа для магнитной цепи можно записать: $\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2$.



Рис. 2.2. Схема построения трехстержневого взаимоиндуктивного ИП угловых перемещений

Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 наводят в сигнальных катушках w_2' и w_2'' ЭДС e_1 и e_2 . Выходное напряжение в силу встречного включения сигнальных катушек равно разности наводимых в них ЭДС:

$$U_{\rm BMX} = e_1 - e_2 \; .$$

Действующие значения ЭДС, индуцируемые в каждой из сигнальных обмоток, определяются аналогично рассмотренному выше преобразователю с П-образным сердечником:

$$E_1 = 4,44w'_2 f\Phi_1; \quad E_2 = 4,44w''_2 f\Phi_2.$$
(2.6)

С учётом (2.6) и при условии симметричности сигнальных катушек $(w_2' = w_2'' = w_2)$ выходное напряжение трехстержневого ИП (рис. 2.2) равно:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = 4,44w_2 f(\Phi_1 - \Phi_2).$$
(2.7)

При симметричном расположении ротора относительно статора, когда ротор перекрывает торцевые поверхности крайних полюсов статора ровно на половину, магнитные проводимости крайних воздушных зазоров равны между собой $G_{\rm B1} = G_{\rm B2}$, и магнитные потоки также между собой равны $\Phi_1 = \Phi_2$. При этом напряжение на выходе сигнальных обмоток в соответствии с (2.7) теоретически равно нулю. Такое положение ротора называют нулевым или нейтральным.

При отклонении ротора от нулевого положения торцевые поверхности полюсов статора перекрываются неодинаково, магнитная проводимость воздушного зазора под одним полюсом станет больше магнитной проводимости воздушного зазора другого полюса. Происходит перераспределение магнитных потоков: магнитный поток через полюс, торцевая поверхность которого перекрыта ротором больше увеличивается, через другой полюс – уменьшается. На выходе преобразователя появится напряжение (2.7), пропорциональное разности индуцированных в сигнальных катушках ЭДС E_1 и E_2 и имеющее фазу больше ЭДС.

Расчет взаимоиндуктивных ИП сводится к определению параметров катушек возбуждения и сигнальных обмоток (числа витков, диаметра намоточного провода, сопротивления), расчету магнитной цепи (определение магнитных потоков и магнитных проводимостей) и определению выходного сигнала преобразователя.

Отличие расчета магнитной цепи взаимоиндуктивных ИП от индуктивных заключается в необходимости вычисления не только суммарной проводимости магнитной цепи, но и магнитных потоков в различных частях цепи. В основу расчета магнитной цепи положены законы, которые по форме аналогичны законам электрической цепи (закон Ома, законы Кирхгофа).

При расчете магнитной цепи составляется схема замещения, которая изображается аналогично электрической схеме. Источнику электродвижущей силы и электрическому сопротивлению цепи в схеме замещения магнитной цепи соответствует источник магнитодвижущей силы (катушка) и магнитное сопротивление (или магнитная проводимость). В силу аналогии законов для электрических и магнитных цепей приемы расчета магнитных цепей полностью совпадают с приемами расчета электрических цепей, целью которого является определение тока в каждой ветви цепи.

2.1.2. Схемы построения взаимоиндуктивных преобразователей с подвижным ротором

Большое распространение получили дифференциальные взаимоиндуктивные (трансформаторные) ИП угловых перемещений, примеры которых приведены на рис. 2.3 – 2.7. Такие преобразователи могут изготавливаться с числом полюсов кратным трем (рис. 2.3, 2.4, 2.5) либо кратным четырем (рис. 2.6, 2.7). В первом случае преобразователь можно представить как совокупность трехполюсных секций, на центральных полюсах которых расположены обмотки возбуждения, а на смежных – сигнальные обмотки (аналогично рассмотренной на рис. 2.2 схеме построения трехстержневого преобразователя). Во втором случае на каждом из полюсов располагается по две обмотки: обмотка возбуждения и сигнальная обмотка.

На рис. 2.3 приведена конструкция трехстержневого трансформаторного ИП угловых перемещений, схема построения которого рассмотрена в п. 2.1.1 (рис. 2.2).



Рис. 2.3. Трехстержневой трансформаторный ИП угловых перемещений: 1 – статор, 2 – обмотка возбуждения, 3 – сигнальные обмотки, 4 – ротор

На рис. 2.4 представлен шестиполюсный трансформаторный ИП, применяемый в гироскопических датчиках угловой скорости для измерения угловых перемещений гироузла. Шестиполюсный ИП (рис. 2.3) можно представить состоящим из двух трехстержневых преобразователей. На каждом из шести полюсов статора располагаются по одной обмотке. На полюсах статора 1, 4 располагаются обмотки катушек возбуждения, а на полюсах 2, 3, 5, 6 статора обмотки сигнальных катушек, которые соединяются между собой по дифференциальной схеме. Магнитный поток, создаваемый током в катушке возбуждения датчика, распределяется между полюсами статора в соответствии с магнитными проводимостями воздушных зазоров между ротором и полюсами. При этом напряжение на выходе сигнальных обмоток равно разности ЭДС, трансформированных в них магнитными потоками.

При среднем положении ротор 4 одинаково перекрывает поверхности полюсов сигнальных катушек и магнитные потоки в полюсах одинаковы. Выходное напряжение ИП при этом равно нулю. При повороте ротора (например, по часовой стрелке) на определенный угол магнитные потоки в полюсах 2 и 5 увеличиваются, а в полюсах 3 и 6 – уменьшаются. Равенство ЭДС, индуцированных в катушках, нарушается, и на выходе датчика появляется напряжение:

$$U_{\rm Bbix} = 8,88 \ w_2 f (\Phi_2 - \Phi_6), \tag{2.8}$$

фаза которого определяется ЭДС в катушках, установленных на полюсах с большим магнитным потоком. При повороте ротора в другом направлении фаза выходного напряжения изменяется на 180 градусов.



Рис. 2.4. Шестиполюсный взаимоиндуктивный ИП угловых перемещений: 1 – основание, 2 – пакет статора с катушками, 3 – стопорная гайка, 4 – пакет ротора, 5 – рама гироузла, 6 – ось гироузла

Чувствительность такого преобразователя в два раза выше чем у трехстержневого ИП (см. формулы (2.7) и (2.8)).

Для повышения чувствительности число полюсов преобразователя может быть увеличено до двенадцати (рис. 2.5, *a*). Двенадцатиполюсный преобразователь можно представить состоящим из четырех трехполюсных секций. На полюсах 3, 6, 9, 12 располагаются обмотки возбуждения, на остальных полюсах – сигнальные обмотки. Схема включения катушек преобразователя представлена на рис. 2.5, *б*. Точками на схеме обозначено начало катушек. Принцип действия преобразователя аналогичен рассмотренным выше; выходной сигнал двенадцатиполюсного ИП определяется следующим образом:

$$U_{\rm Bbix} = 17,76 \, w_2 f \, (\Phi_2 - \Phi_4). \tag{2.9}$$

Чувствительность рассмотренных преобразователей (рис. 2.3, 2.4, 2.5) увеличивается кратно количеству трехполюсных секций, однако следует помнить, что с увеличением числа полюсов возрастают габариты датчика и уменьшается диапазон измеряемых угловых перемещений.



б)

Рис. 2.5. Двенадцатиплюсный трансформаторный ИП угловых перемещений: *а)* эскиз преобразователя, *б)* схема включения катушек

На рис. 2.6 представлена схема построения взаимоиндуктивного ИП угловых перемещений типа микросин. Преобразователь имеет симметричный четырёхполюсный статор и двухполюсный ротор. На каждом полюсе статора расположены две катушки, одна катушка возбуждения, другая – сигнальная (выходная). Все катушки возбуждения соединены так, что мгновенная полярность диаметрально противоположных полюсов, перекрываемых ротором, противоположна. Каждый полюс статора можно считать трансформатором с переменным магнитным потоком, величина которого зависит от взаимного расположения статора и ротора. В нулевом положении полюса ротора перекрывают все полюса статора одинаково. При повороте ротора площадь перекрытия под

двумя противоположными полюсами увеличивается, а под двумя другими – уменьшается. При этом если пренебречь геометрическими погрешностями изготовления статора и ротора и полагать, что эксцентриситет между ротором и статором равен нулю, можно считать, что суммарная площадь перекрытия под всеми четырьмя полюсами будет оставаться неизменной. Последнее условие обеспечивает неизменность величины общего тока возбуждения для всех четырёх катушек возбуждения при поворотах ротора. Увеличение площади перекрытия статора вызывает уменьшение магнитного сопротивления данного участка магнитопровода, в результате чего возрастает магнитный поток, пересекающий сигнальную катушку данного статора, и увеличивается ЭДС, индуцируемая в этой катушке.



Рис. 2.6. Схема построения взаимоиндуктивного ИП типа микросин

Сигнальные катушки в микросине соединены межу собой так, что ЭДС катушек диаметрально противоположных полюсов суммируются, а соседних полюсов вычитаются, т.е.

$$U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = (E_1 + E_3) - (E_2 + E_4).$$

Если наводимые в катушках ЭДС попарно равны $E_1=E_3$, $E_2=E_4$, то выходной сигнал ИП типа микросин определяется выражением (2.8). Величина выходного напряжения при этом будет пропорциональна углу α отклонения ротора от нулевого положения. Пропорциональную зависимость тем легче обеспечить, чем меньше угол поворота ротора. При малом повороте, кроме того, практически до минимума сводятся моменты тяжения, действующие на ротор со стороны магнитного поля катушек. Благодаря этому так же обеспечивается высокая точность показаний ИП.

Для повышения чувствительности применяемся восьмиполюсная конструкция (так называемый сдвоенный микросин). Схема построения такого датчика представлена на рис. 2.7, *а*. На каждом из восьми полюсов располагаются по две обмотки: обмотка возбуждения и сигнальная. Схема включения обмоток показана на рисунке 7, *б*.





Рис. 2.7. Взаимоиндуктивный восьмиполюсный ИП: *а)* схема построения, *б)* схема включения обмоток

Принцип действия взаимоиндуктивного восьмиполюсного ИП аналогичен рассмотренному выше преобразователю типа микросин. Выходной сигнал ИП определяется выражением (2.9).

2.2. Взаимоиндуктивные преобразователи с подвижной катушкой

Взаимоиндуктивные датчики с подвижной катушкой представляют собой дифференциальный трансформатор с воздушным зазором, вторичная (сигнальная) обмотка которого располагается в воздушном зазоре.

Существует две схемы взаимоиндуктивных ИП с подвижной катушкой: схема, дифференциальная по потоку, и схема, дифференциальная по ЭДС. В обеих схемах катушки возбуждения располагаются на полюсах магнитопровода и запитываются переменным напряжением. В воздушных зазорах магнитопровода располагаются плоские сигнальные катушки, которые крепятся на специальных кронштейнах, жестко связанных с помощью рычага с осью, угол поворота которой требуется измерить.

При поворотах оси прибора сигнальная катушка (рамка) перемещается в зазоре магнитопровода перпендикулярно магнитным силовым линиям потока возбуждения.

2.2.1. Схема построения преобразователя, дифференциальная по потоку

На рис. 2.8 представлена схема взаимоиндуктивного ИП с подвижной катушкой, дифференциальная по потоку. Данный ИП представляет собой Побразный магнитопровод 1 (статор), на котором располагается обмотка возбуждения 2, состоящая из двух катушек с числом витков w_1 ' и w_1 ". Вторичная обмотка (сигнальная катушка) 3 выполнена в виде плоской рамки с числом витков w_2 , которая перемещается в воздушном зазоре магнитопровода.



Рис. 2.8. Схема построения ИП с подвижной катушкой, дифференциальная по потоку

В преобразователях с подвижной катушкой коэффициент трансформации между первичной и вторичной обмотками изменяется путём перемещения рамки — катушки *w*₂ в магнитном поле воздушного зазора, создаваемом первичной обмоткой.

Две половины обмотки возбуждения (w_1 ' и w_1 ") включаются последовательно согласованно (или параллельно согласованно) и создают суммарную магнитодвижущую силу. Нулевым (исходным) положением рамки преобразователя является её симметричное положение относительно полюсов магнитопровода, в зазоре которого она находится. В таком положении левая и правая части подвижной рамки (сигнальной катушки) пронизываются одинаковыми по величине и противоположно направленными магнитными потоками. В результате, при таком расположении рамки суммарный поток сцепления с ней, равен нулю, и ЭДС, индуцированная в рамке, отсутствует.

Предположим, что рамка переместилась из среднего положения на величину x влево (рис. 2.9). Разобьём магнитный поток Φ , создаваемый обмоткой возбуждения, на пять потоков-составляющих так, как это показано на рис. 2.9. (Краевыми потоками рассеяния пренебрегаем).

Потоки, охватывая проводники, "сцепляются" с ними, в результате чего в витках рамки индуцируются ЭДС. Потоки Φ_{n1} , Φ_{n2} не охватывают ни левые, ни правые проводники рамки, поэтому названные магнитные потоки не наводят ЭДС в сигнальных обмотках.



Рис. 2.9. К определению выходного сигнала ИП с подвижной катушкой

Если поток охватывает одинаковое количество правых и левых проводников, то возникшие в них ЭДС компенсируются. В данном случае компенсируются ЭДС, наводимые потоками ($\Phi_{n2} + \Phi_{n3}$) и ($\Phi_{n3} + \Phi_{n4}$). Некомпенсированными остаются ЭДС, соответствующие потокам $\Phi_1 = (\Phi_{n4} + \Phi_{n5})$ и $\Phi_2 = \Phi_{n5}$:

$$\Phi_1 = b \left(\frac{a-c}{2} + x \right) B, \quad \hat{O}_2 = b \left(\frac{a-c}{2} - x \right) B,$$

где *а* – ширина полюса, *b* – толщина пакета магнитопровода, *с* – ширина витков подвижной катушки (см. рис. 2.9), *B* – индукция магнитного поля в воздушном зазоре.

Так как потоки Φ_1 и Φ_2 относительно плоскости сигнальной катушки направлены встречно, то суммарный магнитный поток, пронизывающий контур вторичной катушки, равен:

$$\Phi_{\Sigma} = \Phi_1 - \Phi_2 = 2xbB.$$

Результирующая ЭДС на выходе ИП:

$$E_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = 4,44 f w_2 \Phi_{\Sigma} = 8,88 f b B w_2 x.$$

Из полученного выражения следует, что взаимоиндуктивные ИП с подвижной катушкой обладают линейной характеристикой при условии постоянства магнитной индукции в воздушном зазоре. То есть протяжённость линейного участка характеристики определяется длиной участка однородного поля в воздушном зазоре магнитопровода, который приблизительно соответствует границам полюсов магнитопровода.

2.2.2. Схема построения преобразователя, дифференциальная по ЭДС

Существенным недостатком рассмотренного преобразователя с подвижной катушкой, дифференциального по потоку, является сильное влияние на его выходной сигнал внешних переменных магнитных полей. Это влияние выражается в увеличении нулевого сигнала и в изменении крутизны характеристики датчика: внешнее переменное поле наводит во вторичной катушке ничем не компенсированную ЭДС.

Указанного недостатка лишен взаимоиндуктивный ИП с подвижной катушкой, дифференциальный по ЭДС (рис. 2.10). На рис. 2.10, *а* представлена конструктивная схема ИП, на рис. 2.10, δ – электрическая схема соединения катушек. На магнитопроводе *1* (статоре) расположена катушка возбуждения 2. Подвижный элемент (ротор) преобразователя выполнен в виде немагнитного основания 4, на которое наклеены две плоские сигнальные катушки 3. Ротор преобразователя может совершать угловые перемещения относительно оси крепления по радиусу р. На электрической схеме (рис. 2.10, б) цифрой 5 обозначены упругие токоподводы к сигнальным катушкам, являющиеся принципиально необходимым элементом взаимоиндуктивных ИП с подвижной катушкой.



Рис. 2.10. Взаимоиндуктивный ИП с подвижной катушкой, дифференциальный по ЭДС: *а)* конструктивная схема, *б)* электрическая схема соединения катушек:

1 – магнитопровод, 2 – катушка возбуждения, 3 – сигнальные катушки,

4 – немагнитное основание сигнальных катушек, 5 – упругие токоподводы

Сигнальные катушки преобразователя на рис. 2.10 включены встречно. Ток в катушке возбуждения создает магнитный поток $\Phi_{\rm B}$, который проходит через рабочий зазор, пересекая плоскости сигнальных катушек. В сигнальных катушках потоком возбуждения наводятся ЭДС, которые за счет встречного включения катушек находятся в противофазе. Если амплитуды ЭДС, наведенных в сигнальных катушках, равны, что имеет место при электрически центральном положении ротора датчика, то выходной сигнал датчика равен нулю (с точностью до нулевого сигнала). Если ротор отклоняется на угол β относительно электрически центрального положения, то на зажимах сигнальной цепи появляется результирующая ЭДС, характеризующая угол β и его направление.

Преобразователи, имеющие две сигнальные катушки, более критичны к качеству изготовления элементов самого преобразователя, так как их магнитопроводы имеют параллельные участки магнитных цепей, которые вследствие несовершенства изготовления магнитопровода могут обладать различными магнитными сопротивлениями. Это приводит к несовпадению геометрического и электрического центров датчика (к возникновению угла регулировки β_p) и к возникновению нулевого сигнала. Влияние внешних магнитных полей на выходной сигнал датчика угла, имеющего две сигнальные катушки, значительно
слабее, так как наводимые внешними магнитными полями ЭДС (помехи) взаимно компенсируются во встречно включенных сигнальных катушках.

Обычно в датчиках, дифференциальных по ЭДС, для получения большего потокосцепления, а следовательно, и большей крутизны, ширина намотки *с* каждой из сигнальных катушек составляет больше половины ширины полюса: c > a/2(см. рис. 2.11). Кроме того, между сигнальными катушками имеется изоляционный промежуток шириной *t*.

Выходное напряжение датчика равно разности ЭДС, наведенных соответственно в левой и правой сигнальных катушках:



Рис. 2.11. К выводу функции преобразования ИП

$$U_{\rm Bbix} = E_1 - E_2. \tag{2.10}$$

Определим величины наводимых в катушках ЭДС, предположив, что сигнальные катушки имеют прямоугольную форму, а кронштейн с сигнальными катушками повернулся по часовой стрелке на малый угол β так, что линейное перемещение рамки слева направо составляет величину ρβ, где ρ – радиус поворота катушек (см. рис. 2.10, 2.11).

Рассмотрим контур *dx*, находящийся на расстоянии *x* от торца полюса. Действующее значение элементарной ЭДС, наводимой в контуре, равно:

$$dE_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_{dx} \Phi_x = 4,44 f w_{dx} \Phi_x, \qquad (2.11)$$

где Φ_x – поток, пронизывающий контур dx, w_{dx} – количество витков сигнальной катушки, содержащихся в контуре dx.

