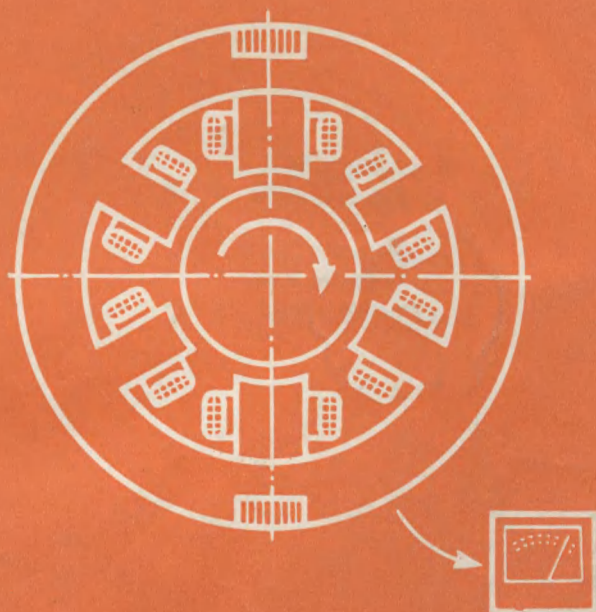




БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



Ю. И. РЫБАЛЬЧЕНКО

МАГНИТОУПРУГИЕ ДАТЧИКИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА



БИБЛИОТЕКА ПРИБОРОСТРОИТЕЛЯ



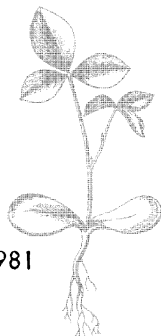
Ю. И. РЫБАЛЬЧЕНКО

МАГНИТОУПРУГИЕ ДАТЧИКИ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

МОСКВА

«МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1981



Scan AAW

ББК 34.9
Р93
УДК 531.789.1

Рецензент канд. техн. наук *В. Н. Миславский*

Рыбальченко Ю. И.

Р93 Магнитоупругие датчики крутящего момента.—
М.: Машиностроение, 1981, 128 с., ил. (Б-ка приборостроителя).

40 к.

В книге рассмотрены принцип действия и устройство различных типов магнитоупругих датчиков крутящего момента и их чувствительных элементов. Изложены результаты теоретического и экспериментального исследования этих датчиков, приведена методика расчета параметров датчиков в статическом и динамическом режимах работы. Указаны погрешности измерения и способы их уменьшения. Приведены параметры выпускаемых датчиков и описано их применение в различных промышленных установках.

Рассмотрен также бесконтактный магнитоупругий датчик осевого усилия вала, по принципу действия и устройству сходный с магнитоупругими датчиками крутящего момента.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, специализирующихся в области проектирования и обслуживания автоматизированных систем управления различными промышленными установками.

Р 31305-225
038(01)-81 — **225-81. 2706000000**

ИБ № 2623

Юрий Иванович Рыбальченко

**МАГНИТОУПРУГИЕ ДАТЧИКИ
КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА**

Редактор *Л. К. Тучкова*
Технический редактор *Н. Н. Чистякова*
Корректор *Н. И. Шарунина*

Сдано в набор 23.04.81. Подписано к печати 20.08.81. Т-23627. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 6,72. Уч.-изд. л. 8,42. Тираж 4000 экз. Заказ № 601. Цена 40 к.

Издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Стромынский пер., 4.

Московская типография № 32 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 103051, Цветной бульвар, 26.

© Издательство «Машиностроение», 1981.

Эффективные и надежные автоматические системы управления различными промышленными установками и технологическими процессами могут быть созданы лишь на базе эффективных и надежных средств автоматизации, в ряду которых первыми стоят датчики различных параметров этих процессов. К параметрам, характеризующим различные производственные процессы, относится крутящий момент, передаваемый валами машин и механизмов, по величине которого можно судить об эффективности их использования, а также о возникновении аварийных режимов работы.

Крутящие моменты валов наиболее просто можно измерить магнитоупругими датчиками момента (МДМ), а осевые усилия в валах — бесконтактным магнитоупругим датчиком осевого усилия. Некоторые типы этих датчиков, не имея механического и электрического контакта с контролируемым валом, обладая большой мощностью выходного сигнала и линейностью выходной характеристики, будучи очень простыми по конструкции и надежными в тяжелых условиях окружающей среды, нашли применение в судовых двигателях установках, на прокатных станах, в буровых станках, в металлорежущих станках с ЧПУ, в газовых турбинах, бумагоделательной промышленности и т. п.

Явление магнитной упругости, впервые описанное Виллари в 1865 г. [5], обратное явлению магнитострикции, открытой Джоулем в 1842 г. На основе явления магнитной упругости были созданы и магнитоупругие датчики крутящего момента.

Разработкой и внедрением МДМ занимались как организации СССР, так и зарубежные фирмы. Исследования МДМ связаны с именами отечественных и зарубежных ученых: Б. Б. Тимофеева, Я. Я. Томсона, Н. Е. Жадобина, В. Б. Гинзбурга, С. Д. Левинтова, А. М. Борисова, В. И. Стасяка, О. Даале (O. Dahle), Г. Майерса (H. Myers), Е. Анжейда (E. Angeid), Ф. Е. Скоупа (F. E. Scorpe) и других.

Одну из первых конструкций МДМ за рубежом создал в 1954 г. Р. А. Бэс (R. A. Beth) [54], а в СССР — в 1957 г. М. А. Кругликов [авт. свид. № 112899 (СССР)]. В последующие годы как в СССР, так и за рубежом было предложено много оригинальных конструкций МДМ, однако не все они получили распространение из-за тех или иных своих недостатков. Наиболее удачными и поэтому наиболее популярными конструкциями оказались явнополусный крестовой МДМ (пат. США № 2895331) и в последующем заменивший его явнополусный кольцевой МДМ (пат. США № 3011340),

который в отечественной литературе, получил название тордуктор. Конструктивной разновидностью тордуктора является МДМ с П-образными измерительными магнитопроводами [авт. свид. № 148932 (СССР)].

Дальнейшим развитием конструкции тордуктора, в которой устранены некоторые его недостатки, явился явнополюсный МДМ с двойным числом измерительных полюсов, который ниже будем называть дифдуктором [дифференциальным тордуктором, авт. свид. № 214141 (СССР)]. Получил распространение также явнополюсный кольцевой трансформаторный МДМ [пат. США № 3340729, авт. свид. № 614343, (СССР)], который в книге называется трансдуктором.

Явнополюсный кольцевой бесконтактный магнитоупругий датчик осевого усилия вала был предложен В. С. Михайловым и А. И. Солодовниковым в 1961 г. [авт. свид. № 142445 (СССР)]. По конструкции и принципу действия этот датчик сходен с МДМ типа тордуктора, не имеет механического и электрического контакта с валом и применен в судовой двигательной установке для измерения упора гребного винта [25].

Отмеченные выше типы МДМ и датчиков осевого усилия получили практическое применение в различных промышленных установках, и большинство исследователей рассматривают в своих работах именно эти типы приборов. Вместе с тем в настоящее время сложилось положение, когда ряд вопросов теории, методики расчета и практического применения разработан недостаточно, что приводит к созданию нерациональных конструкций датчиков и к затруднениям при их использовании. Публикации, освещающие некоторые вопросы теории и практики различных типов МДМ и осевого усилия, распылены в различных периодических изданиях и сборниках статей, что затрудняет их изучение.

При написании настоящей книги автор ставил целью обобщить имеющиеся сведения о МДМ и датчиках осевого усилия, осветить их теорию и методику расчета и обобщить практику их применения в различных промышленных установках.

При использовании формул настоящей книги все величины должны быть выражены в основных, дополнительных и производных единицах системы СИ.

Автор будет благодарен читателям за советы и замечания, которые следует направлять в адрес издательства: 107076, Москва, Стромынский пер. д. 4, изд-во «Машиностроение».

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- α — отношение средней длины к средней ширине участка магнитной проводимости вала $G_{в.в}$ МДМ;
- β — отношение средней длины к средней ширине участка магнитной проводимости вала $G_{и.д}$ МДМ;
- γ — отношение средней длины к средней ширине участка магнитной проводимости вала $G_{и0}$ дифдуктора;
- $\Delta\mu$ — приращение магнитной проницаемости за счет действия магнитоупругого эффекта;
- $\Delta\mu_{и}$ — приращение магнитной проницаемости материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{и.д}$ за счет действия магнитоупругого эффекта;
- $\delta_{в}$ — односторонний воздушный зазор под полюсом возбуждения;
- $\delta_{и}$ — односторонний воздушный зазор под измерительным полюсом;
- μ — магнитная проницаемость материала вала;
- μ_0 — магнитная постоянная;
- $\mu_{в}$ — магнитная проницаемость материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{в.в}$ тордуктора;
- $\mu_{и}$ — магнитная проницаемость материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{и.д}$ тордуктора;
- μ_n — начальное значение магнитной проницаемости материала вала при $\sigma=0$;
- $\mu_{в.в}$ — магнитная проницаемость материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{в.в}$ дифдуктора;
- $\mu_{и.д}$ — магнитная проницаемость материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{и.д}$ дифдуктора;
- $\mu_{и0}$ — магнитная проницаемость материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{и0}$ дифдуктора;
- σ — нормальные механические напряжения в материале вала;
- $\sigma_{max}, \sigma_{min}$ — максимальное и минимальное значения нормальных механических напряжений в материале вала;
- τ — касательные напряжения в материале вала;
- τ_p — полюсное деление;
- τ_1 — передний полюсный шаг дифдуктора и трансдуктора;
- τ_0 — задний полюсный шаг дифдуктора;
- $\Phi_{в.п}$ — магнитный поток в полюсе возбуждения;
- $\Phi_{в\delta}$ — магнитный поток в воздушном зазоре под полюсом возбуждения;

- $\Phi_{И.п}$ — магнитный поток в измерительном полюсе;
 $\Phi_{И.я}$ — магнитный поток в ярме измерительного магнитопровода МДМ;
 $\Phi_{И.у}$ — уравнивательный магнитный поток в ярме измерительного магнитопровода дифдуктора;
 $\Phi_{в.р}$ — магнитный поток рассеяния;
 $\Phi_{И.δ}$ — мгновенное значение магнитного потока в воздушном зазоре под полюсом возбуждения;
 $\Phi_{И.п}$ — мгновенное значение магнитного потока в измерительном полюсе;
 $\Phi_{И0}$ — мгновенное значение магнитного потока в магнитном сопротивлении $R_{И0}$ дифдуктора;
 $\Psi_{И.п}$ — мгновенное значение потокоцепления полюсной катушки измерительной обмотки;
 ω — круговая частота тока возбуждения;
 $\omega_{в}$ — частота вращения вала;
 $a_{в}$ — размер проекции полюса возбуждения на поверхности вала в направлении, перпендикулярном к оси вала;
 $a_{И}$ — размер проекции измерительного полюса на поверхности вала в направлении, перпендикулярном к оси вала;
 $b_{в}$ — размер проекции полюса возбуждения на поверхности вала в направлении оси вала;
 $b_{И}$ — размер проекции измерительного полюса на поверхности вала в направлении оси вала;
 $b_{в.в}$ — средняя ширина участка магнитной проводимости $G_{в.в}$ вала МДМ;
 $b_{И.в}$ — средняя ширина участка магнитного сопротивления $R_{И.в}$ вала трансдуктора;
 $b_{И.д}$ — средняя ширина участка магнитной проводимости $G_{И.д}$ вала МДМ;
 $b_{И0}$ — средняя ширина участка магнитной проводимости $G_{И0}$ вала дифдуктора;
 b_0 — расстояние между проекциями полюсов возбуждения и измерительных полюсов на поверхности вала в направлении оси вала;
 C_d — константа, применяющаяся при расчете дифдукторов;
 $E_{И}$ — действующее значение ЭДС измерительной обмотки;
 $e_{И.п}$ — мгновенное значение ЭДС в полюсной катушке измерительной обмотки;
 $F_{в.п}$ — МДС полюса возбуждения;
 f — частота тока возбуждения;
 $f_{в.п}$ — мгновенное значение МДС пары полюсов возбуждения;
 $f_{И.д}$ — мгновенное значение падения магнитного потенциала на магнитном сопротивлении $R_{И.д}$ вала МДМ;
 G — модуль сдвига материала вала;
 $G_{в.в}$ — магнитная проводимость участка вала между проекциями полюсов возбуждения МДМ;
 $G_{И.д}$ — магнитная проводимость участка вала между проекциями полюсов возбуждения и измерительных МДМ;
 $G_{И0}$ — магнитная проводимость участка вала между проекциями измерительных полюсов дифдуктора;
 H — напряженность магнитного поля;

- h — некоторая средняя глубина проникновения магнитного потока в тело вала;
- $I_{\text{в}}$ — действующее значение тока в полюсной катушке обмотки возбуждения;
- $I_{\text{и}}$ — действующее значение тока измерительной обмотки;
- $i_{\text{в}}$ — мгновенное значение тока в полюсной катушке обмотки возбуждения;
- J_p — полярный момент инерции поперечного сечения вала;
- K_{μ} — магнитоупругая чувствительность материала вала;
- $l_{\text{в.в}}$ — средняя длина участка магнитной проводимости $G_{\text{в.в}}$ вала МДМ;
- $l_{\text{и.в}}$ — средняя длина участка магнитного сопротивления $R_{\text{и.в}}$ вала трансдуктора;
- $l_{\text{и.д}}$ — средняя длина участка магнитной проводимости $G_{\text{и.д}}$ вала МДМ;
- $l_{\text{и0}}$ — средняя длина участка магнитной проводимости $G_{\text{и0}}$ вала дифдуктора;
- M — крутящий момент;
- $p_{\text{в}}$ — число пар полюсов возбуждения;
- $R_{\text{в.в}}$ — магнитное сопротивление участка вала между проекциями полюсов возбуждения МДМ;
- $R_{\text{в.ж}}$ — магнитное сопротивление магнитопровода возбуждения МДМ;
- $R_{\text{в.п}}$ — магнитное сопротивление полюса возбуждения;
- $R_{\text{в.я}}$ — магнитное сопротивление ярма магнитопровода возбуждения;
- $R_{\text{в0}}$ — магнитное сопротивление воздушного зазора под полюсом возбуждения;
- $R_{\text{и.д}}$ — магнитное сопротивление участка вала между проекциями полюсов возбуждения и измерительных МДМ;
- $R_{\text{и.ж}}$ — магнитное сопротивление материала измерительного магнитопровода;
- $R_{\text{и.п}}$ — магнитное сопротивление измерительного полюса;
- $R_{\text{и.я}}$ — магнитное сопротивление ярма измерительного магнитопровода;
- $R_{\text{и0}}$ — магнитное сопротивление воздушного зазора под измерительным полюсом;
- $R_{\text{и0}}$ — магнитное сопротивление участка вала между проекциями измерительных полюсов дифдуктора;
- r — сопротивление измерительной схемы дифдуктора и трансдуктора;
- $r_{\text{и}}$ — активное сопротивление измерительной обмотки;
- $r_{\text{н}}$ — активное сопротивление нагрузки;
- $S_{\text{д}}$ — чувствительность дифдуктора;
- $S_{\text{т}}$ — чувствительность тордуктора;
- $S_{\text{тр}}$ — чувствительность трансдуктора;
- $s_{\text{в}}, s_{\text{и}}$ — площади проекций на поверхность вала полюсов возбуждения и измерительного соответственно;
- t — время;
- U — выпрямленное выходное напряжение на сопротивлении нагрузки;
- $U_{\text{и}}$ — напряжение измерительной обмотки;

U_0 — выпрямленное напряжение дифдуктора и трансдуктора на сопротивлении измерительной схемы r ;
 W_p — полярный момент сопротивления поперечного сечения вала;
 w_B — число витков полюсной катушки обмотки возбуждения;
 $w_{\text{И}}$ — число витков полюсной катушки измерительной обмотки;
 $x_{\text{И}}$ — индуктивное сопротивление измерительной обмотки;
 $y_{\text{Д}}$ — функция размеров проекций полюсов и полюсного деления дифдуктора;
 $y_{\text{Т}}$ — функция размеров проекций полюсов и полюсного деления тордуктора;
 $z_{\text{И}}$ — полное сопротивление измерительной обмотки.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО МАГНИТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА (МДМ)

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТОУПРУГОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Физическое явление магнитной упругости заключается в изменении намагниченности ферромагнитного материала под действием возникающих в нем механических напряжений. Обратным эффектом магнитной упругости является магнитострикция, состоящая в возникновении механических деформаций и напряжений в ферромагнитном материале при изменении в нем напряженности магнитного поля. Эти явления присущи большинству ферромагнитных материалов.

Ферромагнетизм вещества проявляется в способности его атомов образовывать области самопроизвольной намагниченности (домены). Этим современная теория ферромагнетизма объясняет ряд специфических свойств ферромагнитных материалов, в том числе и явление магнитной упругости [2, 5]. Элементарными носителями магнетизма в веществе являются электроны атомов. В атомах вещества могут иметь место так называемые незаполненные оболочки и подоболочки. Вещества, содержащие атомы с недостроенными оболочками, обладают свойством парамагнетизма и ферромагнетизма. Одним из условий существования ферромагнетизма является наличие нескомпенсированных спиновых моментов, возникающих в атомах с незаполненными оболочками. Между спиновыми магнитными моментами атомов действуют силы, помогающие ориентировать их в одном направлении вопреки силам теплового движения. Наличие сил взаимодействия объясняется обменом электронами между соседними атомами вещества. Эту электрическую энергию электронов называют обменной, а силы электрического взаимодействия — обменными.

Когда атомы вещества находятся друг от друга на расстояниях, намного превышающих расстояния между атомами в кристаллах, то обменные силы ничтожно малы и ферромагнетизм невозможен. При сближении атомов эти силы возрастают и заставляют спиновые магнитные моменты электронов соседних атомов располагаться параллельно друг другу — возникает ферромагнитное состояние. При достижении определенного расстояния между атомами обменные силы достигают некоторого максимума, а затем начинают уменьшаться, обращаясь в нуль. При дальнейшем сближении спины электронов устанавливаются антипараллельно, причем такая ориентация спинов в некоторых веществах в энергетическом отношении является более выгодной (хром, марганец). Для железа, кобальта и никеля отношение расстояния между атомами в кристаллической решетке к радиусу незаполненной оболочки атома находится в пределах 3—4.

При обычных температурах электрические обменные силы поддерживают параллельность спинов электронов при отсутствии внешнего магнитного поля в так называемых областях самопроизвольной намагниченности (доменах). Ферромагнитное вещество представляет собой конгломерат множеств таких областей, каждая из которых намагничена до насыщения в некотором произвольном направлении. Векторная сумма намагниченностей всех областей при отсутствии внешнего магнитного поля равна нулю, и внешне ферромагнетик кажется ненамагнитным. В реальных кристаллах разбеганию ферромагнетика на домены способствуют также магнитная анизотропия и различные структурные и химические неоднородности.

Энергия магнитного взаимодействия атомов различна по величине по разным направлениям кристалла, поэтому расположение магнитных моментов доменов в одних направлениях кристалла вещества будет энергетически более выгодным, чем в других (так называемые направления легкого и трудного намагничивания). Такого рода анизотропия является естественной магнитной анизотропией кристаллов. При наличии механических деформаций атомы кристаллической решетки смещаются со своих нормальных положений, что приводит к изменению характера магнитного взаимодействия в кристалле. В результате этого на кристаллографическую анизотропию накладывается упругая анизотропия, вызванная дополнительным магнитным взаимодействием атомов вследствие искажения решетки при деформации.

Обычно ориентация осей кристаллов носит случайный характер, поэтому магнитная анизотропия проявляется незначительно. При некоторых видах механической обработки (прокатка) оси отдельных кристаллов внутри поликристаллического образца получают преимущественное расположение в каком-либо направлении, при этом магнитные свойства в различных направлениях будут различными.

В помещенном в магнитное поле ферромагнитном теле происходит перераспределение магнитных моментов доменов, в результате чего намагниченность всего тела в целом возрастает. В слабых магнитных полях происходит рост доменов с энергетически выгодным направлением магнитного момента по отношению к внешнему полю за счет соседних областей с менее выгодным направлением момента. Механизм этого процесса заключается в смещении границ между областями самопроизвольной намагниченности, поэтому такой процесс называют процессом смещения границ.

В более сильных полях за смещением границ следует процесс поворота магнитных моментов доменов к направлению поля (процесс вращения). При полном совпадении магнитных моментов доменов с направлением поля наступает техническое насыщение. При этом величина технического насыщения равна величине самопроизвольной намагниченности I_s , а поле с напряженностью H_s является полем насыщения.

Последний этап называют парапроцессом. Он состоит в том, что величина намагниченности увеличивается за счет ориентации спиновых моментов отдельных электронов, находящихся внутри доменов. Здесь техническое насыщение стремится к абсолютному.

Таким образом, в кристалле ферромагнетика выгодные направления намагниченности определяются: а) энергией магнитной анизотропии кристалла W_k ; б) магнитоупругой энергией W_d ; в) энергией внешнего магнитного поля W_H .

Если энергия магнитной анизотропии мала или упругие напряжения настолько велики, что энергией W_k по сравнению с энергией W_d можно пренебречь, ход кривой намагниченности в области вращения будет определяться упругими напряжениями.

Различают ферромагнетики с положительной магнитострикцией и отрицательной. У первой группы ферромагнетиков возрастанию механических растягивающих напряжений соответствует возрастание намагниченности, а сами материалы при этом удлиняются. У второй группы ферромагнетиков с возрастанием напряжений растяжения намагниченность уменьшается, а сами они при этом укорачиваются.

Железо представляет собой материал, который может иметь как положительную, так и отрицательную магнитострикцию в зависимости от напряженности поля и магнитной предыстории, т. е. от термической, термомеханической и термомагнитной обработок, влияющих на внутренние напряжения и магнитную анизотропию [5, 8, 15, 18].

Упругие напряжения вызывают процессы переориентации самопроизвольной намагниченности. Так как при этом возможны необратимые изменения направлений самопроизвольной намагниченности доменов, то возникает явление магнитного гистерезиса.

В зависимости от вида упругой деформации намагниченность в ферромагнетиках может претерпевать самые различные изменения. При кручении, например, деформация кручения обуславливает возникновение выгодных направлений намагниченности доменов под углом 45° к оси образца.

Магнитоупругие свойства ферромагнетиков позволяют использовать их при создании датчиков для измерения деформаций, усилий и крутящих моментов.

МДМ относятся к группе тензометрических торсиометров [47], в которых используется явление изменения намагниченности вещества ферромагнитного вала при изменении механических напряжений, возникающих в нем в результате приложения внешних крутящих моментов. Изменение намагниченности при неизменной напряженности магнитного поля можно представить как результат изменения магнитной проницаемости материала вала под действием механических напряжений. Отсюда следует, что характер напряженного состояния вала определяет принцип действия и конструкцию МДМ.

В поперечных сечениях вала при кручении возникают касательные напряжения, направление которых в каждой точке перпендикулярно радиусу, соединяющему эту точку с центром сечения. Величина касательного напряжения в каждой точке прямо пропорциональна расстоянию ее от центра, поэтому на поверхности вала эти напряжения будут наибольшие. Касательные напряжения определяются выражением

$$\tau = \frac{M}{W_p}, \quad (1)$$

где M — крутящий момент; W_p — полярный момент сопротивления поперечного сечения вала.

Такие же касательные напряжения (в соответствии с законом парности касательных напряжений) возникают в радиальных плоскостях вала, т. е. в площадках, проходящих через его продольную ось. Таким образом, элементарный параллелепипед $abcd$ (рис. 1) на

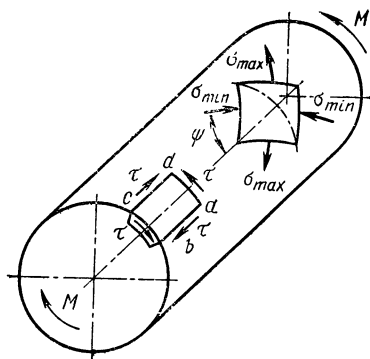


Рис. 1. Напряженные состояния в элементарных площадках на поверхности скручиваемого вала

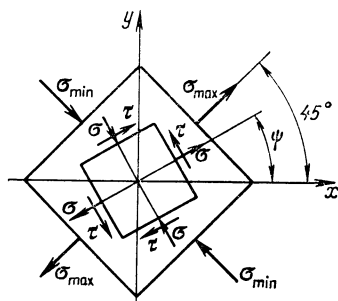


Рис. 2. Плоское напряженное состояние элементарной площадки материала, испытывающего нормальные и касательные напряжения

поверхности вала находится в плоском напряженном состоянии чистого сдвига. При этом в соответствии с теорией плоского напряженного состояния величина нормальных напряжений в любой элементарной площадке на поверхности скручиваемого вала (рис. 1 и 2)

$$\sigma = \sigma_x \cos^2 \psi + \sigma_y \sin^2 \psi + \tau_x \sin 2\psi,$$

где σ_x , σ_y — нормальные напряжения на гранях площадки, параллельные осям x и y соответственно (ось x параллельна оси вала); τ_x — касательные напряжения, параллельные оси x ; ψ — угол между направлением напряжений σ и осью x .

Так как в случае чистого кручения материал вала находится в состоянии чистого сдвига, то напряжения $\sigma_x = \sigma_y = 0$. Если отсчет углов ψ вести от оси x (рис. 2), то тогда $\tau_x = \tau$ и нормальные напряжения на гранях интересующей нас элементарной площадки на поверхности вала

$$\sigma = \tau \sin 2\psi. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что максимальное значение нормальных напряжений будет иметь место при $\psi = 45^\circ$. В этом случае (см. рис. 2)

$$\sigma_{\max} = |-\sigma_{\min}| = |\tau| = \frac{M}{W_p}.$$

Конструкция любого МДМ должна создаваться с учетом того обстоятельства, что направления действия максимальных и минимальных значений нормальных напряжений (главных напряжений), а значит и направления наибольших относительных изменений магнитной проницаемости материала вала, находятся под углом 45° к оси вала. На любом участке вала в направлении действия главных рас-

тягивающих напряжений (σ_{\max}) для материала с положительной магнитострикцией будет иметь место увеличение магнитной проницаемости, а на участках вала в направлении действия главных сжимающих напряжений (σ_{\min}) в том же случае будет иметь место уменьшение магнитной проницаемости. В случае отрицательной магнитострикции знаки приращения магнитной проницаемости изменятся на обратные.

Рассмотрим характер изменения магнитной проницаемости участков вала в направлении действия главных напряжений σ_{\max} и σ_{\min} (см. рис. 1). В работе [16] такие зависимости установлены экспериментально для образцов в виде параллелепипедов из стали 20 (рис. 3). Образцы подвергали растяжению при постоянной напряженности магнитного поля H , при этом магнитную проницаемость измеряли как в направлении действия растягивающих напряжений, так и в перпендикулярном направлении, т. е. в направлении действия сжимающих напряжений.

Из графиков, приведенных на рис. 3, следует, что на участках вала, где действуют растягивающие напряжения, магнитная проницаемость

$$\mu = \mu_H + \Delta\mu = \mu_H + K_\mu \sigma,$$

а на участках вала, где действуют напряжения сжатия,

$$\mu = \mu_H - \Delta\mu = \mu_H - K_\mu \sigma.$$

В этих выражениях: μ_H — начальное значение магнитной проницаемости при $\sigma=0$; $\Delta\mu$ — приращение магнитной проницаемости за счет действия магнитоупругого эффекта; K_μ — магнитоупругая чувствительность.

Из приведенных выражений и кривых (см. рис. 3) следует, что магнитоупругая чувствительность

$$K_\mu = \left(\frac{\partial \mu}{\partial \sigma} \right)_H$$

во всем диапазоне изменения σ является нелинейной функцией, но в пределах $\sigma=0 \div 40$ Н/мм² кривые $\mu(\sigma)$ могут быть с достаточной для практики точностью аппроксимированы отрезками прямых. В этом случае при $H=\text{const}$

$$K_\mu = \frac{\Delta\mu}{\sigma} \frac{\text{Гн} \cdot \text{м}}{\text{Н}}.$$

Значения магнитоупругой чувствительности при растяжении и сжатии в общем случае не равны между собой, однако в ряде конкретных конструкций МДМ в расчет можно принимать некоторое

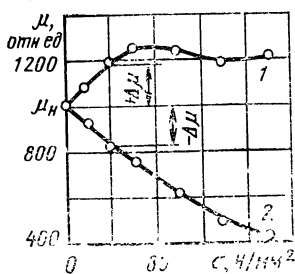


Рис. 3. Зависимость относительного значения магнитной проницаемости μ^* образца из стали 20 от напряжений растяжения (кривая 1) и сжатия (кривая 2)

среднее значение приращения магнитной проницаемости $\Delta\mu$ и магнитоупругой чувствительности K_μ .

Магнитоупругая чувствительность образца зависит от ряда факторов. В любом образце из ферромагнитного материала имеются внутренние напряжения, которые отличаются по величине и знаку в различных его точках, поэтому при приложении к образцу внешней нагрузки напряжения в различных его точках также будут различными. В зависимости от способа механической обработки заготовки, из которой изготовлен образец, будет иметь место также более или менее выраженная магнитная анизотропия. Кроме того, форма кривых $\mu(\sigma)$ зависит от напряженности магнитного поля в образце и от его термической обработки.

Вследствие этого действительная магнитная индукция B и действительная магнитная проницаемость μ в каждой точке образца могут значительно отличаться от расчетных, и нельзя по экспериментально снятым зависимостям $B(\sigma)$ или $\mu(\sigma)$ непосредственно судить о магнитоупругих свойствах материала, если не известно напряженное состояние образца. Снятые характеристики будут характеристиками данного образца, а не материала [18].

Отсюда следует важный вывод: чувствительность МДМ будет зависеть не только от марки стали вала, но окажется иной при установке МДМ на разных участках одного и того же вала. Практика показывает, что МДМ должен тарироваться непосредственно на рабочем валу, и перемещение его на другой участок вала без новой тарировки не допускается.

Обычно вал нагружен кроме крутящего еще и изгибающим моментом. При вращении такого вала в каждой точке поверхностного слоя главные напряжения σ_{\max} и σ_{\min} будут меняться с периодом, равным времени одного оборота вала в соответствии с выражениями

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_{\text{И}}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{И}}}{2}\right)^2 + \tau^2};$$
$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_{\text{И}}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\text{И}}}{2}\right)^2 + \tau^2},$$

где $\sigma_{\text{И}}$ — напряжения изгиба вала.

Следовательно, чувствительность МДМ будет периодически меняться с частотой, равной частоте вращения вала за счет действия $\sigma_{\text{И}}$, что также хорошо согласуется с экспериментальными данными.

2. ТИПЫ МДМ

За период с 1954 г. по настоящее время предложено достаточно большое число типов МДМ, которые можно классифицировать следующим образом:

а) по типу магнитопроводов различают МДМ с неявно выраженными полюсами (неявнополюсные) и с явно выраженными полюсами (явнополюсные);

б) по способу установки на контролируемом валу различают приставные и кольцевые МДМ;

в) по типу магнитоупругого чувствительного элемента различают МДМ, которые могут быть размещены непосредственно на ва-

лу, и МДМ, которые могут быть размещены только на специальном чувствительном элементе, встраиваемом в кинематический тракт передачи момента;

г) по необходимости электрической связи с элементами, расположенными на вращающемся валу, различают контактные и бесконтактные МДМ;

д) по чувствительности к знаку крутящего момента различают МДМ, не чувствительные к знаку момента и чувствительные к нему;

е) по виду выходной величины различают параметрические (дрессельные) и генераторные (например, трансформаторные) МДМ;

ж) по виду функции преобразования различают МДМ с нелинейной и линейной функцией преобразования.

Некоторые из предложенных типов МДМ внедрены на различных промышленном оборудовании, другие не получили распространения из-за присущих им недостатков. К числу таких недостатков относятся необходимость электрической связи с вращающимся валом, необходимость последовательного включения в тракт передачи момента специальных полых втулок с тороидально намотанными на них обмотками, сложность конструкции, нелинейность функции преобразования и т. п. Ниже рассмотрены только явнополюсные МДМ, которые не имеют главных из перечисленных недостатков, выпускаются промышленностью и применяются в системах управления промышленным оборудованием. Рассмотрены также те датчики, которые явились прообразом более совершенных типов явнополюсных МДМ, что позволит лучше понять принцип действия и устройство последних.

Дрессельный приставной МДМ [авт. свид. № 112899 (СССР)]. Устройство датчика показано на рис. 4. Два П-образных дресселя 1 и 2 располагаются с зазором относительно контролируемого вала под углом 45° относительно оси вала перпендикулярно друг другу, так что один из них находится в зоне главных растягивающих напряжений, а другой — в зоне сжимающих. При возникновении в валу крутящего момента индуктивное сопротивление катушки первого

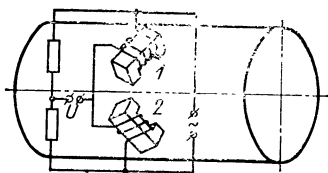


Рис. 4. Дрессельный магнитоупругий датчик крутящего момента

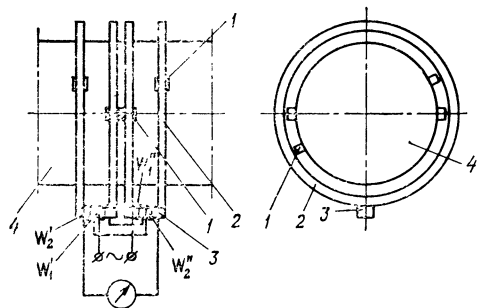


Рис. 5. Дрессельный магнитоупругий датчик крутящего момента с вращающимися полюсами и кольцевыми магнитопроводами

дросселя будет возрастать, а второго — уменьшаться. Катушки дросселей включаются и работают в качестве плечей мостовой измерительной схемы на переменном токе. Недостатком такого МДМ является большая погрешность из-за различной магнитной проницаемости отдельных участков вала и из-за изменения воздушных зазоров между дросселями и валом при эксцентриситете последнего, нечувствительность к знаку момента.

Дроссельный кольцевой МДМ [авт. свид. № 237425 (СССР)]. Разновидностью конструкции датчика предыдущего типа, в которой сделана попытка устранить в определенной степени имеющиеся недостатки, является конструкция, показанная на рис. 5. МДМ состоит из четырех полюсных наконечников 1, укрепленных на валу 4 и расположенных так, что направление между наконечниками одной пары составляет 45° , а другой пары — 135° к оси вала. Кольцевые магнитопроводы 2, попарно соединенные между собой ярмами 3, охватывают полюсные наконечники. На каждом ярме намотаны намагничивающие W'_1 и W''_1 и измерительные W'_2 и W''_2 обмотки. Магнитный поток, образованный переменным током в намагничивающих обмотках, замыкается по кольцевым магнитопроводам, полюсным наконечникам и по участкам вала между ними. Так как полюсные наконечники относительно вала находятся в одном и том же положении, то погрешность от изменения магнитной проницаемости на разных участках вала при его вращении должна быть значительно меньше. Данные о характеристиках описанных датчиков и применении их в промышленных объектах в литературе отсутствуют.

Трансформаторный приставной МДМ [55]. Датчик, изображенный на рис. 6, представляет собой своеобразный дифференциальный трансформатор. Он имеет один центральный полюс возбуждения и четыре измерительных полюса, расположенных под углом 45° к оси вала. Измерительные обмотки, установленные на измерительных полюсах, соединяются между собой последовательно встречно. При отсутствии крутящего момента магнитные сопротивления участков вала между полюсом возбуждения и каждым из измерительных полюсов равны, ЭДС в каждой из измерительных обмоток также равны, а их сумма равна нулю. При наличии крутящего момента вала ЭДС в измерительных обмотках будут разными, и на выходе появится разностная ЭДС, по величине которой судят о значении крутящего момента.

Трансформаторный кольцевой МДМ. Трансформаторному приставному МДМ присущи те же недостатки, что и дроссельному приставному датчику. Эти недостатки в большой мере устраняются в трансформаторном кольцевом МДМ [пат США № 3340729, авт. свид. № 614343 (СССР)]. Здесь шихтованный кольцевой статор имеет несколько полюсов возбуждения, равномерно расположенных по окружности, а число измерительных полюсов и измерительных катушек составляет четыре на каждый полюс возбуждения (рис. 7). Измерительные катушки соединяются в две измерительные обмотки, включенные встречно в дифференциаль-

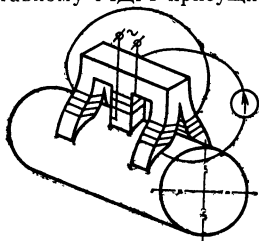


Рис. 6. Трансформаторный магнитоупругий датчик крутящего момента

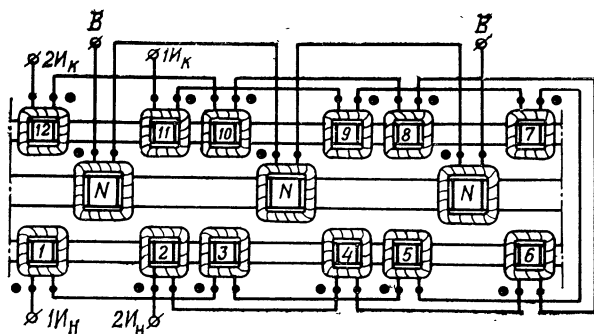


Рис. 7. Кольцевой трансформаторный магнитоупругий датчик крутящего момента (развертка магнитопроводов):

N — торцы полюсов возбуждения; 1, ..., 12 — торцы полюсов измерительных магнитопроводов; B , B — зажимы обмотки возбуждения; $1H_H$, $1H_K$ — зажимы первой измерительной обмотки; $2H_H$, $2H_K$ — зажимы второй измерительной обмотки

ной схеме. Эта конструкция как бы состоит из нескольких приставных трансформаторных датчиков, рассмотренных выше и поэтому не требует более подробных объяснений.

Крестовой приставной МДМ фирмы ASEA ("cross torductor") [56]. Крестовой МДМ (рис. 8) состоит из П-образного сердечника 1 с обмоткой возбуждения 2, питаемой переменным током, и П-образного сердечника 3 с измерительной обмоткой 4. Один из сердечников располагается вдоль оси контролируемого вала, а другой — под углом 90° относительно первого сердечника. Магнитный поток сердечника возбуждения, проходя через воздушные зазоры в вал, создает в нем магнитное поле симметричное относительно полюсов измерительного сердечника, поэтому эти полюсы находятся под одинаковыми магнитными потенциалами и магнитный поток в измерительном сердечнике равен нулю. При появлении крутящего момента магнитное поле вала искажается из-за изменения магнитной проницаемости на участках вала между проекциями полюсов возбуждения и измерительных, полюсы измерительного сердечника оказываются под различными магнитными потенциалами и в измерительной обмотке индуцируется переменная ЭДС, пропорциональная крутящему моменту. Крестовой датчик имеет те же недостатки, что и дроссельный: низкую точность измерения из-за зависимости выход-

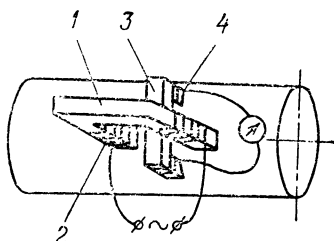


Рис. 8. Крестовой магнитоупругий датчик крутящего момента

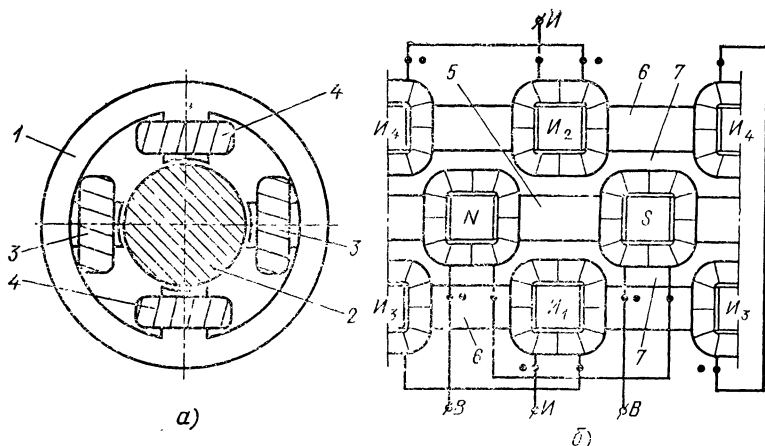


Рис. 9. Тордуктор с одной парой полюсов возбуждения:

a — вид сбоку; *б* — развртка магнитопроводов со схемой соединения обмоток; *N*, *S* — торцы полюсов возбуждения; *И*₁, ..., *И*₄ — торцы измерительных полюсов; *B*, *В* — зажимы обмотки возбуждения; *И*, *И* — зажимы измерительной обмотки

ного напряжения от величины зазора, наличие глубоких пульсаций выходного напряжения из-за магнитной неоднородности материала вала, нечувствительность к знаку момента.

Кольцевой МДМ фирмы ASEA («ring torquoductor», пат. США № 3011340, [56]). Эту конструкцию МДМ назовем тордуктором. Тордуктор в значительной степени лишен недостатков, присущих крестовому МДМ. Он состоит из магнитного сердечника *1*, размещенного концентрично с валом *2* (рис. 9). Сердечник имеет магнитопровод возбуждения *5*, на полюсах которого размещены катушки обмотки возбуждения *3*, питающиеся переменным током, и два измерительных магнитопровода *6*, на полюсах которого размещены катушки *4* измерительной обмотки. Катушки измерительной обмотки соединены согласно-последовательно. Магнитопровод возбуждения отделен от измерительных магнитопроводов дистанционными кольцами *7*. Тордукторы получили достаточно широкое распространение за рубежом. Их недостатками являются нечувствительность к знаку момента, нелинейность функции преобразования в ее начальной части и наличие выходного напряжения при $M=0$.

Тордуктор с П-образными измерительными магнитопроводами [авт. свид. № 148932 (СССР)]. Разновидностью конструкции тордуктора является МДМ с П-образными измерительными магнитопроводами, расположенными параллельно оси вала в промежутках между полюсами возбуждения (рис. 10). Не отличаясь по принципу действия от тордуктора, он имеет более сложную конструкцию.

Кольцевой дифференциальный МДМ [авт. свид. № 214161 (СССР)]. Ниже этот МДМ будем называть дифдуктором (дифференциальным тордуктором). Дифдуктор состоит из сердечника *1*, размещенного концентрично с контролируемым валом *2* (рис. 11). Сердечник имеет магнитопровод *6*, на полюсах которого размеща-

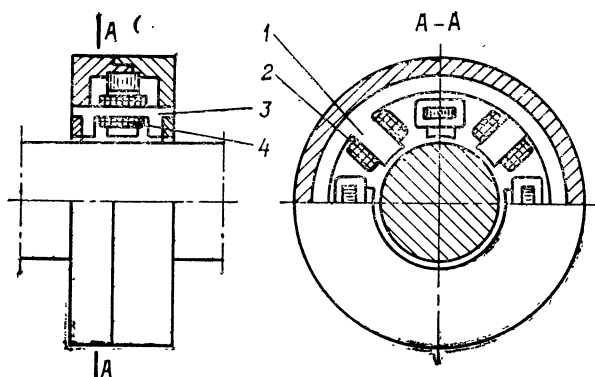


Рис. 10. Тордуктор с поперечно расположенными II-образными измерительными магнитопроводами:

1 — полюс возбуждения; 2 — катушка обмотки возбуждения; 3 — II-образный измерительный магнитопровод; 4 — катушка измерительной обмотки

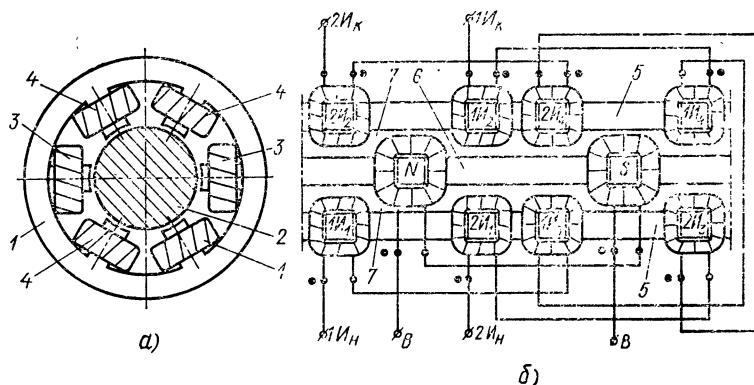


Рис. 11. Дифдуктор с одной парой полюсов возбуждения:

а — вид сбоку; б — развертка магнитопроводов со схемой соединения обмоток; N, S — торцы полюсов возбуждения; $1I_1, \dots, 1I_4, \dots, 2I_1, \dots, 2I_4$ — торцы измерительных полюсов; B, B — зажимы обмотки возбуждения; $1I_H, 1I_K$ — зажимы первой измерительной обмотки; $2I_H, 2I_K$ — зажимы второй измерительной обмотки

ются катушки обмотки возбуждения 3, питаемые переменным током, и два измерительных магнитопровода 5, на полюсах которого размещены катушки 4 двух измерительных обмоток. Катушки каждой из измерительных обмоток соединены последовательно (рис. 11, б). Магнитопровод возбуждения отделен от измерительных магнитопроводов кольцами 7. Напряжения обеих измерительных обмоток выпрямляются и сравниваются с помощью дифференциальной изме-

рительной схемы. Дифдукторы, будучи чувствительными к знаку момента и имея линейную функцию преобразования, являются наиболее перспективными датчиками среди всех типов МДМ. Они нашли распространение в СССР.

Ограниченный объем настоящей книги не позволяет рассмотреть все имеющиеся конструкции МДМ, поэтому автор отсылает читателей, желающих углубить свои знания сведениями о других типах МДМ, к первоисточникам (см. [1], [53], а также авт. свид. СССР №№ 126426, 127260, 130419, 224122, 274420, 304456, 331264, 340918, 390382, 432357, 492765, 493669, 540166, 580465, пат. США №№ 2895331, 3465581, пат. ГДР № 63898).

3. ВСТРОЙКА МДМ В МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ

Как уже отмечалось выше, МДМ не требуют большой измерительной базы на контролируемом валу и вследствие этого могут быть сравнительно легко размещены во многих производственных машинах и механизмах. Однако в отдельных случаях требуются определенные переделки некоторых узлов существующих машин и механизмов, с тем чтобы оказалось возможным применить в них МДМ.

В общем случае материал и размеры валов и их термообработку выбирают из соображений прочности и жесткости. Применение МДМ выдвигает другие требования к валу: высокие магнитные и магнитоупругие свойства, малый гистерезис. Эти требования во многих случаях находятся в противоречии с требованиями к валу как к ответственному элементу конструкции. Некоторые материалы, в частности нержавеющие стали, идущие на изготовление валов, обладают очень низкими магнитоупругими свойствами или полным их отсутствием. Препятствием применению МДМ также могут служить недостаток пространства для размещения датчика и особенности кинематической цепи машины.

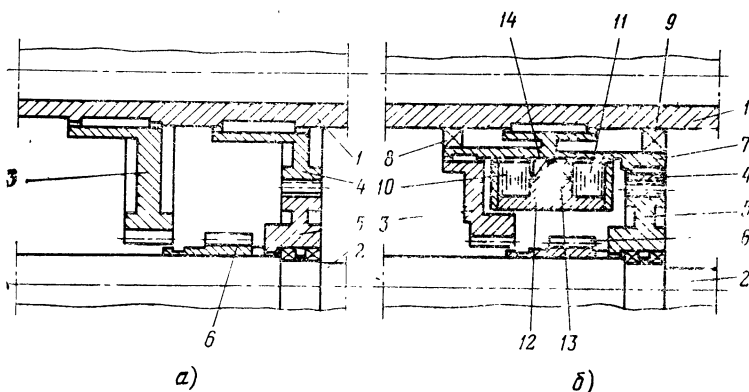


Рис. 12. Часть кинематической цепи шпинделя токарного станка 1Б732ФЗ:

а — в существующей конструкции станка; б — в конструкции станка со встроенными магнитоупругими датчиками

В перечисленных случаях оказывается целесообразным применение магнитоупругих чувствительных элементов, встроенных в кинематическую цепь последовательно или параллельно, обладающих требуемыми свойствами и имеющих необходимую точность изготовления.

Применение последовательно включенного чувствительного элемента рассмотрим на примере токарного станка 1Б732ФЗ с числовым программным управлением. В автоматической системе управления этого станка требовалось измерять крутящий момент шпинделя с помощью дифдуктора. Часть кинематической цепи этого станка показана на рис. 12, а. Вращение от электродвигателя главного движения к шпинделю 1 через вал 2 передается или с помощью пары зубчатых колес 6 и 3 (при этом номинальный крутящий момент шпинделя составляет 4905 Н·м) или с помощью пары зубчатых колес 4 и 5 (что соответствует номинальному крутящему моменту шпинделя 2453 Н·м).

Конструктивное решение узла МДМ в этом станке показано на рис. 12, б [1, 49]. На шпиндель 1 на шпонке посажен стакан 7, поддерживаемый с обоих концов шарикоподшипниками 8 и 9. Толщины стенок стакана в его левой и правой частях выбраны из условий равенства напряжений кручения в них при номинальных моментах 2453 и 4905 Н·м. Зубчатые колеса 3 и 4 укреплены на концах стакана, а вал 2 с зубчатыми колесами 5 и 6 остался без изменений. Два датчика (дифдуктора) 10 и 11 помещены в корпус 12, опирающийся на стакан с помощью шарикоподшипников 13 и 14 и зафиксированный относительно корпуса станка.

При работе станка на поддиапазоне крутящего момента 4905 Н·м крутящий момент от вала 2 передается к шпинделю 1 через

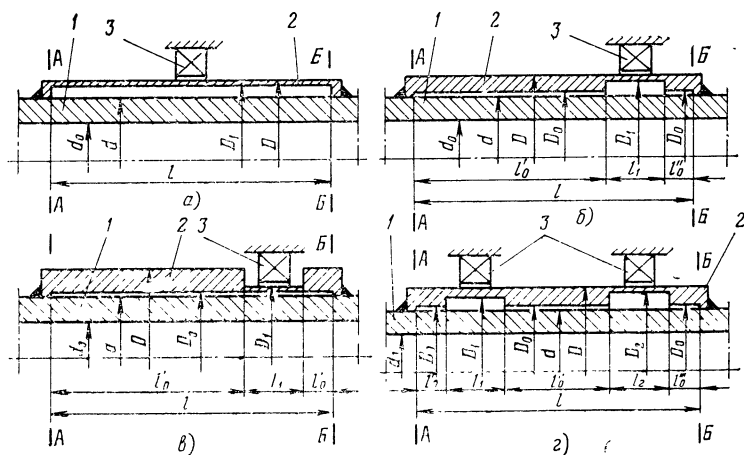


Рис. 13. Стакан, приваренный к валу и применяемый в качестве чувствительного элемента магнитоупругого датчика крутящего момента:

а — стакан неизменного поперечного сечения по длине; б, в — стакан с тонким рабочим участком в зоне установки магнитоупругого датчика; г — стакан с двумя тонкими рабочими участками (1 — вал; 2 — стакан; 3 — магнитоупругий датчик крутящего момента)

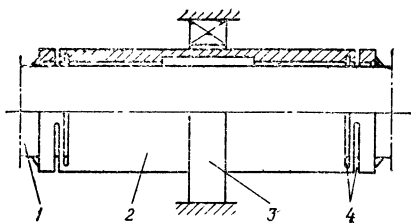


Рис. 14. Стакан, разгруженный от изгибающего момента:

1 — вал; 2 — стакан; 3 — датчик момента; 4 — прорези

зубчатые колеса 3 и 6 и левую часть стакана, при этом работает датчик 10. При работе на поддиапазоне момента 2453 Н·м вращение на шпиндель передается через зубчатые колеса 4 и 5 и правую часть стакана, при этом работает датчик 11. Оба датчика имеют при номинальных крутящих моментах одинаковое выходное напряжение

Разнообразие диаметров существующих валов приводит к тому, что для каждого диаметра вала необходимо проектировать новый МДМ. Со временем это приведет к появлению необоснованно большого числа типоразмеров датчиков. Этого можно избежать, если применить в качестве магнитоупругого чувствительного элемента стакан, включенный в кинематический тракт передачи момента параллельно валу, как показано на рис. 13 [26, 59]. Такой стакан закрепляется своими торцами на валу путем горячей посадки, сварки или любым другим способом, обеспечивающим безлюфтовое соединение его с валом. В этом случае материал стакана, его термообработка и точность изготовления могут быть взяты наилучшими с точки зрения применения МДМ, а наружный диаметр стакана может быть унифицирован для достаточно большого числа диаметров валов.

Для разгрузки стакана от изгибающего момента в нем может быть выполнено несколько поперечных прорезей, сдвинутых на угол 90° (рис. 14).

Заслуживает также внимания техническое решение, заключающееся в применении одного и того же МДМ на валах разных диаметров [авт. свид. № 331264 (СССР)]. Сущность его заключается в том, что в яре датчика выполнены радиальные отверстия с резьбой, в которые ввинчены полюсные сердечники. В зависимости от диаметра вала полюсные сердечники перемещаются в отверстиях на требуемую величину с последующей фиксацией.

4. РАСЧЕТ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МДМ

В случае включения магнитоупругого чувствительного элемента в кинематический тракт передачи момента последовательно расчет механических напряжений в нем производят по формулам, известным из курса сопротивления материалов. Для случая включения чувствительного элемента в кинематический тракт параллельно расчет можно произвести в соответствии с выведенными ниже формулами.

Механические системы, показанные на рис. 13, являются статически неопределимыми, так как напряжения в различных сечениях вала и стакана не могут быть определены с помощью только уравнений равновесия. Дополнительно к уравнениям равновесия необходимо составить также уравнения перемещений, основанные на характере деформации системы.

Для случая стакана одинакового поперечного сечения по длине (рис. 13, а) крутящий момент, передаваемый участком вала l между сечениями $A-A$ и $B-B$,

$$M = M_B + M_C,$$

где M_B — крутящий момент, передаваемый валом; M_C — крутящий момент, передаваемый стаканом.

Угол закручивания вала на участке l

$$\varphi_B = \frac{M_B l}{G_B J_B},$$

а угол закручивания стакана на участке l

$$\varphi_C = \frac{M_C l}{G_C J_C},$$

где G_B и G_C — модули упругости второго рода для материалов вала и стакана соответственно; J_B и J_C — полярные моменты инерции поперечных сечений вала и стакана.

Учитывая, что углы закручивания вала и стакана на участке l равны между собой ($\varphi_B = \varphi_C$) и модули упругости также равны ($G_B = G_C$) (материал вала и стакана — сталь), получаем

$$\frac{M_B}{M_C} = \frac{J_B}{J_C}. \quad (3)$$

Пользуясь одним из свойств пропорций и учитывая, что $M_B + M_C = M$ (где M — крутящий момент, передаваемый валом за пределами участка l), будем иметь из уравнения (3)

$$M_C = \frac{J_C M}{J_B + J_C} = K_1 M. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что при постоянном значении коэффициента K_1 крутящий момент, передаваемый стаканом, прямо пропорционален моменту M , приложенному к валу.

Выходное напряжение МДМ, как будет показано в гл. II и III, прямо пропорционально величине главных напряжений в стакане σ_c , численно равных максимальным касательным напряжениям:

$$\tau_c = \sigma_c = \frac{M_c}{W_c}, \quad (5)$$

где W_c — полярный момент сопротивления поперечного сечения стакана.

Подставив в выражение (5) значение M_c из формулы (4) и учитывая, что $W_c = 2J_c/D$, получим

$$\tau_c = \frac{0,5MD}{J_B + J_C}, \quad (6)$$

где D — наружный диаметр стакана.

С учетом того, что $J_C = 0,1(D^4 - D_1^4)$, выражение (5) примет вид

$$\tau_c = \frac{0,5MD}{J_B + 0,1(D^4 - D_1^4)}, \quad (7)$$

где D_1 — внутренний диаметр стакана.

Формулы (6) и (7) позволяют определить напряжения кручения τ_c в стакане по известным значениям M и размерам вала и стакана или размер D_1 по заданным значениям τ_c и J_B и выбранному значению D .