Если считать, что весь магнитный поток Φ_x сосредоточен в воздушном зазоре, т.е. проходит через площадь $S_x = bx$, то можно записать:

$$\Phi_x = BS_x = \Phi_{\hat{a}} \frac{x}{a}, \qquad (2.12)$$

где $B = \Phi_{\rm B}/(ab)$ – индукция в зазоре.

Число витков сигнальной катушки, содержащихся в контуре dx, равно:

$$w_{dx} = \frac{hdx}{S_{i\delta}} k_{c}, \qquad (2.13)$$

37

где k_3 – коэффициент заполнения окна сигнальной катушки, h – толщина сигнальной катушки (см. рис. 2.11), S_{np} – площадь сечения провода сигнальной катушки.

Подставляя выражения (2.13) и (2.12) в (2.11), получим:

$$dE_2 = 4,44 f \Phi_{\hat{a}} \frac{k_c h}{a S_{\bar{i}\bar{\delta}}} x dx.$$
(2.14)

Интегрируя выражение (2.14), получим:

$$E'_{2} = 4,44 f \Phi_{\hat{a}} \frac{k_{c}h}{aS_{\bar{i}\delta}} \int_{0}^{\frac{a-t}{2} - \rho\beta} x dx = 2,22 f \Phi_{\hat{a}} \frac{k_{c}h}{aS_{\bar{i}\delta}} \left(\frac{a-t}{2} - \rho\beta\right)^{2}.$$
 (2.15)

Аналогично определяется величина E'_1 для первой сигнальной катушки:

$$E'_{1} = 2,22 f \Phi_{\hat{a}} \frac{k_{c} h}{a S_{\tilde{1} \delta}} \left(\frac{a-t}{2} + \rho \beta \right)^{2}.$$
 (2.16)

Выражения (2.15) и (2.16) получены без учета краевых потоков (потоков выпучивания), которые также наводят ЭДС в сигнальных катушках. Обозначив эти ЭДС через $E_{1\kappa}$ и $E_{2\kappa}$, можно записать:

$$E_1 = E'_1 + E_{1\hat{e}}, \ E_2 = E'_2 + E_{2\hat{e}}.$$
(2.17)

Точно рассчитать ЭДС $E_{1\kappa}$ и $E_{2\kappa}$ трудно, так как сложно точно учесть распределение и интенсивность потоков выпучивания. Ввиду меньшей интенсивности этих потоков по сравнению с рабочим потоком приближенно можно считать, что:

$$E_{1\kappa} \approx E_{2\kappa} \tag{2.18}$$

при любом положении сигнальных катушек.

Подставляя (2.15) и (2.16) в (2.17), а последнее, с учетом приближенного равенства (2.18), – в выражение (2.10), получим:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = 4,44 f \Phi_{\hat{a}} \frac{k_{c}h}{aS_{\tilde{i}\delta}} \rho(a-t)\beta.$$
(2.19)

Магнитный поток, входящий в выражение (2.19), можно определить следующим образом:

$$\Phi_{\rm B} = w_1 i \ G_{\Sigma} \,, \tag{2.20}$$

где i – ток в катушке возбуждения, G_{Σ} – суммарная проводимость магнитной цепи.

Подставляя (2.20) в (2.19), получаем следующие выражения для величины выходного сигнала и крутизны статической характеристики взаимоиндуктивного ИП, дифференциального по ЭДС:

$$U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = 4,44f \frac{k_{c}hw_{1}G_{\Sigma}}{aS_{1\delta}}\rho i(a-t)\beta = K_{1}\beta,$$

$$K_{\rm i} = \frac{4.44 f k_{\rm c} h w_1 G_{\rm \Sigma} \rho i (a-t)}{a S_{\rm i\delta}}$$

При смещении рамки датчика в направлении, перпендикулярном магнитному потоку, за счет осевого зазора в опорах на выходе датчика появляется ложный сигнал, равноценный некоторому углу поворота рамки датчика. Чтобы устранить ложный сигнал, необходимо использовать два диаметрально расположенных датчика, сигнальные обмотки которых включаются на вход усилителя параллельно. Кроме исключения ошибки от радиальных смещений сигнальной катушки, в этом случае возрастает надежность работы датчика.

Так как подвижная часть взаимоиндуктивного ИП с подвижной катушкой не имеет ферромагнитных масс, то у такого датчика не существует и реактивного момента электромагнитных сил. Реактивный момент ИП с подвижной катушкой возникает за счет взаимодействия тока в сигнальных катушках с магнитным потоком возбуждения. Ток в сигнальных катушках обычно мал, поэтому реактивный момент таких преобразователей незначителен. Однако в виду наличия токопроводов к сигнальным катушкам в преобразователях с подвижной катушкой возникают дополнительные постоянные и упругие моменты тяжения. Моменты тяжения возникают также в результате неидеальности изготовления, что приводит к несовпадению геометрического и электрического центров датчика угла.

На работу ИП с подвижной катушкой влияют ложные сигналы, возникающие в результате наводок, нерабочие (например, радиальные) смещения ротора, нелинейность характеристик, угол сдвига фаз между выходным сигналом и опорным напряжением, температура и т.д. Однако по стабильности характеристик взаимоиндуктивные ИП перемещений как с подвижным ротором, так и с подвижной катушкой значительно превосходят другие типы датчиков.

2.4. Нулевые сигналы и моменты тяжения взаимоиндуктивных преобразователей

Выходной электрический сигнал при нулевом положении ротора (т.е. при отсутствии входного перемещения) не равен нулю и называется нулевым (остаточным) сигналом преобразователя.

Основными причинами появления нулевого сигнала является геометрическая или магнитная асимметрия цепей сигнальных обмоток (неравенство числа витков сигнальных обмоток, наличие короткозамкнутых витков, несимметрия полюсов магнитопровода из-за неточности изготовления статора и неоднородности свойств его материала). Благодаря этим факторам остаточный сигнал будет определяться основной гармоникой, синфазной с основным сигналом преобразователя. Кроме того, разные потери на гистерезис и вихревые токи в ветвях магнитопровода могут явиться причиной того, что фазовый сдвиг напряжения ЭДС двух вторичных катушек не будет равен 180 градусов.

Несимметрия выходных (сигнальных) катушек w_2' и w_2'' приводит к изменению фазы ЭДС одной из катушек. Тогда ЭДС левой w_2' и правой w_2'' катушек будут смещены между собой на угол, не равный 180 градусов, и остаточный сигнал датчика будет определяться величиной ЭДС, сдвинутой по фазе относительно выходного сигнала преобразователя на угол 90 градусов. Если ЭДС, индуцированные в катушках w_2' и w_2'' , обозначить за E'_2 и E''_2 :

$$E'_{2} = U'_{2} \sin \omega t, \ E''_{2} = U''_{2} \sin(\omega t - \varphi),$$

где ϕ – фазовый сдвиг между ЭДС E_1 ' и E_2 ", то выходной сигнал ИП будет равен:

 $U_{\hat{a}\hat{u}\tilde{o}} = E_2' - E_2'' = (U_2' - U_2'' \cos\varphi)\sin\omega t - U_2'' \sin\varphi\cos\omega t .$

Поворачивая ротор, можно добиться того, чтобы составляющая $(U'_2 - U''_2 \cos \varphi)$ стала равна нулю. Это и будет нулевое положение ротора преобразователя.

Вторая составляющая сигнала $(U''_2 \sin \varphi \cos \omega t)$ представляет собой напряжение основной частоты, сдвинутое по фазе относительно основного сигнала на угол 90 градусов, и называется квадратурной составляющей выходного сигнала. Квадратурную составляющую нулевого сигнала за счет поворота ротора устранить невозможно.

Устранение квадратурного сигнала возможно несколькими способами: симметрированием преобразователя, подключением фазирующего сопротивления, применением компенсирующих устройств.

Симметрирование основано на механической доводке магнитопровода статора либо на отмотке (домотке) витков выходных катушек датчика. Этот

способ представляет технологические трудности, поэтому чаще используют способ, заключающийся в подключении параллельно одной из катушек омического сопротивления, которое называется фазирующим. Пример схемы включения фазирующего сопротивления показан на рис. 2.12. Если величина фазирующего сопротивления R_{ϕ} значительно превышает сопротивление сигнальной катушки R,



Рис. 2.12. Схема соединения обмоток с фазирующим сопротивлением

то при несущественном изменении амплитуды ЭДС этой катушки удаётся согласовать фазы ЭДС сигнальных катушек.

Если конструкция прибора, в составе которого применяется взаимоиндуктивный преобразователь перемещений, не предусматривает возможность углового поворота ротора (статора) преобразователя перемещения, то для уменьшения остаточного сигнала используют компенсирующее устройство. Компенсация выходного сигнала датчика в нулевом положении ротора производится с помощью масштабного и фазового компенсирующих устройств, выходные сигналы которых сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол, близкий к 90 градусов. Изменяя амплитуды и полярность выходных сигналов масштабного и фазового компенсирующих устройств, можно получить суммарный сигнал, снимаемый с них, фаза которого будет сдвинута на 180 градусов относительно фазы выходного сигнала преобразователя, а амплитуда равна выходному сигналу преобразователя. Часто компенсация квадратурной составляющей нулевого сигнала осуществляется на входе первого или второго каскада усилителя, к входу которого подключён взаимоиндуктивный ИП. Основной сигнал преобразователя U_{вых} суммируется с компенсационным сигналом U_{комп}, формируемым на вторичной обмотке фазовращателя.

Взаимоиндуктивные ИП являются дифференциальными по отношению к основной и нечётным гармоникам выходного напряжения. Но при наличии внешнего постоянного подмагничивания магнитопровода появляются чётные гармоники потока, по отношению к которым датчик не является дифференциальным, т.к. фаза чётных гармоник потока определяется не только его основной гармонической составляющей, но также направлением постоянного потока по отношению к переменному. Помимо рассмотренных выше причин это также может явится причиной появления нулевого сигнала. К появлению нулевого сигнала приводит наличие внешних переменных электромагнитных полей, имеющих частоту равную частоте напряжения питания.

При наличии в составе выходного сигнала U_{вых} взаимоиндуктивного преобразователя кроме основной гармоники, напряжения

$$\Delta U_{i\dot{a}+} = U_n \sin(n\omega t + \varphi_n),$$

где n = 3, 5, 7... – номера гармоник, то на выходе фазового демодулятора появляется постоянное напряжение:

$$U = \frac{k}{\pi} \int_{0}^{\pi} U_n \sin(n\omega t + \varphi_n) d(\omega t) = \frac{k}{\pi} \frac{U_n}{n^2} \cos\varphi_n,$$

где U_n – амплитуда напряжения нечетных гармоник, ϕ_n – сдвиг фазы соответствующей нечетной гармоники, k – коэффициент усиления каскадов усилителя до демодулятора.

Составляющая чётных гармоник нулевого сигнала на выходе фазового демодулятора не даёт постоянной составляющей, но она создаёт значительный фон и искажает форму полезного сигнала. Причиной же появления напряжения чётных гармоник являются внешние магнитные поля постоянного тока. Наиболее эффективным методом борьбы с нулевым сигналом, вызванным постоянным подмагничиванием или внешними электромагнитными полями, является магнитное экранирование.

Качество трансформаторного преобразователя характеризуется его добротностью Q – отношением крутизны выходной характеристики K_{Π} преобразователя к величине нулевого сигнала U_0 :

$$Q = \frac{K_{\rm i}}{U_0}.$$

Для повышения добротности за счет снижения уровня нулевого сигнала, уменьшения потерь на перемагничивание магнитопровода, и вихревые токи, наводимые в нем, магнитопровод (статор и ротор) трансформаторных ИП изготавливают из пластин ферромагнитного материала, обладающего наименьшей шириной петли гистерезиса (пермаллой – сплав 50НП, 65НП, 79НМ, 80НХС). Толщина пластин магнитопровода h_{Λ} не должна превышать двойной глубины проникновения волны переменного магнитного поля в материал магнитопроводаа:

$$h_{\rm e} \le 2\sqrt{\frac{1}{\pi\mu_{\rm n}\mu_0 f\gamma}},$$

где γ – удельная электропроводность материала магнитопровода, μ_c – относительная магнитная проницаемость материала магнитопровода.

Перед сборкой (склеиванием) в пакет пластины тщательно контролируются на изоляцию друг от друга и отсутствие заусенец на их краях. При работе преобразователей на высоких частотах питающего напряжения в качестве материала магнитопровода применяют ферриты, что при хорошей однородности

феррита позволяет получить добротность значительно выше, чем у преобразователей с металлическим магнитопроводом.

Рабочий угол поворота ротора определяется половиной дуги полюса статора и для различных типов преобразователей не превышает (3...10) градусов. Отклонение ротора в пределах рабочего угла обеспечивает достаточно высокую линейность выходной характеристики преобразователя.

В зависимости от качества изготовления преобразователя отклонение выходной характеристики от линейной в приделах рабочего угла не превышает (0,5...5) процентов. При повороте ротора на большие углы крутизна выходной характеристики падает и возрастает нелинейность характеристики.

На стабильность характеристик преобразователя (крутизну выходной характеристики, величину и стабильность нулевого сигнала, величину реактивного момента) влияют взаимные радиальные и осевые перемещения ротора и статора. Так при изменении зазора за счёт радиального смещения ротора в направлении статора преобразователя, изменяется крутизна выходной характеристики K_n и уровень нулевого сигнала U_0 . При смещении ротора в направлении перпендикулярном полюсам статора появляется выходной сигнал, равноценный некоторому углу поворота ротора. Для уменьшения влияния радиальных смещений ротора на характеристики преобразователя применяют круговые симметричные дифференциальные трансформаторные преобразователи шестиполюсного типа, типа микросин или двенадцатиполюсного типа, рассмотренные в п. 2.1.2.

Достоинством симметричных трансформаторных преобразователей является низкое значение радиальных давлений (нагрузок) на опоры, по сравнению с несимметричными преобразователями.

В несимметричных схемах сила электромагнитного притяжения, действующая между статором и ротором и вызывающая дополнительную нагрузку на опоры, равна:

$$F_{\mathrm{ýi}} = -\frac{\partial W_{\mathrm{i}}}{\partial \delta},$$

где $W_{\rm M}$ – энергия магнитного поля в воздушном зазоре.

Энергия магнитного поля равна

$$W_{i} = \frac{1}{2} \Phi i_{1} w_{1} = (i_{1} w_{1})^{2} G_{\Sigma},$$

при этом сила электромагнитного взаимодействия:

$$F_{\dot{y}\dot{\imath}} = -\frac{1}{2} (\dot{i}_1 w_1)^2 \frac{\partial G_{\Sigma}}{\partial \delta} \,.$$

Момент, действующий на ротор преобразователя угловых перемещений при отклонении ротора на некоторый угол α и стремящийся вернуть его в начальное положение, называют моментом тяжения. Момент тяжения определяется следующим образом:

$$M_{\dot{o}\ddot{y}x} = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n} (w_{1}\dot{i}_{1})_{j}^{2} \frac{dG_{\Sigma j}}{d\alpha}, \qquad (2.21)$$

где $(w_1 i_1)_j$ – магнитодвижущая сила, приходящаяся на воздушный зазор под *j*-м полюсом, $G_{\Sigma j}$ – суммарная магнитная проводимость воздушного зазора под *j*-м полюсом.

Эффективным средством снижения момента тяжения, как это следует из выражения (2.21), является уменьшение величины тока возбуждения. Сохраняя значения крутизны выходной характеристики K_n , максимального снижения тока i_1 можно достичь, повышая до оптимального значения частоту напряжения питания $f = \omega/2\pi$.

Момент тяжения имеет две составляющие: упругий момент, т.е. момент, пропорциональный углу отклонения ротора α, и нулевой, т.е. момент тяжения при электрически центральном положении ротора.

Упругие реактивные моменты обусловлены в основном наличием тока в сигнальных катушках и нелинейным изменением краевых проводимостей (потоков выпучивания) зон зазоров при повороте ротора на угол α.

Нулевые моменты, создаваемые трансформаторными преобразователями перемещений с ферромагнитным ротором, обусловлены наличием упругих моментов и технологическими погрешностями (неидеальностью) поверхностей, полюсов ротора и статора.

В отличие от взаимоиндуктивных датчиков с подвижным ротором момент тяжения преобразователей с подвижной катушкой практически отсутствует. Это объясняется тем, что подвижный элемент (сигнальные катушки) не имеет ферромагнитных масс, и, следовательно, не создает электромагнитного момента; а момент за счет взаимодействия тока в сигнальных катушках с переменным магнитным полем незначителен, т.к. токи в сигнальных катушках малы.

Основным недостатком взаимоиндуктивных ИП с подвижной катушкой является необходимость обеспечения дополнительных токоподводов к подвижному узлу прибора. Токоподводы создают и постоянные, и упругие моменты тяжения. Следует также отметить, что воздушные зазоры в датчиках с подвижной катушкой значительно больше, чем в преобразователях с подвижным ротором, и для обеспечения требуемой индукции в зазоре необходимо использовать большие токи возбуждения, что в свою очередь вызывает большое потребление мощности датчиков с подвижной катушкой.

2.4. Лабораторный практикум

Исследование взаимоиндуктивных измерительных преобразователей с подвижным ротором

Целью выполнения лабораторного практикума является изучение теоретических основ работы взаимоиндуктивных ИП, их схем построения и погрешностей, а также проведение экспериментальных исследований взаимоиндуктивных ИП с подвижным ротором.

Результаты экспериментальных исследований оформляются в виде отчета о проделанной лабораторной работе. Отчет должен содержать цель работы, измерительную схему лабораторной установки, эскиз ИП, схему замещения магнитной цепи и электрическую схему преобразователя, теоретические зависимости выходного напряжения от параметров ИП, все необходимые расчеты, таблицы и графики характеристик, а также вывод по работе, который должен включать в себя анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов. Пример оформления титульного листа и содержание отчета представлены в приложении.

При большом объеме однотипных расчетов в отчете допускается привести один из них.

2.4.1. Описание лабораторных установок

В работе исследуются два взаимоиндуктивных ИП: трехстержневой (см. рис. 2.2, 2.3), и взаимоиндуктивный датчик ИД-15. Схемы лабораторных установок представлены на рис. 2.13, *a*, *б*.

Каждая лабораторная установка выполнена в виде основания, на котором жестко закреплены исследуемый датчик 1 и микровинт 3. На основании расположены клеммы для подключения напряжения питания " $U_{пит}$ " и клеммы " $U_{вых}$ " для подключения измерительных приборов – вольтметра и осциллографа. Питание исследуемых ИП осуществляется от источника переменного напряжения: для трехстержневого ИП – $U_{п} = 26$ В, f = 400 Гц; для датчика ИД- $15 - U_{п} = 12$ В, f = 20000 Гц.