Из анализа выражения (7) следует, что при известном значении момента инерции поперечного сечения вала J_B и выбранном диаметре D_1 напряжения кручения в стакане τ_c падают с ростом наружного диаметра стакана D . Если же, увеличивая диаметр D , сохранять одновременно постоянной величину момента инерции стакана $J_c = 0,1(D^4 - D_1^4)$, то τ_c будет расти прямо пропорционально D . При этом диаметр D_1 может увеличиваться до тех пор, пока стенка стакана не будет иметь достаточную толщину для проведения магнитного потока возбуждения МДМ. Таким образом, возможности получения требуемых значений τ_c в этом случае ограничены допустимым максимальным значением наружного диаметра стакана и допустимой минимальной толщиной его стенки.

Недостатком описанного выше способа является необходимость выполнения стакана сравнительно большого диаметра при малой толщине его стенки, что приводит к росту размеров МДМ. В определенной степени этот недостаток можно устранить, если в зоне установки МДМ стакан выполнить с меньшей толщиной стенки, чем в остальной части (рис. 13, б). Такая конструкция стакана дает возможность значительно увеличить напряжения кручения на этом участке и повысить таким путем выходное напряжение МДМ или уменьшить его габаритные размеры.

Рассмотрим основные соотношения для этого случая. Угол закручивания вала на участке l между сечениями $A-A$ и $B-B$

$$\varphi_B = \frac{M_B l}{G_B J_B}, \quad (8)$$

а угол закручивания стакана на этом же участке

$$\varphi_c = \varphi'_0 + \varphi''_0 + \varphi_1 = \frac{M_c l'_0}{G_{c0} J_{c0}} + \frac{M_c l''_0}{G_{c0} J_{c0}} + \frac{M_c l_1}{G_{c1} J_{c1}}. \quad (9)$$

Приравняв выражения (8) и (9), приняв допущения и выполнив преобразования, аналогичные предыдущему случаю, и обозначив $l'_0 + l''_0 = l_0$ (см. рис. 13, б), получим

$$M_c = \frac{l J_{c0} J_{c1} M}{l_1 J_B J_{c0} + (l J_{c0} + l_0 J_B) J_{c1}} = K_2 M, \quad (10)$$

где $J_{c0} = 0,1(D^4 - D_0^4)$ — полярный момент инерции поперечного сечения нерабочего участка стакана (на участках l'_0 и l''_0); $J_{c1} = 0,1(D^4 - D_1^4)$ — то же, рабочего участка стакана (на участке l_1); $J_B = 0,1(d^4 - d_0^4)$ — то же, вала (на участке l).

Как видно из выражения (10), при неизменном значении коэффициента K_2 крутящий момент, передаваемый стаканом, также пропорционален моменту M .

Напряжения кручения в рабочем сечении стакана

$$\tau_{c1} = \sigma_{c1} = \frac{M_c}{W_{c1}}, \quad (11)$$

где W_{c1} — полярный момент сопротивления поперечного сечения рабочего участка стакана.

Учитывая, что $W_{c1} = 2J_{c1}/D$, $l_0 = l - l_1$, $J_{c1} = 0,1(D^4 - D_1^4)$, подставив в формулу (11) значение из выражения (10) и проделав необходимые преобразования, получим выражение для напряжений кручения на рабочем участке стакана:

$$\tau_{c1} = \frac{0,5MD}{J_B \frac{l_1}{l} \left(1 - \frac{J_{c1}}{J_{c0}}\right) + J_{c1} \left(1 + \frac{J_B}{J_{c0}}\right)}. \quad (12)$$

Формула (12) позволяет определить τ_{c1} в рабочем участке стакана по известным размерам вала и стакана или размер D_1 по заданному значению τ_{c1} и выбранным значениям размеров вала и стакана.

Сравнивая выражения (6) и (12), видим, что они различаются только множителями при J_B и J_{c1} .

Рассмотрим в формуле (12) множитель при J_B , равный

$$\frac{l_1}{l} \left(1 - \frac{J_{c1}}{J_{c0}}\right). \quad (13)$$

Так как $J_{c1} < J_{c0}$, а l_1/l может быть выбрано значительно меньшим единицы, то в целом множитель (13) оказывается значительно меньшим единицы.

Множитель при J_{c1}

$$1 < \left(1 + \frac{J_B}{J_{c0}}\right) < 2,$$

так как $J_B < J_{c0} < \infty$.

Из проведенного анализа следует, что при надлежащем выборе l_1 и l и одних и тех же значениях M , D и D_1 напряжения кручения для стакана с уменьшенным сечением на рабочем участке будут больше, чем τ_c для стакана постоянного поперечного сечения.

Возможно выполнить стакан таким образом, как показано на рис. 13, в. В этом случае МДМ утапливается внутрь стакана и размеры всего устройства могут быть существенно уменьшены. Такой вариант исполнения целесообразно применять в тех случаях, когда имеются ограничения по габаритным размерам. Очевидно, что датчик в этом случае должен быть разъемным. Для этого варианта исполнения стакана напряжения кручения в рабочем участке

$$\tau'_{c1} = \frac{0,5MD}{J_B \frac{l_1}{l} \left(1 - \frac{J'_{c1}}{J_{c0}}\right) + J'_{c1} \left(1 + \frac{J_B}{J_{c0}}\right)}. \quad (14)$$

Сравним выражения (14) и (12). Ввиду того, что $D_1 < D$ и $J'_{c1} < J_{c1}$, то $\tau'_{c1} < \tau_{c1}$, т. е. в этом случае выходное напряжение будет несколько ниже.

Иногда машина или механизм, в которых производится контроль крутящего момента, работает не на предельном значении крутящего момента, а при значительно меньшем значении M , т. е. имеется несколько поддиапазонов крутящего момента. В этом случае МДМ при меньшем значении момента будет иметь соответственно меньшее значение выходного напряжения и может потребоваться его усиление. Применения усилителя можно избежать, если выполнить станок с несколькими рабочими участками l_1, l_2, \dots, l_i с разными значениями диаметров рабочих участков D_1, D_2, \dots, D_i , где $i=1, 2, \dots, n$.

В общем случае напряжения кручения для k -го рабочего участка при общем числе n участков (включая нерабочий)

$$\tau_{ck} = \frac{5MD}{10 \frac{l_k}{l} J_B + \left(1 + \frac{J_B}{l} \sum_i \frac{l}{J_{ci}}\right) (D^4 - D_k^4)} \quad \text{в}$$

где $i=0, 1, 2, \dots, k-1, k+1, \dots, n$.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ТОРДУКТОРА

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Схема магнитопровода с магнитными потоками показана на рис. 15, а электрическая схема замещения магнитной цепи тордуктора с одной парой полюсов возбуждения — на рис. 16. Обычно число пар полюсов возбуждения более единицы и выбирается в зависимости от диаметра вала, но процессы, происходящие в тордукторе с любым числом полюсов возбуждения, идентичны.

Переменный магнитный поток $\Phi_{B\delta}$, возникающий под действием МДС полюсов $F_{в.п.}$ через воздушный зазор проходит в вал от северного полюса возбуждения к южному, при этом картина магнитного поля в поверхностном слое вала выглядит так, как показано на рис. 19, 20.

При отсутствии крутящего момента магнитные сопротивления участков вала между проекциями полюсов возбуждения и измерительных $R_{и.д} = 1/G_{и.д}$ (см. рис. 20) равны между собой, магнитные потенциалы участков вала под парами измерительных полюсов I_1-I_2 и I_3-I_4 равны между собой и поэтому магнитные потоки в каждом из них равны нулю (рис. 15,а). При появлении крутящего момента магнитные сопротивления участков вала в направлении действия главных напряжений σ_{\max} и σ_{\min} изменяются. В направлении действия главных растягивающих напряжений сопротивление уменьшается, а в направлении сжимающих — увеличивается:

$$R'_{и.д} > R''_{и.д}.$$

Это приводит к изменению магнитных потенциалов на поверхности вала под измерительными полюсами, в результате чего в них появляются магнитные потоки $\Phi_{и.п}$ (см. рис. 15,б), которые индуцируют в полюсных катушках измерительной обмотки переменные ЭДС. Поток $\Phi_{и.п.}$, раздваиваясь, замыкается по яруму измерительного магнитопровода (поток $\Phi_{и.я.}$).

Будем считать, что магнитный поток рассеяния $\Phi_{в.р}$ учтен с помощью коэффициента рассеяния как некоторая доля потока полюса возбуждения $F_{в.п.}$. С учетом этого, мгновенное значение магнитного потока в воздушном зазоре под полюсом возбуждения при отсутствии крутящего момента

$$\Phi_{B\delta} = \frac{f_{в.п.}}{2R_{B\delta} + R_{в.ж} + R_{\Sigma}}, \quad (15)$$

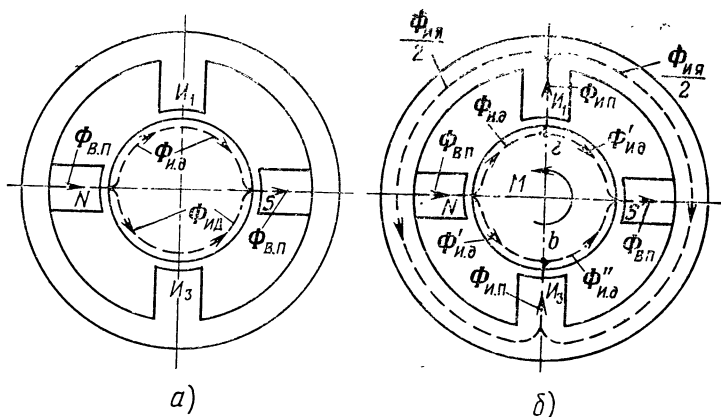


Рис. 15 Магнитные потоки в магнитопроводах двухполюсного тордуктора (потоки рассеяния не показаны):

а — магнитные потоки при $M=0$; б — то же, при $M \neq 0$

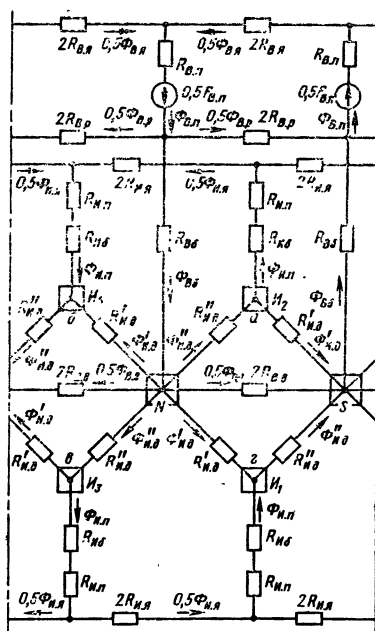


Рис. 16. Схема замещения магнитной цепи двухполюсного тордуктора (магнитные потоки рассеяния $\Phi_{в.р}$ показаны упрощенно)

где $R_{в\delta}$ — магнитное сопротивление воздушного зазора под полюсом возбуждения.

Магнитное сопротивление магнитопровода возбуждения в соответствии со схемой замещения

$$R_{в.ж} = 2R_{в.п} + R_{в.я}, \quad (16)$$

где $R_{в.п}$, $R_{в.я}$ — магнитные сопротивления полюса и ярма магнитопровода возбуждения соответственно.

Эквивалентное сопротивление остальной части магнитной цепи тордуктора при отсутствии крутящего момента

$$R_3 = \frac{R_{в.в} R_{и.д}}{2R_{в.в} + R_{и.д}}, \quad (17)$$

где $R_{в.в}$ — магнитное сопротивление участка вала между проекциями полюсов возбуждения; $R_{и.д}$ — магнитное сопротивление участков вала между проекциями полюсов возбуждения и измерительных.

Мгновенное значение МДС пары полюсов возбуждения

$$f_{в.п} = 2i_{в\omega} \omega_B, \quad (18)$$

где i_v — мгновенное значение тока в полюсной катушке обмотки возбуждения; ω_v — число витков полюсной катушки обмотки возбуждения.

С учетом выражений (15) и (17)

$$\Phi_{B\delta} = \frac{f_{B.p} (2R_{B.v} + R_{И.д})}{(2R_{B\delta} + R_{B.ж}) (2R_{B.v} + R_{И.д}) + R_{B.д} R_{И.д}}. \quad (19)$$

В соответствии со схемой замещения

$$\Phi_{B\delta} = \Phi_{B.v} + 4\Phi_{И.д}, \quad (20)$$

где $\Phi_{B.v}$ — мгновенное значение магнитного потока в магнитном сопротивлении $R_{B.v}$; $\Phi_{И.д}$ — то же, в магнитном сопротивлении $R_{И.д}$.

Так как магнитные потоки в параллельно включенных магнитных сопротивлениях обратно пропорциональны величинам этих сопротивлений, то можно записать

$$\frac{2\Phi_{И.д}}{\Phi_{B.v}} = \frac{R_{B.v}}{R_{И.д}}. \quad (21)$$

С учетом уравнений (19)–(21) мгновенное значение магнитного потока

$$\Phi_{И.д} = \frac{f_{B.p} R_{B.v}}{2 [2R_{B.v} (2R_{B\delta} + R_{B.ж}) + (2R_{B\delta} + R_{B.v} + R_{B.ж}) R_{И.д}]}. \quad (22)$$

Мгновенное значение падения магнитного напряжения на магнитном сопротивлении $R_{И.д}$ при крутящем моменте $M=0$

$$\begin{aligned} f_{И.д} &= \Phi_{И.д} R_{И.д} = \\ &= \frac{f_{B.p} R_{B.v} R_{И.д}}{2 [2R_{B.v} (2R_{B\delta} + R_{B.ж}) + (2R_{B\delta} + R_{B.v} + R_{B.ж}) R_{И.д}]}. \end{aligned}$$

При появлении крутящего момента на валу ввиду изменения магнитной проницаемости на участках вала, подвергающихся сжатию и растяжению, магнитные сопротивления соответствующих участков изменятся. Если предположить, что приращения сопротивлений на участках сжатия и растяжения одинаковы и равны $+\Delta R_{И.д}$ и $-\Delta R_{И.д}$ соответственно, получим мгновенные значения падения магнитных напряжений

$$f'_{И.д} = \frac{f_{B.p} R_{B.v} (R_{И.д} + \Delta R_{И.д})}{2 [2R_{B.v} (2R_{B\delta} + R_{B.ж}) + (2R_{B\delta} + R_{B.v} + R_{B.ж}) (R_{И.д} + \Delta R_{И.д})]}; \quad (22)$$

$$f''_{И.д} = \frac{f_{B.p} R_{B.v} (R_{И.д} - \Delta R_{И.д})}{2 [2R_{B.v} (2R_{B\delta} + R_{B.ж}) + (2R_{B\delta} + R_{B.v} + R_{B.ж}) (R_{И.д} - \Delta R_{И.д})]}. \quad (23)$$

Между точками $a-b$ и $c-g$ (см. рис. 15, 16) возникает при этом разность магнитных потенциалов

$$\Delta f_{\text{И.д}} = f'_{\text{И.д}} - f''_{\text{И.д}},$$

а в измерительных полюсах появится переменный магнитный поток, мгновенное значение которого

$$\Psi_{\text{И.п}} = \frac{f'_{\text{И.д}} - f''_{\text{И.д}}}{2R_{\text{И}\delta} + R_{\text{И.ж}}}, \quad (24)$$

где $R_{\text{И.б}}$ — магнитное сопротивление воздушного зазора под измерительным полюсом; $R_{\text{И.ж}}$ — магнитное сопротивление железа измерительного магнитопровода;

$$R_{\text{И.ж}} = 2R_{\text{И.п}} + R_{\text{И.я}}, \quad (25)$$

здесь $R_{\text{И.п}}$, $R_{\text{И.я}}$ — магнитные сопротивления полюса и ярма измерительного магнитопровода.

Подставив в выражение (24) значения $f'_{\text{И.д}}$ и $f''_{\text{И.д}}$ из формул (22) — (23) и проделав необходимые преобразования, получим выражение мгновенного значения магнитного потока в полюсе измерительного магнитопровода

$$\Psi_{\text{И.п}} = \frac{4\omega_{\text{В}} i_{\text{В}} R_{\text{В.в}}^2 (2R_{\text{В}\delta} + R_{\text{В.ж}}) \Delta R_{\text{И.д}}}{(2R_{\text{И}\delta} + R_{\text{И.ж}}) \{ [2R_{\text{В.в}} (2R_{\text{В}\delta} + R_{\text{В.ж}}) + (2R_{\text{В}\delta} + R_{\text{В.ж}} + R_{\text{В.в}}) R_{\text{И.д}}]^2 - [(2R_{\text{В}\delta} + R_{\text{В.ж}} + R_{\text{В.в}}) \Delta R_{\text{И.д}}]^2 \}} \rightarrow \quad (26)$$

Упростим полученное выражение. Вторым слагаемым в знаменателе формулы (26) можно пренебречь как величиной второго порядка малости по сравнению с первым слагаемым. Кроме того, обычно магнитная цепь тордуктора не насыщена, поэтому основным магнитным сопротивлением в цепи является сопротивление воздушных зазоров и можно принять, что

$$2R_{\text{В}\delta} + R_{\text{В.ж}} + R_{\text{В.в}} \approx 2R_{\text{В}\delta};$$

$$2R_{\text{И}\delta} + R_{\text{И.ж}} \approx 2R_{\text{И}\delta}.$$

С учетом упрощений выражение (26) примет вид

$$\Psi_{\text{И.п}} = \frac{\omega_{\text{В}} i_{\text{В}} R_{\text{В.в}}^2 \Delta R_{\text{И.д}}}{R_{\text{В}\delta} R_{\text{И}\delta} (2R_{\text{В.в}} + R_{\text{И.д}})^2}. \quad (27)$$

6. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ

На основе выражения (27) выведем уравнение, связывающее крутящий момент вала с выходным напряжением.

Магнитное сопротивление воздушного зазора под полюсом возбуждения и измерительным полюсом

$$R_{\text{В}\delta} = \frac{\delta_{\text{В}}}{\mu_0 a_{\text{В}} b_{\text{В}}} = \frac{\delta_{\text{В}}}{\mu_0 s_{\text{В}}}; \quad (28)$$

$$R_{И\delta} = \frac{\delta_{И}}{\mu_0 a_{И} b_{И}} = \frac{\delta_{И}}{\mu_0 s_{И}}, \quad (29)$$

где $\delta_{в}$, $\delta_{И}$ — односторонний воздушный зазор под полюсами возбуждения и измерительным соответственно; $a_{в}$, $b_{в}$ — размеры проекции полюса возбуждения на поверхности вала; $a_{И}$, $b_{И}$ — то же, измерительного полюса (см. рис. 20); $S_{в}$, $S_{И}$ — соответственно площади проекций полюсов возбуждения и измерительного; μ_0 — магнитная постоянная.

Допустим, что магнитные сопротивления участков вала имеют активный характер и глубина проникновения переменного магнитного потока в тело вала одинакова на всех его участках и равна некоторой средней величине h . Тогда магнитное сопротивление

$$R_{в.в} = \frac{\alpha}{\mu_{в} h}, \quad (30)$$

где $\mu_{в}$ — абсолютная магнитная проницаемость материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{в.в}$ (магнитной проводимости $G_{в.в}$);

$$\alpha = \frac{l_{в.в}}{b_{в.в}},$$

здесь $l_{в.в}$, $b_{в.в}$ — некоторые средние длина и ширина участка магнитной проводимости $G_{в.в}$.

Аналогично, магнитное сопротивление

$$R_{И.д} = \frac{\beta}{\mu_{И}}, \quad (31)$$

где $\mu_{И}$ — абсолютная магнитная проницаемость материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{И.д}$ (магнитной проводимости $G_{И.д}$);

$$\beta = \frac{l_{И.д}}{b_{И.д}}; \quad (32)$$

здесь $l_{И.д}$, $b_{И.д}$ — некоторые средние длина и ширина участка магнитной проводимости $G_{И.д}$.

Базируясь на выражении (31), можно записать

$$R_{И.д} + \Delta R_{И.д} = \frac{\beta}{(\mu_{И} - \Delta \mu_{И}) h}. \quad (33)$$

Вычитая из выражения (33) выражение (31) и учитывая, что $\Delta \mu_{И}$ по сравнению с $\mu_{И}$ можно пренебречь как величиной второго порядка малости, получим

$$\Delta R_{И.д} = \frac{\Delta \mu_{И}}{\mu_{И}} R_{И.д}. \quad (34)$$

Допуская, что

$$\Delta\mu_{\text{И}} = |\Delta\mu'_{\text{И}}| = |\Delta\mu''_{\text{И}}|,$$

где $|\Delta\mu'_{\text{И}}|$ и $|\Delta\mu''_{\text{И}}|$ — модули приращений магнитной проницаемости материала вала на участках сжатия и растяжения соответственно, можно записать

$$\Delta\mu_{\text{И}} = K_{\mu} |\sigma_{\text{max}}| = K_{\mu} \tau, \quad (35)$$

где $|\sigma_{\text{max}}| = |\sigma_{\text{min}}|$ — модуль главных напряжений на поверхности вала; τ — максимальные касательные напряжения в валу.

С учетом уравнений (1), (27)–(30), (31), (34), (35) получим

$$\Psi_{\text{И.п}} = \frac{\mu_0^2 K_{\mu} w_{\text{В}} s_{\text{В}} s_{\text{И}} \alpha^2 \beta M i_{\text{В}}}{h \delta_{\text{В}} \delta_{\text{И}} (2\alpha\mu_{\text{И}} + \beta\mu_{\text{В}})^2 W_{\text{р}}}. \quad (36)$$

Мгновенное значение потокосцепления полюсной катушки измерительной обмотки тордуктора

$$\psi_{\text{И.п}} = w_{\text{И}} \Psi_{\text{И.п}}, \quad (37)$$

где $w_{\text{И}}$ — число витков полюсной катушки измерительной обмотки.

Мгновенное значение ЭДС в полюсной катушке измерительной обмотки

$$e_{\text{И.п}} = - \frac{d\psi_{\text{И.п}}}{dt}. \quad (38)$$

Переменными величинами во времени (не считая крутящего момента M) являются ток возбуждения $i_{\text{В}}$ и магнитные проницаемости $\mu_{\text{В}}$ и $\mu_{\text{И}}$ ввиду неоднородности магнитных свойств материала вала. Воздушные зазоры $\delta_{\text{В}}$ и $\delta_{\text{И}}$ под полюсами возбуждения и измерительными также могут являться переменными величинами, если имеет место вращающийся эксцентриситет вала относительно расточки статора, эллипсность вала и т. п. Остальные параметры в формуле (36) являются величинами постоянными.

Обозначим

$$\eta = 2\alpha\mu_{\text{И}} + \beta\mu_{\text{В}}. \quad (39)$$

Выражение (38) с учетом формулы (39) преобразуется к виду

$$e_{\text{И.п}} = -K_3 \frac{d}{dt} \left(\frac{i_{\text{В}}}{\delta_{\text{В}} \delta_{\text{И}} \eta^3} \right) = -\frac{K_3}{\delta_{\text{В}} \delta_{\text{И}} \eta^3} \left[\frac{di_{\text{В}}}{dt} - \left(\frac{1}{\delta_{\text{В}}} \frac{d\delta_{\text{В}}}{dt} + \frac{1}{\delta_{\text{И}}} \frac{d\delta_{\text{И}}}{dt} + \frac{2}{\eta} \frac{d\eta}{dt} \right) i_{\text{В}} \right], \quad (40)$$

где

$$K_3 = \frac{\mu_0^2 K_{\mu} w_{\text{В}} w_{\text{И}} s_{\text{В}} s_{\text{И}} \alpha^2 \beta M}{h W_{\text{р}}}. \quad (41)$$

Обмотка возбуждения питается переменным током промышленной частоты (50 Гц) или повышенной частоты (400, 1000 Гц).

Положим, что мгновенное значение тока возбуждения в полюсной катушке возбуждения

$$i_B = \sqrt{2} I_B \cos 2\pi f t, \quad (42)$$

тогда

$$\frac{di_B}{dt} = -2\sqrt{2}\pi f I_B \sin 2\pi f t, \quad (43)$$

где I_B — действующее значение тока в полюсной катушке обмотки возбуждения; f — частота тока возбуждения; t — время.

С учетом выражений (42) и (43) мгновенное значение ЭДС в полюсной катушке

$$e_{И.п} = \frac{K_4}{\delta_B \delta_{И} \eta^2} \left[\omega \sin \omega t + \left(\frac{1}{\delta_B} \frac{d\delta_B}{dt} + \frac{1}{\delta_{И}} \frac{d\delta_{И}}{dt} + \frac{2}{\eta} \frac{d\eta}{dt} \right) \cos \omega t \right], \quad (44)$$

где

$$K_4 = K_3 \sqrt{2} I_B; \quad (45)$$

$$\omega = 2\pi f. \quad (46)$$

Выражение (44) можно представить в виде

$$e_{И.п} = K_4 A \sin(\omega t + \varphi), \quad (47)$$

где

$$A = \left| \pm \frac{\sqrt{\omega^2 + \left(\frac{1}{\delta_B} \frac{d\delta_B}{dt} + \frac{1}{\delta_{И}} \frac{d\delta_{И}}{dt} + \frac{2}{\eta} \frac{d\eta}{dt} \right)^2}}{\delta_B \delta_{И} \eta^2} \right|; \quad (48)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\frac{1}{\delta_B} \frac{d\delta_B}{dt} + \frac{1}{\delta_{И}} \frac{d\delta_{И}}{dt} + \frac{2}{\eta} \frac{d\eta}{dt}}{\omega}.$$

Второе слагаемое под знаком радикала выражения (48) является функцией угловой частоты вращения вала

$$\omega_B = \frac{\pi n}{30},$$

где n — частота вращения вала, об/мин.

Так как $\omega \gg \omega_B$, функция A будет представлять собой медленно меняющуюся амплитуду, т. е. огибающую по отношению к несущей частоте ω , а φ — медленно меняющуюся фазу колебаний несущей частоты. Расчеты показывают, что второй член подкоренного выражения формулы (48) на два-три порядка меньше первого, и поэтому им можно пренебречь по сравнению с ω^2 как величиной более высокого порядка малости.

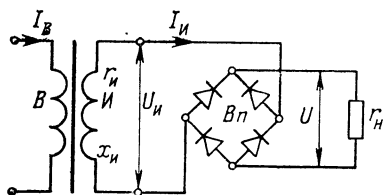


Рис. 17. Принципиальная электрическая схема тордуктора

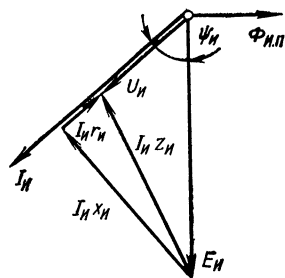


Рис. 18. Векторная диаграмма измерительной цепи тордуктора

Все измерительные катушки соединяются между собой последовательно согласно, образуя измерительную обмотку (см. рис. 9). На пару полюсов возбуждения приходятся четыре измерительные катушки. С учетом изложенного выше и выражения (47) действующее значение ЭДС измерительной обмотки тордуктора с числом пар полюсов возбуждения p_B

$$E_H = \frac{4p_B K_4 \omega}{\sqrt{2} \delta_B \delta_H (2\alpha\mu_H + \beta\mu_B)^2} . \quad (49)$$

К измерительной обмотке тордуктора через мостовую выпрямительную схему подсоединяется сопротивление нагрузки, обычно активное (рис. 17).

Переменное напряжение на клеммах измерительной обмотки в соответствии с векторной диаграммой (рис. 18)

$$U_H = \frac{E_H r_H}{\sqrt{r_H^2 + x_H^2}} . \quad (50)$$

В формуле (50) и на векторной диаграмме: I_H — ток в измерительной обмотке (действующее значение); z_H , r_H , x_H — полное, активное и реактивное сопротивления измерительной обмотки; r_H — сопротивление нагрузки.

С учетом того, что напряжение U_H выпрямляется мостовой схемой $Bп$ (см. рис. 17), и с учетом выражений (41), (45), (46), (49) выпрямленное напряжение на сопротивлении нагрузки

$$U = \frac{2\sqrt{2}U_H}{\pi} = S_T M, \quad (51)$$

где чувствительность тордуктора

$$S_T = \frac{22,5\mu_0^2 K_\mu \omega_B \omega_H p_B s_B s_H \alpha^2 \beta I_B r_H}{h \delta_B \delta_H' (2\alpha\mu_H + \beta\mu_B)^2 \sqrt{r_H^2 + x_H^2} W_D} . \quad (52)$$

Выражение (51) с учетом выражения (52) является основным уравнением тордуктора, связывающим выходное напряжение с крутящим моментом.

Как следует из формулы (52), чувствительность в случае переменных величин δ_B , δ_H , μ_B , μ_H будет также переменной величиной в функции частоты вращения контролируемого вала ω_B . За выходное напряжение при этом следует принимать средневывпрямленное значение U .

7. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИ МАГНИТОИЗОТРОПНОМ ВАЛЕ И ОТСУТСТВИИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ВАЛА

Положим, что материал вала в магнитном отношении изотропен, а вращающийся эксцентриситет отсутствует, т. е.

$$\mu_B = \mu_H = \mu = \text{const}; \quad (53)$$

$$\delta_B = \delta_H = \delta = \text{const}. \quad (54)$$

Этот случай является идеальным и на практике не имеет места. Однако к нему можно свести следующие случаи работы тордуктора.

1. Вал не вращается. При этом под каждым полюсом воздушные зазоры хотя и могут быть не равны друг другу, но они неизменны по величине. То же самое можно сказать о магнитной проницаемости отдельных участков вала. Напряжения различных полюсных катушек тордуктора при этом отличны друг от друга, но выходное напряжение измерительной обмотки равно их сумме и при $M = \text{const}$ является величиной постоянной.

2. Вал вращается, но в качестве сопротивления нагрузки применено инерционное звено, например магнитоэлектрический прибор. В этом случае стрелка прибора уже при сравнительно небольшой частоте пульсаций будет фиксировать некоторое средневывпрямленное значение выходного напряжения.

С учетом условий (53) и (54) чувствительность тордуктора

$$S_T = \frac{22,5 \mu_0^2 K_{\mu}^w \omega_B \omega_H \rho_B s_B s_H y_T f I_B r_H}{\mu^2 h \delta^2 \sqrt{r_H^2 + x_H^2} W_p}, \quad (55)$$

где

$$y_T = \frac{\alpha^2 \beta}{(2\alpha + \beta)^2}. \quad (56)$$

Из уравнения (51) следует, что при неизменном значении чувствительности выходное напряжение должно быть прямо пропорционально крутящему моменту. На практике имеется отклонение от этого закона за счет наличия начального напряжения при $M=0$ и нелинейности характеристики в начальной части (см. рис. 36) [17, 22]. Такая форма характеристики объясняется присутствием стального магнитопровода и связанными с этим нелинейностями (неуравновешенность по третьей гармонике магнитного потока), а также наличием выпрямительной схемы, элементы которой имеют нелинейность вольт-амперной характеристики в начальной ее части [45].

Отмеченный недостаток тордуктора обычно устраняют введением компенсационной схемы, при которой начало координат совмещают с точкой, лежащей на линейной части характеристики $U(M)$. Естественно, что такое техническое решение связано с усложнением всего измерительного устройства [57].

Проанализируем выражение чувствительности. Из выражения (55) следует, что S_T прямо пропорциональна числу витков полюсных катушек обмоток возбуждения и измерительной w_B и $w_{И}$, числу пар полюсов возбуждения p_B , площади торцов полюсов возбуждения и измерительных S_B и $S_{И}$ и отношению сопротивления нагрузки к общему сопротивлению измерительной цепи

$$r_H / \sqrt{r_H^2 + x_{И}^2}.$$

Чувствительность тордуктора обратно пропорциональна квадрату воздушного зазора δ и полюсному моменту сопротивления вала (чувствительного элемента) W_p .

Зависимость чувствительности от тока возбуждения I_B является нелинейной функцией, так как магнитный поток возбуждения связан с током возбуждения через магнитную проницаемость. Подтверждением этого служат экспериментальные зависимости $U(I_B w_B) = U(F_B)$ (рис. 69).

Зависимость чувствительности от частоты тока возбуждения является сложной нелинейной функцией, так как от частоты зависят такие параметры, как $x_{И}$, $R_{B.ж.}$, $R_{И.ж.}$, $R_{B.в.}$ и $R_{И.д.}$, что подтверждается экспериментально (рис. 68).

Чувствительность также прямо пропорциональна магнитоупругой чувствительности вала K_d и обратно пропорциональна квадрату магнитной проницаемости материала вала μ . Очевидно, что величина S_T зависит от отношения этих величин, так как, например, высокой магнитной проницаемости могут соответствовать плохие магнитоупругие свойства, и наоборот.

Выражение (55) указывает также на то, что для увеличения S_T следует брать более высокую частоту тока возбуждения, при которой глубина проникновения магнитного потока в вал h имеет меньшее значение.

Исследуем функцию y_T , зависящую от размеров проекций полюсов на поверхность вала и расстояний между ними.

Рассмотрим картину магнитного поля в поверхностном слое вала, которую обычно изображают в виде совокупности линий потока и эквипотенциальных линий. На рис. 19 показаны картины поля, полученные экспериментально при наличии и отсутствии крутящего момента и при отсутствии измерительных полюсов [38]. Как показали исследования, введение измерительных полюсов практически не искажает картину поля. В работе [38] также выведены соотношения, позволяющие построить картину поля расчетным путем, причем расчетные и опытные данные достаточно близки. Вместе с тем ни эти данные, ни другие модели поля [40, 56] не дают возможности получить аналитические выражения для участков магнитных сопротивлений в соответствии с электрической схемой замещения магнитной цепи тордуктора (см. рис. 16).

Для создания модели поля в поверхностном слое вала применен известный метод простых геометрических фигур. Участки

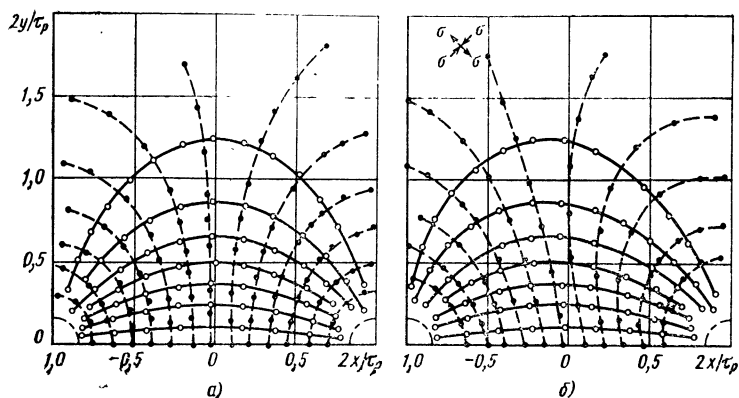


Рис. 19. Экспериментальная картина магнитного поля в поверхностном слое вала (сплошными линиями обозначены линии магнитного потока, штриховыми — эквипотенциалы) при расстоянии между центрами полюсов возбуждения $\tau_p = 165$ мм и напряженности магнитного поля $H_0 = 0,43$ А/мм:

а — при напряжениях кручения в валу $\tau = 0$; б — то же, при $\tau = 44$ Н/мм²

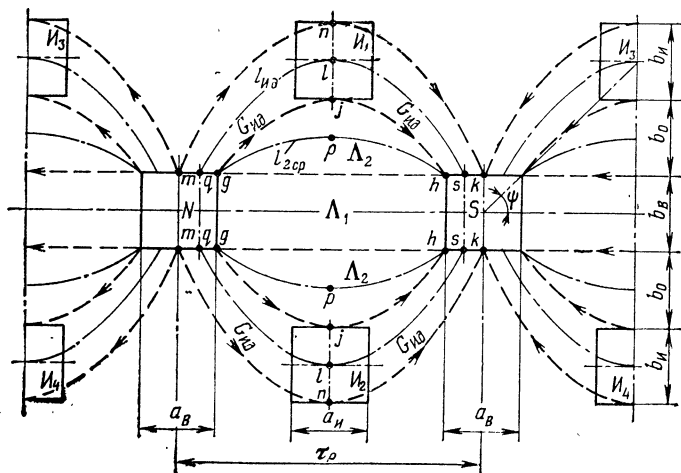


Рис. 20. Картина магнитного поля на поверхности вала для двухполюсного тордуктора с полюсами прямоугольного сечения, составленная по методу простых геометрических фигур:

N, S — проекции полюсов возбуждения; I_1, \dots, I_4 — проекции измерительных полюсов

магнитных сопротивлений вала можно представить в виде простых геометрических фигур, средняя длина и ширина которых может быть выражена аналитически. Пренебрегая магнитной проводимостью за пределами линий *mnk* (рис. 20), сопротивление $R_{B.B}$ выразим следующим образом:

$$R_{B.B} = \frac{1}{G_{B.B}} = \frac{1}{2\Lambda_1 + 4\Lambda_2}, \quad (57)$$

где Λ_1 — магнитная проводимость участка между проекциями полюсов возбуждения, ограниченного отрезками прямых *qs*; Λ_2 — проводимость участка между проекциями полюсов возбуждения, ограниченного отрезками прямых *gh* и кривой линией *gjh*.

С учетом выражения (57)

$$\alpha = \frac{1}{\frac{2b_{1cp}}{l_{1cp}} + \frac{4b_{2cp}}{l_{2cp}}}, \quad (58)$$

где $b_{1cp} = b_B$ — средняя ширина трубки магнитного потока участка магнитной проводимости Λ_1 (см. рис. 20); b_{2cp} — средняя ширина трубки магнитного потока участка магнитной проводимости Λ_2 ; l_{2cp} — длина средней магнитной линии участка проводимости Λ_2 . Длина средней магнитной линии участка проводимости Λ_1

$$l_{1cp} = 0,5 (2\tau_p - a_B), \quad (59)$$

где τ_p — полюсное деление (см. рис. 20).

Будем считать, что участки магнитной проводимости вала Λ_1 и Λ_2 ограничены квадратичными параболой. Средние линии магнитных трубок этих участков представим также в виде парабол. При этом картина магнитного поля в целом хорошо согласуется с результатами экспериментов работы [38].

Длина средней магнитной линии участка проводимости Λ_2

$$\begin{aligned} l_{2cp} &= 2 \int_0^{0,5(\tau_p - a_B)} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_1}{dx}\right)^2} dx = \\ &= \frac{2b_0 \sqrt{4b_0^2 + (\tau_p - a_B)^2} + (\tau_p - a_B)^2 \times}{4b_0} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{\times \ln \frac{2b_0 + \sqrt{4b_0^2 + (\tau_p - a_B)^2}}{\tau_p - a_B}}{\tau_p - a_B}, \end{aligned} \quad (60)$$

где уравнение параболы *gph* (см. рис. 20) имеет вид

$$y_1 = \frac{b_0}{2} - \frac{2b_0}{(\tau_p - a_B)^2} x^2.$$

Средняя ширина трубки магнитного потока b_{2cp} участка проводимости Λ_2 может быть представлена как отношение площади

фигуры gjh (см. рис. 20) к длине средней магнитной линии l_{2cp} . Площадь фигуры gjh

$$s_2 = 2 \int_0^{0,5(\tau_p - a_B)} y_2 dx = \frac{2b_0 (\tau_p - a_B)}{3}, \quad (61)$$

где уравнение параболы gjh имеет вид

$$y_2 = b_0 - \frac{4b_0}{(\tau_p - a_B)^2} x^2.$$

С учетом выражений (58)–(61) напомним

$$\begin{aligned} \alpha = \frac{1}{\frac{4b_B}{2\tau_p - a_B} + \frac{4s_2}{l_{2cp}^2}} &= \frac{1}{4 \left\{ \frac{b_B}{2\tau_p - a_B} + \right.} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{32b_0^3 (\tau_p - a_B)}{3 \left[2b_0 \sqrt{4b_0^2 + (\tau_p - a_B)^2} + (\tau_p - a_B)^2 \times \right.} \\ &\rightarrow \left. \left. \times \ln \frac{2b_0 + \sqrt{4b_0^2 + (\tau_p - a_B)^2}}{\tau_p - a_B} \right]^2 \right\}}. \end{aligned} \quad (62)$$

Следуя той же методике, определим β . Длина средней магнитной линии участка проводимости $G_{И.д}$

$$\begin{aligned} l_{И.д} &= \int_0^{0,25(2\tau_p - a_B)} \sqrt{1 + \left(\frac{dy_3}{dx} \right)^2} dx = \\ &= \frac{4(2b_0 + b_{И}) \sqrt{16(2b_0 + b_{И})^2 + (2\tau_p - a_B)^2} +}{32(2b_0 + b_{И})} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{4(2b_0 + b_{И}) + \sqrt{16(2b_0 + b_{И})^2 + (2\tau_p - a_B)^2}}{2\tau_p - a_B} \ln \left(\frac{4(2b_0 + b_{И}) + \sqrt{16(2b_0 + b_{И})^2 + (2\tau_p - a_B)^2}}{2\tau_p - a_B} \right) \end{aligned} \quad (63)$$

где уравнение параболы qls имеет вид

$$y_3 = \frac{2b_0 + b_{И}}{2} - \frac{8(2b_0 + b_{И})}{(2\tau_p - a_B)^2} x^2.$$

Среднюю ширину трубки магнитного потока $b_{И.д}$ участка проводимости $G_{И.д}$ можно представить как отношение площади фигуры $nkhjn$ (см. рис. 20) к длине средней магнитной линии $l_{И.д}$. Площадь фигуры $nkhjn$

$$s_{И.д} = \int_0^{0,5\tau_p} y_4 dx - \int_0^{0,5(\tau_p - a_B)} y_2 dx = \frac{\tau_p b_{И} + a_B b_0}{3}, \quad (64)$$

где уравнение параболы mnk имеет вид

$$y_4 = b_0 + b_{И} - \frac{4(b_0 + b_{И})}{\tau_p^2} x^2.$$

С учетом выражений (32), (63) и (64) будем иметь

$$\beta = \frac{l_{И.д}^2}{s_{И.д}} = \frac{3 \left[4(b_0 + b_{И}) \sqrt{16(b_0 + b_{И})^2 + (2\tau_p - a_B)^2} + \right.}{1024(\tau_p b_{И} + a_B b_0)(2b_0 + b_{И})^2} \rightarrow$$

$$\left. + (2\tau_p - a_B)^2 \ln \frac{4(b_0 + b_{И}) + \sqrt{16(b_0 + b_{И})^2 + (2\tau_p - a_B)^2}}{2\tau_p - a_B} \right]^2}{\rightarrow} \quad (65)$$

Как следует из выражений (56), (62) и (65), функция y_T зависит от пяти переменных: τ_p , b_0 , a_B , b_B , $b_{И}$. Переменную b_0 можно исключить из их числа, выразив ее через другие величины. Это справедливо для случая, когда размер b_0 выбирают не произвольно, а так, чтобы средние магнитные линии участков магнитной проводимости $G_{И.д}$ располагались по направлению главных напряжений вала σ_{\max} и σ_{\min} . Как следует из выражения (2), $\sigma = \sigma_{\max} = |\sigma_{\min}|$ при $\psi = 45^\circ$. Исходя из этого, тордуктор необходимо проектировать таким образом, чтобы

$$b_0 = 0,5(\tau_p - b_B - b_{И}). \quad (66)$$

Если условие (66) при проектировании тордуктора не выдержано, то чувствительность тордуктора будет иметь меньшее значение. Уменьшение чувствительности может быть учтено введением в выражение (55) множителя $\sin 2\psi$, где

$$\angle \psi = \arctg \frac{2b_0 + b_B + b_{И}}{\tau_p}.$$

Ввиду сложности выражений (56), (62) и (65) и большого числа переменных проанализировать функцию y_T в общем виде невозможно, поэтому анализ зависимости $y_T(\tau_p, a_B, b_B, b_{И})$ проводили для ряда значений каждого из переменных при фиксированных значениях остальных переменных. Для удобства исследований переменные τ_p , a_B , b_B , $b_{И}$ были представлены в относительных единицах, а расчеты выполнялись на ЭЦВМ [34].

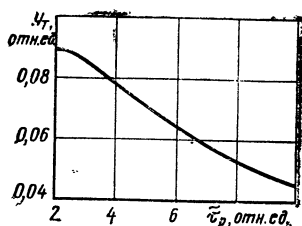


Рис. 21. Зависимость y_T от относительного значения полюсного деления тордуктора $\tilde{\tau}_p$ при $a_B = b_B = a_H = b_H = \text{const}$ ($\tilde{\tau}_p = \tau_p/a_B$)

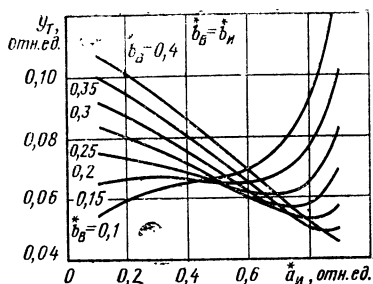


Рис. 22. Зависимость y_T от относительного значения размера полюса возбуждения тордуктора a_B при $b_B = b_H = \text{const}$ ($a_B = a_B/\tau_p$; $b_B = b_B/\tau_p$; $b_H = b_H/\tau_p$)

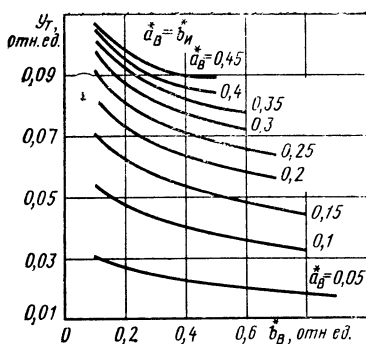


Рис. 23. Зависимость y_T от относительного значения размера полюса возбуждения тордуктора b_B при $a_B = b_H = \text{const}$

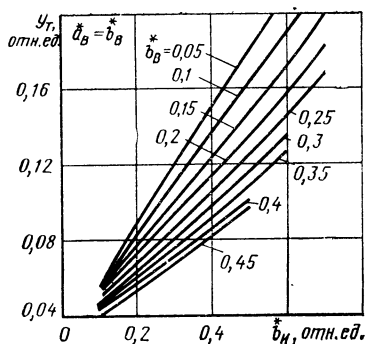


Рис. 24. Зависимость y_T от относительного значения размера измерительного полюса тордуктора b_H при $a_B = b_B = \text{const}$

На рис. 21 показана зависимость $y_T(\tilde{\tau}_p)$. Из графика следует, что величина y_T падает с ростом полюсного деления, поэтому целесообразно выбирать минимально возможные значения $\tilde{\tau}_p$.

На рис. 22 изображено семейство характеристик $y_T(a_B)$ при $b_B = b_H = \text{const}$. Ход кривых в пределах реально выполнимых ве-

личин \bar{a}_B (до $\bar{a}_B = 0,4$) свидетельствует о небольшом росте величины y_T с ростом \bar{a}_B (при $\bar{b}_B = \bar{b}_H = 0 \div 0,15$) или о некотором снижении величины y_T с ростом \bar{a}_B (при $\bar{b}_B = \bar{b}_H > 0,15$).

На рис. 23 показано семейство характеристик $y_T(\bar{b}_B)$ при $\bar{a}_B = \bar{b}_H = \text{const}$. Ход кривых указывает на небольшое снижение величины y_T с ростом \bar{b}_B .

На рис. 24 представлено семейство характеристик $y_T(\bar{b}_H)$ при $\bar{a}_B = \bar{b}_B = \text{const}$. Ход кривых указывает на существенное возрастание величины y_T с ростом \bar{b}_H , в связи с чем имеет смысл увеличивать размер \bar{b}_H измерительного полюса при проектировании тордуктора.

8. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИ МАГНИТОАНИЗОТРОПНОМ ВАЛЕ И НАЛИЧИИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ВАЛА

Положим, что материал вала магнитоанизотропен и имеется вращающийся эксцентриситет вала относительно расточки статора, т. е. $\mu_B \neq \text{const}$; $\mu_H \neq \text{const}$; $\delta_B \neq \text{const}$; $\delta_H \neq \text{const}$.

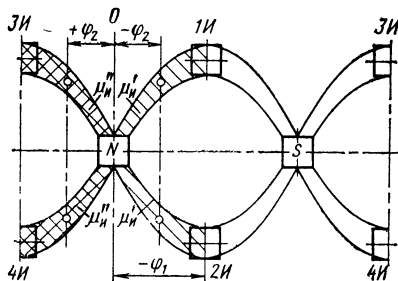


Рис. 25. Фазовые углы для участков магнитной проводимости вала и воздушных зазоров под полюсами тордуктора

Магнитная проницаемость материала вала по его окружности может изменяться произвольным образом, но это изменение при вращении вала носит периодический характер. Воздушные зазоры под полюсами по окружности вала в общем случае также могут изменяться произвольным образом из-за наличия эксцентриситета, овальности вала и расточки магнитопровода и других факторов.

Осевые размеры тордуктора значительно меньше длины развертки его расточки, поэтому можно допустить, что в осевом направлении магнитные свойства вала в зоне установки МДМ неизменны. Примем аналогичное допущение также в отношении воздушных зазоров под полюсами. Тогда мгновенная картина магнитного поля на поверхности вала будет иметь вид, как показано на рис. 25. Ось начала отсчетов фаз примем совпадающей с центром полюса возбуждения N .

В соответствии с выражениями (39) и (47) мгновенное значение ЭДС в полюсных катушках, расположенных на полюсах 1H и 2H (рис. 25),

$$e'_{и.и} = K_4 \omega | \pm v'_{Ti} | \sin \omega t,$$

а мгновенное значение ЭДС в полюсных катушках, расположенных на полюсах 3И и 4И,

$$e''_{и.и} = K_4 \omega | \pm v''_{Ti} | \sin \omega t,$$

где

$$v'_{Ti} = \frac{1}{\delta_{Bi} \delta_{иi} (2\alpha \mu'_{иi} + \beta \mu_{Bi})^2};$$

$$v''_{Ti} = \frac{1}{\delta_{Bi} \delta_{иi} (2\alpha \mu''_{иi} + \beta \mu_{Bi})^2}.$$

Действующее значение ЭДС измерительной обмотки с учетом числа полюсных катушек каждой измерительной обмотки, равного $2p_B$,

$$E_{и} = \frac{K_4 \omega}{\sqrt{2}} (\pm \gamma_T),$$

где

$$\gamma_T = \sum_{i=1}^{2p_B} [(\pm v'_{Ti}) + (\pm v''_{Ti})].$$

В соответствии с формулой (51) выпрямленное напряжение на сопротивлении нагрузки

$$U = S_{T1} M,$$

где чувствительность тордуктора

$$S_{T1} = \frac{5,63 \mu_0^2 K_{\mu} \omega_B w_{иB} s_{и} \alpha^2 \beta / I_{B} r_H}{h W_p \sqrt{r_H^2 + x_{и}^2}} |\gamma_T|.$$

Воздушные зазоры δ_{Bi} , $\delta_{иi}$ и магнитная проницаемость соответствующих участков поверхности вала μ_{Bi} , $\mu'_{иi}$, $\mu''_{иi}$, являясь периодическими функциями текущего угла поворота вала $\omega_B t$, могут быть представлены в общем виде с помощью тригонометрических рядов Фурье с учетом местоположения центров участков магнитной проводимости и центров воздушных зазоров по отношению к началу отсчета.

Кроме того, на вал действует изгибающий момент (см. п. 1), поэтому огибающая несущей частоты (частоты тока возбуждения) будет представлять собой сложную гармоническую кривую, содержащую постоянную составляющую (средневыпрямленное выходное напряжение), гармонику с частотой

$$f_1 = \frac{n}{60} \text{ Гц.}$$

и гармонику с частотой

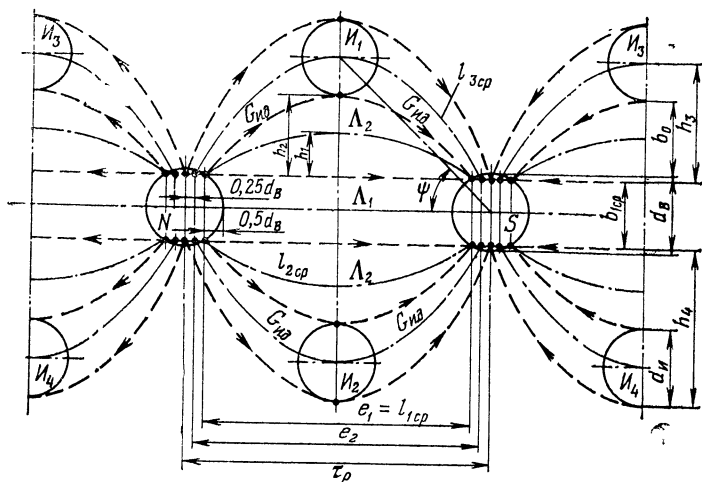


Рис. 26. Картина магнитного поля на поверхности вала для двухполюсного тордуктора с полюсами круглого сечения: N, S — проекции полюсов возбуждения; I_1, \dots, I_4 — проекции измерительных полюсов

$$f_2 = \frac{np_B}{30} \text{ Гц.}$$

Эти низкочастотные (по сравнению с частотой тока возбуждения) пульсации огибающей являются паразитными, и их необходимо устранять теми или иными способами

9. ТОРДУКТОР С ПОЛЮСАМИ КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Чтобы избежать сложностей, связанных с изготовлением штампов для просечки пластин электротехнической стали, идущих на изготовление магнитопроводов МДМ, их часто делают из сплошной низкоуглеродистой стали. Одна из таких конструкций показана на рис. 72, другие описаны в работах [34, 46]. В этих конструкциях полюсы удобно изготовлять круглого поперечного сечения, в связи с чем проекции полюсов на поверхность вала также будут иметь вид круга и формулы для расчета функции y_t , полученные для полюсов прямоугольного сечения, здесь нельзя применить.

На рис. 26 показана модель картины магнитного поля на поверхности вала для круглых полюсов, построенная аналогично тому, как это сделано в п. 7 для полюсов прямоугольного сечения.

Используя выражения (58) и (65) и определив средние длину и ширину каждого из участков проводимости (см. п. 7), получим

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1,74d_B}{e_1} + \frac{128h_2^3e_1}{3 \left(2h_2 \sqrt{4h_2^2 + e_1^2} + e_1^2 \ln \frac{2h_2 + \sqrt{4h_2^2 + e_1^2}}{e_1} \right)^2}}; \quad (67)$$

$$\beta = \frac{3 \left[4h_3 \sqrt{16h_3^2 + e_2^2} + e_2^2 \ln \frac{4h_3 + \sqrt{16h_3^2 + e_2^2}}{e_2} \right]^2}{256h_3^2 (h_4\tau_p - h_2e_1)}. \quad (68)$$

В формулах (67) и (68):

$$h_2 = b_0 + 0,065d_B;$$

$$h_3 = b_0 + 0,065d_B + 0,5d_{II};$$

$$h_4 = b_0 + 0,065d_B + d_{II};$$

$$e_1 = 0,5 (2\tau_p - d_B); \quad (69)$$

$$e_2 = 0,25 (4\tau_p - d_B); \quad (70)$$

d_B , d_{II} — соответственно диаметр проекции на валу торца полюсов возбуждения и измерительного.

Функция y_T для данного случая также определяется по выражению (56). Как было оговорено в п. 7, тордуктор следует проектировать так, чтобы $\psi = 45^\circ$ (рис. 26). Это соответствует условию

$$b_0 = 0,5 (\tau_p - d_B - d_{II}). \quad (71)$$

С учетом условия (71) y_T будет зависеть от трех переменных: τ_p , d_B и d_{II} . Анализ зависимости $y_T(\tau_p, d_B, d_{II})$ проводили для ряда значений каждого из переменных при фиксированных значениях остальных переменных с помощью ЭЦВМ.

На рис. 27, 28, 29 показаны зависимости $y_T(\tilde{\tau}_p)$, $y_T(\tilde{d}_B)$ и $y_T(\tilde{d}_{II})$. Сравнение их с полученными ранее характеристиками для тордуктора с полюсами прямоугольного поперечного сечения показывает, что характер их изменения близок к характеру изменения зависимостей $y_T(\tilde{\tau}_p)$, $y_T(\tilde{b}_B)$ и $y_T(\tilde{b}_{II})$ соответственно.

10. ТОРДУКТОР С П-ОБРАЗНЫМИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ МАГНИТОПРОВОДАМИ

На рис. 30 показана схема магнитопроводов с магнитными потоками, а на рис. 31 — электрическая схема замещения магнитной цепи тордуктора с одной парой полюсов возбуждения. Переменный магнитный поток Φ_{B0} проходит в вал от северного полюса возбуждения к южному, и картина магнитного поля в поверхностном слое вала будет идентична изображенной на рис. 19, 20.