Отклонение ротора на фиксированные углы относительно измерительной оси производится с помощью микровинта, связанного через рычаг с ротором исследуемого ИП. Отсчёт углов перемещения производится по угловой шкале 2 и стрелке либо по показаниям микровинта 3.

При вращении микровинта ротор ИП поворачивается относительно статора, на выходе появляется сигнал в виде переменного напряжения. Контроль напряжения производится с помощью внешнего вольтметра переменного напряжения с пределом измерения не менее 10 В или осциллографа, которые подключаются к соответствующим выходным разъемам.



Рис. 2.13. Схемы лабораторных установок: *а)* трехстержневой ИП, *б)* взаимоиндуктивный датчик ИД-15: 1 – исследуемый ИП, 2 – шкала, 3 – микрометрический винт

2.4.2. Методика проведения эксперимента

Методика проведения эксперимента для обоих датчиков (трехстержневого трансформаторного ИП перемещений (рис. 2.13, *a*) и взаимоиндуктивного ИП перемещений ИД-15 (рис. 2.13, *б*)) аналогична и отличается только напряжением, частотой питания и диапазоном измерения. В методике эксперимента значения под буквой *a*) относится к трехстержневому трансформаторному ИП перемещений; значения под буквой *б*) – к взаимоиндуктивному ИП перемещений ИД-15.

Методика заключается в следующем:

1. Подключить к гнездам " $\sim U_{\text{пит}}$ " установки источник переменного напряжения, предварительно установив амплитуду выходного напряжения $U_{\text{п}}$ и частоту *f*:

a) $U_{\rm II} = 26$ B, f = 400 Гц;

б) $U_{\rm m} = 12 \text{ B}, f = 20 \text{ к} \Gamma \text{ц}.$

Значения контролируются по осциллографу.

2. К гнездам "U_{вых}" подключить вольтметр переменного напряжения и (или) осциллограф.

3. Вращая ручку микровинта, найти такое положение ротора ИП, при котором выходной сигнал будет минимальным.

4. Вращая ручку микрометрического винта, снять статическую характеристику $U_{\text{вых}} = U(\alpha)$:

- *а)* через 0,5 градуса в диапазоне перемещений $\Delta \alpha = \pm 10^{\circ}$ относительно найденного нулевого положения;
- б) через 1 градус в диапазоне перемещений $\Delta \alpha = \pm 15^{\circ}$ относительно найденного нулевого положения.

5. Подобным образом снять статические характеристики исследуемого ИП при различных амплитудах напряжениях питания (задаётся преподавателем) и частоте питания: *a*) f=400 Гц, δ) f=20 кГц.

Результаты занести в таблицу:

Входное пере-	Выходной сигнал при частоте питания $f = 400 \ \Gamma$ ц (20 кГц)					
α, град	$U_{\rm fr} = 26 \ {\rm B} \ (12 \ {\rm B})$	U_1, B	<i>U</i> ₂ , B	<i>U</i> ₃ , B		
<i>К</i> _{ср+} , В/град						
<i>К</i> _{ср-} , В/град						

6. Снять статические характеристики исследуемого ИП при амплитуде напряжении питания: *a*) $U_{\rm n} = 26$ B, *б*) $U_{\rm n} = 12$ B и различных значениях частоты питающего напряжения *f* (задаётся преподавателем).

Результаты занести в таблицу:

Входное пере-	Выходной сигнал при амплитуде напряжения питания $U_{\rm n} = 26$ B (12 B)					
а, град	<i>f</i> , Гц	<i>f</i> ₁ ,Гц	<i>f</i> ₂ , Гц	<i>f</i> ₃ , Гц		
<i>К</i> _{ср+} , В/град						
К _{ср-} , В/град						

7. Построить графики полученных зависимостей $U_{\text{вых}} = U(\alpha)$ при фиксированной частоте и различной амплитуде напряжения питания в одних осях, при фиксированной амплитуде и различных частотах – в других осях.

8. Определить среднюю крутизну положительной и отрицательной ветви статической характеристики для всех частот и напряжений питания по формулам:

$$K_{\tilde{\mathrm{n}}\tilde{\mathrm{o}}+} = \frac{U_{\mathrm{max}+} - U_{0}}{\alpha_{\mathrm{max}} - \alpha_{0}}, \quad K_{\tilde{\mathrm{n}}\tilde{\mathrm{o}}-} = \frac{U_{\mathrm{max}-} - U_{0}}{-\alpha_{\mathrm{max}} - \alpha_{0}},$$

где $U_{\text{max}+}$, $U_{\text{max}-}$ – максимальное значение измеренного напряжения при максимальном положительном и отрицательном углах, U_0 – минимальное (нулевое) значение измеренного напряжения, α_{max} , α_0 – максимальный угол и угол, соответствующий минимальному выходному сигналу (по стрелочной шкале). Данные занести в таблицы п. 5, п. 6 (нижние строки).

9. По полученным данным построить графики зависимостей крутизны характеристики от амплитуды и частоты питающего напряжения $K = K_U(U_{i})$ и $K = K_f(f)$ (по четырем точкам).

10. Построить графики зависимостей нулевого сигнала от амплитуды и частоты питающего напряжения $U_0 = U_{0U}(U_{\rm I})$ и $U_0 = U_{0f}(f)$ (по четырем точкам).

11. Провести анализ полученных результатов и сделать вывод.

2.4.3. Контрольные вопросы

1. Какое физическое явление положено в основу работы взаимоиндуктивных ИП?

2. Какие схемы построения взаимоиндуктивных ИП с подвижным ротором вы знаете? Расскажите об основных преимуществах и недостатках каждой из схем.

3. В каких областях и для измерения каких величин используются взаимоиндуктивные ИП с подвижным ротором?

4. Предложите варианты построения дифференциальных взаимоиндуктивных ИП с подвижным ротором для измерения линейных и угловых перемещений.

5. Назовите основные причины, обусловливающие наличие погрешностей взаимоиндуктивных ИП с подвижным ротором.

6. Назовите причины возникновения нулевого сигнала взаимоиндуктивных ИП с подвижным ротором. Какими способами можно уменьшить нулевой сигнал?

7. Какие моменты называют моментами тяжения взаимоиндуктивных ИП с подвижным ротором? Какова природа их возникновения?

8. Каким образом можно уменьшить момент тяжения взаимоиндуктивных ИП с подвижным ротором при условии обеспечения требуемой крутизны характеристики преобразователя?

9. Предложите пути повышения чувствительности шестиполюсного взаимоиндуктивного ИП (рис. 2.4) при ограничении:

а) габаритных размеров;

б) потребляемой мощности;

в) диапазона измерения.

2.5. Лабораторный практикум

Исследование взаимоиндуктивных измерительных преобразователей с подвижной катушкой

Целью выполнения лабораторного практикума является изучение теоретических основ работы взаимоиндуктивных ИП линейных и угловых перемещений, их схем построения и погрешностей, а также проведение экспериментальных исследований взаимоиндуктивных ИП с подвижной катушкой.

Результаты экспериментальных исследований оформляются в виде отчета о проделанной лабораторной работе. Отчет должен содержать цель работы, измерительную схему лабораторной установки, эскиз ИП, схему замещения магнитной цепи и электрическую схему преобразователя, теоретические зависимости выходного напряжения от параметров ИП, все необходимые расчеты, таблицы и графики характеристик, а также вывод по работе, который должен включать в себя анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов. Пример оформления титульного листа и содержание отчета представлены в приложении.

При большом объеме однотипных расчетов в отчете допускается привести один из них.

2.5.1. Описание лабораторной установки

В работе исследуется взаимоиндуктивный ИП с подвижной катушкой, дифференциальный по потоку (см. рис. 2.10). Схема лабораторной установки представлена на рис. 2.14.

Лабораторная установка выполнена в виде основания, на котором жестко закреплены исследуемый датчик *1* и микровинт *3*. На основании расположены клеммы для подключения напряжения питания " $U_{пит}$ " и клеммы " $U_{вых}$ " для подключения измерительных приборов – вольтметра и осциллографа. Питание исследуемого ИП осуществляется от источника переменного напряжения $U_{п} = 26 \text{ B}, f = 400 \text{ Гц}.$

Отклонение ротора на фиксированные углы относительно измерительной оси производится с помощью микровинта, связанного через рычаг с ротором исследуемого ИП (сигнальной катушкой). Отсчёт углов перемещения производится по угловой шкале 2 и стрелке либо по показаниям микровинта 3.

При вращении микровинта сигнальная катушка ИП поворачивается относительно статора, изменяется потокосцепление левого и правого полюсов и на выходе появляется сигнал в виде переменного напряжения. Контроль напряжения производится с помощью внешнего вольтметра переменного напряжения с пределом измерения не менее 10 В или осциллографа, которые подключаются к соответствующим выходным разъемам.



Рис. 2.14. Схема лабораторной установки: 1 – исследуемый взаимоиндуктивный ИП с подвижной катушкой, 2 – шкала, 3 – микрометрический винт

2.5.2. Методика проведения эксперимента

1. Подключить к гнездам "~ $U_{\text{пит}}$ " установки источник переменного напряжения, предварительно установив амплитуду выходного напряжения $U_{\text{п}} = 26 \text{ B}$ и частоту f = 400 Гц.

2. К гнездам "U_{вых}" подключить вольтметр переменного напряжения и (или) осциллограф.

3. Вращая ручку микровинта, найти такое положение ротора ИП, при котором выходной сигнал будет минимальным.

4. Вращая ручку микрометрического винта, снять статическую характеристику $U_{\text{вых}} = U(\alpha)$ через 1 градус в диапазоне перемещений $\Delta \alpha = \pm 10^{\circ}$ относительно найденного нулевого положения.

5. Аналогично п. 4 снять статические характеристики исследуемого ИП при напряжении питания $U_{\rm n} = 26$ В и различных значениях частоты питающего напряжения *f* (частота задаётся преподавателем).

6. Построить графики полученных зависимостей $U_{\text{вых}} = U(\alpha)$.

7. Определить текущую крутизну статической характеристики для снятых характеристик по формуле:

$$K_i = \frac{U_{i+1} - U_{i-1}}{\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1}},$$

где U_{i-1} , U_{i+1} – измеренные значения выходного напряжения в (i-1)-ой и (i+1)-ой точках характеристики, α_{i-1} , α_{i+1} – задаваемое угловое перемещение (значения, отстоящие друг от друга на 2 градуса).

Экспериментальные и расчетные данные занести в таблицу:

Входное пе-	<i>f</i> =400 Гц		<i>f</i> ₁ ,Гц		<i>f</i> ₂ , Гц		<i>f</i> ₃ , Гц	
ремещение α, град	$U_{\text{bbix}}, \mathbf{B}$	<i>К</i> _{<i>i</i>} , В/град	$U_{\text{BMX}}, \mathbf{B}$	<i>К</i> _{<i>i</i>} , В/град	$U_{\text{bbix}}, \mathbf{B}$	<i>К</i> _{<i>i</i>} , В/град	$U_{\text{вых}}, \mathbf{B}$	<i>К</i> _i , В/град

8. По полученным данным построить графики зависимостей крутизны характеристики от угла поворота сигнальной катушки при различных частотах питающего напряжения $K = K(\alpha)$.

9. Построить графики зависимостей нулевого сигнала от частоты питающего напряжения $U_0 = U_{0f}(f)$.

10. По графику статической характеристики (п. 4) на положительной ветке выделить участок вблизи нулевого угла, близкий к линейному. Снять уточненную статическую характеристику на выделенном линейном участке через 0,2 градуса, контролируя перемещение по показаниям микровинта. При этом следует считать, что угловое отклонение на выделенном участке пропорционально линейному перемещению, контролируемому по микровинту.

11. Считая, что выходной сигнал от углового перемещения на выделенном участке зависит линейно:

$$U_{\rm pac} = U_{\rm min} + K_{\rm cp}\alpha, \qquad (2.22)$$

определить среднюю крутизну характеристики K_{cp} , расчетное значение нулевого сигнала U_{min} , абсолютную ΔU и относительную γ погрешность линейности в каждой точке характеристики по следующим формулам:

$$K_{\|\bar{0}\|} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (U_i - U_0)}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i}, \quad U_{\min} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (U_i - K_{cp} x_i),$$

$$\Delta U_i = U_{\text{pac}i} - U_i, \quad \gamma_i = \frac{\Delta U_i}{U_{\text{pac}i}} 100 \%,$$

где $U_{\text{рас }i}$ – расчетное значение выходного напряжения в *i*-ой точке характеристики, определяемое по формуле (2.22), U_0 – минимальное измеренное значение выходного сигнала (нулевой сигнал).

Результаты расчетов свести в таблицу:

Входное переме- щение		Измеренное зна- чение напряже-	Расчетное зна-	Погрешность линейности		
х, мм	α, град	ния U _{изм} , В	ния U_{pac} , В	Δ, Β	γ, %	

12. Построить графики экспериментальной $U_{\mu_{3M}} = U(\alpha)$ и расчетной $U_{pac} = U(\alpha)$ характеристик для линейного участка.

13. Провести анализ полученных результатов и сделать вывод.

2.5.3. Контрольные вопросы

1. Какое физическое явление положено в основу работы взаимоиндуктивных ИП?

2. Какие схемы построения взаимоиндуктивных ИП с подвижной катушкой вы знаете? Расскажите об основных преимуществах и недостатках каждой из схем.

3. В каких областях и для измерения каких величин используются взаимоиндуктивные ИП с подвижной катушкой?

4. Предложите варианты построения дифференциальных взаимоиндуктивных ИП с подвижной катушкой для измерения линейных и угловых перемещений.

5. Назовите основные причины, обусловливающие наличие погрешностей взаимоиндуктивных ИП с подвижной катушкой.

6. Назовите причины возникновения нулевого сигнала взаимоиндуктивных ИП с подвижной катушкой, дифференциальных по магнитному потоку и по ЭДС. Какими способами можно уменьшить нулевой сигнал в каждой из схем?

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ (СИЛОВЫЕ) МОМЕНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В информационно-измерительных приборах и системах общего и специального назначения широко применяются системы коррекции, программного разворота подвижных углов, следящие системы, контуры силовой обратной связи. Исполнительными устройствами этих систем чаще всего являются силовые или моментные преобразователи, которые преобразуют электрический сигнал в механическую силу или момент.

В зависимости от выполняемых функций в составе измерительного устройства или системы силовые (моментные) преобразователи могут работать в режиме управления (например, в гироскопических приборах при начальной ориентации или программном развороте подвижного узла), в режиме компенсации (для компенсации вредных моментов, создаваемых конструктивными элементами устройства) и в режиме измерения (например, для измерения гироскопического момента в датчиках угловой скорости или силы инерции в акселерометрах). Требования, предъявляемые к моментным преобразователям, зависят от их назначения, т.е. от режима работы.

В режиме управления основным требованием к моментным преобразователям является обеспечение большого момента, достаточного для разворота подвижной системы с требуемой скоростью. В отношении стабильности момента и линейности характеристики особенно жестких требований обычно не предъявляется.

В режиме компенсации от силовых или моментных преобразователей не требуется создание больших моментов, но необходима высокая стабильность уровня момента в течение длительного времени.

Самые жесткие требования предъявляются к моментным преобразователям при их работе в режиме измерения: они должны развивать большие моменты и иметь низкие значения нестабильности и нелинейности характеристики.

В прецизионных навигационных приборах (акселерометрах, датчиках угловой скорости, гироскопах) наиболее широкое применение получили электромеханические силовые (моментные) преобразователи электромагнитного и магнитоэлектрического типа, которые могут работать как при аналоговом, так и при импульсном токах управления. Использование импульсных токов управления позволяет повысить стабильность и линейность характеристики моментных преобразователей и осуществить их связь с микропроцессорными вычислительными устройствами, которые в настоящее время широко применяются в измерительной технике.

Электромагнитные силовые (моментные) преобразователи рассматриваются в третьем разделе настоящего учебного пособия; магнитоэлектрические преобразователи – в четвертом разделе.

3.1. Принцип действия электромагнитных преобразователей

Конструктивно силовые (моментные) электромагнитные преобразователи (ЭМП) аналогичны рассмотренным ранее индуктивным и взаимоиндуктивным ИП. Отличие заключается в назначении и схемах включения обмоток.

Принцип действия ЭМП основан на эффекте силового взаимодействия магнитного поля, созданного электромагнитом, и введенного в него ферромагнитного тела (якоря, ротора). Электомагнитные преобразователи предназначены для преобразования управляющего электрического сигнала (тока i_y или напряжения U_y) в механическую силу или вращающий момент. В силовых преобразователях ротор может совершать линейные перемещения, в моментных преобразователях– угловые.

Типичный участок магнитной цепи моментных ЭМП, используемых в приборах в качестве исполнительных устройств и преобразователей обратной связи, представлен на рис. 3.1. На явно выраженных полюсах статора 1, выполненного из листового магнитомягкого материала, расположены катушки 2, в которых протекает ток управления. Ротор 3, имеющий возможность совершать угловые движения вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка, также выполнен из магнитного материала и в начальном положении наполовину перекрывает один (левый) полюс статора и целиком другой (правый). При поступлении в катушки управления управляющего тока i_v , в полюсах статора возникает магнитный поток Φ_v , который создает радиальные F_r и тангенциальные F_{τ} силы, стремящиеся переместить ротор так, чтобы магнитная энергия, запасенная в магнитной системе, была бы (стала бы) минимальной. Тангенциальные силы F_{τ} , приложенные к ротору, создают вращательный момент. На качество работы ЭМП оказывают влияние краевые потоки 4 и потоки рассеяния 5.

Момент, создаваемый электромагнитной системой с явно выраженными полюсами, определяется по формуле:

$$M = \sum_{j=1}^{n} M_{j}, \qquad (3.1)$$

где M_j – момент, действующий на ротор со стороны *j*-го полюса, *n* – число полюсов преобразователя.

В общем виде, выражение для момента, создаваемого *j*-м полюсом статора, получается из энергетического соотношения:

$$M_j = -\frac{dW_j}{d\beta}, \qquad (3.2)$$

где W_j – энергия магнитного поля, приходящаяся на участок магнитной цепи, содержащей зазор под *j*-м полюсом, β – угловое перемещение ротора.



Рис. 3.1. Типичный участок магнитной цепи моментного ЭМП: 1 – статор, 2 – катушки, 3 – ротор, 4 –силовые линии краевых магнитных потоков, 5 – силовые линии потоков рассеяния

Знак "минус" показывает, что магнитная энергия участка магнитной цепи убывает на dW_j , превращаясь в работу $M_j d\beta$, совершаемую моментом M_j при повороте ротора.