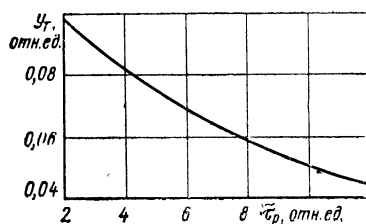


Рис. 27. Зависимость y_T от относительного значения полюсного деления τ_p тордуктора с полюсами круглого поперечного сечения при $d_B = d_H = \text{const}$

$$(\tau_p = \tau_p / d_B)$$

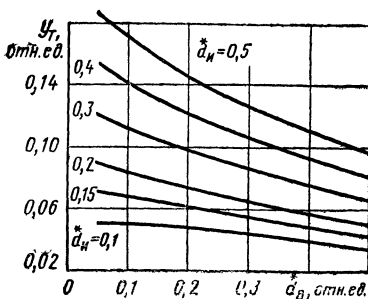


Рис. 28. Зависимость y_T от относительного значения диаметра d_B^* полюса возбуждения тордуктора с полюсами круглого поперечного сечения при $d_H = \text{const}$ ($d_B = d_B / \tau_p$; $d_H^* = d_H / \tau_p$)

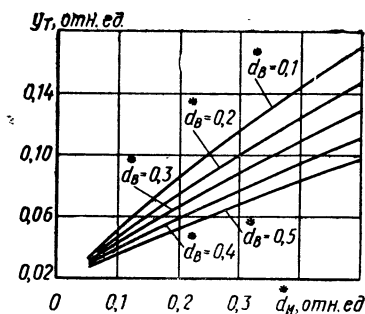


Рис. 29. Зависимость y_T от относительного значения диаметра d_H^* измерительного полюса тордуктора с полюсами круглого поперечного сечения при $d_B^* = \text{const}$

При отсутствии крутящего момента вала участки магнитных сопротивлений $R_{И.д}$ плечей магнитного моста (рис. 31) равны между собой, магнитные потенциалы участков вала под парами измерительных полюсов I_1-I_2 и I_3-I_4 равны между собой и поэтому магнитные потоки в измерительных магнитопроводах 3 (рис. 30) равны нулю. При появлении крутящего момента вала магнитные сопротивления $R_{И.д}$ меняют свою величину (см. п. 5), что приводит к изменению магнитных потенциалов вала под измерительными полюсами, и в измерительных магнитопроводах появляются магнитные потоки $\Phi_{И.п}$. В катушках измерительных обмоток, намотанных на измерительных магнитопроводах, при этом будут индуцироваться ЭДС, пропорциональные крутящему моменту вала. Измерительные катушки соединяются последовательно, образуя измерительную обмотку.

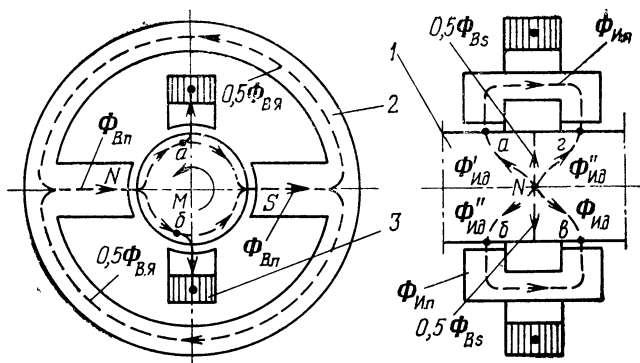


Рис. 30. Магнитные потоки в магнитопроводах двухполюсного тордуктора с П-образными измерительными магнитопроводами при $M \neq 0$ (магнитные потоки рассеяния не показаны):

1 — вал; 2 — магнитопровод возбуждения; 3 — измерительный магнитопровод

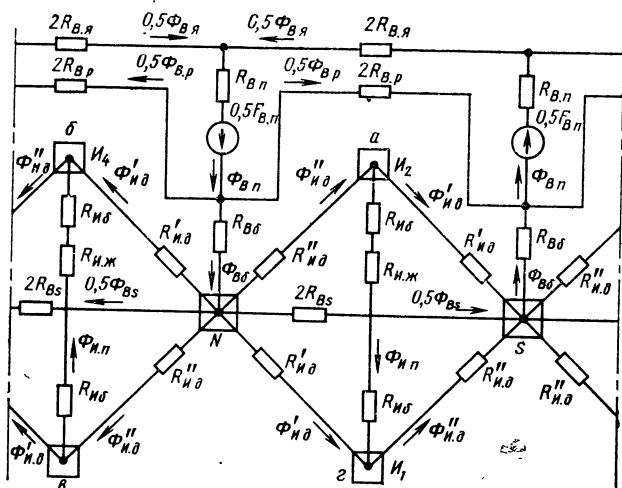


Рис. 31. Схема замещения магнитной цепи двухполюсного тордуктора с П-образными измерительными полюсами (магнитные потоки рассеяния $\Phi_{в.р}$ показаны упрощенно)

Для этого типа тордуктора справедливы все соотношения, выведенные в пп. 5—9, он имеет те же недостатки. По сравнению с описанной ранее конструкцией тордуктор с П-образными полюсами имеет более сложное устройство.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ДИФДУКТОРА

11. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

На рис. 32 показана схема магнитопровода с магнитными потоками, а на рис. 33 — электрическая схема магнитной цепи дифдуктора с одной парой полюсов возбуждения. Переменный магнитный поток $\Phi_{в\pi}$, возникающий под действием МДС полюсов возбуждения $F_{в\pi}$, через воздушные зазоры проходит в вал от северного полюса возбуждения к южному, при этом картину магнитного поля в поверхностном слое вала можно представить в виде, показанном на рис. 34.

При отсутствии крутящего момента на валу магнитные сопротивления участков вала $R_{и.д}$ равны между собой, и магнитные потоки во всех измерительных полюсах $\Phi_{и\pi}$ также равны между собой. При появлении крутящего момента

$$R'_{и.д} > R''_{и.д},$$

что приводит к перераспределению магнитных потенциалов в магнитном сопротивлении вала и к изменению магнитных потенциалов

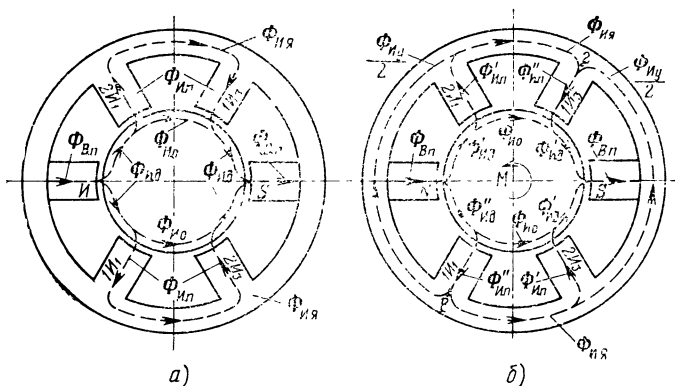


Рис. 32. Магнитные потоки в магнитопроводах двухполюсного дифдуктора (магнитные потоки рассеяния не показаны):

а — магнитные потоки при $M=0$; б — то же, при $M \neq 0$

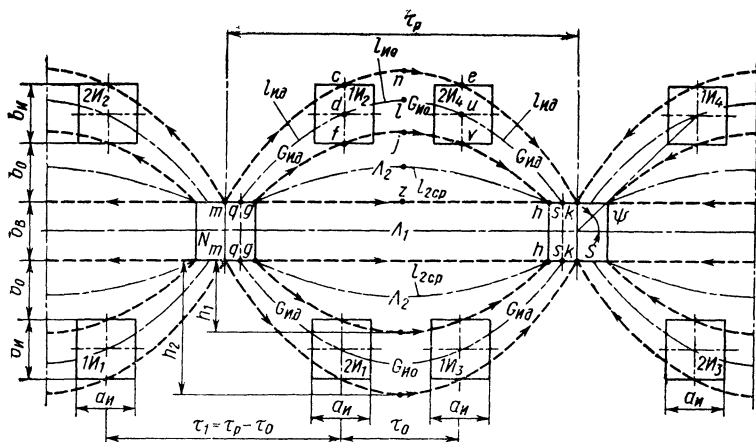


Рис. 34. Картина магнитного поля на поверхности вала для двухполюсного дифдуктора с полюсами прямоугольного сечения: N, S — проекции полюсов возбуждения; $1H_1, \dots, 1H_4, 2H_1, \dots, 2H_4$ — проекции измерительных полюсов

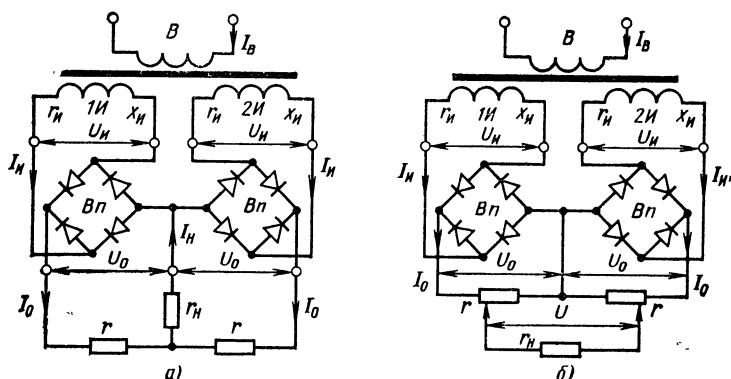


Рис. 35. Принципиальная электрическая схема дифдуктора с дифференциальной измерительной схемой:

а — схема типа «А»; б — схема типа «Б»; B — обмотка возбуждения; $1H, 2H$ — измерительные обмотки; Bn — выпрямительный мост

некоторая доля потока полюса возбуждения $\Phi_{B.п}$. Поэтому мгновенное значение переменного магнитного потока

$$\Phi_{B\delta} = \frac{f_{B.п}}{2R_{B\delta} + R_{B.ж} + \frac{R_{B.в}R_{И.э}}{R_{B.в} + R_{И.э}}} \quad (72)$$

В соответствии со схемой замещения

$$R_{И.э} = \frac{1}{4} \left[2R_{И.д} + \frac{R_{И0} (2R_{Из} + R_{И.ж})}{2R_{И.д} + R_{И.ж} + R_{И0}} \right], \quad (73)$$

где $R_{И0}$ — магнитное сопротивление вала на участке между проекциями измерительных полюсов. Все остальные обозначения в выражениях (72) и (73) приняты такими же, как и для тордуктора [см. формулы (15)–(18), (25)].

Полагая, что

$$2R_{Ид} + R_{И.ж} \gg R_{И0},$$

можно значением $R_{И0}$ в выражении (73) пренебречь как величиной более высокого порядка малости по сравнению с $2R_{Ид} + R_{И.ж}$. Тогда уравнение (73) примет вид

$$R_{И.э} = \frac{2R_{И.д} + R_{И0}}{4}. \quad (74)$$

Используя выражения (20) и (21), получим

$$\begin{aligned} \Phi_{И.д} &= \frac{\Phi_{Вд} R_{В.в}}{4(R_{В.в} + R_{И.э})} = \\ &= \frac{f_{В.п} R_{В.в}}{4(R_{В.в} + R_{И.э}) \left(2R_{Вд} + R_{В.ж} + \frac{R_{В.в} R_{И.э}}{R_{В.в} + R_{И.э}} \right)}. \end{aligned} \quad (75)$$

На основании схемы замещения при крутящем моменте $M=0$

$$\Phi_{И.д} = \Phi_{И.п} + \Phi_{И0},$$

где $\Phi_{И.п}$, $\Phi_{И0}$ — мгновенные значения переменного магнитного потока в измерительном полюсе и в сопротивлении $R_{И0}$ соответственно.

Магнитные потоки в параллельных магнитных сопротивлениях обратно пропорциональны величинам этих сопротивлений; следовательно,

$$\frac{\Phi_{И.п}}{\Phi_{И0}} = \frac{R_{И0}}{2R_{Ид} + R_{И.ж}}. \quad (76)$$

Используя выражения (74)–(76), получим

$$\begin{aligned} \Phi_{И.п} &= \frac{f_{В.п} R_{В.в} R_{И0}}{(2R_{Ид} + R_{И.ж}) [4R_{В.в} (2R_{Вд} + R_{В.ж}) + (2R_{Ид} + R_{И0}) \times \\ &\rightarrow \times (2R_{Вд} + R_{В.ж} + R_{В.в})]}. \end{aligned} \quad (77)$$

Считая, что сопротивление $R_{В.в}$ является величиной более высокого порядка малости по сравнению с величиной $2R_{Вд} + R_{В.ж}$, можно принять

$$2R_{B\delta} + R_{B.ж} + R_{B.в} \approx 2R_{B\delta} + R_{B.ж}. \quad (78)$$

Магнитная цепь дифдуктора обычно не насыщена и основное магнитное сопротивление сосредоточено в воздушных зазорах. Учитывая это, можно считать, что

$$2R_{B\delta} + R_{B.ж} \approx 2R_{B\delta}; \quad (79)$$

$$2R_{И\delta} + R_{И.ж} \approx 2R_{И\delta}. \quad (80)$$

С учетом допущений (78)—(80) и формулы (18) выражение (77) для мгновенного значения магнитного потока измерительного полюса можно записать в следующем виде:

$$\Phi_{и.п} = \frac{\omega_B i_B R_{B.в} R_{И0}}{2R_{B\delta} R_{И\delta} (4R_{B.в} + 2R_{И.д} + R_{И0})}. \quad (81)$$

12. ЭДС ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ОБМОТКИ

Магнитные сопротивления зазоров под полюсами дифдуктора $R_{B\delta}$, $R_{И\delta}$ и магнитное сопротивление вала $R_{B.в}$ определяют для дифдуктора так же, как и для тордуктора, соответственно по формулам (28) и (29).

Приняв те же допущения, что и для тордуктора (см. п. 6), определим магнитное сопротивление

$$R_{И.д} = \frac{\beta}{\mu_{И.д} h}, \quad (82)$$

где $\mu_{И.д}$ — абсолютная магнитная проницаемость материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{И.д} = 1/G_{И.д}$ (см. рис. 34); β определяют по формуле (32).

Магнитное сопротивление

$$R_{И0} = \frac{\gamma}{\mu_{И0} h}, \quad (83)$$

где $\mu_{И0}$ — абсолютная магнитная проницаемость материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{И0} = 1/G_{И0}$ (см. рис. 34);

$$\gamma = \frac{l_{И0}}{b_{И0}};$$

здесь $l_{И0}$, $b_{И0}$ — соответственно средняя длина и ширина участка магнитной проводимости $G_{И0}$.

С учетом формул (28)—(30), (82), (83) уравнение (81) преобразуем к виду

$$\Phi_{и.п} = \frac{\mu_0^2 \omega_B i_B s_B s_{И} \alpha \gamma \mu_{И.э}}{2h \delta_B \delta_{И} \xi}, \quad (84)$$

где $s_B = a_B b_B$, $s_{И} = a_{И} b_{И}$ — площади проекций на валу торцов полюсов возбуждения и измерительного;

$$\xi = 4\alpha\mu_{\text{и.д}}\mu_{\text{и0}} + 2\beta\mu_{\text{в.в}}\mu_{\text{и0}} + \gamma\mu_{\text{в.в}}\mu_{\text{и.д}}. \quad (85)$$

Мгновенное значение ЭДС в полюсной катушке измерительной обмотки определяется в соответствии с выражением (38). Как уже отмечалось в п. 6, переменными величинами в функции времени являются $i_{\text{в}}$, $\mu_{\text{в.в}}$, $\mu_{\text{и.д}}$, $\mu_{\text{и0}}$, $\delta_{\text{в}}$, $\delta_{\text{и}}$. Остальные величины в формуле (84) являются постоянными. Мгновенное значение ЭДС в полюсной катушке, как и в случае тордуктора, может быть получено в следующем виде:

$$e_{\text{и.п}} = K_5 \left| \pm \frac{\mu_{\text{и.д}}}{\delta_{\text{в}}\delta_{\text{и}}\xi} \right| \sin \omega t, \quad (86)$$

где

$$K_5 = \frac{\sqrt{2} \pi \mu_0^2 \omega_{\text{в}} \omega_{\text{и}} s_{\text{в}} s_{\text{и}} \alpha \gamma f I_{\text{в}}}{h}. \quad (87)$$

13. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИ МАГНИТОИЗОТРОПНОМ ВАЛЕ И ОТСУТСТВИИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ВАЛА

Положим, что материал вала в магнитном отношении изотропен, а вращающийся эксцентриситет вала относительно расточки магнитопровода дифдуктора отсутствует, т. е.

$$\mu_{\text{в.в}} = \mu_{\text{и.д}} = \mu_{\text{и0}} = \text{const}; \quad (88)$$

$$\delta_{\text{в}} = \delta_{\text{и}} = \delta = \text{const}. \quad (89)$$

Условия, при которых возможны эти допущения, подробно рассмотрены в п. 7.

Обозначим число полюсов возбуждения $2p_{\text{в}}$; на один полюс возбуждения у каждой измерительной обмотки приходится две ее полюсные катушки, включаемые последовательно. С учетом выражений (86)–(89) действующее значение ЭДС каждой из двух измерительных обмоток

$$E_{\text{и}} = K_6 \pm \frac{\mu_{\text{и.д}}}{\xi}, \quad (90)$$

где

$$K_6 = \frac{4\pi \mu_0^2 \omega_{\text{в}} \omega_{\text{и}} p_{\text{в}} s_{\text{в}} s_{\text{и}} \alpha \gamma f I_{\text{в}}}{h \delta^2}. \quad (91)$$

Выпрямленное напряжение на сопротивлении r с учетом выпрямления мостовой схемой (см. рис. 35) в соответствии с векторной диаграммой (см. рис. 18) и выражениями (50), (85), (90) и (91)

$$U_0 = \frac{K_7 \mu_{\text{и.д}}}{(4\alpha\mu_{\text{и0}} + \gamma\mu_{\text{в.в}}) \mu_{\text{и.д}} + 2\beta\mu_{\text{в.в}} \mu_{\text{и0}}}, \quad (92)$$

где

$$K_7 = \frac{K_6 2 \sqrt{2} r}{\pi \sqrt{r^2 + x_{II}^2}}. \quad (93)$$

Выходы обеих измерительных обмоток включены между собой последовательно встречно (см. рис. 35), поэтому при отсутствии крутящего момента на валу напряжения обеих измерительных обмоток равны между собой, т. е.

$$U'_0 = U''_0 = U_0.$$

Выходное напряжение зависит от величины сопротивлений $R_{И.д}$ (проводимостей $G_{И.д}$). Изменение $R_{И.д}$ связано с изменением магнитной проницаемости $\mu_{И.д}$ соответственно на величины $+\Delta\mu_{И.д}$ и $-\Delta\mu_{И.д}$ при появлении крутящего момента. Считая, что сопротивление нагрузки $r_H = \infty$, на основании выражения (92) будем иметь

$$U'_0 = \frac{K_7 (\mu_{И.д} + \Delta\mu_{И.д})}{(4\alpha\mu_{И0} + \gamma\mu_{В.В})(\mu_{И.д} + \Delta\mu_{И.д}) + 2\beta\mu_{В.В}\mu_{И0}}; \quad (94)$$

$$U''_0 = \frac{K_7 (\mu_{И.д} - \Delta\mu_{И.д})}{(4\alpha\mu_{И0} + \gamma\mu_{В.В})(\mu_{И.д} - \Delta\mu_{И.д}) + 2\beta\mu_{В.В}\mu_{И0}}. \quad (95)$$

Выходное напряжение

$$\begin{aligned} \Delta U = U'_0 - U''_0 &= \frac{K_7 4\beta\mu_{В.В}\mu_{И0}\Delta\mu_{И.д}}{(4\alpha\mu_{И.д}\mu_{И0} + 2\beta\mu_{В.В}\mu_{И0} + \gamma\mu_{В.В}\mu_{И.д})^2 -} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{-(4\alpha\mu_{И0} + \gamma\mu_{В.В})^2 (\Delta\mu_{И.д})^2}{(4\alpha\mu_{И.д}\mu_{И0} + 2\beta\mu_{В.В}\mu_{И0} + \gamma\mu_{В.В}\mu_{И.д})^2}. \end{aligned} \quad (96)$$

Второе слагаемое в знаменателе уравнения (96) значительно меньше первого, и его значением можно пренебречь как величиной второго порядка малости. С учетом этого

$$\Delta U = \frac{K_7 4\beta\mu_{В.В}\mu_{И0}\Delta\mu_{И.д}}{(4\alpha\mu_{И.д}\mu_{И0} + 2\beta\mu_{В.В}\mu_{И0} + \gamma\mu_{В.В}\mu_{И.д})^2}. \quad (97)$$

Поскольку вал считается магнитоизотропным, то полагаем теперь

$$\mu_{В.В} = \mu_{И.д} = \mu_{И0} = \mu. \quad (98)$$

Выходное напряжение дифдуктора при $r_H \neq \infty$ и с учетом уравнений (1), (35), (91), (93), (97) и условия (98)

$$U = \frac{r_H}{r + r_H} \Delta U = S_D M, \quad (99)$$

где чувствительность дифдуктора

$$S_D = \frac{45\mu_0^2 K_\mu \omega_B \omega_{И0} \rho_{В.В} s_{И0} y_D f I_{В.В} r r_H}{\mu^2 h \delta^2 W_p (r + r_H) \sqrt{r^2 + x_{II}^2}}; \quad (100)$$

здесь

$$y_D = \frac{\alpha\beta\gamma}{(4\alpha + 2\beta + \gamma)^2}. \quad (101)$$

Из уравнения (99) следует, что при неизменной чувствительности S_D выходное напряжение прямо пропорционально моменту (см. также рис. 36). Экспериментально снятые характеристики $U(M)$ у различных типов дифдукторов подтверждают это (см. п. 21, а также работы [21, 23]).

Из сравнения выражений чувствительности тордуктора (55) и дифдуктора (100) следует, что при прочих равных условиях чувствительность последнего вдвое выше. Зависимость чувствительности дифдуктора от остальных параметров (за исключением функции y_D) такая же, как и у тордуктора (см. п. 6).

Рассмотрим зависимость функции y_D от величин α , β и γ , характеризующих размеры полюсов дифдуктора и расстояния между ними. Как и в случае тордуктора, участки магнитных сопротивлений вала можно представить в виде простых геометрических фигур, средняя длина и ширина которых могут быть выражены аналитически.

Для описания магнитного сопротивления $R_{в.в.}$, величины α и длины средней магнитной линии участка проводимости Λ_1 (см. рис. 34) применим формулы (57)–(59). Будем считать, что участки магнитной проводимости Λ_2 , $G_{И.д}$ и $G_{Ю}$ ограничены квадратичными параболой. Средние линии магнитных трубок этих участков также представим в виде парабол.

С учетом этого

$$\alpha = \frac{1}{\frac{4b_B}{2\tau_p - a_B} + \frac{4s_2}{l_{2cp}^2}} = \frac{1}{4 \left\{ \frac{b_B}{2\tau_p - a_B} + \frac{32h_1^3(\tau_p - a_B)}{3 \left[2h_1 \sqrt{4h_1^2 + (\tau_p - a_B)^2} + (\tau_p - a_B)^2 \times \ln \frac{2h_1 + \sqrt{4h_1^2 + (\tau_p - a_B)^2}}{\tau_p - a_B} \right]^2 \right\}}; \quad (102)$$

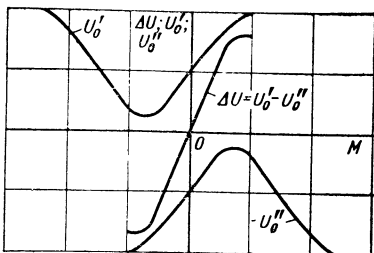


Рис. 36. Выходная характеристика дифдуктора $\Delta U(M)$

$$\beta = \frac{l_{И.д}^2}{s_{И.д}} =$$

$$= \frac{3\tau_p^2 (\tau_p - a_B)^2 \left\{ 8h_3 [q_1 (2\tau_p - a_B)^2 - 2q_2\tau_0] + \right.}{2048 [h_2q_3 (\tau_p - a_B)^2 - h_1q_4\tau_p^2]h_3^2 (2\tau_p - a_B)^4} \rightarrow$$

$$\left. + (\tau_p - a_B)^4 \ln \frac{(8h_3 + q_1)(2\tau_p - a_B)}{16h_3\tau_0 + q_2} \right\}^2 \rightarrow \quad (103)$$

$$\gamma = \frac{l_{И0}^2}{s_{И0}} =$$

$$= \frac{3\tau_p^2 (\tau_p - a_B)^2 \left[16h_3q_2\tau_0 + (2\tau_p - a_B)^4 \ln \frac{16h_3\tau_0 + q_2}{(2\tau_p - a_B)^2} \right]^2}{1024 (h_2q_5 - h_1q_6) h_3^2 (2\tau_p - a_B)^4} \quad (104)$$

В выражениях (102)–(104)

$$h_1 = \frac{2b_0 (\tau_p - a_B)^2}{2 (\tau_p - a_B)^2 - \tau_0^2};$$

$$h_2 = \frac{(b_0 + b_{И})\tau_p^2}{\tau_p^2 - \tau_0^2};$$

$$h_3 = 0,5 (h_1 + h_2);$$

$$q_1 = \sqrt{64h_3^2 + (2\tau_p - a_B)^2};$$

$$q_2 = \sqrt{256h_3^2\tau_0^2 + (2\tau_p - a_B)^4};$$

$$q_3 = 2\tau_p^3 - 3\tau_p^2\tau_0 + \tau_0^3;$$

$$q_4 = 2(\tau_p - a_B)^3 - 3(\tau_p - a_B)^2\tau_0 + \tau_0^3;$$

$$q_5 = \tau_0 (3\tau_p^2 - \tau_0^2)(\tau_p - a_B)^2;$$

$$q_6 = \tau_p^2\tau_0 [3(\tau_p^2 - a_B)^2 - \tau_0^2];$$

τ_0 — задний полюсный шаг.

Как следует из выражений (101)–(104), u_d является функцией шести переменных: τ_p , τ_0 , a_B , b_B , $b_{И}$, b_0 . Переменную b_0 , как и в случае тордуктора, можно исключить из числа, если b_0 выбирается из соображений расположения средней магнитной линии участка магнитной проводимости $G_{И.д}$ по направлению главных напряжений в валу σ_{\max} и σ_{\min} . Это соответствует случаю, когда угол $\psi = 45^\circ$ (см. рис. 34), откуда

$$b_0 = 0,5 (\tau_p - \tau_0 - b_B - b_H). \quad (105)$$

Если условие (105) при проектировании дифдуктора не выдержано, то чувствительность его будет иметь меньшее значение.

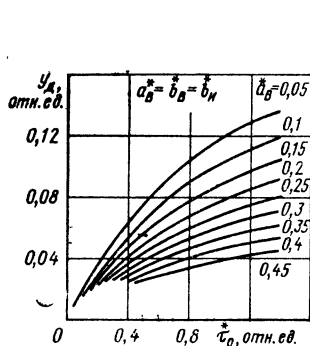


Рис. 37. Зависимость y_D от относительного значения заднего полюсного шага дифдуктора τ_0 при $\tau_1 = \text{const}$, $a_B^* = b_B^* = b_H^* = \text{const}$, $a_B^* = b_B^* = b_H^* = \text{const}$ ($\tau_0 = \tau_0/\tau_1$; $\tau_1 = \tau_1/\tau_1 = 1$; $a_B^* = a_B/\tau_1$; $b_B^* = b_B/\tau_1$; $b_H^* = b_H/\tau_1$)

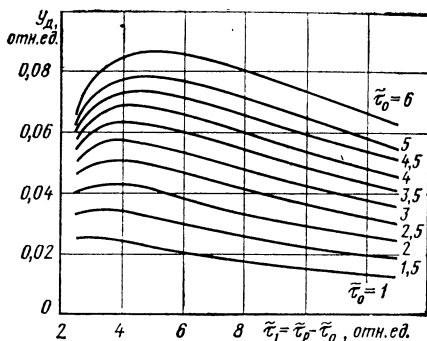


Рис. 38. Зависимость y_D от относительного значения переднего полюсного шага дифдуктора τ_1 при $\tau_0 = \text{const}$, $a_B = b_B = b_H = \text{const}$ ($\tau_1 = \tau_1/a_B$; $\tau_0 = \tau_0/a_B$; $a_B = a_B/a_B = 1$; $b_B = b_B/a_B = 1$; $b_H = b_H/a_B = 1$)

Уменьшение чувствительности можно учесть введением в выражение (100) множителя $\sin 2\psi$, где

$$\angle \psi = \arctg \frac{2b_0 + b_B + b_H}{\tau_p - \tau_0}. \quad (106)$$

Анализ зависимости $y_D(\tau_p, \tau_0, a_B, b_B, b_H)$ проведен для ряда значений каждой из переменных при фиксированных значениях остальных переменных. Величины $\tau_p, \tau_0, a_B, b_B, b_H$ выражены в относительных единицах, расчеты выполнялись на ЭЦВМ [34].

На рис. 37 показано семейство зависимостей $y_D(\tau_0)$, откуда следует, что y_D возрастает с ростом τ_0 , причем этот рост проявляется тем заметнее, чем меньше размеры проекций полюсов возбуждения и измерительных. Это означает, что y_D увеличивается с ростом магнитного сопротивления $R_{и0}$ прямо пропорционального расстоянию τ_0 и обратно пропорционального средней ширине трубки магнитного потока, зависящей от размеров проекций полюсов.

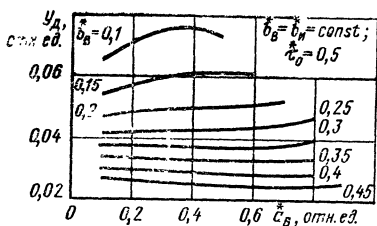


Рис. 39. Зависимость y_D от относительного значения размера проекции торца полюса возбуждения дифдуктора a_B^* при $\tau_0 = 0,5 = \text{const}$; $b_B^* = b_{II}^* = \text{const}$ ($a_B^* = a_B/\tau_1$; $b_B^* = b_B/\tau_1$; $b_{II}^* = b_{II}/\tau_1$; $\tau_0 = \tau_0/\tau_1$)

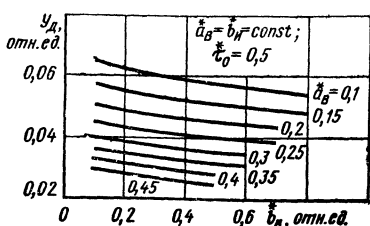


Рис. 40. Зависимость y_D от относительного значения размера проекции торца полюса возбуждения дифдуктора b_B^* при $\tau_0 = 0,5 = \text{const}$; $a_B^* = a_{II}^* = \text{const}$ ($b_B^* = b_B/\tau_1$; $\tau_0 = \tau_0/\tau_1$; $a_B^* = a_B/\tau_1$; $a_{II}^* = a_{II}/\tau_1$)

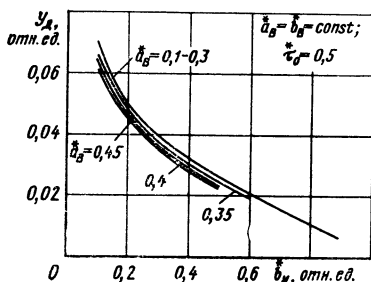


Рис. 41. Зависимость y_D от относительного значения размера торца измерительного полюса дифдуктора b_{II}^* при $\tau_0 = 0,5 = \text{const}$; $a_B^* = b_B^* = \text{const}$ ($b_{II}^* = b_{II}/\tau_1$; $\tau_0 = \tau_0/\tau_1$; $a_B^* = a_B/\tau_1$; $b_B^* = b_B/\tau_1$)

С физической точки зрения это объясняется увеличением магнитного потока $\Phi_{II,п.}$, проходящего из вала в измерительные полюсы, за счет уменьшения потока Φ_{II0} (см. рис. 32, 33). Такие рассуждения справедливы для случая $R_{II0} \gg R_{II,ж.}$, что всегда можно достигнуть выбором достаточно большого поперечного сечения полюсов и ярма измерительных магнитопроводов.

Из семейства характеристик $y_D(\tilde{\tau}_1)$ при $\tilde{\tau}_0 = \text{const}$ (рис. 38) следует, что функция y_D сначала возрастает с ростом $\tilde{\tau}_1$, достигая максимума, а затем уменьшается. Для каждого большего значения $\tilde{\tau}_0$ график $y_D(\tilde{\tau}_1)$ лежит выше предыдущего, а максимум функции сдвигается в сторону больших значений $\tilde{\tau}_1$.

На рис. 39 показано семейство характеристик $y_D(a_B^*)$, на рис.

40 — семейство характеристик $y_D(\vec{b}_B)$, а на рис. 41 — семейство характеристик $y_D(\vec{b}_И)$ при $\tau_0 = 0,5$. Из приведенных графиков следует, что y_D мало зависит от размеров торцов полюсов возбуждения a_B и b_B и сильно зависит от размера торцов измерительных полюсов $b_И$, возрастая с его уменьшением. Ввиду этого, при проектировании дифдуктора следует брать размер $b_И$ измерительного полюса возможно меньшим. Из этих графиков следует также, что y_D возрастает с ростом τ_0 , что хорошо согласуется с данными зависимостей $y_D(\tau_0)$ (см. рис. 37).

14. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИ МАГНИТОАНИЗОТРОПНОМ ВАЛЕ И НАЛИЧИИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ВАЛА

Положим, что материал вала магнитоанизотропен и имеется вращающийся эксцентриситет вала относительно расточки статора. В этом случае

$$\begin{aligned} \mu_{B.B} &\neq \text{const}; \mu_{И.Д} \neq \text{const}; \\ \mu_{И0} &\neq \text{const}; \delta_B \neq \text{const}; \delta_И \neq \text{const}. \end{aligned}$$

Так же как и для тордуктора, магнитная проницаемость материала вала в функции его окружности изменяется произвольно, имея пространственно периодический характер. Воздушные зазоры по окружности вала также произвольно меняются из-за наличия вращающегося эксцентриситета, овальности вала, расточки магнитопровода датчика и т. п.

Допустим, что в осевом направлении в зоне установки дифдуктора магнитная проницаемость и воздушные зазоры неизменны. Тогда мгновенная картина магнитного поля на поверхности вала

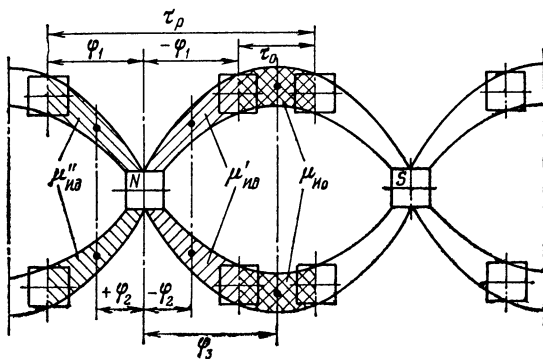


Рис. 42. Фазовые сдвиги для участков магнитной проводимости вала и воздушных зазоров под полюсами дифдуктора

будет иметь вид, показанный на рис. 42; ось начала отсчетов фаз примем совпадающей с центром полюса возбуждения N .

С учетом фазового сдвига, возникающего при вращении вала, выпрямленное напряжение каждой измерительной обмотки при $M=0$

$$U_0 = \frac{2K_B r}{\pi \sqrt{r^2 + x_{II}^2}} \sum_{i=1}^{2p_B} \left[\frac{\mu'_{II, di}}{\delta_{Vi} \delta'_{IIi} (c_i \mu'_{II, di} + d_i)} + \frac{\mu''_{II, di}}{\delta_{Vi} \delta''_{IIi} (c_i \mu''_{II, di} + d_i)} \right],$$

где

$$c_i = 4\alpha \mu_{II0i} + \gamma \mu_{B, Vi};$$

$$d_i = 2\beta \mu_{B, Vi} \mu_{II0i};$$

K_B определяют по выражению (87).

При появлении на валу крутящего момента напряжения обеих измерительных обмоток изменяются за счет изменения магнитной проницаемости участков вала $G_{II, d}$ на величины $+\Delta\mu_{II, d}$ и $-\Delta\mu_{II, d}$, в связи с чем на выходе дифдуктора появится напряжение. Опуская промежуточные выкладки, можно записать

$$U = S_{d1} M,$$

где чувствительность дифдуктора

$$S_{d1} = \frac{11,25 \mu_0^2 K_\mu \omega_B \omega_{II} s_B s_{II} \alpha \beta \gamma f I_B r r_H}{h W_p (r + r_H) \sqrt{r^2 + x_{II}^2}} |\gamma_d|;$$

$$\gamma_d = \sum_{i=1}^{2p_B} (v'_{di} + v''_{di});$$

$$v'_{di} = \pm \frac{\mu_{B, Vi} \mu_{II0i}}{\delta_{Vi} \delta'_{IIi} (4\alpha \mu'_{II, di} \mu_{II0i} + 2\beta \mu_{B, Vi} \mu_{II0i} + \gamma \mu_{B, Vi} \mu'_{II, di})^2};$$

$$v''_{di} = \pm \frac{\mu_{B, Vi} \mu_{II0i}}{\delta_{Vi} \delta''_{IIi} (4\alpha \mu''_{II, di} \mu_{II0i} + 2\beta \mu_{B, Vi} \mu_{II0i} + \gamma \mu_{B, Vi} \mu''_{II, di})^2}.$$

Значения воздушных зазоров δ_{Vi} , δ'_{IIi} , δ''_{IIi} и магнитная проницаемость соответствующих участков поверхности вала $\mu_{B, Vi}$, $\mu'_{II, di}$, $\mu''_{II, di}$, μ_{II0i} являются периодическими функциями текущего угла поворота вала $\omega_B t$ и поэтому огибающая несущей частоты дифдуктора будет содержать такие же гармоники, как и огибающая тордуктора.

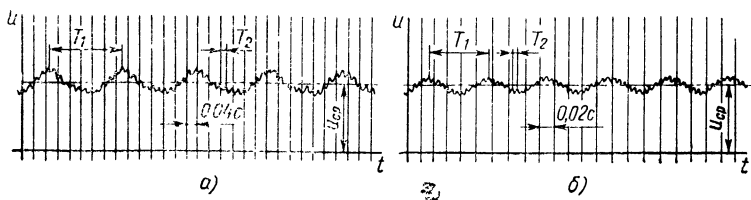


Рис. 43. Осциллограммы выходного напряжения дифдуктора ИПМ-220, размещенного на шпинделе станка 1Б732Ф3:

а — частота вращения шпинделя 237 об/мин; б — 755 об/мин

На рис. 43 показаны осциллограммы выходного напряжения двенадцатипольного дифдуктора ИПМ-220, установленного на шпинделе станка 1Б732Ф3. Осциллограммы сняты при скоростях вращения $n=237$ об/мин, что соответствует частоте вращения $f_1=4$ Гц (период вращения $T_1=0,25$ с), и $n=755$ об/мин, что соответствует частоте $f_1=12,6$ Гц ($T_1=0,08$ с). Из осциллограмм следует, что огибающая содержит постоянную составляющую (средневыпрямленное выходное напряжение U_{cp}) и те же гармоники, что и у тордуктора (см. п. 8).

15. ДИФДУКТОР С ПОЛЮСАМИ КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Дифдуктор, подобно тордуктору, можно изготавливать из сплошной низкоуглеродистой стали с полюсами круглого сечения. На рис. 44 показана модель картины магнитного поля на поверхности вала для дифдуктора с круглыми полюсами. Используя выражения (102)—(104) и определив средние длину и ширину каждого из участков проводимости подобно тому, как это сделано в п. 13, получим

$$\alpha = \frac{1}{1,74d_B + \frac{128h_2^3e_1}{e_1 + 3 \left(2h_2 \sqrt{4h_2^2 + e_1^2} + e_1^2 \ln \frac{2h_2 + \sqrt{4h_2^2 + e_1^2}}{e_1} \right)^2}}; \quad (107)$$

$$\beta = \frac{3e_1^2\tau_p^2 \left[4h_3(q_1e_2^2 - q_2\tau_0) + e_2^4 \ln \frac{e_2(4h_3 + q_1)}{4h_3\tau_0 + q_2} \right]^2}{128 h_3^2e_2^4 (h_4e_1^2q_3 - h_2\tau_p^2q_4)}; \quad (108)$$

$$\gamma = \frac{3e_1^2\tau_p^2 \left(4h_3q_2\tau_0 + e_2^4 \ln \frac{4h_3\tau_0 + q_2}{e_2^2} \right)^2}{64h_3^2e_2^4 (h_4e_1^2q_5 - h_2\tau_p^2q_6)}. \quad (109)$$

В формулах (107)—(109)

$$\begin{aligned}
 h_2 &= \frac{(b_0 + 0,065d_B) e_1^2}{e_1^2 - \tau_0^2}; \\
 h_4 &= \frac{(b_0 + 0,065d_B + d_H) \tau_p^2}{\tau_p^2 - \tau_0^2}; \\
 h_3 &= 0,5 (h_2 + h_4); \\
 q_1 &= \sqrt{16h_3^2 + e_2^2}; \\
 q_2 &= \sqrt{16h_3^2 \tau_0^2 + e_2^4}; \\
 q_3 &= (\tau_p - \tau_0) (2\tau_p^2 - \tau_p \tau_0 - \tau_0^2); \\
 q_4 &= (e_1 - \tau_0) (2e_1^2 - e_1 \tau_0 - \tau_0^2); \\
 q_5 &= \tau_0 (3\tau_p^2 - \tau_0^2); \\
 q_6 &= \tau_0 (3e_1^2 - \tau_0^2);
 \end{aligned}$$

e_1, e_2 определяют по формулам (69), (70); d_B, b_H — диаметр проекции на вал торца полюсов возбуждения и измерительных.

Функция u_D для дифдуктора с круглыми полюсами также определяется по выражению (101). Дифдуктор должен проектироваться таким образом, чтобы угол $\psi = 45^\circ$ (рис. 44). Для данного случая это соответствует условию

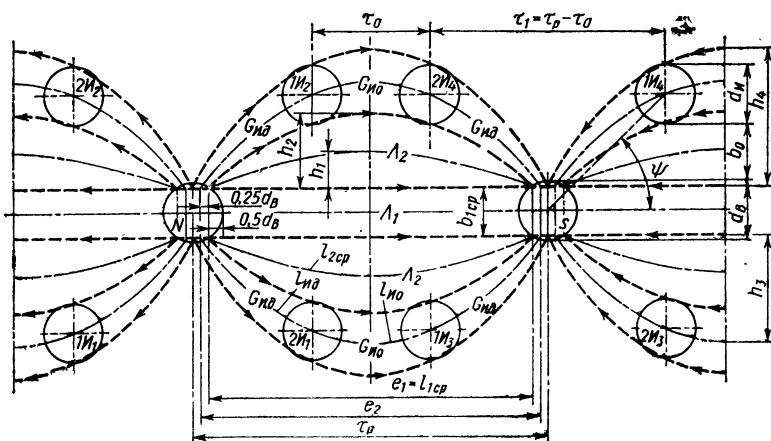


Рис. 44. Картина магнитного поля на поверхности вала для двухполюсного дифдуктора с полюсами круглого сечения:

N, S — проекции полюсов возбуждения; $1H_1, \dots, 1H_4, 2H_1, \dots, 2H_4$ — проекции измерительных полюсов

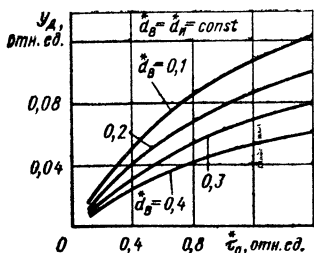


Рис. 45. Зависимость y_D от относительного значения заднего полюсного шага τ_0^* дифдуктора с полюсами круглого поперечного сечения при $d_B = d_H = \text{const}$ ($\tau_0 = \tau_0/\tau_1$; $d_B^* = d_B/\tau_1$; $d_H^* = d_H/\tau_1$)

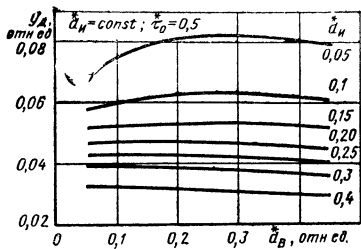


Рис. 46. Зависимость y_D от относительного значения диаметра d_B^* полюса возбуждения дифдуктора с полюсами круглого поперечного сечения при $\tau_0 = 0,5 = \text{const}$; $d_H^* = \text{const}$ ($\tau_0 = \tau_0/\tau_1$; $d_B^* = d_B/\tau_1$; $d_H^* = d_H/\tau_1$)

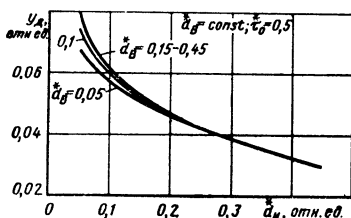


Рис. 47. Зависимость y_D от относительного значения диаметра d_H^* измерительного полюса дифдуктора с полюсами круглого поперечного сечения при $\tau_0 = 0,5 = \text{const}$; $d_B^* = \text{const}$ ($\tau_0 = \tau_0/\tau_1$; $d_B^* = d_B/\tau_1$; $d_H^* = d_H/\tau_1$)

$$b_0 = 0,5 (\tau_p - \tau_0 - d_B - d_H). \quad (110)$$

На рис. 45—47 показаны зависимости $y_D(\tau_0^*)$, $y_D(d_B^*)$, $y_D(d_H^*)$ для дифдуктора с круглыми полюсами, построенные в относительных единицах с учетом условия (110). Сравнение их с полученными ранее характеристиками для дифдуктора с полюсами прямоугольного поперечного сечения показывает, что характеры их изменения подобны.

16. ТРАНСФОРМАТОРНЫЙ МДМ

Как уже отмечалось в п. 2, наряду с тордуктором и дифдуктором получил распространение трансформаторный кольцевой МДМ, который мы условились называть трансдуктором.

На рис. 48 показана усовершенствованная конструкция трансдуктора [авт. свид. № 614343 (СССР)]. Трансдуктор размещается с зазором относительно контролируемого вала 9 и состоит из ших-

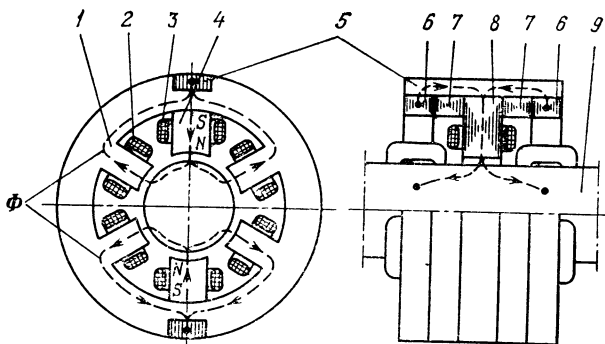


Рис. 48. Магнитные потоки в магнитопроводах двух-полюсного трансдуктора (потоки рассеяния не показаны)

тованного магнитопровода возбуждения 8, на полюсах 4 которого размещены катушки 3 обмотки возбуждения, двух шихтованных измерительных магнитопроводов 6, на полюсах 1 которого размещены катушки измерительных обмоток 2, и двух промежуточных колец 7. Стержневые шихтованные магнитопроводы 5 вставлены в пазы, проходящие через ярма всех магнитопроводов и промежуточные кольца.

Катушки возбуждения соединены в обмотку таким образом, что полярность всех полюсов возбуждения одинакова. Катушки измерительных полюсов соединены в две обмотки и включены на выходе датчика в дифференциальную измерительную схему.

Сравнение конструкций трансдуктора и дифдуктора показывает, что они отличаются лишь способом соединения полюсных катушек обмоток возбуждения и измерительных и, следовательно, полярностью полюсов: чередующейся у дифдуктора и одноименной у трансдуктора, поэтому анализ работы трансдуктора производится в данной главе.

На рис. 49 изображена схема замещения, магнитной цепи элементарной ячейки трансдуктора, содержащей один полюс

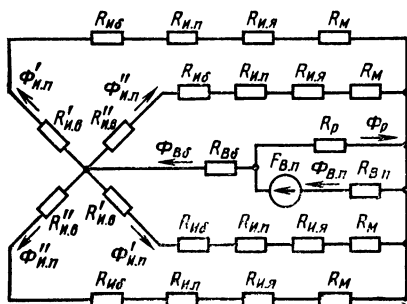
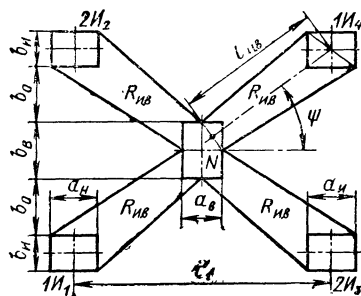


Рис. 49. Схема замещения магнитной цепи элементарной ячейки трансдуктора (магнитные потоки рассеяния Φ_p показаны упрощенно)

возбуждения и четыре измерительных полюса (трансдуктор может иметь любое число таких ячеек, в том числе нечетное). Переменный магнитный поток возбуждения $\Phi_{B\delta}$ из полюса возбуждения через воздушный зазор попадает в вал и, разделившись на четыре части, проходит затем через воздушные зазоры в измерительные полюса. Далее каждая часть потока $\Phi_{И.п}$ проходит по яру измерительного магнитопровода, а затем по дополнительному стержневому магнитопроводу, откуда попадает в полюс возбуждения.

Рис. 50. Упрощенная картина магнитного поля на поверхности вала элементарной ячейки трансдуктора:

N — проекция полюса возбуждения;
 $1И_1, -1И_4, 2И_2, 2И_3$ — проекции измерительных полюсов



Конструкция трансдуктора без стержневых магнитопроводов (пат. США № 3340729) имеет значительно меньшее выходное напряжение, так как при переходе из измерительных магнитопроводов в полюс магнитные потоки идут поперек направления шихтовки листов железа.

Упрощенная картина магнитного поля на поверхности вала показана на рис. 50. При $M=0$ магнитные сопротивления $R_{и.в}$ равны между собой и поэтому магнитные потоки во всех измерительных полюсах $\Phi_{И.п}$ также равны между собой. В случае, когда $M \neq 0$,

$R'_{и.в} > R''_{и.в}$, в результате чего потоки $\Phi'_{и.п} < \Phi''_{и.п}$. Изменение магнитных потоков приводит к изменению ЭДС, индуцируемых в измерительных обмотках. Поскольку выходы обеих измерительных обмоток включены в дифференциальную измерительную схему, на сопротивлении нагрузки появится разность напряжений, зависящая от величины крутящего момента вала.

Будем считать, что магнитный поток рассеяния $\Phi_{в.р}$ учтен с помощью коэффициента рассеяния как некоторая доля потока полюса $\Phi_{в.п}$. На основе схемы замещения магнитной цепи (см. рис. 49) мгновенное значение потокосцепления катушки измерительного полюса в допущении, что

$$R_{в.п} + R_{B\delta} \approx R_{B\delta}, \quad R_{и.п} + R_{и.я} + R_M + R_{и.д} \approx R_{и.д},$$

$$\psi_{и.п} = \frac{\omega_B \omega_{и.в} i_B}{4R_{B\delta} + R_{и.д} + R_{и.в}}, \quad (111)$$

где $R_{и.в}$ — магнитное сопротивление участка вала между проекци-

ями полюсов возбуждения и измерительным; R_M — то же, стержневого магнитопровода; остальные обозначения идентичны принятым в п. 5.

Магнитные сопротивления воздушных зазоров $R_{B\delta}$ и $R_{И\delta}$ соответственно определяют по выражениям (28), (29).

Положим, что магнитное сопротивление вала имеет активный характер, а глубина проникновения магнитного потока в тело вала одинакова в любой точке и равна средней величине h . Тогда

$$R_{И.в} = \frac{\beta}{\mu_B h}, \quad (112)$$

где

$$\beta = \frac{l_{И.в}}{b_{И.в}} = \frac{l_{И.в}^2}{s_{И.в}}; \quad (113)$$

μ_B — абсолютная магнитная проницаемость материала вала на участке магнитного сопротивления $R_{И.в}$; $l_{И.в}$, $b_{И.в}$, $s_{И.в}$ — соответственно средние длина, ширина и площадь участка магнитного сопротивления $R_{И.в}$.

В соответствии с рис. 50

$$\begin{aligned} l_{И.в} &= 0,25 \sqrt{(2\tau_1 - a_B)^2 + (4b_0 + b_B + 2b_{И})^2}; \\ s_{И.в} &= 0,125 [(b_B + 2b_{И}) \tau_1 + (4b_0 + b_B + 6b_{И}) a_{И} + \\ &\quad + (2b_0 + b_B) a_B]; \\ \beta &= \frac{(2\tau_1 - a_B)^2 + (4b_0 + b_B + 2b_{И})^2}{2 [(b_B + 2b_{И}) \tau_1 + (4b_0 + b_B + 6b_{И}) a_{И} + (2b_0 + b_B) a_B]}. \end{aligned} \quad (114)$$

С учетом выражений (28), (29), (111)–(113) мгновенное значение потокосцепления полюсной катушки измерительной обмотки

$$\psi_{И.п} = \frac{K_8 \mu_B i_B}{\chi},$$

где

$$\begin{aligned} K_8 &= \mu_0 w_B w_{И} h s_B s_{И}; \\ \chi &= \mu_B h (4\delta_B s_{И} + \delta_{И} s_B) + \mu_a \beta s_B s_{И}. \end{aligned}$$

Использував методику вывода функции преобразования, примененную в п. 12 для случая магнитоизотропного вала и отсутствия вращающегося эксцентриситета вала, выпрямленное напряжение на сопротивлении r (см. рис. 35) при $M=0$

$$U_0 = \frac{16 \sqrt{2} \mu_0 w_B w_{И} \rho_B s_B s_{И} f I_B r \mu_B h}{[\mu_0 \beta s_B s_{И} + \delta h (s_B + 4s_{И}) \mu_B] \sqrt{r^2 + x_{И}^2}}. \quad (115)$$

При $M \neq 0$ магнитная проницаемость μ_B на участках магнитного сопротивления $R_{И.в}$ изменится соответственно на величины

$+\Delta\mu_v$ и $-\Delta\mu_v$, при этом с учетом малости величины $\Delta\mu_v$ по сравнению с величиной μ_v с учетом выражений (1), (35), (94) — (96), (99) и (115)

$$U = \frac{r_H}{r + r_H} (U'_0 - U''_0) = S_{Tp} M, \quad (116)$$

где чувствительность трансдуктора

$$S_{Tp} = \frac{45\mu_0^2 K_\mu \omega_B \omega_{II} \rho_B s_B^2 s_{II}^2 \beta f I_B r r_H}{\mu_B^2 h \delta^2 (s_B + 4s_{II})^2 W_p (r + r_H) \sqrt{r^2 + x_{II}^2}}. \quad (117)$$

Выражение чувствительности трансдуктора получено в предположении, что $\psi = 45^\circ$ (см. рис. 50). Если $\psi \neq 45^\circ$, то в выражение (117) следует ввести множитель $\sin 2\psi$, где

$$\psi = \arctg \frac{4b_0 + b_B + 2b_{II}}{2\tau_p - a_B}.$$

Из выражения (116) следует, что при неизменном значении чувствительности выходное напряжение трансдуктора прямо пропорционально крутящему моменту, что подтверждается экспериментальными данными [59].

Исследование зависимости β по формуле (114) от величины переднего полюсного шага τ_1 (при $a_B = b_B = a_{II} = b_{II} = \text{const}$ и при соблюдении условия $\psi = 45^\circ$) показало, что β практически линейно возрастает с ростом τ_1 . Функция β уменьшает свое значение с ростом любого из поперечных размеров торцов полюсов (это уменьшение тем заметнее, чем меньше относительное значение остальных поперечных размеров торцов полюсов по отношению к полюсному делению). Следовательно, чувствительность трансдуктора возрастает с ростом магнитного сопротивления $R_{II.B}$.