Энергия магнитной цепи, в общем случае складывается из энергии, запасенной непосредственно в рабочих зазорах, в зоне краевых потоков, в зоне потоков утечки и в стальных участках магнитопровода (ротора и статора). Учитывая, что энергия магнитного поля, запасенная непосредственно в рабочих зазорах много больше остальных составляющих, то при рассмотрении принципа действия ЭМП этими составляющими можно пренебречь. Тогда

$$W_j \approx \int_0^{\Phi_j} F_{i\ j} dF_{i\ j} , \qquad (3.3)$$

где Φ_j – результирующее значение магнитного потока в воздушном зазоре под *j*-м полюсом, F_{Mj} – магнитодвижущая сила, приходящаяся на *j*-й зазор, равная

$$F_{i j} = \frac{\Phi_j}{G_j},\tag{3.4}$$

G_j – магнитная проводимость *j*-го воздушного зазора. Подставляя (3.4) в (3.3), получим:

$$W_{j} = \frac{1}{G_{j}} \int_{0}^{\Phi_{j}} \Phi_{j} d\Phi_{j} = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{j}^{2}}{G_{j}} + \frac{1}{2} \frac{\Phi_{j0}^{2}}{G_{j}}, \qquad (3.5)$$

где Φ_{j0} – магнитный поток в *j*-м полюсе, возникающий из-за остаточной намагниченности материала магнитопровода.

Подставляя выражение для энергии магнитного поля (3.5) в формулу (3.2), определим момент, действующий на ротор со стороны *j*-го полюса статора:

$$M_{j} = -\frac{1}{2} \left(2 \frac{\Phi_{j}}{G_{j}} \frac{d\Phi_{j}}{d\beta} - \frac{\Phi_{j}^{2}}{G_{j}^{2}} \frac{dG_{j}}{d\beta} \right) - -\frac{1}{2} \left(2 \frac{\Phi_{j0}}{G_{j}} \frac{d\Phi_{j0}}{d\beta} - \frac{\Phi_{j0}^{2}}{G_{j}^{2}} \frac{dG_{j}}{d\beta} \right).$$
(3.6)

Для малых углов отклонения ротора можно считать, что магнитный поток в воздушном зазоре остается постоянным, поэтому

$$\frac{d\Phi_j}{d\beta} \approx 0, \ \frac{d\Phi_{j0}}{d\beta} \approx 0.$$

В этом случае выражение (3.1) принимает вид:

$$M = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n} \left(\frac{\Phi_{j}^{2}}{G_{j}^{2}} + \frac{\Phi_{j0}^{2}}{G_{j}^{2}} \right) \frac{dG_{j}}{d\beta} = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{2} \frac{\Phi_{j}^{2}}{G_{j}^{2}} \frac{dG_{j}}{d\beta} - M_{\hat{i}\hat{n}\hat{o}},$$

где $M_{\rm oct}$ – момент, обусловленный остаточной намагниченностью материала магнитопровода, создающий нулевой момент тяжения и порождающий вариации рабочих моментов.

Момент, обусловленный остаточной намагниченностью, в соответствии с (3.6), равен:

$$M_{\hat{i}\hat{n}\hat{o}} = -\frac{1}{2} \frac{\Phi_{j0}^2}{G_j^2} \frac{dG_j}{d\beta}.$$
 (3.7)

Если на каждом полюсе располагается по одной катушке с числом витков w_i и током i_i , то момент, развиваемый ЭМП, можно определить:

$$M = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n} (wi)_{j}^{2} \frac{dG_{j}}{d\beta}.$$
 (3.8)

Формула (3.8) получена без учета момента, обусловленного остаточной намагниченностью материала магнитопровода.

Если все катушки идентичны и протекающие в них токи равны $i_j = i_y$ (например, при последовательном соединении катушек), то

$$M = \frac{1}{2} w^2 i_{\delta}^2 \sum_{j=1}^n \frac{dG_j}{d\beta}.$$

Зависимость создаваемого ЭМП момента от управляющего сигнала при таком соединении катушек является нелинейной (квадратическая зависимость).



Рис. 3.2. Схема построения силового ЭМП с П-образным сердечником

На рис. 3.2 представлена построения схема силового ЭМП с П-образным сердечником. Данная схема аналогична схеме построения индуктивного ИП, рассмотренного в п. 1.1 (см. рис. 1.1). При подаче в катушку управляющего сигнала в виде тока или напряжения на ротор со стороны статора будет действовать сила. Работа этой сила по перемещению ротора определяется изменением энергии W магнитного поля, запасенной в магнитной системе. Из

этого энергетического соотношения можно определить силу, действующую на ротор:

$$F = -\frac{\partial W}{\partial \delta}$$

Энергия магнитного поля для ЭМП с П-образным сердечником:

$$W = \frac{1}{2}\Phi F_{i} = \frac{1}{2}\Phi w i_{o} = \frac{1}{2}(w i_{o})^{2}G_{\Sigma}, \qquad (3.9)$$

где G_{Σ} – суммарная проводимость магнитной цепи.

Дифференцируя выражение (3.9), определим силу, действующую на ротор:

$$F = -\frac{1}{2} \left(w i_{\delta} \right)^2 \frac{\partial G_{\Sigma}}{\partial \delta}.$$
(3.10)

Функция преобразования силового ЭМП, приведенного на рис. 3.2, – нелинейна. Для обеспечения линейной характеристики в ЭМП используются схемы с двумя системами катушек: обмотками возбуждения и обмотками управления. Конструктивно такие преобразователи аналогичны взаимоиндуктивным ИП. Пример схемы построения такого преобразователя показан на рис. 3.3.



Рис. 3.3. Схема построения ЭМП с Ш-образным сердечником с линейной характеристикой

Преобразователь представляет собой два Ш-образных сердечника, расположенных по разные стороны от ротора, выполненного в виде кольцевого магнитопровода. На центральном полюсе каждого из сердечников размещены по две катушки: одна – обмотка возбуждения, другая – управления. В обмотках возбуждения протекает постоянный ток $i_{\rm B}$, который намагничивает сердечники. Если в управляющих катушках ток отсутствует, то силы, действующие на ротор со стороны двух Ш-образных электромагнитных датчиков, уравновешивают друг друга $F_1=F_2$, и суммарный момент, действующий на ротор, равен нулю. Направление намотки катушек выполняется таким образом, что магнитные потоки $\Phi_{\rm B}$ и $\Phi_{\rm y}$, создаваемые соответственно токами возбуждения и управления в одном сердечнике складываются, а в другом – вычитаются. Поэтому при подаче управляющего сигнала (тока управления $i_{\rm y}$) сила, действующая на ротор со стороны другого сердечника, увеличивается, а сила, действующая на ротор со стороны другого сердечника, уменьшается. Результирующий момент, действующий на ротор, при этом равен:

$$M = (F_1 - F_2)r, (3.11)$$

где *r* – плечо действия силы (расстояние от центра кольцевого магнитопровода до середины электромагнита).

Суммарный магнитный поток в каждом сердечнике можно определить через магнитодвижущие силы создаваемые обмотками возбуждения и управления:

$$\Phi = (i_{\hat{a}} w_{\hat{a}} \pm i_{\acute{o}} w_{\acute{o}}) G_{\Sigma},$$

где w_в, w_у – число витков обмотки возбуждения и управления соответственно.

Знак "+" берется, когда потоки $\Phi_{\rm B}$ и $\Phi_{\rm y}$ совпадают по направлению, знак "-" - когда потоки $\Phi_{\rm B}$ и $\Phi_{\rm y}$ направлены противоположно.

По аналогии с формулой (3.10), учитывая направления потоков в магнитопроводе каждого преобразователя, определим силы F_1 и F_2 :

$$F_{1} = -\frac{1}{2} \left(i_{\hat{a}} w_{\hat{a}} + i_{\hat{o}} w_{\hat{o}} \right)^{2} \frac{dG_{\Sigma 1}}{d\delta}, \qquad (3.12)$$

$$F_{2} = -\frac{1}{2} \left(i_{\hat{a}} w_{\hat{a}} - i_{\hat{o}} w_{\hat{o}} \right)^{2} \frac{dG_{\Sigma 2}}{d\delta}, \qquad (3.13)$$

где $G_{\Sigma 1}$, $G_{\Sigma 2}$ – суммарные магнитные проводимости магнитных цепей левого и правого Ш-образных сердечников.

При симметричном положении кольцевого магнитопровода суммарные проводимости магнитных цепей каждого сердечника равны между собой:

$$G_{\Sigma 1}=G_{\Sigma 2}=G_{\Sigma}.$$

Подставляя выражения для сил (3.12) и (3.13) в формулу (3.10), определим момент, создаваемый преобразователем на рис. 3.3:

$$M = -2w_{\hat{a}}w_{\hat{o}}i_{\hat{a}}i_{\hat{o}}r\frac{dG_{\Sigma}}{d\delta}.$$
(3.14)

Как видно из формулы (3.14), функция преобразования ЭМП (рис. 3.3) является линейной. Однако линейность функции преобразования обеспечивается только для нулевого (симметричного) положения ротора. При отклонении ротора от нулевого положения проводимости магнитных цепей левого и прового сердечников становятся неравными, и линейность функции преобразования (3.14) нарушается. Чем больше отклонение ротора, тем больше погрешность линейности, поэтому одним из основных требований для обеспечения линейно-

сти статической характеристики и стабильности момента при проектировании ЭМП является требование малых (на сколько это возможно) перемещений ротора.

Применяя схемы построения ЭМП с двумя системами катушек (возбуждения и управления), можно обеспечить линейную функцию преобразования моментных преобразователей с симметричным многополюсным статором и ротором, типовой участок магнитной цепи которых изображен на рис. 3.1.

3.2. Схемы построения электромагнитных преобразователей

Конструктивные схемы электромагнитных моментных преобразователей приведены на рис. 3.4 – 3.7. Электромагнитные преобразователи состоят из статора и ротора с явно выраженными полюсами. Статор крепится к неподвижной части прибора, ротор – к подвижной. На полюсах статора, а в некоторых случаях на стенке магнитопровода, размещаются катушки возбуждения, управления, компенсации, перемагничивания.

Преобразователи с дифференциальным включением обмоток могут быть использованы в качестве моментных обратных преобразователей в приборах компенсационного типа с потенциометрическими ИП перемещений (схема соединения обмоток приведена на рис. 3.4, e). При повороте подвижной части прибора щетка потенциометра перемещается, происходит перераспределение токов i_{v1} , i_{v2} в обмотках моментного преобразователя и на ротор действует момент, направленный в сторону большего магнитного потока и стремящийся вернуть подвижную часть прибора в начальное положение.

Широкое практическое применение нашли моментные ЭМП с симметричным многополюсным статором и ротором с двумя системами обмоток, конструктивно аналогичных взаимоиндуктивным преобразователям (см. рис. 2.4 – 2.7). Число полюсов статора таких преобразователей может быть кратно трем (три, шесть, двенадцать) или четырем (четыре, восемь, шестнадцать). В первом случае на среднем полюсе каждой из трехполюсных секций размещается обмотка возбуждения, а на крайних полюсах – обмотки управления. Во втором случае на каждом полюсе располагаются по две обмотки: одна – возбуждения, другая – управления. Зависимость создаваемого ЭМП момента от управляющего сигнала в обоих случаях линейна.

На рис. 3.5 и 3.6 приведены примеры таких схем построения электромагнитных моментных преобразователей.

Схема построения моментного ЭМП на рис. 3.5 аналогична схеме построения взаимоиндуктивного ИП угловых перемещений типа микросин (см. рис. 2.6). На каждом из четырех полюсов статора размещены по две катушки – возбуждения и управления. Катушки управления, также как и катушки возбуждения, соединены между собой последовательно. В катушках возбуждения протекает постоянный ток $i_{\rm B}$, который намагничивает статор и ротор, и при отсутствии тока $i_{\rm y}$ в катушках управления ротор находится в устойчивом положении равновесия.





б)

a)







Рис. 3.4. Моментные ЭМП с поворотным якорем: *a*) с *H*-образным якорем, *b*) с *S*-образным якорем, *b*) с *T*-образным якорем, *c*), *d*) с дифференциальным включением обмоток, е) схема включения обмоток



Рис. 3.5. Схема построения моментного ЭМП типа микросин

При подаче управляющего сигнала в полюсах магнитопровода создаются магнитные потоки управления, которые складываются с потоками возбуждения в нечетных полюсах и вычитаются в четных, а при реверсе управляющего сигнала – наоборот (направления магнитных потоков, создаваемых токами возбуждения и управления, в полюсах статора на рис. 3.5 показаны стрелками). При этом в зонах диаметрально противоположных полюсов происходит синхронное увеличение или уменьшение магнитного потока по отношению к потоку возбуждения. Ротор, поворачиваясь, втягивается в зону полюсов с увеличивающимся магнитным потоком.

На рис. 3.6, *а* представлена схема построения двенадцатиполюсного моментного ЭМП. На полюсах 3, 6, 9, 12 расположены катушки возбуждения, включенные последовательно, на остальных полюсах – катушки управления. По магнитному включению катушки управления делятся на две группы. Первая группа расположена на полюсах 1, 4, 7, 10, вторая – на полюсах 2, 5, 8, 11.

Схема соединения катушек приведена на рис. 3.6, б. Точками на схеме обозначено начало обмоток.

При идеальном изготовлении преобразователя работу каждой трехполюсной секции можно рассматривать отдельно от остальных. Рассмотрим секцию, включающую полюса 2, 3, 4. Ток возбуждения, протекающий по обмотке возбуждения, расположенной на полюсе 3, создает поток возбуждения Φ_3 , который разделяется на две половины и замыкается через полюса 2 и 4, на которых размещены катушки управления.



Рис. 3.6. Двенадцатиполюсный моментный ЭМП: *а*) схема построения, *б*) схема соединения катушек

Наличие тока в катушках управления вызывает появление потока управления Φ_{24} , который замыкается через полюса 2 и 4 статора и полюс ротора. Через полюс 3 Φ_{24} , не проходит, т.к. в нем магнитные потоки управления, созданные токами в катушке 2 и 4 полюсов, были бы направлены встречно. Из рис. 3.6, *а* видно, что потоки возбуждения и управления направлены одинаково (складываются) в полюсе 4 и встречно (вычитаются) в полюсе 2. В результате на полюсе ротора действует момент, стремящийся повернуть ротор в сторону более сильного магнитного потока, т.е. в сторону полюса 4. Реверсирование момента производится изменением полярности тока управления.

На ротор моментных ЭМП, кроме вращающего момента, обусловленного действием тангенциальных сил F_{τ} , действуют радиальные силы притяжения ротора к статору (см. рис. 3.1). В симметричных схемах ЭМП, результирующее значение радиальной силы F_r , приложенной к ротору и нагружающей опоры прибора, близко к нулю, т.к. сила притяжения любого полюса уравновешивается силой притяжения диаметрально противоположного полюса.

Формула для расчета вращающего момента ЭМП с числом полюсов статора, кратным трем, имеет вид:

$$M_3 = -2n_3 w_{\hat{a}} w_{\hat{o}} i_{\hat{a}} i_{\hat{o}} \frac{dG_{\Sigma}}{d\beta}, \qquad (3.15)$$

где n_3 – количество трех полюсных секций, $G_{\Sigma} = G_0 G_1 / (G_0 + 2G_1)$ – суммарная проводимость участка магнитной цепи, соответствующего трехполюсной секции, G_0 , G_1 – магнитные проводимости воздушных зазоров под центральным и боковым полюсами соответственно.

Момент ЭМП с числом полюсов, кратным четырем, равен:

$$M_{4} = -nw_{\hat{a}}w_{\dot{o}}i_{\hat{a}}i_{\dot{o}}\frac{dG_{1}}{d\beta}, \qquad (3.16)$$

где *n* – количество полюсов статора, *G*₁ – магнитная проводимость одного воздушного зазора.

Применяя методы расчета магнитных цепей, можно определить результирующие магнитные потоки в полюсах статора, проводимости воздушных зазоров, а затем, используя формулы (3.15) и (3.16), вычислить номинальное значение момента, развиваемое ЭМП.

Как видно из (3.15), (3.16) функции преобразования рассматриваемых ЭМП являются линейными. Однако формулы (3.15), (3.16) получены для нулевого положения ротора, т.е. при условии равенства проводимостей воздушных зазоров под всеми полюсами преобразователей с числом полюсов, кратным четырем, и равенства проводимостей боковых зазоров трехполюсных секций преобразователей с числом полюсов, кратных трем. При отклонении ротора от нулевого положения магнитная цепь преобразователя становится несимметричной, и нарушается линейность зависимости развиваемого преобразователем момента от управляющего сигнала.

Приведенные формулы (3.15), (3.16) справедливы при питании обмоток возбуждения и управления постоянным током. Если ЭМП работает на переменном токе и токи возбуждения и управления $i_{\rm B}$ и $i_{\rm V}$ не совпадают по фазе, то формулы (3.15), (3.16) изменяются. Так, если токи возбуждения и управления имеют значения:

$$i_{\hat{a}} = \sqrt{2}I_{\hat{a}\hat{a}}\sin\omega t, \ i_{\hat{o}} = \sqrt{2}I_{\hat{o}\hat{a}}\sin(\omega t + \varphi),$$

то средняя величина момента, действующего за период изменения тока, для ЭМП с числом полюсов, кратным трем и четырем, соответственно равны:

$$M_3 = -2n_3 w_{\hat{a}} w_{\hat{o}} I_{\hat{a}\hat{a}} I_{\hat{o}\hat{a}} \frac{dG_{\Sigma}}{d\beta} \cos\phi, \qquad (3.17)$$

$$M_4 = -nw_{\hat{a}}w_{\hat{o}}I_{\hat{a}\hat{a}}I_{\hat{o}\hat{a}}\frac{dG_1}{d\beta}\cos\varphi, \qquad (3.18)$$

где ϕ – разность фаз токов возбуждения и управления, $I_{\rm BZ}$, $I_{\rm YZ}$ – действующие значения тока возбуждения и управления.

Из формул (3.17), (3.18) следует, что момент, создаваемый ЭМП различных приведенных типов одинаков при работе на переменном и постоянном токе лишь при нулевом фазовом сдвиге $\varphi = 0$.

В моментных ЭМП с числом полюсов кратным четырем на каждом полюсе статора могут располагаться не по две, а по одной катушке. Пример схемы построения такого преобразователя приведен на рис. 3.7, *а*.

На каждом полюсе восьмиполюсного статора имеется по одной обмотке. Катушки, расположенные на четных полюсах, равно как и катушки на нечетных полюсах соединены между собой последовательно. Ток управления подается в одну из групп катушек. При подаче управляющего сигнала в группу катушек на нечетных полюсах, возникшие магнитные потоки замыкаются только через полюса своей группы и создают момент одного направления (мгновенные направления магнитных потоков на рис. 3.7, *а* показаны стрелками). Реверс момента достигается переключением групп катушек (подачей тока управления, в данном случае, в катушки четных полюсов).