Сравним чувствительности дифдуктора (100) и трансдуктора (117). Из рассмотрения выражений чувствительности следует, что они отличаются лишь определенными сомножителями. Выделим их: для дифдуктора этот сомножитель

$$K_D = s_B s_{II} y_D,$$

а для трансдуктора

$$K_{Tp} = \left(\frac{s_B s_{II}}{s_B + 4s_{II}} \right)^2 \beta.$$

Для реальных конструкций дифдукторов $y_D = 0,04 \div 0,07$, а для трансдукторов $\beta = 1,5 \div 3$. При этом для значений $s_{II} = (0,25 \div 1,00) s_B$ отношение

$$\frac{K_{Tp}}{K_D} = 1,5 \div 2,6.$$

Следовательно, трансдуктор (имеется в виду усовершенствованная конструкция) при прочих равных условиях имеет более высо-

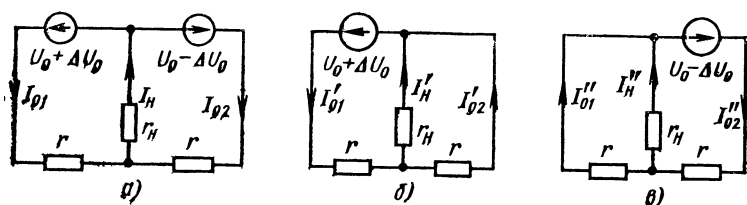


Рис. 51. Схемы к расчету дифференциальной измерительной схемы типа А методом наложения

кую чувствительность, чем дифдуктор, а его недостатком является более сложная конструкция.

В случае наличия магнитной анизотропии и вращающегося эксцентриситета вала, т. е. когда $\mu_b \neq \text{const}$, $\delta_b \neq \text{const}$, $\delta_H \neq \text{const}$, в выходном напряжении появятся паразитные пульсации (см. пп. 8 и 14).

17. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ МДМ

В дифдукторах, так же как и в трансдукторах, применяют дифференциальные измерительные схемы двух типов. Одна из них изображена на рис. 35, а (будем условно называть ее схемой типа А), другая — на рис. 35, б (схема типа Е). Произведем сравнение чувствительности обеих схем.

Рассмотрим схему А (рис. 35, а' и 51, а). Каждую из измерительных обмоток с выпрямителем представим в виде источника напряжения U_0 . При появлении крутящего момента напряжение одного из источников увеличится на величину ΔU_0 , а другого — на ту же величину уменьшится. Определим ток, возникающий в сопротивлении нагрузки, и чувствительность схемы.

Пользуясь методом наложения, можно записать для схемы, показанной на рис. 51, б,

$$I'_{01} = \frac{U_0 + \Delta U_0}{r + \frac{r r_H}{r + r_H}} = \frac{U_0 (r + r_H)}{r (r + 2r_H)} + \frac{\Delta U_0 (r + r_H)}{r (r + 2r_H)}; \quad (118)$$

$$\frac{I'_H}{I'_{01}} = \frac{r}{r + r_H}. \quad (119)$$

Из выражения (119) с учетом формулы (118) получаем

$$I'_H = I'_{01} \frac{r}{r + r_H} = \frac{U_0}{r + 2r_H} + \frac{\Delta U_0}{r + 2r_H}.$$

Аналогично определяем ток I''_H (рис. 51, в):

$$I''_H = \frac{U_0}{r + 2r_H} - \frac{\Delta U_0}{r + 2r_H}.$$

По методу наложения ток в сопротивлении нагрузки

$$I_H = I_H' - I_H'' = \frac{2\Delta U_0}{r + 2r_H}. \quad (120)$$

Чувствительность схемы типа А по току может быть выражена как отношение тока прибора к относительному приращению напряжения источника. С учетом выражения (120) чувствительность по току

$$S_I = \frac{I_H}{\frac{\Delta U_0}{U_0}} = \frac{2U_0}{r + 2r_H}. \quad (121)$$

Если сопротивление цепи нагрузки

$$r_H \gg r, \quad (122)$$

так что ток I_H пренебрежимо мал по сравнению с токами в других ветвях схемы, то тогда рассматривается чувствительность по напряжению

$$S_U = \frac{I_H r_H}{\frac{\Delta U_0}{U_0}} = \frac{2U_0 r_H}{r + 2r_H}. \quad (123)$$

Значением сопротивления r в знаменателе выражения (123) можно пренебречь как величиной более высокого порядка малости по сравнению с $2r_H$ по условию (122), и окончательно чувствительность схемы типа А по напряжению

$$S_U = U_0.$$

Рассмотрим схему типа Б (рис. 35, б и 52). Для решения схемы примем метод уравнений Кирхгофа, в соответствии с которым получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} I_3 - I_1 - I_H &= 0; \\ I_4 - I_2 + I_H &= 0; \\ I_1 r' &= U_0 + \Delta U_0; \\ I_2 r &= U_0 - \Delta U_0; \\ I_1 r - I_2 r &= I_H r_H. \end{aligned} \right\} \quad (124)$$

Решив систему уравнений (124) относительно тока в сопротивлении нагрузки, получим

$$I_H = \frac{2\Delta U_0}{r_H}. \quad (125)$$

Чувствительность схемы типа Б по току с учетом выражения (125)

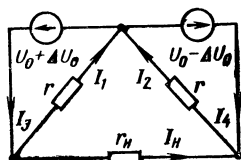


Рис. 52. Схема к расчету дифференциальной измерительной схемы типа Б методом уравнений Кирхгофа

$$S_I = \frac{I_H}{\frac{\Delta U_0}{U_0}} = \frac{2U_0}{r_H} . \quad (126)$$

Чувствительность схемы типа Б по напряжению с учетом выражения (125)

$$S_U = \frac{I_H r_H}{\frac{\Delta U_0}{U_0}} = 2U_0 . \quad (127)$$

Сравнивая формулы (121), (126) и (123), (127), видим, что измерительная схема типа Б имеет более высокую чувствительность как по току, так и по напряжению, и поэтому ей следует отдать предпочтение перед схемой типа А.

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПОГРЕШНОСТИ МДМ

18. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ И ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ

Рассмотрим тордуктор как датчик автоматической системы управления. Он состоит из элементарных преобразователей (звеньев), включенных последовательно (рис. 53). Первым звеном тордуктора является вал (или чувствительный элемент типа стакана) B , преобразующий крутящий момент $M(p)$ в приращение магнитной проницаемости $\Delta\mu_{\text{И}}(p)$ *. Передаточную функцию этого звена обозначим $W_1(p)$.

Приращение магнитной проницаемости $\Delta\mu_{\text{И}}(p)$ является входной величиной трансформаторного преобразователя $ТП$, выходной величиной которого является переменная ЭДС измерительной обмотки $E_{\text{И}}(p)$. Передаточную функцию этого звена обозначим $W_{2Т}(p)$.

Переменная ЭДС $E_{\text{И}}(p)$ выпрямляется с помощью преобразователя $ВП$, представляющего собой мостовой выпрямитель. Выходной величиной его является выпрямленное напряжение $U(p)$, а передаточная функция этого звена — $W_3(p)$.

Для сглаживания пульсаций выходного напряжения на выходе МДМ обычно включают фильтр нижних частот Φ , выходной величиной которого является выпрямленное напряжение $U_1(p)$, а передаточная функция этого звена — $W_4(p)$.

Передаточная функция тордуктора

$$W_T(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) = W_1(p) W_{2Т}(p) W_3(p) W_4(p).$$

Рассмотрим структурную схему дифдуктора и трансдуктора (рис. 54). Чувствительный элемент — вал B преобразует крутящий момент $M(p)$ в приращение магнитной проницаемости $\pm\Delta\mu_{\text{И.д}}(p)$. Передаточные функции этих звеньев обозначим $W'_1(p)$ и $W''_1(p)$.

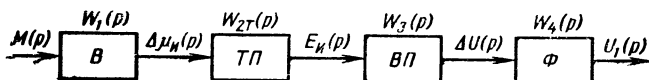


Рис. 53. Структурная схема тордуктора

В данной главе p — комплексная переменная в преобразовании Лапласа.

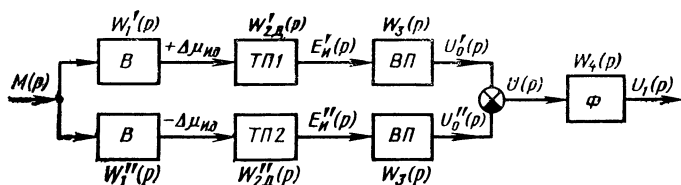


Рис. 54. Структурная схема дифдуктора и трансдуктора

Приращение магнитной проницаемости $\pm \Delta \mu_{ИД}(p)$ является входной величиной двух трансформаторных преобразователей ТП1 и ТП2. Передаточная функция каждого из этих преобразователей $W_{2Д}(p)$, а переменная ЭДС на выходе каждого из них $E_{И}'(p)$ и $E_{И}''(p)$ соответственно. Переменные ЭДС трансформаторных преобразователей выпрямляются с помощью полупроводниковых выпрямителей ВП, передаточной функцией которых является $W_3(p)$.

Выходные напряжения каждой из параллельных ветвей, состоящих из ТП1 и ВП и ТП2 и ВП, вычитаются, и выходное напряжение $U(p)$ поступает на фильтр Ф. Передаточная функция фильтра — $W_4(p)$.

Передаточная функция дифдуктора и трансдуктора с учетом последовательно-параллельного соединения их звеньев

$$W_{Д}(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) \left[\sum_{j=1}^k W_j(p) \right] = W_{2Д}(p) W_3(p) \times \\ \times W_4(p) [W_1'(p) - W_1''(p)].$$

Трансформаторный преобразователь при условии, что частота тока возбуждения (несущая) значительно больше частоты изменения преобразуемой входной величины (огibaющей), можно считать безынерционным усилителем [29]. Его передаточная функция

$$W_2(p) = K_9,$$

где для тордуктора на основании выражения (55)

$$K_{9Т} = \frac{8\pi\mu_0^2\omega_B\omega_{И}^2\rho_B S_B S_{И} y_T f I_B}{\mu^2 h \delta^2};$$

для дифдуктора на основании выражения (100)

$$K_{9Д} = \frac{16\pi\mu_0^2\omega_B\omega_{И}^2\rho_B S_B S_{И} y_{Д} f I_B}{\mu^2 h \delta^2}.$$

Выпрямитель также является безынерционным звеном с передаточной функцией

$$W_3(p) = K_{10},$$

где для тордуктора

$$K_{10T} = \frac{2\sqrt{2}r_H}{\pi\sqrt{r_H^2 + x_{II}^2}};$$

для дифдуктора

$$K_{10Д} = \frac{2\sqrt{2}rr_H}{(r + r_H)\sqrt{r^2 + x_{II}^2}}.$$

Определим передаточную функцию вала. В большинстве случаев валы устанавливают на двух опорах — подшипниках качения. Сам вал представляет собой массу, распределенную по длине, в одном-двух местах на валу могут быть установлены сосредоточенные массы. Расчет динамики вала с учетом распределенных по длине масс является сложным [28, 42], поэтому при составлении расчетных схем упругих систем типа вала удается получить достаточно точные результаты, приведя все распределенные массы к сосредоточенным. В этом случае вал можно представить в виде невесомой балки на податливых в линейном и угловом отношениях опорах с одной-двумя сосредоточенными массами [30].

Для этого случая уравнение движения вала может иметь вид

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + c \frac{d\varphi}{dt} + k\varphi = M, \quad (128)$$

где J — динамический момент инерции сосредоточенной массы; φ — угол закручивания; c — постоянная демпфирования, равная величине демпфирующего момента при угловой скорости, равной единице; M — возмущающий крутящий момент; $k = GJ_p/l$ — коэффициент жесткости, т. е. крутящий момент, необходимый для закручивания вала на угол 1 рад (здесь G — модуль сдвига; J_p — полярный момент инерции поперечного сечения вала; l — длина вала).

Разделив обе части уравнения (128) на k , получим

$$T_B^2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\lambda_B T_B \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = \frac{M}{k}, \quad (129)$$

где постоянная времени звена

$$T_B = \sqrt{\frac{J}{k}};$$

степень затухания

$$\lambda_B = \frac{c}{2\sqrt{Jk}}.$$

Приращение магнитной проницаемости материала вала и напряжения кручения, зависящие от крутящего момента, связаны между собой уравнением (35), с учетом которого угол закручивания вала

$$\varphi = \frac{M}{k} = \frac{W_p}{K_\mu k} \Delta\mu_{И.д.}$$

Подставив полученное значение φ в уравнение (129), получим

$$T_B^2 \frac{d^2 (\Delta \mu_{И.Д})}{dt^2} + 2\lambda_B T_B \frac{d (\Delta \mu_{И.Д})}{dt} + \Delta \mu_{И.Д} = K_B M, \quad (130)$$

где коэффициент преобразования звена

$$K_B = \frac{K_\mu}{W_B}.$$

Уравнение (130) является уравнением колебательного звена, передаточная функция которого

$$W_1(p) = \frac{K_B}{T_B^2 p^2 + 2\lambda_B T_B p + 1}. \quad (131)$$

Характеристическое уравнение колебательного звена имеет вид

$$T^2 p^2 + 2\lambda T p + 1 = 0.$$

По расположению корней этого уравнения на комплексной плоскости можно судить о характере звена. Корни характеристического уравнения следующие:

$$p_1 = \omega_0 (-\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1});$$

$$p_2 = \omega_0 (-\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1}),$$

где собственная частота колебания звена

$$\omega_0 = 1/T.$$

Для звена второго порядка могут иметь место следующие виды корней характеристического уравнения:

а) демпфирование велико, степень затухания $\lambda > 1$, корни характеристического уравнения действительные и разные, передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}; \quad (132)$$

в этом случае передаточная функция представляет собой произведение передаточных функций двух аperiodических звеньев;

б) $\lambda = 1$; корни характеристического уравнения действительные и равные, передаточная функция

$$W(p) = \frac{K}{(Tp + 1)^2};$$

это выражение представляет собой частный случай зависимости (132);

в) демпфирование отсутствует, $\lambda = 0$; корни характеристического уравнения мнимые; звено становится консервативным, в нем возникают периодические незатухающие колебания; передаточная функция консервативного звена

$$W(p) = \frac{K}{T^2 p^2 + 1};$$

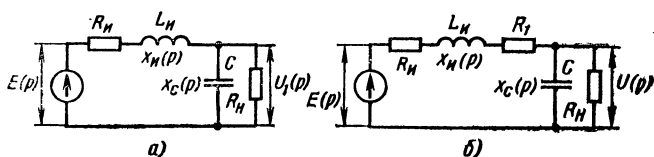


Рис. 55. Схемы простейших фильтров нижних частот тордуктора:

а — емкостный; б — Г-образный активно-емкостный

г) демпфирование невелико, $\lambda < 1$; корни характеристического уравнения комплексно-сопряженные; передаточная функция имеет вид (131).

Случай вала соответствует условию г, когда демпфирование, т. е. рассеяние энергии колебаний, невелико. Демпфирование вызывается влиянием внешней среды, особенностями конструкции и внутренним трением в материале вала. Энергия колебаний или отводится от механической системы, или рассеивается внутри самой системы. Внутренние потери зависят от внутреннего трения в материале вала, имеющего термическую природу. При последовательных циклах нагрузки и разгрузки вала соответствующие диаграммы испытаний обнаруживают петли гистерезиса, величины площадей которых соответствуют внутренней энергии, рассеянной в материале вала за цикл.

Рассеяние энергии колебаний за счет внешних и внутренних потерь в механической системе неодинаково и может изменяться в широких пределах. Обычно внешние потери в несколько раз превышают внутренние. Исследованиями установлено, что в узлах машин преобладает конструкционное демпфирование, т. е. энергетические потери, возникающие вследствие действия сил трения на контактных поверхностях в соединениях (в подшипниках, шпонках и т. п.) при колебаниях механических систем [30].

Рассмотрим передаточные функции фильтров, являющихся обычно последовательными пассивными корректирующими устройствами. Влияние предыдущего и последующего звеньев на работу фильтра может быть учтено введением в соответствующие выражения сопротивления выхода измерительной обмотки $r_{и}$ и $x_{и}$ и сопротивления нагрузки ($r_{н}$ — у тордуктора, $r_{и}$ и $r_{н}$ — у дифдуктора и трансдуктора).

На рис. 55 изображены схемы простейших фильтров, применяемых для сглаживания пульсаций у тордуктора: емкостный и Г-образный RC-фильтр. Передаточная функция емкостного фильтра (вывод опускаем)

$$W_4(p) = \frac{U_1(p)}{E(p)} = \frac{r_{н}x_{с}(p)}{[r_{и} + x_{и}(p)][r_{н} + x_{с}(p)] + r_{н}x_{с}(p)} =$$

$$= \frac{K_{\Phi}}{T_{\Phi}^2 p^2 + 2\lambda_{\Phi} T_{\Phi} p + 1} \quad (133)$$

где

$$x_{сi}(p) = \frac{1}{pC};$$

$$x_H(p) = pL_H;$$

степень затухания

$$\lambda_\Phi = \frac{r_H r_H C + L_H}{2 \sqrt{r_H (r_H + r_H) L_H C}}; \quad (134)$$

постоянная времени

$$T_\Phi = \sqrt{\frac{r_H L_H C}{r_H + r_H}}; \quad (135)$$

коэффициент усиления

$$K_\Phi = \frac{r_H}{r_H + r_H}; \quad (136)$$

C — емкость фильтра.

Учитывая, что обычно $r_H \ll r_H$, $L_H \ll r_H r_H C$, значениями r_H и L_H в выражениях (134)–(136) можно пренебречь как величинами более высокого порядка малости. С учетом этого

$$\lambda_\Phi \approx \frac{r_H C}{2 \sqrt{L_H C}};$$

$$T_\Phi \approx \sqrt{L_H C};$$

$$K_\Phi \approx 1.$$

Как следует из формулы (133), емкостный фильтр представляет собой колебательное звено. С целью хорошего сглаживания пульсаций величину емкости C выбирают достаточно большой и степень затухания $\lambda_\Phi > 1$. В этом случае передаточная функция будет представлять собой произведение передаточных функций двух апериодических звеньев [см. выражение (132)].

С учетом порядка малости величин передаточная функция Γ -образного RC -фильтра тордуктора может быть описана выражением (133), где

$$\lambda_\Phi \approx \frac{r_1 r_H C}{2 \sqrt{(r_1 + r_H) r_H L_H C}};$$

$$T_\Phi \approx \sqrt{\frac{r_H L_H C}{r_1 + r_H}};$$

$$K_\Phi = \frac{r_H}{r_1 + r_H}.$$

На рис. 56 показаны схемы емкостного и активно-емкостного фильтров дифдукторов, отличающихся от таковых для тордукторов наличием сопротивления r (второе сопротивление r шунтируется диодами выпрямительного моста ВП). Для емкостного фильтра

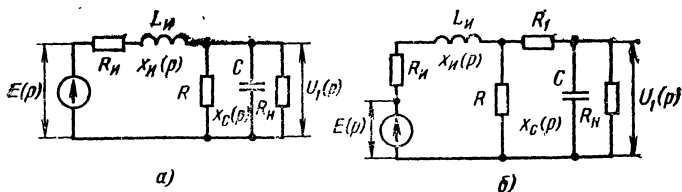


Рис 56. Схемы простейших фильтров нижних частот дифдуктора и трансдуктора:

а — емкостный; б — Г-образный активно-емкостный

передаточная функция также описывается уравнением (133), а в выражениях (134) — (136) вместо r_H следует подставить

$$r_{H.Э} = \frac{r r_H}{r + r_H}.$$

Активно-емкостный фильтр дифдуктора с учетом внутреннего сопротивления измерительной обмотки и сопротивления нагрузки представляет собой простейшую лестничную схему (рис. 56, б), проводимость которой может быть представлена в виде непрерывной дроби [4]

$$Y_{Э}(p) = \frac{1}{r_H + x_H(p) + \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{r_1 + \frac{r_H x_C(p)}{r_H + x_C(p)}}}}.$$

Прделав необходимые преобразования, получим

$$Z_{Э}(p) = \frac{1}{Y_{Э}(p)} = \frac{p^2 (r + r_1) r_H L_H C + p [(r_H r + r_H r_1 + r r_1) r_H C + (r + r_1) r_H L_H] + (r + r_1 + r_H) L_H}{p (r + r_1) r_H C + (r + r_1 + r_H) L_H}.$$

Передаточная функция активно-емкостного фильтра дифдуктора

$$W_{\Phi}(p) = \frac{U_1(p)}{E(p)} = \frac{r_H x_C(p)}{[r_H + x_C(p)] Z_{Э}(p)} = \frac{K_{\Phi 1} (T_{\Phi 1} p + 1)}{T_{\Phi 4}^3 p^3 + T_{\Phi 2}^2 p^2 + T_{\Phi 3} p + 1},$$

где

$$K_{\Phi 1} = \frac{(r + r_1 + r_H) r_H}{r_H r + (r_H + r) (r_1 + r_H)} \approx \frac{(r + r_1 + r_H) r_H}{(r_1 + r_H) r}; \quad (137)$$

$$T_{\Phi 1} = \frac{(r + r_1) r_H C}{r + r_1 + r_H}; \quad (138)$$

$$T_{\Phi 2} = \sqrt{\frac{(r_H r + r_H r_1 + r r_1) r_H^2 C^2 - [(r + r_1 - r_H) r_H - (r + r_1) r_H] L_H C}{r_H r + (r_H + r) (r_1 + r_H)}} \approx$$

$$\approx r_H C \sqrt{\frac{r_1}{r_1 + r_H}}; \quad (139)$$

$$T_{\Phi 3} = \frac{(r + r_1 + r_H) L_H + (r_H r + r_H r_1 + r r_1) r_H C + [r_H r +$$

$$r_H r + (r_H + r) (r_1 + r_H)] r_H C}{r_H r + (r_H + r) (r_1 + r_H)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ (r_H + r) (r_1 + r_H) r_H C}{r_1 + r_H} \approx \frac{(2r_1 + r_H) r_H C}{r_1 + r_H}; \quad (140)$$

$$T_{\Phi 4} = \sqrt[3]{\frac{(r + r_1) r_H^2 L_H C^2}{r_H r + (r_H + r) (r_1 + r_H)}} \approx$$

$$\approx \sqrt[3]{\frac{(r + r_1) r_H^2 L_H C^2}{r (r_1 + r_H)}}. \quad (141)$$

Для реальных значений параметров, входящих в выражения (137)–(141), постоянная времени $T_{\Phi 4}$ на два-три порядка ниже постоянных времени $T_{\Phi 1}$, $T_{\Phi 2}$ и $T_{\Phi 3}$. С учетом этого, значением постоянной времени $T_{\Phi 4}$ можно пренебречь как величиной более высокого порядка малости, и передаточная функция примет более простой вид:

$$W_4(p) \approx \frac{K_{\Phi 1} (T_{\Phi 1} p + 1)}{T_{\Phi 5}^2 p^2 + 2\lambda_{\Phi 1} T_{\Phi 5} p + 1};$$

где

$$\lambda_{\Phi 1} \approx \frac{2r_1 + r_H}{2\sqrt{r_1 (r_1 + r_H)}};$$

$$T_{\Phi 1} \approx \frac{(r + r_1) r_H C}{r + r_1 + r_H};$$

$$T_{\Phi 5} = r_H C \sqrt{\frac{r_1}{r_1 + r_H}}.$$

Передаточные функции других типов фильтров могут быть построены по методике, приведенной в работе [3].

Полоса пропускания прибора, состоящего из ряда измерительных преобразователей, ограничивается тем преобразователем, который имеет наименьшую полосу пропускания, в нашем случае — фильтром. На рис. 57 показаны переходные функции, полученные

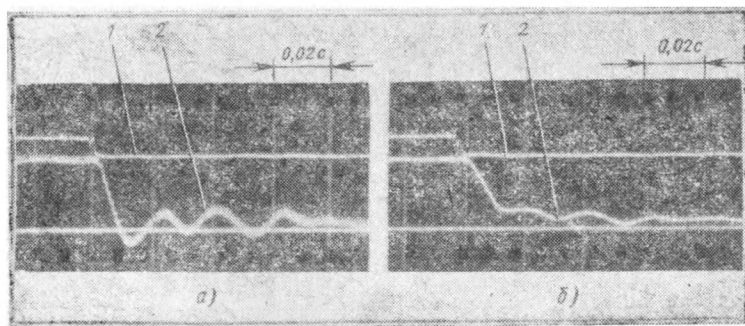


Рис. 57. Экспериментальная переходная функция дифдуктора ИПМ-120:

а — при емкостном фильтре 0,5 мкФ; б — при емкостном фильтре 2 мкФ (1 — примененный крутящий момент; 2 — выходное напряжение).

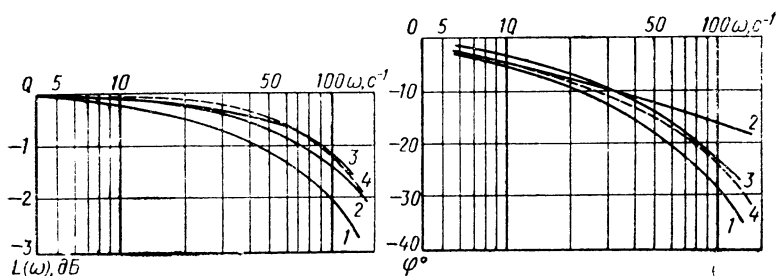


Рис. 58. ЛАЧХ и ФЧХ для различных магнитоупругих датчиков крутящего момента:

1 — для четырехполюсного тордуктора с шихтованными магнитопроводами; 2, 3 — для четырех- и двухполюсного дифдукторов с шихтованными магнитопроводами; 4 — для четырехполюсного дифдуктора с массивными измерительными магнитопроводами

экспериментально на дифдукторе ИПМ-120 при наличии демпфирования типа сухого трения в цапфе вала [34]. Как следует из осциллограмм, характер изменения выходного напряжения дифдуктора подтверждает изложенное выше положение: при определенном значении емкости фильтра дифдуктор преобразуется из колебательного звена в апериодическое.

Логарифмические амплитудно-частотные (ЛАЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики, полученные экспериментально для нескольких типоразмеров МДМ [50], показаны на рис. 58. Частотные характеристики снимали путем одновременного осциллографирования выходного напряжения датчиков и крутящего момента на валу. Момент определяли с помощью тензодатчиков, наклеенных на вал под полюсами исследуемого МДМ.

Частотные характеристики снимали в диапазоне круговых частот $\omega = 8 \div 130 \text{ с}^{-1}$. Как следует из рис. 58, относительная амплитуда выходного напряжения при $\omega = 130 \text{ с}^{-1}$ составляет величину для различных типоразмеров МДМ от 0,74 до 0,83, т. е. полоса пропускания составляет величину более 21 Гц при частоте возбуждения $f = 50 \text{ Гц}$. Аналогичные испытания, проведенные для дифдуктора ИПМ-50 при частоте возбуждения 400 Гц, показали, что полоса пропускания составила более 100 Гц.

Максимальный сдвиг по фазе (см. рис. 58) выходного напряжения относительно крутящего момента составил для различных типов МДМ величину $18\text{—}31^\circ$.

19. ПОГРЕШНОСТИ МДМ

Основными причинами погрешностей МДМ являются:

а) несовершенная упругость материала вала, проявляющаяся в упругом последствии, зависимости модуля упругости материала вала от температуры, упругом гистерезисе и трении в материале вала и его соединениях;

б) несовершенные магнитные и магнитоупругие свойства материала вала;

в) нестабильность параметров тока возбуждения;

г) эффекты вихревых токов и «магнитной записи» вала.

Упругое последствие и изменение модуля упругости от температуры приводят к изменению первоначальной деформации и жесткости вала. При умеренных температурах и небольших напряжениях величина упругого последствия проявляется в небольшой степени.

Упругий гистерезис и трение в материале вала выражаются в неоднозначности зависимости деформации от направления изменения крутящего момента. Различают трение внешнее и внутреннее. Внешнее трение происходит в шпоночных, шлицевых и т. п. соединениях, и его можно определить расчетным путем. Внутреннее трение в материале вала учесть сложнее. Его величину можно оценить по опытным коэффициентам, характеризующим петлю упругого гистерезиса, или по декрементам затухания колебаний в материале.

Несовершенство магнитных свойств материала вала проявляется в магнитном гистерезисе, связанном с необратимостью процесса намагничивания, и в зависимости намагниченности от температуры. Несовершенство магнитных свойств проявляется также в виде магнитной анизотропии вала, выражающейся в существенном различии магнитной проницаемости на разных участках вала. Различие магнитной проницаемости вызывает погрешности, проявляющиеся в виде паразитных пульсаций выходного напряжения (см. пп. 8, 14). Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что погрешности от упругого и магнитного гистерезиса различных ферромагнитных материалов лежат в пределах $0,5\text{—}8,0\%$, причем большие значения погрешности относятся к более жестким в магнитном отношении сплавам [15]. Величина гистерезиса зависит также от термической и механической обработки вала.