Схема соединения катушек управления показана на рис. 3.7, δ . Таким образом, в этой схеме, реверс момента достигается не изменением полярности тока управления i_y , а подключением к источнику питания различных групп катушек с помощью логического устройства (ЛУ), получающего информацию о полярности управляющего сигнала.

Мгновенное значение момента, созданного ЭМП, при наличии тока управления в четырех катушках (например, на нечетных полюсах):

$$M = -2(w_{\circ}i_{\circ})^{2} \frac{dG_{1}}{d\beta}.$$
 (3.19)

При этом считаем, что ротор находится в нулевом симметричном положении и проводимости всех воздушных зазоров одинаковы.

Из выражения (3.19) следует, что функция преобразования ЭМП на рис. 3.7, *а* нелинейная, что создает неудобства при его применении. Для получения линейных характеристик при высокой стабильности развиваемых моментов, ЭМП рассматриваемой группы питают током с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) (см. рис. 3.8, *а*) или импульсным током (рис. 3.8, *б*).



a)



Рис. 3.7. Восьмиполюсный моментный ЭМП: *а)* конструктивная схема построения, *б)* схема включения катушек управления

Действующее значение тока за период при ШИМ в соответствии с рис. 3.8, *a*, равно:

$$I_{\acute{o}\ddot{a}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{t_{\acute{e}}} [I(t)]^2 dt} = I_{i} \sqrt{\frac{t_{\acute{e}}}{T}}, \qquad (3.20)$$

где T – период изменения тока при ШИМ, $I_{\rm M}$ – амплитуда импульса тока, $t_{\rm H}$ – длительность импульса тока.



Рис. 3.8. Характер изменения тока управления ЭМП: *а*) ток с широтно-импульсной модуляцией, *б*) импульсный ток

Подставив (3.20) в (3.19), получим:

$$M_{\text{gèi}} = -2w_{\delta}^{2}I_{i}^{2}\frac{dG_{i}}{d\beta}\frac{t_{e}}{T}.$$
(3.21)

При ШИМ амплитудное значение тока $I_{\rm M}$ остается постоянным, а информативным параметром, связанным с управляющим сигналом, является длительность импульса тока $t_{\rm H}$ за период времени *T*. Таким образом, из выражения (3.21) следует, что при питании ЭМП током с ШИМ его статическая характеристика становится линейной: развиваемый момент $M_{\rm шим}$ линейно зависит от длительности импульса *t*_и. Задавая или измеряя с высокой точностью длительность импульса, также с высокой точностью создают или определяют момент.

При питании ЭМП импульсным током в обмотки, создающие положительный и отрицательный моменты, с периодичностью $T_{1\mu}$ поступают импульсы одинаковой и высокостабильной длительности $t_{1\mu}$ (см. рис. 3.8, б). При чем в каждом периоде длительностью T в обмотки, создающие положительный момент, импульсы тока поступают в течение времени t_+ , а в обмотки, создающие отрицательный момент, – в течение оставшегося времени ($T-t_+$). Средняя величина момента, развиваемого преобразователем за период времени T, при питании обмоток импульсным током определяется следующим образом:

$$M_{\dot{e}} = \frac{1}{T} \left(\int_{0}^{t_{+}} M_{1\dot{e}} dt - \int_{t_{+}}^{T} M_{1\dot{e}} dt \right) = -2w_{\dot{o}}^{2} I_{\dot{i}}^{2} \frac{dG_{1}}{d\beta} \frac{t_{1\dot{e}}}{T_{1\dot{e}}} \frac{n_{+} - n_{-}}{N}, \qquad (3.22)$$

где M_{1u} – единичный момент, развиваемый преобразователем при подаче в обмотки одного импульса длительностью t_{1u} , n_+ , n_- – число импульсов, поступивших в катушки, создающие положительный и отрицательный моменты, соответственно, $N = n_+ + n_-$ – общее число импульсов, поступивших в катушки за период времени *T*.

При равенстве числа импульсов $n_+ = n_-$, то есть при выполнении условия $t_+ = T/2$, средний момент, развиваемый преобразователем, равен нулю.

Из выражения (3.22) следует, что при питании ЭМП импульсным током задать или измерить момент можно, задав или измерив разность числа импульсов n_+ , поступивших в обмотки, создающие положительный момент, и числа импульсов n_- , поступивших в обмотки, создающие отрицательный момент. Подсчет числа импульсов и вычисление их разности выполняется с помощью микропроцессорных устройств.

3.3. Материалы элементов электромагнитных преобразователей

Материал магнитопроводов ЭМП должен обладать высокими значениями магнитной проницаемости и индукции насыщения, малыми коэрцитивной силой и потерями мощности на гистерезис и вихревые токи, а также высокой стабильностью магнитных характеристик.

В наибольшей степени удовлетворяют поставленным требованиям магнитомягкие материалы типа пермаллой: сплавы железа с никелем, легированные молибденом, хромом, медью (марки 50H, 79HM и др.). Для уменьшения нулевых остаточных моментов и потерь на перемагничивание магнитопровод чаще всего изготавливают набором из отдельных пластин. Недостатком пермаллоев являются сильная зависимость их магнитных характеристик от механических воздействий, обусловленных обработкой магнитопроводов и их монтажом в приборе. В случаях, когда требуется минимизировать нестабильность момента, обусловленную гистерезисными свойствами материала, роторы ЭМП изготовляют из ферритов (марки 2000HM1, 1000HM3, 3000HMC и др.). Основными достоинствами ферритов является пониженная чувствительность к механическим воздействиям, низкие потери на гистерезис и вихревые токи, простота изготовления деталей. Недостатками ферритов являются меньшие, чем у магнитомягких сталей, значения магнитной проницаемости, индукции насыщения и механической прочности.

Катушки управления и возбуждения мотаются медным проводом, диаметр которых несколько больше, чем в катушках индуктивных и взаимоиндуктивных преобразователей (обычно от 0,07 до 0,2 мм). В большинстве случаев катушки ЭМП выполняются бескаркасными. Часто для крепления катушек на полюсах, улучшения отвода тепла от них, а также для получения монолитной детали зоны полюсов статора заливают эпоксидными смолами.

3.4. Нулевые моменты электромагнитных преобразователей

Нулевые моменты, создаваемые ЭМП, возникают в основном за счет остаточной намагниченности материала ротора и статора и неидеальной геометрии рабочих поверхностей полюсов ротора и статора. Теоретически нулевой момент определяется по формуле (3.7), однако практическое определение остаточных магнитных потоков в каждом конкретном случае затруднительно, т.к. они зависят от магнитных свойств материала магнитопровода и предыстории его намагничивания.

Явление остаточной намагниченности характерно для любых магнитных материалов. Если не применять специальных мер, то нулевой момент, обусловленный остаточной намагниченностью материала, возникает при любом виде токов возбуждения и управления и существует после их исчезновения. При работе ЭМП на постоянном токе этот момент имеет наибольшее значение и его можно оценить по выражению:

$$M_{\rm oct} \approx 10^{-3} M_{\rm пред}$$

где $M_{\text{пред}}$ – значение предыдущего момента, т.е. момента, который развивал ЭМП перед измерением остаточного момента.

Для снижения величины нулевого момента, вызванного остаточной намагниченностью материала магнитопровода, применяется способ периодического размагничивания материала с помощью сильного переменного магнитного поля. Это поле создается специальными катушками, размещаемыми на статоре, питаемыми переменным током. В размагничивающие катушки подается импульсный ток через определенные промежутки времени с помощью программного устройства. При работе ЭМП на переменном токе нулевые моменты, обусловленные остаточной намагниченностью материала, минимальны, и обычно специальных мер для снижения нулевых моментов в таких случаях не требуется.

Неидеальность изготовления магнитопровода ЭМП (ротора, статора) приводит к тому, что рабочие поверхности полюсов ротора и статора имеют отклонение от формы поверхности гладких цилиндров, в результате чего зазоры между полюсами становятся неравномерными. В связи с этим магнитная энергия, запасенная в неравномерных зазорах между полюсами, оказывается неминимальной при центральном положении ротора, и на него действуют моменты тяжения (нулевые), стремящиеся увести ротор из центрального положения в такое, в котором магнитная энергия системы будет минимальной.

Снижение нулевого момента может быть достигнуто применением ЭМП, у которых при отсутствии управляющего сигнала результирующий магнитный поток в полюсе равен нулю. Такое требование не выполнимо в ЭМП, работа которых основана на взаимодействии магнитных потоков возбуждения и управления, т.к. необходимость постоянного существования потока возбуждения обусловлена самим принципом действия таких ЭМП.

Требование равенства нулю результирующего магнитного потока при отсутствии управляющего сигнала автоматически выполняется в ЭМП, питаемых токами с ШИМ (рис. 3.8, *a*), что обуславливает их применение в тех случаях, когда требуются очень низкие нулевые моменты.

Нестабильность момента, создаваемого ЭМП может быть оценена с помощью следующих формул:

а) при питании постоянным током

$$\frac{\Delta M}{M_{=}} = \frac{\Delta i_{\hat{a}}}{i_{\hat{a}}} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta r}{r} - \frac{\Delta \delta}{\delta};$$

б) при питании переменным током

$$\frac{\Delta M}{M_{\approx}} = \frac{\Delta i_{\hat{a}\hat{a}}}{i_{\hat{a}\hat{a}}} - tg\phi\Delta\phi + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta r}{r} - \frac{\Delta\delta}{\delta};$$

в) при питании током с ШИМ

$$\frac{\Delta M_{\text{ø\acute{e}i}}}{M_{\text{ø\acute{e}i}}} = 2\frac{\Delta I_{i}}{I_{i}} - \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta r}{r} - \frac{\Delta\delta}{\delta}.$$

Нестабильности геометрических размеров (ширины полюса Δh , радиуса ротора Δr и воздушного зазора $\Delta \delta$) обусловлены в основном изменениями температуры и в относительных величинах составляют порядка 10^{-4} . Нестабильности значений постоянного тока возбуждения $\Delta i_{\rm B}$, амплитуды тока при ШИМ $\Delta I_{\rm M}$ и временных интервалов ΔT могут быть доведены до уровня 10^{-5} . Более сложной задачей является обеспечение низких уровней нестабильности действующего значения переменного тока возбуждения $\Delta i_{\rm Bd}$ и особенно его фазы $\Delta \varphi$. Поэтому там, где требуется высокая стабильность момента, силовые и моментные ЭМП, работающие на переменном токе, не применяются.

Из-за упругих деформаций опор приборов и наличия в них зазора, ротор ЭМП может смещаться в радиальном направлении относительно статора на некоторую величину Δ . Из всех типов, рассмотренных ЭМП, только двенадцатиполюсный ЭМП (рис. 3.6) не имеет вариации момента от радиального смещения ротора. Во всех других симметричных конструкциях такая вариация имеет место и ее величина пропорциональна относительному радиальному смещению в квадрате $(\Delta/\delta)^2$.

Кроме того, наличие радиального смещения ротора приводит к тому, что результирующая радиальная сила притяжения ротора к статору, становится неравной нулю. При этом создается дополнительная нагрузка на опоры и возрастает момент трения.

Вариация момента ЭМП при повороте ротора на некоторый угол β относительно статора, обуславливается перераспределением потоков возбуждения и управления. В этом случае вариация момента пропорциональна величине:

$$\frac{\Delta M}{M} \sim \frac{w_{\rm o} i_{\rm o}}{w_{\rm a} i_{\rm a}} \frac{\beta}{\beta_0},$$

где β_0 – угол, равный половине угла размаха полюса статора (см. рис. 3.6, *a*).

Конструктивное оформление силовых и моментных ЭМП позволяет использовать их в качестве взаимоиндуктивных ИП угловых и линейных перемещений. Это существенное достоинство ЭМП, способствующее унификации элементов информационно-измерительных систем.
3.5. Лабораторный практикум

Исследование электромагнитных моментных преобразователей

Целью выполнения лабораторного практикума является изучение теоретических основ работы силовых и моментных ЭМП, их схем построения и погрешностей, а также проведение экспериментальных исследований электромагнитного моментного преобразователя.

Результаты экспериментальных исследований оформляются в виде отчета о проделанной лабораторной работе. Отчет должен содержать цель работы, измерительную схему лабораторной установки, эскиз ИП, теоретические зависимости развиваемого преобразователем момента от управляющего сигнала (тока или напряжения), все необходимые расчеты, таблицы и графики характеристик, а также вывод по работе, который должен включать в себя анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов. Пример оформления титульного листа и содержание отчета представлены в приложении.

При большом объеме однотипных расчетов в отчете допускается привести один из них.

3.5.1. Описание лабораторной установки

В работе исследуется электромагнитный моментный преобразователь несимметричного типа, схема построения которого соответствует рис. 3.4, *в*. Схема лабораторной установки представлена на рис. 3.9.

Установка выполнена в виде рычажной системы, одно колено которой связано с якорем моментного ЭМП 1, укрепленным на оси подвижного узла 2. Подвижный узел установлен в подшипниках на основании установки 3. На другом плече размещен подвижный груз 4. Величина перемещения груза по резьбе рычага 5 контролируется по линейке 6.

Ток в обмотку моментного преобразователя подается от внешнего источника регулируемого управляющего напряжения 7 (источника постоянного напряжения или генератора переменного напряжения). Контроль управляющего напряжения U_{ynp} производится с помощью внешнего вольтметра V, величина тока управления контролируется амперметром A, вмонтированным в панель лабораторной установки.

Для измерения угла отклонения рычага 5 от горизонтального положения используется взаимоиндуктивный преобразователь угловых перемещений 8, подключенный к входу фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ). Для питания взаимоиндуктивного преобразователя угловых перемещений используется дополнительный внешний источник: $U_{\text{пит}}$ = 36 В, $f_{\text{пит}}$ = 400 Гц. Сигнал с ФЧВ подается на вольтметр 9 (V₀), шкала которого проградуирована в единицах углового перемещения. Вольтметр V₀, так же, как и амперметр A, вмонтирован в панель лабораторной установки.



5 – рычаг, 6 – линейка, 7 – источник постоянного напряжения (управляющего сигнала), 8 – взаимоиндуктивный датчик угла, 1 – электромагнитный моментный преобразователь, 2 – подвижный узел, 3 – основание установки, 4 – подвижный груз, Рис. 3.9. Схема лабораторной установки "Электромагнитный моментный преобразователь": 9 – вольтметр, отображающий сигнал датчика угла При подаче тока управления I_{ynp} в обмотку преобразователя развиваемый преобразователей момент стремится переместить вверх рычаг 5 с грузом 4. Сила тяжести, действующая на груз, создает противодействующий момент направленный встречно вращающему моменту, действующему со стороны ЭМП. Горизонтальное положение рычага подвижной системы соответствует положению равновесия, при котором вращающий и противодействующий моменты равны. Таким образом, в положении равновесия подвижной системы вращающий момент ЭМП можно рассчитать, зная момент, создаваемый силой тяжести. В положении равновесия рычаг с грузом находится в горизонтальном положении, о чем свидетельствует нулевое показание вольтметра V₀.

3.5.2. Методика проведения эксперимента

1. Подключить кабель питания датчика угла к источнику переменного напряжения 36 В, 400 Гц.

2. К клеммам "V" на лицевой панели лабораторной установки, подключить выносной вольтметр.

3. Груз 4 (рис. 3.9) поставить в крайнее левое положение соответствующее минимальной длине *l* рычага.

4. Подключить источник управляющего сигнала (источник постоянного напряжения или генератор звуковой частоты) к гнездам " $U_{\text{упр}}$ " установки. Источник управляющего сигнала задается преподавателем.

5. Включить питание установки (тумблер поставить в положение "ВКЛ").

6. Перемещением рукоятки "Регулировка выхода" источника управляющего сигнала добиться того, чтобы стрелка вольтметра V_0 находилась в нулевом положении шкалы.

7. Записать соответствующие этому положению груза ток в обмотке исследуемого преобразователя и напряжение на нем (показания встроенного в лабораторную установку амперметра **A** и внешнего вольтметра **V**).

8. Определить вращающий момент, развиваемый ЭМП, по формуле:

$$M_{\hat{a}\hat{o}} = mgl$$
,

где m = 6 г – масса груза, g = 9,81 кг м/с, l – расстояние от оси вращения подвижной части до центра масс груза (по делениям линейки).

9. Перемещая последовательно груз 4 по рычагу 5 (рис. 3.9) от начального положения в сторону увеличения l с шагом 5 мм и выполняя при этом пункты 6, 7, 8, снять статические характеристики преобразователя: $M_{\rm Bp}=f(I_{\rm VIIP})$; $M_{\rm Bp}=\phi(U_{\rm VIIP})$.

10. Рассчитать среднюю крутизну статической характеристики исследуемого ЭМП по току $K_{I \, cp}$ и по напряжению $K_{U \, cp}$ по следующим формулам:

$$K_{I\,\tilde{n}\tilde{0}} = \sum_{i=1}^{n} M_{\hat{a}\tilde{0}\,i} \left/ \sum_{i=1}^{n} I_{\check{0}\tilde{1}\tilde{0}\,i}, K_{U\,\tilde{n}\tilde{0}} = \sum_{i=1}^{n} M_{\hat{a}\tilde{0}\,i} \left/ \sum_{i=1}^{n} U_{\check{0}\tilde{1}\tilde{0}\,i}, \right.$$

75

где n – количество измерений, $I_{ynp i}$, $U_{ynp i}$ – измеренные ток в катушке моментного преобразователя и напряжение на ней в *i*-й точке эксперимента (при текущем положении груза), $M_{Bp i}$ – рассчитанный вращающий момент ЭМП в этой точке.

11. Определить нелинейность по току σ_I и по напряжению σ_U в каждой точке статической характеристики ЭМП по следующим формулам:

$$\sigma_{Ii} = \frac{M_{\hat{a}\delta i} - K_{I\tilde{n}\delta}I_{\delta\tilde{i}\delta i}}{M_{\hat{a}\delta \max}} 100\%, \ \sigma_{Ui} = \frac{M_{\hat{a}\delta i} - K_{U\tilde{n}\delta}U_{\delta\tilde{i}\delta i}}{M_{\hat{a}\delta \max}} 100\%,$$

где *М*_{вр тах} – максимальное значение вращающего момента.

12. Экспериментально полученные и расчетные данные занести в таблицу:

<i>l</i> , м	<i>I</i> _{упр} , А	$U_{ m yпp},{ m B}$	$M_{вр}, H \cdot м$	σ _I , %	σ_{U} , %

13. Построить графики экспериментальных характеристик: $M_{\rm BP}=f(I_{\rm ynp})$, $M_{\rm BP}=\phi(U_{\rm ynp})$, и расчетных линейных характеристик: $M_{\rm лин}=K_{I\,cp}I_{\rm ynp}$, $M_{\rm лин}=K_{U\,cp}U_{\rm ynp}$.

14. Провести анализ полученных результатов и сделать вывод.

3.5.3. Контрольные вопросы

1. Какое физическое явление положено в основу работы силовых и моментных ЭМП?

2. В каких областях и для каких целей используются ЭМП?

3. Какие схемы построения ЭМП вы знаете?

4. Приведите сравнительный анализ ЭМП с одной и двумя системами катушек.

5. Назовите основные элементы конструкции ЭМП.

6. Какие материалы применяются при изготовлении элементов конструкции ЭМП?

7. Назовите основные причины, обусловливающие наличие погрешностей ЭМП.

8. Как зависит момент, создаваемый моментным ЭМП, от угловых перемещений ротора?

9. Назовите причины, обусловливающие нелинейность статической характеристики ЭМП при различных способах построения и схемах включения. Какими способами можно уменьшить погрешность линейности?

10. Назовите причины возникновения нулевых моментов ЭМП. Какими способами можно уменьшить нулевые моменты?

76

4. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

4.1. Принцип действия магнитоэлектрических преобразователей

Принцип действия магнитоэлектрических преобразователей (МЭП) основан на законе Ампера, в соответствии с которым на проводник с током, расположенный в магнитном поле, действует сила, стремящаяся вытолкнуть про-

водник из магнитного поля. Направление силы определяется по правилу левой руки (рис. 4.1). Магнитное поле создается постоянными магнитами. Для усиления магнитного поля и концентрации его в рабочем зазоре используют магнитопровод. Для увеличения выталкивающей силы в зоне магнитного поля размещается не один проводник, а катушка (или часть катушки).



Рис. 4.1. К определению направления силы

Выталкивающая сила в соответствии с законом Ампера определяется по формуле:

$$F = w_a l_a B_{\delta c} I \sin \alpha \,, \tag{4.1}$$

где l_a – активная длина катушки, т.е. та часть витка катушки, которая находится в магнитном поле, и на которую действует выталкивающая сила, w_a – число витков катушки, находящихся непосредственно в магнитном поле, B_{p3} – магнитная индукция в рабочем зазоре, I – ток, протекающей в катушке (измеряемый или управляющий сигнал), α – угол между направлением тока и силовыми линиями магнитной индукции.

Момент, создаваемый МЭП, равен:

$$M = rn_{\hat{e}}F = rn_{\hat{e}}w_{a}l_{a}B_{\delta c}I\sin\alpha, \qquad (4.2)$$

где r – плечо приложения силы F, n_{κ} – число частей катушек, на которые действует сила F.

В зависимости от того, как конструктивно расположены постоянный магнит и катушки преобразователя, различают МЭП с внешним (наружным) магнитом и с внутрирамочным магнитом. В зависимости от того, какой элемент преобразователя является подвижным, различают МЭП с подвижной катушкой и неподвижным наружным или внутрирамочным магнитом, или с подвижным внутрирамочным магнитом.

Магнитоэлектрические преобразователи широко применяются в электроизмерительной технике и элементах автоматических приборных устройств: гальванометрах различных типов, логометрах, силовых или моментных преобразователях, магнитоэлектрических реле, двигателях отработки и т.д.

Достоинством МЭП является высокая точность, большой вращающий момент (высокая чувствительность), малое собственное потребление мощности, линейность характеристики. К недостаткам можно отнести возможность работы преобразователей только на постоянном токе, а также относительную сложность конструкции.

4.2. Магнитоэлектрические преобразователи гальванометрического типа

К гальванометрическим МЭП относятся преобразователи, у которых вращающий и противодействующий моменты имеют разную физическую природу, причем противодействующий момент не зависит от напряжения источника питания, т.е. от управляющего или измеряемого сигнала. Обычно противодействующий момент создается двумя пружинами, которые в большинстве конструкций с подвижными катушками и неподвижным магнитом выполняют одновременно и функцию токоподводов. Реже применяют "магнитную пружину", т.е. систему из двух постоянных магнитов, один из которых укрепляют на подвижной части, а второй – на неподвижной части преобразователя.

На рис. 4.2 изображена электрокинематическая схема гальванометра, в конструкции которого использован магнитоэлектрический моментный преобразователь с наружным неподвижным магнитом *1* и подвижной плоской катушкой *4*. Подобные конструкции применяются в большинстве стрелочных приборов для измерения тока или других физических величин, функционально связанных с током в катушке.

При протекании в катушке 4 тока на две смежных части катушки, расположенных между полюсными наконечниками 2 и цилиндрическим магнитопроводом 3, действует пара сил, разворачивающая катушку вокруг оси 5. Пара сил создает вращающий момент, который определяется аналогично формуле (4.2):

$$M = 2rw_a l_a B_{\delta c} I \sin \alpha \,. \tag{4.3}$$

При этом активная длина катушки l_a равна ширине полюсных наконечников, а плечо приложения силы – половине ширины катушки: r = b/2. В рассматриваемой конструкции все витки катушки находятся в магнитном поле, поэтому $w_a = w$.

Силовые линии магнитной индукции в рабочем зазоре направлены перпендикулярно поверхностям магнитопровода и полюсных наконечников, т.е. по радиусу. В этом случае угол α между направлением тока и линиями магнитной индукции при разворотах катушки всегда остается равным 90 градусов.



Рис. 4.2. Схема построения магнитоэлектрического гальванометра: 1 – постоянный магнит, 2 – полюсные наконечники (арматура), 3 – цилиндрический магнитопровод, 4 – подвижная рамка (катушка), 5 – полуось, 6 – керн, 7 – подпятник, 8 – винт, 9 – спиральные противодействующие пружины, 10 – узел корректора, 11 – узел стрелки, 12 – противовесы

С учетом сказанного ранее вращающий момент (4.3) можно определить следующим образом:

$$M = w l_a b B_{\delta c} I = w S_{\dot{a}} B_{\delta c} I$$
,

где $S_a = b l_a -$ активная площадь рамки.

Противодействующий момент при повороте катушки в гальванометре создается двумя спиральными пружинами 9, служащими одновременно токоподводами обмотки преобразователя. Противодействующий момент спиральных пружин равен:

$$M_{i\delta} = 2G_{i\delta}\phi_{i\delta}$$

где G_{np} – суммарная жесткость одной пружины, ϕ – угол поворота подвижной системы.

В установившемся режиме вращающий момент уравновешивается противодействующим: $M = M_{пр}$. Из этого условия можно определить угол отклонения подвижной системы:

$$\varphi = \frac{w S_{\dot{a}} B_{\delta \varsigma}}{2 G_{\bar{\imath} \delta}} I \, .$$

Если индукция в рабочем зазоре распределена равномерно, т.е. одинакова во всех точках, то угол отклонения подвижной системы пропорционален протекающему в катушке току и статическая характеристика магнитоэлектрического гальванометра линейна.

4.3. Магнитоэлектрические логометры

4.3.1. Принцип действия логометров

В магнитоэлектрических преобразователях логометрического типа (логометрах) и вращающий, и противодействующий моменты имеют одинаковую физическую природу и оба зависят от напряжения питания, т.е. от измеряемых токов. В логометрах измеряемой величиной является не ток, а отношение токов в двух или более электрических цепях. Так как измеряемой является относительная величина (отношение токов), то показания логометров практически не зависят от колебаний напряжения источника питания. Это обстоятельство послужило причиной широкого применения логометров в приборах технологического контроля при измерении неэлектрических величин электрическими методами. Обычно логометры используются в дистанционных измерительных приборах в качестве указателей.

Подвижная часть логометра может быть связана с катушками (рамками) с током или с магнитом. Принцип действия обеих конструктивных схем аналогичен.

Рассмотрим принцип действия на примере двухрамочного магнитоэлектрического логометра с подвижными рамками, принципиальная схема которого представлена на рис. 4.3.

Подвижная система логометра состоит из двух рамок I и II, жестко закрепленных между собой под углом γ . По рамкам протекают токи I_1 и I_2 , и на те части катушек, которые расположены в магнитном поле, действуют силы F_1 и F_2 , определяемые аналогично формуле (4.1). Направление токов в рамках таково, что вращающий момент, создаваемый парой сил F_1 , действующих на одну рамку, направлен встречно противодействующему моменту, создаваемому парой сил F_2 , действующих на другую рамку. Названия моментов приняты условно, например, вращающим обычно называют момент, вызывающий перемещение подвижной системы по направлению часовой стрелки, а противодействующим – момент, вызывающий перемещение подвижной системы против часовой стрелки.



Рис. 4.3. Принципиальная схема магнитоэлектрического логометра

Моменты M_1 и M_2 , развиваемые рамками логометра, зависят как от токов, протекающих в рамках, так и от положения рамок в рабочем зазоре, причем последнее обусловлено тем, что в конструкции логометра предусматривают, чтобы при перемещении рамок в рабочем зазоре менялась и величина магнитного потока, сцепляемого с витками соответствующей рамки. Изменение магнитного потока в рабочем зазоре может быть осуществлено либо созданием зазоров переменной величины, в результате чего изменяется индукция магнитного поля в различных участках зазора, либо изменением активной длины рамок, либо намагничиванием постоянного магнита по определенному закону. Моменты M_1 и M_2 при этом равны:

$$M_1 = \Phi_1 I_1 w_1, \quad M_2 = \Phi_2 I_2 w_2, \tag{4.4}$$

где Φ_1 и Φ_2 – магнитные потоки, охватываемые витками катушек, w_1 , w_2 – число витков соответствующей катушки.

Магнитные потоки, охватываемые витками рамок, равны:

$$\Phi_1 = B_1 S_1 = B_1 a_1 b_1, \quad \Phi_2 = B_2 S_2 = B_2 a_2 b_2, \tag{4.5}$$

где B_1 , B_2 – соответственно индукции в зазоре в месте расположения активных сторон рамок, S_1 и S_2 — активные площади рамок, a_1 , a_2 – активные длины рамок, b_1 , b_2 – ширина рамок.

В положении равновесия действующие на подвижную систему вращающий и противодействующий моменты равны. При этом, если пренебречь вредными моментами (трением в опорах, моментом токопроводов и т.д.), с учетом (4.4) и (4.5) можно записать:

$$B_1 S_1 w_1 I_1 = B_2 S_2 w_2 I_2 \,. \tag{4.6}$$

Если число витков в катушках одинаково $w_1=w_2=w$, то из выражения (4.6) получим:

$$\frac{B_1 S_1}{B_2 S_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

Из последнего уравнения следует, что для обеспечения зависимости угла поворота подвижной системы логометра от отношения токов, необходимо, чтобы индукция в зазоре была переменной или активная площадь рамки изменялась при повороте катушек.

В логометре, принципиальная схема которого представлена на рис. 4.3, активные площади катушек остаются постоянными $S_1=S_2=S$, а зависимость магнитной индукции от положения рамок достигается выполнением зазора переменной длины. Например, если ток в первой рамки больше тока во второй рамки $I_1>I_2$, то вращающий момент M_1 будет больше момента M_2 , т.е. $M_1>M_2$. Рамка I перетянет рамку II, и система будет двигаться по направлению действия силы F_1 . По мере поворота рамка I с большим током I_1 будет перемещаться в зону пониженной индукции, и ее вращающий момент будет уменьшаться. Рамка II с меньшим током I_2 будет приближаться к зоне наибольшей индукции, и ее момент будет возрастать. При равенстве моментов система придет в новое положение равновесия, развернувшись на некоторый угол φ . При этом можно записать

$$\frac{B_1(\phi)}{B_2(\phi)} = \frac{I_2}{I_1} \,. \tag{4.7}$$

Изменение распределения магнитного потока в рабочем зазоре на ряду с переменной величиной рабочего зазора может быть достигнуто использованием постоянных магнитов, намагниченных по определенному закону.

Если же в рабочих зазорах величина индукции постоянна $B_1=B_2=B$, то для работы системы необходимо, чтобы отношение величин S_1 и S_2 изменилось при повороте подвижной системы на некоторый угол:

$$\frac{S_1(\alpha)}{S_2(\alpha)} = \frac{I_2}{I_1}.$$
(4.8)

Такому способу изменения распределения магнитного потока в рабочем зазоре соответствуют конструкции с переменной активной длиной витков рамки (см. п. 4.3.2, рис. 4.4).

Решая уравнения (4.7) или (4.8) относительно угла ϕ , можно определить зависимость угла отклонения подвижной системы от отношения токов в рамках логометра, когда система находится в равновесии:

$$\varphi = f\left(\frac{I_2}{I_1}\right). \tag{4.9}$$

Выражение (4.9) является функцией преобразования магнитоэлектрического логометра. Отношение приращения угла отклонения подвижной системы к приращению отношения токов в рамках, вызвавших это отклонение, называется чувствительностью логометра:

$$K = \frac{d\varphi}{d(I_2/I_1)}.$$

Следовательно, для каждой конструкции логометра угол отклонения его подвижной системы определяется только отношением токов в его рамках, но вид уравнения (4.9) зависит от способа создания формы магнитного поля в рабочем зазоре магнитной системы, т.е. определяется конструктивными особенностями логометра.

При выборе конструктивных параметров логометра обычно исходят из следующих условий:

- а) равномерности шкалы логометра;
- б) устойчивости состояния равновесия подвижной системы логометра в любых положениях;
- в) требуемой чувствительности логометра.

4.3.2. Типы конструкций логометров

Наибольшее распространение получили логометры с подвижными рамками и неподвижным наружным или внутрирамочным магнитом и логометры с подвижным внутрирамочным магнитом. По числу рамок, участвующих в создании моментов, различают двухкатушечные и трехкатушечные логометры.

Рассмотрим несколько типовых конструкций магнитоэлектрических логометров.



Рис. 4.4. Логометр с наружным неподвижным магнитом: 1 – постоянный магнит, 2 – рамки, 3 – полюсные наконечники, 4 – стрелка

На рис. 4.4 показан эскиз логометра с подвижными рамками и неподвижным наружным магнитом.

Магнитная система логометра образована неподвижным наружным магнитом 1. Форма магнитного поля в рабочем зазоре в данной конструкции создается специальной формой полюсных наконечников 3. Подвижная система логометра образована двумя каркасными рамками 2, прикрепленными к оси с впрессованными в нее кернами и стрелкой 4 с противовесами. Подвижная система опирается на два корундовых подпятника. Обе рамки размещены по одну сторону оси вращения подвижной системы, что обеспечивает большой угол размаха шкалы до 240 градусов и более. Связанная с осью вращения вторая сторона каждой рамки экранирована когтеобразным наконечником 3.

Рамки логометра расположены под некоторым углом друг к другу и перемещаются в одном и том же воздушном зазоре. Так как полюсные наконечники профилированы, то с поворотом рамок логометра меняются длины их активных сторон, что создает зависимость вращающих моментов рамок от угла поворота подвижной системы (см. формулу (4.8)).

В качестве токоподводов используются маломоментные спиральные пружины, возвращающие при отклонении электропитания подвижную систему логометра к исходному положению. Шкала прибора градуируется с учетом действия на подвижную систему моментов спиральных пружин.

Корпус прибора, так же как и шкала, изготавливаются из магнитомягкого материала и выполняют функцию магнитного экрана.

На рис. 4.5 показан эскиз логометра с подвижными рамками и внутрирамочным неподвижным постоянным магнитом. Магнитная система логометра образована внутрирамочным цилиндрическим магнитом *1* и магнитопроводом *2*. Магнит намагничен вдоль своего диаметра. Индукция в зазоре такой магнитной системы распределена по синусоидальному закону. Тогда в зоне зазора, совпадающей с нейтральной осью магнита, индукция равна нулю, а в зоне, расположенной по длине полюсов магнита, индукция максимальна.



Рис. 4.5. Логометр подвижными рамками и внутрирамочным магнитом: 1 – магнит, 2 – магнитопровод, 3 – рамки, 4 – профилированное кольцо, 5 – токоподводы, 6 – стрелка

Подвижная система логометра образована двумя рамками 3, расположенными под углом δ друг к другу, стрелкой 6 с противовесами и двумя полуосями с запрессованными в них кернами. Керны опираются в два подпятника (на рис. 4.5 не показаны). Величина угла δ влияет на характер шкалы: чем меньше угол, тем больше размах шкалы, но меньше чувствительность логометра. В реальных конструкциях логометров угол δ имеет величину порядка 18...25 градусов.

Каждая рамка логометра может быть выполнена из двух половинок, расположенных по обе стороны оси вращения подвижной системы. Одна из рамок имеет меньшую длину среднего витка, так как ее необходимо вставить в другую рамку. Вследствие этого ее активное сопротивление при условии равенства витков получается меньше. Токоподводами к рамкам служат спиральные безмоментные пружины 5, возвращающие подвижную систему к нулю при отключении электропитания.

Для успокоения колебаний при переходных процессах в логометрах с подвижными рамками используются успокоители магнитоиндукционного типа.

Угол поворота подвижной системы логометра по рис. 4.5 определяется следующим образом:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sin\delta}{I_1/I_2 - \cos\delta}\right). \tag{4.10}$$

Формула (4.10) показывает, что угол отклонения подвижной системы зависит только от отношения токов, а угол б жесткого закрепления рамок между собой определяет чувствительность логометра. По уравнению (4.10) может быть рассчитана шкала логометра.

Для получения более равномерной шкалы логометра с внутрирамочным магнитом (рис. 4.5) распределение магнитного потока в рабочем зазоре корректируют с помощью профилированного кольца 4, которое изготавливается из магнитомягкой стали и насаживается на наружную поверхность цилиндрического магнита. Профилированное кольцо захватывает часть магнитного потока магнита, экранируя его, и тем самым, обеспечивает зависимость активной длины рамок от угла поворота подвижной системы. Высота кольца меняется по окружности магнита так, чтобы обеспечить необходимую равномерность шкалы логометра. Таким образом, в рассмотренной конструкции логометра (рис. 4.5) одновременно реализуются зависимости угла поворота рамок и от распределения индукции в рабочем зазоре (4.7) за счет синусоидального закона распределения, и от активной длины катушек (4.8) за счет использования профилирующего кольца.

На рис. 4.6 показан эскиз логометра с подвижным магнитом и неподвижными рамками. Логометр состоит из двух пар неподвижных рамок 3 и 5, между которыми проходит ось подвижной системы 6, состоящей из подвижного магнита 1, стрелки 8 и противовесов 7. Рамки расположены под углом γ друг к другу, который определяет размах шкалы прибора. Угол γ закрепления рамок обычно равен 90 или 120 градусов (на рис. 4.6 угол $\gamma = 120^{\circ}$). Подвижная система укреплена внутри пермаллоевого кольцевого магнитопровода 4, уменьшающего рассеяние магнитного потока и предохраняющего логометр от влияния внешних магнитных полей. Магнит окружен неподвижным медным стаканом 8, служащим успокоителем. Для возвращения стрелки на ноль предназначен небольшой неподвижный магнит 9, укрепленный на неподвижном основании.

Для упрощения можно принять, что магнитные поля, создаваемые каждой парой рамок, однородны и направлены по осям соответствующих рамок (см. рис. 4.6, б). Подвижный магнит при отсутствии других моментов (момента трения, моментов от действия внешних магнитных полей и т.д.) будет устанавливаться по направлению результирующего магнитного поля обеих рамок. Угол поворота подвижного магнита определяется следующим образом:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sin\gamma}{I_1/I_2 + \cos\gamma}\right).$$

При условии взаимной перпендикулярности осей рамок (ү=90°) получим:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{I_2}{I_1}\right).$$





Рис. 4.6. Логометр с подвижным внутрирамочным магнитом: *а)* конструкция логометра, *б)* к определению направления магнитных полей рамок: 1 – подвижный магнит, 2 – успокоитель, 3 и 5 — неподвижные рамки, 4 – магнитопровод, 6 – ось подвижной системы, 7 – противовес, 8 – стрелка, 9 – неподвижный магнит

Основным преимуществом логометров с подвижным магнитом является отсутствие токоподводов и неограниченный угол поворота подвижной системы.

Если направление тока, протекающего в катушках, не меняется, при наличии двух обмоток угол поворота подвижной системы невозможно сделать более 180 градусов. Для создания конструкций с углом поворота подвижной системы более 180 градусов необходимо использовать три или более обмотки, расположенных под углом друг к другу.

На рис. 4.7 показан эскиз трехрамочного логометра с подвижным магнитом. Подвижная система прибора состоит из постоянного магнита 1, запрессованного на ось с кернами. На один из концов оси насажена стрелка с противовесом (на рис. 4.7 не показано).



Рис. 4.7. Эскиз трехобмоточного логометра с подвижным магнитом: 1 – постоянный магнит, 2 – успокоитель, 3 – магнитопровод, 4 – рамки, 5 – корпус-экран

Подвижный магнит 1 окружен неподвижным медным или алюминиевым стаканом 2, служащим успокоителем. Снаружи логометр экранируется корпусом 5, изготавливаемым из магнитомягкого материала.

Магнитопровод 3 представляет собой пакет, набранный из шайб из магнитомягкого материала. На магнитопроводе размещены три бескаркасные рамки 4, расположенные под углом 120 градусов друг к другу.

Вращающий момент логометра создается в результате взаимодействия тока, протекающего по внутренней стороне витков рамок с полем постоянного магнита. Поле тока, протекающего по внешней стороне витков катушек, экранируется магнитопроводом.

Достоинством трехкатушечных логометров является возможность поворота подвижного магнита в зависимости от соотношения токов на угол 360 градусов и больше, что необходимо для работы ряда дистанционных передач с логометрическими указателями.

4.3.3. Логометрические схемы электрических дистанционных передач

Чаще всего логометры применяют в качестве указателей совместно с измерительными приборами, имеющими в цепи выходного сигнала резистивный измерительный преобразователь.

Самым простым способом включения двухкатушечного логометра является параллельное соединение катушек логометра с включением в цепь одной из них резистивного элемента, связанного с измеряемой величиной. Пример такой схемы включения логометра с реостатным ИП представлен на рис. 4.8. Вместо реостатного ИП может быть применены и другие виды резистивных преобразователей (терморезистивные, тензорезистивные). При изменении со-

противления датчика происходит перераспределение токов в катушках логометра, и угол отклонения стрелки отражает изменение сопротивления ИП. Сопротивления R₁ и R₂ могут быть равными $R_1 = R_2$, или выбираться из условия $R_2 = R_1 + R_{\Pi}/2$. В первом случае при любых изменениях измеряемого сопротивления R_x ток I_1 всегда будет меньше тока I_2 , и отклонение стрелки логометра возможно только в одном направлении от нулевого положения. Во втором случае ток I_1 может быть как больше, так и меньше тока I₂ (в зависимости от направления перемещения щетки реостатного ИП относительно его середины), и отклонение стрелки логометра также возможно



Рис. 4.8. Схема включения логометра с параллельным соединением катушек

в двух направлениях относительно начального положения.

Среди схем электрических дистанционных передач наибольшее распространение получили мостовые логометрические схемы. На рис. 4.9, *а* приведена мостовая логометрическая схема с реостатным ИП. Сопротивление реостатного преобразователя вместе с сопротивлениями R_1 , R_2 , R_3 , R_4 составляют мост, в диагональ которого включены рамки логометра r_1 и r_2 . В схеме параметры выбраны таким образом, что при среднем положении щетки реостата (ее относительном перемещении $\varepsilon_x = 0,5$) схема симметрична, т.е. $R_n = R_1$, $R_2 = R_4$. При этом потенциал точки A будет положителен, а потенциал точки B – отрицателен по отношению к потенциалу общей точки соединения логометров (точки O). При среднем положении щетки реостата по рамкам протекают равные и противоположно направленные токи ($I_1 = I_2$). При смещении щетки реостата так, что $\varepsilon_x < 0,5$ потенциал точки O будет повышаться, ток в рамке I уменьшаться, а в рамке II увеличиваться. При $\varepsilon_x > 0,5$ ток I_1 увеличивается, а ток I_2 уменьшается. Таким образом, угол отклонения стрелки логометра отражает изменение измеряемой реостатным ИП физической величины.



Рис. 4.9. Мостовые логометрические схемы: *a*) с реостатным преобразователем, *б*) с потенциометрическим преобразователем

На рис. 4.9, б приведена мостовая логометрическая дистанционной передачи с потенциометрическим ИП. Для получения симметричной шкалы прибора сопротивления R_1 и R_2 схемы выбираются равными. Если щетка потенциометра находится посередине потенциометра ($\varepsilon_x = 0,5$), то потенциалы точек A и B одинаковы, токи в рамках равны и направлены противоположно. При движении щетки влево ($\varepsilon_x < 0,5$) потенциал точки A понижается, а потенциал точки B повышается. Соответственно ток I_1 уменьшается, а ток I_2 увеличивается. Когда щетка передвигается вправо за середину потенциометра ($\varepsilon_x > 0,5$), ток I_1 увеличивается, а ток I_2 уменьшается.

Дистанционные схемы, показанные на рис. 4.9, *a*, *б*, обладают неравномерностью характеристик: чувствительности схемы в середине рабочего участ-122 ка в 1,5...2 раза больше чувствительности в начале и в конце измеряемого диапазона. Поэтому шкалы приборов, выполненных по этим схемам, – нелинейны: деления шкалы в начале и конце диапазона измерений мельче, чем в середине.

Большую по сравнению с предыдущими схемами линейность характеристики обеспечивает показанная на рис. 4.10 схема включения трехрамочного логометра с вращающимся магнитом (см. рис. 4.7). Схема содержит кольцевой замкнутый потенциометр *1* с тремя отводами через 120 градусов и двумя щетками 2, расположенными под углом 180 градусов. Рамки I, II и III логометра соединены в звезду. Каждому положению щеток соответствует определенное соотношение токов в рамках логометра. Магнитные потоки, создаваемые каждым из токов направлены под углом 120 градусов один относительно другого и образуют в сумме некоторое результирующее магнитное поле, по направлению которого располагается подвижный магнит *3* вместе со стрелкой.



Рис. 4.10. Дистанционная схема включения трехрамочного логометра: 1 – кольцевой потенциометр, 2 – щетки, 3 – постоянный магнит со стрелкой

Логометрические схемы с замкнутым потенциометром позволяют передавать угол в неограниченных пределах, но не могут быть применимы в качестве силового дистанционного электропривода из-за малого синхронизирующего (устанавливающего) момента логометра.

Из рассмотренных логометрических схем наибольшей точностью обладает схема с замкнутым потенциометром и трехкатушечным логометром с вращающимся постоянным магнитом. Эта передача не имеет температурных погрешностей, и ее неравномерность составляет порядка одного процента.

Рассмотренные на рис. 4.8 – 4.10 схемы включения логометров не исчерпывают всех возможных вариантов, но являются типовыми для измерительных приборов с измерительными преобразователями резистивного типа.

4.4. Магнитоэлектрические силовые (моментные) преобразователи

Магнитоэлектрические силовые (моментные) преобразователи предназначены для создания усилий (вращающих моментов), пропорциональных силе тока. В основном такие преобразователи применяются в качестве преобразователей обратной связи в информационно-измерительных приборах и системах, работающих по принципу силовой компенсации (системах коррекции гироскопов с тремя степенями свободы, системах обратной связи гироскопических стабилизаторов, датчиках угловой скорости, линейного и углового ускорения, абсолютного и избыточного давлений и др.).

Рассмотрим некоторые конструктивные варианты магнитоэлектрических силовых (моментных) преобразователей получивших распространение в системах автоматических приборных устройств.

4.4.1. Силовой преобразователь со стержневым магнитом

Эскиз силового МЭП изображен на рис. 4.11. Магнитная система этого преобразователя образована прямым цилиндрическим или формы усеченного конуса постоянным магнитом 1 и цилиндрическим магнитопроводом 2, одновременно являющимся и экраном. С одной стороны магнит и магнитопровод соединены по торцу, а с другой стороны в кольцевом рабочем зазоре, образованном полюсным наконечником 4 и магнитопроводом 2, расположена концентрическая катушка 3. Катушка размещена на немагнитном каркасе.



Рис. 4.11. Магнитоэлектрический преобразователь со стержневым магнитом: 1 – постоянный магнит, 2 – цилиндрический магнитопровод, 3 – катушка, 4 – полюсной наконечник, 5 - рычаг

В результате взаимодействия тока *I* в катушке с магнитным полем в зазоре создается сила, действующая на катушку и стремящаяся ее вытолкнуть из воздушного зазора:

$$F = \pi d_{\tilde{n}\delta} w_{\dot{a}} B_{\delta c} I$$

где *d*_{ср} – средний диаметр катушки.

Преобразователь предназначен для получения силы, может быть использован и как моментный, если его подвижную часть, например, обмотку, соединить с рычагом 5 (см. рис. 4.11), имеющим возможность совершать небольшие угловые перемещения.

На рис. 4.12 представлена схема построения подвижного узла маятникового акселерометра с магнитоэлектрической обратной связью, в составе которого используется рассмотренный выше силовой преобразователь.



Рис. 4.12. Схема подвижного узла маятникового акселерометра: 1 – кремниевый чувствительный элемент, 2 – стеклянные крышки, 3 – каркас катушек датчика момента, 4 – катушка датчика момента, 5 – постоянный магнит, 6 – магнитопровод, 7 – обкладки емкостного преобразователя перемещений

Чувствительный элемент акселерометра представляет собой подвижную массу *1*, выполненную из монокристаллического кремния методом анизотропного травления, помещенную в узкий зазор между двумя стеклянными крышками 2. На чувствительный элемент монтируются два каркаса *3* с катушками *4* датчика момента. Магнитная система образована постоянными магнитами *5* и магнитопроводом *6*. На стеклянных крышках подвижного узла располагаются обкладки емкостного преобразователя перемещений *7*. Датчик силы играет

роль "электропружины", отрабатывающей входное воздействие. Выходной сигнал в виде напряжения снимается с сопротивления нагрузки, которое включено последовательно с катушками силового обратного преобразователя.

4.4.2. Преобразователь с многополюсным магнитом

Преобразователь имеет в своем составе постоянный магнит с четным числом явно выраженных полюсов. Чаще всего применяются конструкции, имеющие два, четыре, шесть или восемь полюсов. На рис. 4.13 представлен эскиз преобразователя с шестиполюсным магнитом, применяемый в составе гироскопического датчика угловой скорости.



Рис. 4.13. Магнитоэлектрический преобразователь с шестиполюсным магнитом: 1 – магнит, 2 – магнитопровод, 3 – узел катушек

Магнит помещен в цилиндрический магнитопровод 2, являющийся одновременно и магнитным экраном системы. Магнит и магнитопровод механически жестко соединены между собой. В зазоре, образованном торцами полюсов и внутренней стороной магнитопровода, на немагнитном каркасе расположены катушки 3.

В данной конструкции магнитная система (магнит и магнитопровод) связаны с гироузлом, т.е. с подвижной частью, а система катушек жестко связана с корпусом датчика и является неподвижной. Ширина обмотки выбирается немного меньше ширины полюса магнита для того, чтобы при поворотах магнита на максимальный угол обмотка не выходила за пределы рабочего зазора. При этом момент датчика определяется только величиной тока и не зависит от угла поворота обмоток относительно магнита.

Вращающий момент, создаваемый преобразователем при подаче на его обмотки управляющего тока, подсчитывается по формуле:

$$M = 2 p B_{\delta c} l_{a} r w I ,$$

где *p* – число полюсов магнита, *r* – расстояние от оси вращения до активной стороны обмотки (средний радиус катушек). Ширина катушки выбирается больше ширины магнита. Поэтому активная длина катушки *l*_a определяется шириной магнита.

Магнитоэлектрические моментные преобразователи с многополюсным магнитом способны развивать достаточно большой момент при малых габаритах и малом потреблении мощности.

4.4.3. Преобразователь с полудуговым магнитом

Эскиз преобразователя изображен на рис. 4.14. Магнитная система преобразователя образована двумя подковообразными постоянными магнитами 1. Между торцами магнитов в рабочем зазоре расположена плоская рамка с обмоткой 2, которая имеет возможность перемещаться параллельно торцевым плоскостям постоянных магнитов.



Рис. 4.14. Эскиз магнитоэлектрического преобразователя с полудуговым магнитом: 1 – постоянные магниты, 2 – плоская катушка, 3 – рычаг

При протекании тока в обмотке на нее действует сила:

$$F = 2B_{\delta c}l_{\dot{a}}wI$$
.

Активная длина катушки *l*_a определяется шириной магнита.

Если подвижную часть преобразователя соединить с рычагом *3*, имеющим возможность совершать небольшие угловые перемещения, то рассматриваемая конструкция может быть применена и для создания вращающего момента.

Подобная конструкция магнитоэлектрического преобразователя применяется в составе измерителя линейного ускорения, при этом катушка моментного датчика играет роль инерционного элемента, реагирующего на измеряемое ускорение.

Достоинством магнитоэлектрического преобразователя (рис. 4.14) является то, что его магнитная цепь образуется только двумя постоянными магнитами, что исключает потери энергии на проведение магнитного потока по магнитопроводу и полюсным наконечникам и, в конечном итоге, обеспечивает большую индукцию в рабочем зазоре и большой вращающий момент.

4.4.4. Преобразователь с плоской катушкой

Эскиз преобразователя представлен на рис. 4.15. Подвижным элементом здесь является плоская катушка 1, выполненная на каркасе и подвешенная в корпусе на упругих растяжках подвеса 4. Магнитная система образована линейным магнитом 2 и магнитопроводом 3, представляющим собой два полюсных наконечника.

Момент, развиваемый преобразователем, равен:

$$M = B_{\delta c} l_{\rm a} b w I ,$$

где b – расстояние от оси вращения до активной стороны обмотки (ширина плоской катушки). Активная длина катушки l_a определяется шириной магнитной системы.

Магнитоэлектрический моментный преобразователь с плоской катушкой (рис. 4.15) может применяться в датчиках линейного ускорения. Ось чувствительности в этом случае перпендикулярна плоскости катушки моментного преобразователя. Инерционным элементом датчика, реагирующим на наличие ускорения, является плоская катушка моментного преобразователя, которая отклоняется относительно оси крепления на некоторый угол, а ток в катушке создает противодействующий момент (МЭП играет роль электропружины). Для измерения угла отклонения катушки в таких датчиках обычно на катушке закрепляют проводящий элемент (экран), который является подвижным элементом вихретокового преобразователя угловых перемещений.



Рис. 4.15. Магнитоэлектрический преобразователь с плоской катушкой: 1 – плоская катушка на каркасе, 2 – постоянный магнит, 3 – магнитопровод, 4 – упругие растяжки подвеса

В общем случае инерционный момент, действующий на катушку при наличии ускорения, уравновешивается суммой двух моментов: момента со стороны магнитоэлектрического преобразователя и момента упругости со стороны растяжек подвеса. Чем больше величина упругого момента по отношению к моменту магнитоэлектрического преобразователя, тем большее влияние на выходной сигнал датчика будут оказывать изменение упругих свойств растяжек подвеса под действием внешних и внутренних факторов, т.е. тем больше погрешность датчика. Для исключения такого рода погрешностей вместо упругих растяжек можно использовать безмоментные опоры (например, опоры на кернах). Однако при этом появляются погрешности, связанные с моментом трения в опорах.

4.5. Погрешности магнитоэлектрических преобразователей

К МЭП, используемым в автоматических приборных устройствах специального назначения, предъявляются особые требования:

 магнитоэлектрические преобразователи должны развивать максимально возможную силу, (или вращающий момент) на единицу потребляемой электрической мощности при заданных габаритных размерах;

- развиваемые преобразователем сила или момент должны быть строго пропорциональны управляющему электрическому сигналу; нелинейность и несимметричность характеристики не должны превышать величин, определяемых техническими требованиями;
- крутизна характеристики преобразователя не должна зависеть от положения подвижной системы во всем диапазоне возможного ее перемещения, но должна быть постоянной на протяжении заданного интервала времени при внешних воздействиях, определяемых техническими условиями (изменением температуры окружающей среды, действием вибраций, ударов и т.д.);
- для обеспечения необходимого быстродействия измерительного прибора преобразователь должен обладать возможно меньшей массой (моментом инерции) подвижной части;
- реактивные силы или реактивные вращающие моменты МЭП во всем диапазоне возможных перемещений подвижной системы не должны превышать величин, определяемых техническими требованиями.

В связи со специальными требованиями, предъявляемыми к МЭП, особенно актуальными задачами при проектировании и конструировании являются задачи повышения точности и стабильности характеристик МЭП.

Причинами погрешностей МЭП является влияние внешних и внутренних факторов на характеристики преобразователей.

Влияние внешних факторов проявляется в изменении крутизны статической характеристики МЭП во времени. Крутизна статической характеристики МЭП может изменяться за счет непостоянства магнитной индукции в рабочем зазоре, обусловленного структурным изменением материалов во времени, влиянием внешних магнитных полей, влиянием ударных, линейных и вибрационных ускорений, влиянием температуры внешней среды. Кроме того, при изменении температуры окружающей среды будут меняться сопротивления катушек и геометрические размеры деталей преобразователя.

Уменьшения влияния внешних факторов можно достичь использованием высокостабильных магнитных материалов, улучшением свойств магнитных материалов (например, применением методов искусственного старения), введением в схему приборов различного рода компенсаторов, магнитных экранов и термостатирования.

Из погрешностей, вызванных влиянием внутренних факторов, наиболее существенными являются погрешности, вызванные:

- изменением индукции в рабочем зазоре магнитной системы вследствие воздействия на постоянный магнит магнитодвижущей силы обмотки МЭП;

 изменением индуктивности обмотки при ее перемещении в рабочем зазоре магнитной системы;

– изменением параметров преобразователя при изменении температуры за счет собственного нагрева преобразователя протекающем в катушках током;

– неравномерностью магнитного поля, возникающей вследствие искажения силовых линий магнитного поля по краям воздушного зазора;

- влиянием дополнительных моментов, вносимых токоподводами;

– технологическими причинами (неточностью изготовления деталей МЭП, неидеальностью сборки, отклонением от номинальных значений свойств магнитотвердых материалов, числа витков обмотки, геометрических размеров конструкции и других параметров преобразователя).

В магнитоэлектрических преобразователях с различной природой возникновения вращающего и противодействующего моментов (например, в преобразователях гальванометрического типа) могут возникать дополнительные погрешности, связанные с изменением параметров упругих элементов (изменение и неточность выполнения геометрических размеров спиральных пружин, изменение модуля упругости материала и др.). Также в таких преобразователях существенной может быть погрешность, вызванная нестабильностью напряжения питания.

Основным преимуществом магнитоэлектрических логометров по сравнению с другими типами магнитоэлектрических преобразователей является независимость их показаний от колебаний напряжения питания и пропорциональных изменений сопротивлений катушек (например, под действием температуры). Это справедливо, если не увеличивать момента, создаваемого трением в опорах и токоподводах. Однако при уменьшении напряжения в больших пределах, например в два раза, может увеличиваться погрешность, создаваемая трением в опорах логометра, из-за уменьшения устанавливающего момента.

Изменения характеристик логометрических схем вызываются наличием трения в опорах подвижной системы, в результате чего создается погрешность застоя логометра. Эта погрешность зависит от веса подвижной системы и качества опор.

Логометрические схемы с замкнутыми потенциометрами не имеют температурных погрешностей. Логометрические схемы с незамкнутыми потенциометрами имеют температурные погрешности из-за влияния температуры на сопротивление рамок, в результате чего изменяются значения токов в рамках. Для компенсации температурной погрешности в схеме, изображенной на рис. 4.9, a, часть сопротивления R_3 изготавливается из меди, а другая часть из манганина.

Смысл температурной компенсации заключается в том, что при изменении окружающей, температуры изменяется сопротивление медной катушки, что вызывает изменение соотношения токов в рамках, обратное тому, которое вызвано изменением сопротивления рамок.

По сравнению с другими типами силовых преобразователей (электромагнитными, электростатическими) магнитоэлектрические преобразователи обеспечивают большую чувствительность, линейность характеристики и большую точность преобразования электрического сигнала в механическую силу или момент.

4.6. Лабораторный практикум

Исследование магнитоэлектрических логометров

Целью выполнения лабораторного практикума является изучение теоретических основ работы магнитоэлектрических логометров, вариантов их построения и областей применения, а также проведение экспериментальных исследований магнитоэлектрических логометров.

Результаты экспериментальных исследований оформляются в виде отчета о проделанной лабораторной работе. Отчет должен содержать цель работы, измерительную схему лабораторной установки, все необходимые расчеты, таблицы и графики характеристик, а также вывод по работе, который должен включать в себя анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов. Пример оформления титульного листа и содержание отчета представлены в приложении.

При большом объеме однотипных расчетов в отчете допускается привести один из них.

4.6.1. Описание лабораторной установки

В лабораторной работе исследуются три логометра с подвижными рамками и неподвижным магнитом. Два логометра встроены в лабораторную установку, третий логометр является внешним и подключается отдельно.

Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 4.16. На лицевой панели расположены два миллиамперметра (mA_1 и mA_2) с переключателями (K_1 , K_2) диапазонов измерения тока, два логометра J_1 , J_2 , переключатель логометров K_3 , регулировочные потенциометры R_1 и R_2 (R_1 – точно, R_2 – грубо), тумблер включения и клеммы ("1", "0" и "2") подключения внешнего логометра.

Электрическая принципиальная схема лабораторной установки показана на рис. 4.17. В соответствии с данной схемой ток в катушках логометров изменяется при изменении сопротивлений потенциометров R_1 и R_2 . Токи, протекающие в катушках логометров, измеряются с помощью двух миллиамперметров, сопротивления R_{11} , R_{12} , R_{13} , R_{21} , R_{22} , R_{23} предназначены для переключения диапазонов измерения тока (диапазоны переключаются с помощью переключателей K_1 и K_2). Переключатель K_3 имеет три положения и предназначен для выбора исследуемого логометра: встроенные логометры $Л_1$, $Л_2$ или внешний – $Л_3$ (подключается к клеммам "1", "0" и "2"). При определенном соотношении токов в катушках подвижная система логометра, разворачиваясь, каждый раз устанавливается в положении равновесия. Таким образом, фиксируя угол поворота стрелки логометра и токи в рамках, можно экспериментально определить статическую характеристику логометра (4.9).



Рис. 4.16. Лабораторная установка: "Исследование магнитоэлектрических логометров"



Рис. 4.17. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

4.6.2. Методика проведения эксперимента

1. Подключить установку к источнику постоянного напряжения $U_{\pi} = 27$ В.

2. Переключатель К₃ переключить в положение Л₁, соответствующее первому логометру.

3. Включить питание установки (тумблер переключить в положение "ВКЛ").

4. Плавно изменяя ток резисторами R_1 , R_2 последовательно устанавливать стрелку логометра Π_1 на деления шкалы от нулевого положения до 100 градусов (полный размах шкалы) через 10 градусов, фиксировать угол поворота φ по шкале логометра и значения токов I_1 , I_2 по показаниям миллиамперметров mA_1 и mA_2 (см. рис. 4.16). Переключение диапазонов измерения миллиамперметров при необходимости производится переключателями K_1 , K_2 .

5. Вычислить отношение токов *I*₂/*I*₁ для каждого показания логометра. Экспериментальные и расчетные данные занести в таблицу:

ф, град	<i>I</i> ₁ , мА	<i>I</i> ₂ , мА	I_2/I_1

6. Построить график зависимости угла отклонения стрелки логометра от отношения токов в катушках:

$$\varphi = f(I_2/I_1).$$

7. Переключатель K_3 переключить в положение $Л_2$, соответствующее второму логометру.

8. Выполнить п.п. 4, 5, 6 для второго логометра, задавая угол поворота стрелки в пределах от -90 до +90 градусов через 15 градусов.

9. Подключить внешний логометр Л₃ к клеммам установки следующим образом: "1" – первая катушка, "2" – вторая катушка, "0" – общая точка катушек логометра.

10. Выполнить п.п. 4, 5, 6 для третьего логометра, задавая угол поворота стрелки в пределах от нуля до 90 градусов (максимальное перемещение стрелки) через 9 градусов по шкале логометра. (Угол отклонения стрелки φ = 90° соответствует ее положению на цифре 10 шкалы логометра).

11. Сравнить полученные характеристики для трех логометров, сделать вывод по работе.

4.6.3. Контрольные вопросы

1. Какое физическое явление положено в основу работы магнитоэлектрических преобразователей?

2. Какие типы магнитоэлектрических преобразователей вы знаете?

3. Что собой представляют магнитоэлектрические логометры?

4. Назовите основные элементы конструкции магнитоэлектрических логометров.

5. В чем отличие магнитоэлектрических преобразователей гальванометрического типа и магнитоэлектрических логометров?

6. В каких областях и для каких целей применяются магнитоэлектрические логометры?

7. Какие схемы построения магнитоэлектрических логометров вы знаете?

8. На примере одной из схем построения объясните принцип действия магнитоэлектрического логометра.

9. Назовите основные причины, обусловливающие наличие погрешностей магнитоэлектрических логометров.

10. Как изменятся экспериментальные характеристики логометров в лабораторной работе, если

а) увеличить постоянное напряжение питания;

б) уменьшить постоянное напряжение питания;

в) подключить лабораторную установку к источнику переменного напряжения.

4.7. Лабораторный практикум

Исследование магнитоэлектрических моментных преобразователей

Целью выполнения лабораторного практикума является изучение теоретических основ работы магнитоэлектрических преобразователей, их типов, вариантов построения и областей применения, а также проведение экспериментальных исследований магнитоэлектрического моментного преобразователя.

Результаты экспериментальных исследований оформляются в виде отчета о проделанной лабораторной работе. Отчет должен содержать цель работы, измерительную схему лабораторной установки, эскиз МЭП, теоретические зависимости развиваемого преобразователем момента от управляющего сигнала (тока или напряжения), все необходимые расчеты, таблицы и графики характеристик, а также вывод по работе, который должен включать в себя анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов. Пример оформления титульного листа и содержание отчета представлены в приложении.

При большом объеме однотипных расчетов в отчете допускается привести один из них.

4.7.1. Описание лабораторной установки

В работе исследуется магнитоэлектрический моментный преобразователь с полудуговым магнитом, схема построения которого соответствует рис. 4.14.

Принципиальная схема лабораторной установки изображена на рис. 4.18. Установка представляет собой рычажную систему 1, одно плечо которой связано с обмоткой 3 исследуемого преобразователя 2, на другом плече размещается подвижный груз 4. Величина перемещения груза по резьбе рычага контролируется по линейке. В качестве измерителя угла отклонения коромысла от горизонтального положения применен взаимоиндуктивный датчик угла 5, который подключен на вход фазочувствительного выпрямителя 7 (ФЧВ). Ротор 6 датчика угла жестко связан с рычажной системой. Угол отклонения ротора и, соответственно, рычага с грузом 4 контролируется по встроенному стрелочному указателю V₁. Для питания взаимоиндуктивного преобразователя угловых перемещений используется дополнительный внешний источник U_{пит}= 36 В, $f_{\text{пит}} = 400 \ \Gamma$ ц. Концы обмотки моментного преобразователя подключены к электрической схеме тока, состоящей из обмотки преобразователя и двух потенциометров: R_1 – грубый и R_2 – точный. Контроль напряжения в обмотке производится с помощью встроенного вольтметра V_2 , а величина тока – с помощью встроенного амперметра А. Ключ К служит для замыкания электрической цепи исследуемого преобразователя и подаче на него управляющего сигнала.



Рис. 4.18. Принципиальная схема лабораторной установки "Исследование магнитоэлектрического моментного преобразователя"

При подаче тока управления I_{ynp} в обмотку преобразователя развиваемый преобразователем момент стремится переместить вверх рычаг с грузом 4. Сила тяжести, действующая на груз, создает противодействующий момент направленный встречно вращающему моменту, развиваемому преобразователем. При перемещении груза вдоль рычага меняется плечо приложения силы, и, следовательно, – величина противодействующего момента. Горизонтальное положение рычага подвижной системы соответствует положению равновесия, при котором вращающий и противодействующий моменты равны. Таким образом, в положении равновесия подвижной системы вращающий момент МЭП можно рассчитать, зная момент, создаваемый силой тяжести. В положении равновесия рычаг с грузом находится в горизонтальном положении, о чем свидетельствует нулевое показание вольтметра V₁.

Внешний вид установки представлен на рис. 4.19.



Рис. 4.19. Лабораторная установка "Исследование магнитоэлектрического моментного преобразователя": 1 – вольтметр V₂, 2 – амперметр A,
3 - указатель угла (вольтметр V₁), 4, 5 – переключатели диапазонов вольтметра (15 В – 50 В) и амперметра (5 мА – 50 мА), 6, 7 – регулировочные потенциометры (R₁ – грубо, R₂ – точно), 8 – индикатор включения установки,
9 – тумблер включения установки, 10 – исследуемый магнитоэлектрический преобразователь, 11 – шкала измерения плеча приложения силы, 12 – груз

4.7.2. Методика проведения эксперимента

1. Подключить установку к источнику переменного напряжения 36 В, 400 Гц (питание датчика угла) и к источнику постоянного напряжения 27 В (питание исследуемого моментного преобразователя).

2. Груз *12* (рис. 4.19) поставить в крайнее правое положение соответствующее минимальной длине *l* рычага.

3. Включить питание установки (тумблер поставить в положение "ВКЛ").

4. Перемещая ручки потенциометров R_1 и R_2 добиться того, чтобы стрелка вольтметра V_1 находилась в нулевом положении шкалы.

5. Записать соответствующие этому положению груза ток в обмотке исследуемого преобразователя и напряжение на нем (показания встроенного в лабораторную установку амперметра A и вольтметра V_2).

6. Определить вращающий момент, развиваемый МЭП, по формуле:

$$M_{\hat{a}\hat{\delta}} = mgl$$
,

где m = 29,5 г – масса груза, g = 9,81 кг м/с, l – расстояние от оси вращения подвижной части до центра масс груза (по делениям линейки).

7. Перемещая последовательно груз 12 по рычагу (рис. 4.19) от начального положения в сторону увеличения l с шагом 5 мм и выполняя при этом пункты 4, 5, 6, снять статические характеристики преобразователя: $M_{\rm Bp}=f(I_{\rm ynp})$, $M_{\rm Bp}=\phi(U_{\rm ynp})$.

8. Рассчитать среднюю крутизну статической характеристики исследуемого МЭП по току $K_{I cp}$ и по напряжению $K_{U cp}$ по следующим формулам:

$$K_{I\,\tilde{n}\check{0}} = \sum_{i=1}^{n} M_{\hat{a}\check{0}\,i} \left/ \sum_{i=1}^{n} I_{\check{0}\check{1}\check{0}\,i}, K_{U\,\tilde{n}\check{0}} = \sum_{i=1}^{n} M_{\hat{a}\check{0}\,i} \left/ \sum_{i=1}^{n} U_{\check{0}\check{1}\check{0}\,i}, \right.$$

где n – количество измерений, $I_{ynp i}$, $U_{ynp i}$, – измеренные ток в катушке моментного преобразователя и напряжение на ней в *i*-той точке эксперимента (при текущем положении груза), $M_{Bp i}$ – рассчитанный вращающий момент преобразователя в этой точке.

9. Определить погрешности линейности по току σ_I и по напряжению σ_U в каждой точке статической характеристики магнитоэлектрического преобразователя по следующим формулам:

$$\sigma_{Ii} = \frac{M_{\hat{a}\delta i} - K_{I\tilde{n}\delta}I_{\delta\tilde{i}\delta i}}{M_{\hat{a}\delta\max}} 100\%, \ \sigma_{Ui} = \frac{M_{\hat{a}\delta i} - K_{U\tilde{n}\delta}U_{\delta\tilde{i}\delta i}}{M_{\hat{a}\delta\max}} 100\%,$$

где *М*_{вр max} – максимальное значение вращающего момента.

10. Экспериментальные и расчетные данные занести в таблицу:

<i>l</i> , м	<i>I</i> _{упр} , А	$U_{ m yпp}$, В	$M_{вр}, H \cdot м$	σ _I , %	$\sigma_U, \%$

11. Построить графики экспериментальных характеристик: $M_{\rm вp}=f(I_{\rm ynp})$, $M_{\rm вp}=\phi(U_{\rm ynp})$, и расчетных линейных характеристик: $M_{\rm лин}=K_{I\,\rm cp}I_{\rm ynp}$, $M_{\rm лин}=K_{U\,\rm cp}U_{\rm ynp}$.

12. Провести анализ полученных результатов и сделать вывод.

4.7.3. Контрольные вопросы

1. Какое физическое явление положено в основу работы магнитоэлектрических преобразователей?

2. Какие типы магнитоэлектрических преобразователей вы знаете?

3. Что собой представляют магнитоэлектрические силовые (моментные) преобразователи?

4. Назовите основные элементы конструкции магнитоэлектрических силовых (моментных) преобразователей.

5. В каких областях и для каких целей применяются магнитоэлектрические силовые (моментные) преобразователи?

6. Какие схемы построения магнитоэлектрических силовых (моментных) преобразователей вы знаете?

7. На примере одной из схем построения объясните принцип действия магнитоэлектрического преобразователя.

8. Назовите основные причины, обусловливающие наличие погрешностей магнитоэлектрических преобразователей.

9. Назовите причины, обусловливающие нелинейность статической характеристики магнитоэлектрических преобразователей. Какими способами можно уменьшить погрешность линейности?

10. Назовите причины возникновения нулевых моментов МЭП. Какими способами можно уменьшить нулевые моменты?
Список рекомендованной литературы

- 1. Аш, Ж. Датчики измерительных систем: в 2-х книгах / Ж. Аш и др. М.: Энергоатомиздат, 1992.
- 2. Левшина, Е.С. Электрические измерения физических величин: Измерительные преобразователи / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
- 3. Материалы в приборостроении и автоматике: справочник / под ред. Ю.М. Пятина.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1982. 528 с.
- 4. Никитин, Е.А. Гироскопические системы. Часть 3: Элементы гироскопических приборов / Е.А. Никитин, С.А. Шестов, В.А. Матвеев; под ред. Д.С. Пельпора. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
- 5. Пятин, Ю.М. Постоянные магниты: справочник / Ю.М. Пятин. М: Высшая школа, 1975. 372 с.
- 6. Пятин, Ю.М. Проектирование элементов измерительных устройств / Ю.М. Пятин. М: Высшая школа, 1977. 304 с.
- Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений: учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 2-е изд., стереотип. – М.: Издательский центр "Академия", 2004. – 336 с.
- 8. Рогов, В.А. Методика и практика технических экспериментов / В.А. Рогов, Г.Г. Позняк. М.: Издательский центр "Академия", 2005.
- 9. Фрайден, Дж. Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден. М.: Техносфера, 2005. – 592 с.

Приложение

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им Р. Е. АЛЕКСЕЕВА АРЗАМАССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра "Авиационные приборы и устройства"

Отчет о выполнении лабораторной работы

"Название работы"

по курсу: "Физические основы получения информации"

Работу выполнили студенты:

(Ф.И.О.)

группы:

Проверил преподаватель:

(Ф.И.О.)

"____"___200 год

Арзамас, 200 г.

- 1. Цель работы.
- 2. Содержание работы.
- 3. Измерительные схемы лабораторной установки (в соответствии с выполняемыми заданиями).
- 4. Теоретические основы лабораторной работы.
- 5. Результаты измерений.
- 6. Результаты расчетов, таблицы и графики характеристик.
- 7. Вывод о проделанной работе.

Гуськов Андрей Александрович

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

лабораторный практикум по курсу "Физические основы получения информации"

Часть 2

Редактор О.В. Пугина Компьютерная верстка: А.А. Гуськов

Подписано в печать 12.05.2009. Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 7,0. Тираж 250 экз. Заказ

144

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева Типография НГТУ. 603950, г. Нижний Новгород, ул. К. Минина, 24.