Причинами погрешности МДМ являются нестабильность тока возбуждения и его частоты. Нестабильность формы тока возбуждения также является причиной погрешности, поскольку изменение

соотношения между гармониками тока приводит к изменению чувствительности МДМ.

Погрешности МДМ, связанные с зависимостью выходного напряжения от частоты вращения вала, определяются влиянием эффекта вихревых токов и эффекта «магнитной записи» [11, 52, 56].

Эффект вихревых токов проявляется в поперечном смещении реальных проекций полюсов на поверхность вала по отношению к геометрическим проекциям полюсов на этой поверхности. Смещение проекций полюсов вызывает появление дополнительной ЭДС на выходе МДМ при асимметричном расположении измерительных полюсов относительно полюсов возбуждения или при конусности вала. Значение этой дополнительной ЭДС не зависит от величины измеряемого момента, т. е. данная погрешность МДМ является погрешностью нуля.

Эффект «магнитной записи» заключается в остаточной намагниченности поверхности вала. При малых частотах вращения вала на каждом участке его поверхности происходит несколько циклов перемагничивания, и остаточная намагниченность имеет небольшую величину. С повышением частоты остаточная намагниченность сохраняется все в большей степени, достигая максимального значения при синхронной частоте вращения вала $n_c = 60/f_{\text{рв}}$. При частотах вращения, меньших половины синхронной частоты, влияние эффекта «магнитной записи» проявляется в небольшой степени. Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать заключение о том, что погрешность от эффекта «магнитной записи» также является погрешностью нуля.

Различают четыре группы методов уменьшения погрешностей средств измерения [51]:

- а) стабилизация параметров технологическим путем;
- б) пассивная защита от быстро изменяющихся влияющих воздействий;
- в) активная защита от медленно изменяющихся влияющих воздействий;
- г) коррекция погрешностей.

Рассмотрим эти методы применительно к МДМ.

Стабилизация параметров технологическим путем. Погрешность от несовершенства упругих и магнитных свойств вала может быть значительно уменьшена правильным выбором конструкции МДМ, материала вала и режима его термообработки.

Для уменьшения погрешности от упругого гистерезиса, связанного с влиянием внешнего трения, следует изготавливать вал (чувствительный элемент) с минимальным количеством шпоночных, шлицевых, болтовых соединений. Чувствительный элемент, включаемый в тракт передачи крутящего момента, должен соединяться с валом жестко, например, с помощью сварки.

На магнитный гистерезис оказывает влияние частота тока возбуждения; по данным экспериментов, с ростом частоты гистерезис уменьшается. Величина магнитного гистерезиса в большой степени зависит также от термообработки вала (чувствительного элемента). Правильным выбором режима отжига можно значительно уменьшить магнитный гистерезис. Наилучшие результаты дает отжиг в инертной среде или высоком вакууме. Отжиг, кроме того, выравнивает магнитные свойства вала по его объему, способствуя значительному уменьшению амплитуды паразитных пульсаций выходного напряжения. Уменьшению паразитных пульсаций способствует так-

же соосное расположение МДМ относительно вала, с тем чтобы воздушные зазоры под всеми полюсами были одинаковы. Это условие обычно хорошо обеспечивается установкой корпуса МДМ относительно вала на подшипниках качения.

Конструкция МДМ должна исключать возможность произвольного перемещения датчика в осевом направлении относительно его первоначального места установки.

Для уменьшения погрешности от влияния эффекта «магнитной записи» синхронная частота МДМ должна значительно превышать частоту вращения вала.

В связи с наличием магнитной анизотропии материала вала и возникающих при этом паразитных пульсаций в выходном напряжении необходимо производить установку нуля МДМ на ненагруженном вращающемся валу.

Пассивная защита от быстро меняющихся влияющих воздействий. Методы пассивной защиты представляют собой те или иные приемы фильтрации, которые позволяют значительно уменьшить пульсации выходного напряжения, а именно: пульсации от несущей частоты (частоты тока возбуждения), высокочастотные составляющие паразитных пульсаций и пульсаций помех (наводок). Устранение низкочастотных составляющих этим методом вызывает затруднения, так как при этом требуются фильтры с конденсаторами большой емкости, что увеличивает инерционность датчика.

Активная защита от медленно изменяющихся влияющих воздействий. Активная защита заключается в стабилизации сравнительно медленно меняющихся величин. В МДМ для питания цепи возбуждения обычно применяют источники, стабилизированные по напряжению. В случае повышенных требований к величине погрешности необходимо также стабилизировать частоту и форму напряжения источника, особенно в случае применения автономного источника питания цепи возбуждения.

Коррекция погрешностей. Задача коррекции систематической погрешности сводится к автоматической оценке возникающей погрешности и автоматическому внесению соответствующей поправки в результат измерения. Применительно к МДМ с помощью этого метода производится коррекция погрешностей от влияния температуры окружающей среды и скорости вращения вала.

Создано устройство коррекции температурной погрешности дифдуктора, сущность которого заключается во введении в измерительную схему второго дифдуктора того же типоразмера, установленного на ненагруженной части чувствительного элемента. Выходы обоих дифдукторов включаются в смежные плечи мостовой схемы, поэтому выходные напряжения обоих МДМ от изменения температуры компенсируют друг друга [авт. свид. № 415518 (СССР)]. В зависимости от поддиапазона крутящего момента каждый из дифдукторов поочередно выполняет роль компенсационного.

Коррекцию скоростной погрешности можно производить введением на выходе МДМ компенсационного напряжения, равного и противоположного по знаку составляющей выходного напряжения, зависящей от этой погрешности. Величину и характер изменения напряжения скоростной погрешности устанавливают экспериментально в процессе тарировки МДМ на рабочем валу.

Конкретные значения погрешностей МДМ различных типов, выпускаемых отечественными организациями и зарубежными фирмами, указаны в п. 23.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСНОВЫ РАСЧЕТА МДМ

Расчет МДМ сводится к определению его параметров и размеров, обеспечивающих получение заданного выходного напряжения при заданном крутящем моменте. Другими словами, задача расчета сводится к получению требуемой чувствительности МДМ при наложении определенных ограничений на ряд его параметров и размеров.

Расчет может быть поверочным и оптимальным. При поверочном расчете путем последовательных изменений (в пределах наложенных ограничений) одного или нескольких параметров или размеров МДМ добиваются равенства расчетного значения выходного напряжения заданному. При оптимальном расчете путем изменения значений параметров и размеров в пределах заданных ограничений добиваются минимума (максимума) критерия оптимальности. В качестве критерия оптимальности может быть, например, выходное напряжение (при заданных габаритах) или масса МДМ (при заданном выходном напряжении) и т. п.

Расчет оптимального варианта является сложной задачей, так как выходное напряжение зависит от многих параметров и размеров, взаимно влияющих друг на друга, и возможен лишь при применении ЭЦВМ, поэтому обычно ограничиваются поверочным расчетом.

Некоторые из величин, входящих в расчетные формулы МДМ, могут быть получены лишь из результатов экспериментов, вследствие чего в настоящей главе рассматриваются определенные экспериментальные зависимости между параметрами МДМ и конструкции стенового оборудования для получения этих зависимостей, а также для тарирования и испытаний МДМ.

20. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СТЕНДЫ

Для получения экспериментальной зависимости выходного напряжения от крутящего момента $U(M)$ в статическом режиме работы МДМ, т. е. при невращающемся вале (чувствительном элементе), может быть использован стенд типа, показанного на рис. 59. Он состоит из рамы 1, на которой установлены две стойки 2 и 12. На стойках укладывают испытуемый вал 5, один конец которого закрепляют неподвижно с помощью планки 3 и болтов 4, а на другом его конце с помощью шпилек 8 укрепляют двуплечий рычаг 11. Усилие на конце рычага создается винтом 7, вращающимся в гайке стойки 9. Величину усилия измеряют динамометром 10 типа ДОСМ,

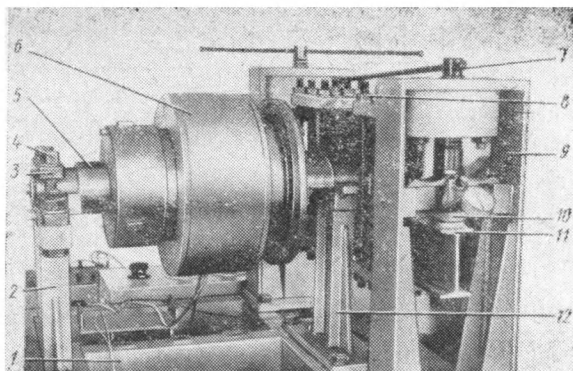


Рис. 59. Испытательный стенд для получения зависимостей $U(M)$ МДМ при невращающемся валу

установленным между винтом и концом рычага. Испытуемый МДМ располагается на валу в корпусе 6, который опирается на вал на подшипниках.

Описанный стенд, являясь простым по конструкции, тем не менее не позволяет получить достаточно полную информацию о МДМ, так как при испытаниях вал не вращается. Чтобы нагрузить вращающийся вал, его следует разместить в стойках на шарикоподшипниках, привести во вращение с помощью электродвигателя и нагрузить крутящим моментом с помощью какого-либо тормоза, например тормоза трения или электрического. При крупных валах нагруженных большими крутящими моментами, такой стенд получается громоздким, сложным и энергоемким.

Стенд можно упростить, если заменить вращение вала относительно неподвижного МДМ вращением МДМ относительно вала,

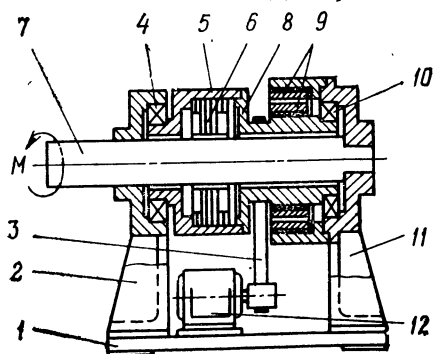


Рис. 60. Испытательный стенд для получения зависимостей $U(M)$ МДМ при вращающемся валу

нагруженного статическим крутящим моментом. Одна из возможных конструкций такого стенда показана на рис. 60 [авт. свид. № 481804 (СССР)]. На раме 1 укреплены стойки 2 и 11, в которых установлен испытуемый вал 7, причем в стойке 11 конец вала защемляется, а на другом его конце создается крутящий момент M . МДМ 6 помещен в корпус 5, который опирается на вал с помощью подшипникового щита 8 и под-

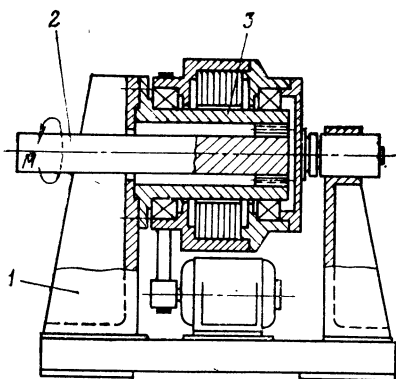


Рис. 61. Испытательный одноопорный стенд для получения зависимостей $U(M)$ МДМ при вращающемся валу

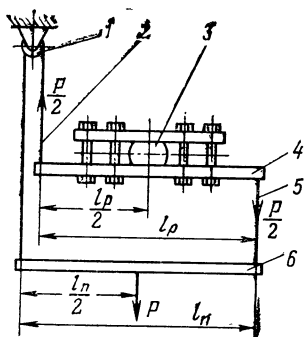


Рис. 62. Конструктивная схема устройства для создания на испытуемом валу крутящего момента

шипников 4 и 10 и приводится во вращение с помощью электродвигателя 12 и механической передачи, например ременной 3. Электрическая связь с вращающимся МДМ осуществляется с помощью токосъемника 9.

Другая конструкция стенда такого типа показана на рис. 61 [авт. свид. № 484421 (СССР)]. Он отличается тем, что полый испытуемый вал 3 укрепляется на стойке 1 консольно. Внутри полого вала проходит вспомогательный вал 2, к которому и приложен крутящий момент. Установка и демонтаж подшипников, корпуса и испытуемого МДМ на этом стенде выполняются проще.

Недостатком обоих типов стендов является необходимость применения токосъемника, что снижает точность измерений.

При создании крутящего момента с помощью рычага, укрепленного на одном из концов вала, и нагрузочного винта или разновесов на валу одновременно возникает и изгибающий момент, что может привести к дополнительной погрешности при тарировке. Крутящий момент на валу возможно создать с помощью несложного устройства, показанного на рис. 62. Рычаг 4, установленный на валу 3 соединяется с планкой 6 двумя тросами 2 и 5, один из которых переброшен через неподвижный блок 1. Усилие P для создания крутящего момента должно быть приложено посередине планки 6. Величина момента на валу

$$M = 0,5Pl_p.$$

Конструкция еще одного стенда показана на рис. 63 [авт. свид. № 381928 (СССР)]. Стенд состоит из испытуемого полого вала 3, внутри которого соосно расположен вспомогательный вал 2. С одного конца валы жестко соединены между собой (сваркой, на шпонке), а с другой снабжены нагружающим приспособлением в виде двуплечего рычага 6 и болтов 5, упирающихся при их завинчивании в выступы 7 вала 3. Величина крутящего момента на валу 3 в этом случае замеряется в статическом режиме каким-либо эталон-

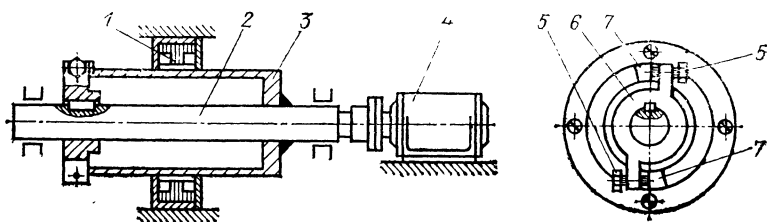


Рис. 63. Стенд для испытаний МДМ при вращающемся валу

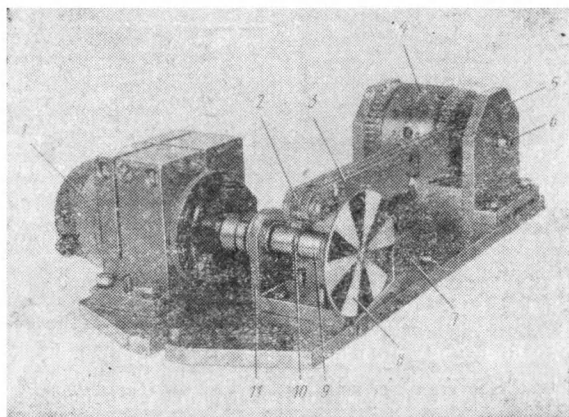


Рис. 64. Внешний вид стенда для динамических испытаний МДМ

ным датчиком момента магнитоупругого или какого-либо другого типа. Испытуемый МДМ 1 размещается вокруг вала 2, приводимого во вращение вместе с валом 3 электродвигателем 4.

Недостатками такого стенда являются необходимость иметь дополнительное эталонное средство измерения момента и невозможность контролировать величины момента в процессе вращения.

Для получения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик используют стенды для динамических испытаний, один из которых показан на рис. 64. Используемый МДМ 4 установлен на валу 6, помещенном на подшипниках в стойках 5. На валу находится рычаг 3 с роликом 2, которым он опирается на эксцентрик 10, посаженный на валик 9, находящийся в стойках 11. При вращении валика 9 электродвигателем 1 рычаг 3, а вместе с ним вал 6 испытывают колебания, близкие к гармоническим; частота колебаний зависит от скорости вращения электродвигателя, которая в данном случае замеряется стробоскопическим методом с помощью секторного диска 8 и неоновой лампы 7, питаемой от генератора звуковой частоты.

Вместо эксцентрикового механизма можно применять также электромагнит, питающийся от генератора переменной частоты.

Для получения экспериментальной переходной функции необходимо на испытуемом валу создать единичную ступенчатую функцию $1(t)$ или $-1(t)$. Функция $-1(t)$ может быть создана с помощью приспособления, показанного на рис 65. Между нажимным винтом 1 и рычагом 6 стенда установлены две закаленные шлифованные призмы 2 и 5, между которыми на роликах 4 зажата усиленная нажимная чека 3. При ударном воздействии на чеку в направлении, указанном на рис. 65 стрелкой, изменение усилия на рычаге по сравнению с временем изменения выходного напряжения МДМ происходит практически ступенчато.

Ступенчатая функция момента на валу может создаваться и другим способом, например путем перекусывания проволоки, на которой подвешен груз на конце рычага, и т. п. В любом случае при этом длина рычага и его масса должны быть минимально возможными, с тем чтобы его момент инерции оказывал минимальное влияние на протекание переходного процесса.

Тарирование МДМ, предназначенных для промышленного применения, можно производить в лабораторных условиях с помощью описанных выше стендов или в производственных условиях непосредственно на валу машины или механизма.

Тарирование в лабораторных условиях на предприятии-изготовителе МДМ возможно при их серийном производстве, когда имеется все необходимое испытательное оборудование, включая образцовые датчики крутящего момента. Тарирование в лабораторных условиях возможно также и при единичном производстве МДМ, если размеры контролируемого вала и датчика невелики и имеются подходящие испытательные стенды. В этом случае может быть произведено как статическое, так и динамическое тарирование на неподвижном и вращающемся валу. Но в любом случае тарирование МДМ должно производиться непосредственно на том валу, который будет установлен в машину или механизм.

В действующих производственных установках, где контролируемые валы имеют большие размеры (например, в прокатном и сортовом оборудовании, на судах и т. п.), ограничиваются статическим тарированием МДМ, которое производится обычно с помощью рычага и разновесов.

21. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ МДМ

Для установления функциональных связей между различными параметрами МДМ с помощью описанных в предыдущем параграфе стендов были получены для различных типов датчиков следующие характеристики.

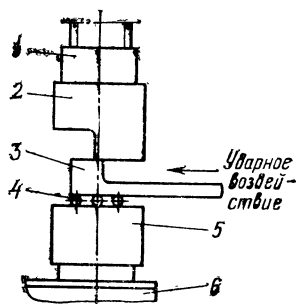


Рис. 65. Приспособление для создания единичной ступенчатой функции на валу МДМ

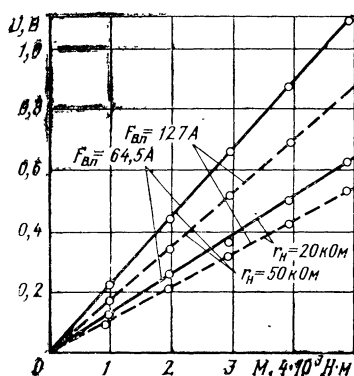


Рис. 66. Экспериментальная выходная характеристика $U(M)$ дифдуктора типа ИПМ-220 с шихтованными магнитопроводами и валом из стали 40X при $W_p = 8,17 \cdot 10^5 \text{ мм}^3$; $r = 100 \text{ кОм}$; $f = 1000 \text{ Гц}$; $\delta = 0,25 \text{ мм}$ и различных $F_{в.п.}$ и r_H

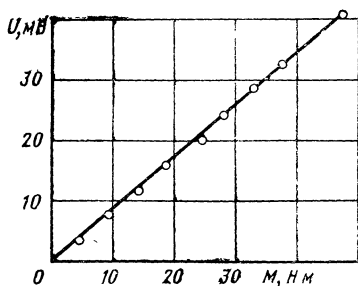


Рис. 67. Экспериментальная выходная характеристика $U(M)$ дифдуктора типа ИПМ-50 со сплошными магнитопроводами и валом из стали 40X при $W_p = 1,58 \cdot 10^4 \text{ мм}^3$; $r = 100 \text{ кОм}$; $f = 400 \text{ Гц}$; $\delta = 0,25 \text{ мм}$; $F_{в.п.} = 173 \text{ А}$; $r_H = 11 \text{ МОм}$

1. Зависимости выходного напряжения от крутящего момента (функции преобразования для различных значений сопротивлений нагрузки r_H , постоянных значений частоты и величины тока возбуждения и неизменной величины воздушного зазора для валов из сталей 45 и 40X.

2. Зависимости выходного напряжения от частоты тока возбуждения при постоянных значениях крутящего момента, тока возбуждения, воздушного зазора и различных сопротивлениях нагрузки для валов из тех же сталей.

3. Зависимости выходного напряжения от МДС возбуждения при постоянных значениях крутящего момента, частоты тока возбуждения, воздушного зазора и различных значениях сопротивления нагрузки для валов из тех же сталей.

На рис. 66 в качестве примера показаны экспериментальные выходные характеристики $U(M)$ для дифдуктора с шихтованными магнитопроводами из электротехнической стали, а на рис. 67 выходная характеристика для дифдуктора со сплошным магнитопроводом. Следует отметить линейный характер функций преобразования обоих

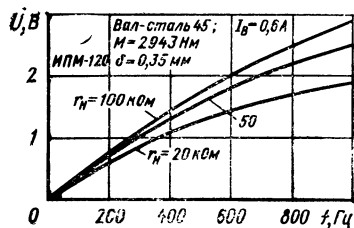


Рис. 68. Экспериментальная зависимость $U(f)$ для дифдуктора типа ИПМ-120 при $M = 2943 \text{ Н·м}$; $W_p = 1,79 \cdot 10^5 \text{ мм}^3$; $r = 100 \text{ кОм}$; $\delta = 0,35 \text{ мм}$; $F_{в.п.} = 120 \text{ А}$ и различных r_H для вала из стали 45

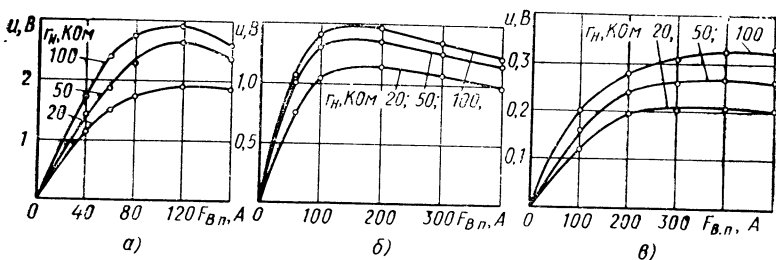


Рис. 69. Экспериментальные зависимости $U(F_{B.n})$ для дифдуктора типа ИПМ-120 с валом из стали 45 при $M=2943 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $W_p = 1,79 \cdot 10^5 \text{ мм}^3$; $r=100 \text{ кОм}$; $\delta=0,35 \text{ мм}$ и различных r_H : а, б, в — для $f=1000, 400$ и 50 Гц соответственно

типов дифдукторов, подтверждающий теоретические соображения, изложенные в п. 13.

На рис. 68 в качестве примера показано семейство характеристик $U(f)$ для дифдуктора с шихтованным магнитопроводом. Из характеристик следует, что выходное напряжение возрастает с ростом частоты тока возбуждения, однако эта зависимость нелинейна. С погрешностью 10—20% можно считать функцию $U(f)$ линейной для частоты до 400 Гц. При частоте тока возбуждения более 400 Гц отклонение от линейной зависимости будет уже большим, достигая при частоте 1000 Гц величины порядка 50%.

Зависимость выходного напряжения $U(F_B)$ — также функция нелинейная, что подтверждается экспериментально. На рис. 69 в качестве примера приведены опытные зависимости $U(F_{B.n})$ для дифдуктора с шихтованным магнитопроводом. Как следует из графиков, функции $U(F_{B.n})$ имеют максимум, который с ростом частоты тока возбуждения сдвигается в сторону меньших значений МДС.

22. РАСЧЕТ ДИФДУКТОРОВ

Выходное напряжение дифдуктора в соответствии с выражениями (99), (100) и (106)

$$U = \frac{45\mu_0^2 K_{\psi} \omega_{II} p_{B.S} s_{II} \gamma d f F_{B.n} r r_H \sin 2\psi}{\mu^2 h \delta^2 W_p (r + r_H) \sqrt{r^2 + x_{II}^2}} M, \quad (142)$$

где действующее значение МДС одного полюса возбуждения

$$F_{B.n} = I_B \omega_B.$$

Частоту тока возбуждения f выбирают из условий возможной частоты изменения измеряемого крутящего момента. Как известно, частота тока возбуждения должна быть в 8—10 раз больше частоты измеряемого процесса, для того чтобы преобразование измеряемой величины производилось без заметных искажений [45]. Выбор повышенного значения f производится также из соображений увеличения чувствительности, которая растет с повышением частоты. Вместе с тем с увеличением частоты растут потери в стали и возрастает

ее магнитное сопротивление, поэтому повышать частоту тока возбуждения имеет смысл лишь до определенного предела, не более чем до 1500—2000 Гц. Практически в МДМ частоту f выбирают из ряда: 50, 400, 500, 1000 Гц.

При выборе частоты f не ниже рекомендуемых значений и при условии достаточно большого значения сопротивлений r и r_H (несколько десятков килоом) внутреннее индуктивное сопротивление измерительной обмотки $X_H \ll r$, и X_H по сравнению с r можно пренебречь как величиной более высокого порядка малости. С учетом этого выражение (142) упростится и примет вид

$$U = \frac{45\mu_0^2 K_\mu \omega_H p_B^2 s_H u_d f F_{B.n} r_H \sin 2\varphi}{\mu^2 h \delta^2 W_p (r + r_H)} M. \quad (143)$$

Зависимости $U(F_{B.n})$ (см. рис. 69) имеют максимум, соответствующий максимуму магнитной проницаемости, в области которого надо выбирать МДС возбуждения $F_{B.n}$ для получения максимума чувствительности дифдуктора. Некоторые исследователи [13, 17] считают, что для снижения погрешности от гистерезиса следует выбирать МДС возбуждения, превышающую значение, соответствующее максимуму чувствительности.

При расчете для получения максимальной чувствительности следует задаваться максимально возможным числом витков катушек измерительных обмоток ω_H и минимальным с точки зрения механической надежности значением воздушного зазора δ .

При расчете следует учитывать, что размеры проекций торцов полюсов на поверхность вала будут несколько больше, чем действительные размеры полюсов, за счет бокового выпучивания магнитного потока.

В этом случае можно воспользоваться методикой, при которой сложное поле в воздушном зазоре заменяется однородным (не имеющим поля выпучивания), при этом действительные размеры полюсов a'_B, b'_B, a'_H, b'_H заменяются расчетными a_B, b_B, a_H, b_H . Поскольку полюсы дифдуктора не насыщены, то из потока выпучивания достаточно учитывать поле с «ребер» торца. Расчетные размеры полюса при этом можно определить по формулам [12]

$$a_B = a'_B + 1,04\delta;$$

$$b_B = b'_B + 1,04\delta;$$

$$a_H = a'_H + 1,04\delta;$$

$$b_H = b'_H + 1,04\delta.$$

Выбор величины полярного момента сопротивления вала W_p производится из условия изгибной и крутильной жесткости вала, уменьшение W_p с целью увеличения чувствительности, как правило, не допускается.

Выбор числа пар полюсов возбуждения p_B и связанных с ним величин полюсного деления τ_p , полюсных шагов τ_1 и τ_0 , коэффициентов u_d и $\sin 2\varphi$ следует производить с учетом данных п. 13.

Из уравнения (143) следует также, что чувствительность дифдук-

тора прямо пропорциональна магнитоупругой чувствительности K_μ и обратно пропорциональна глубине проникновения магнитного потока в вал h и квадрату магнитной проницаемости материала вала μ . С определением этих величин связаны основные трудности расчета дифдукторов.

Как уже отмечалось в п. 1, магнитоупругая чувствительность K_μ зависит от предыстории конкретного образца вала (чувствительного элемента) и меняется в широких пределах в зависимости от химического состава, механической и термической обработки. Кроме того, магнитоупругая чувствительность изменяется от участка к участку вала.

Магнитная проницаемость материала вала μ также зависит от химического состава, механической и термической обработки и меняется от образца к образцу для одной и той же марки стали и от участка к участку одного и того же образца вала.

Из этого можно сделать заключение, что при расчетах следует пользоваться опытными среднестатистическими данными по K_μ^3 и μ для определенного вида термической обработки вала. Такие данные в литературе пока отсутствуют.

Вопросы расчета магнитного поля в поверхностном слое вала рассматривались рядом авторов [17, 19, 24, 38, 44]. Для решения этих вопросов привлекалась теория, разработанная Л. Р. Нейманом [27] и Б. Б. Тимофеевым [41]. Для расчета поля в вале с учетом поверхностного эффекта необходимо решить уравнение Максвелла для трехмерного электромагнитного поля в магнитоанизотропной проводящей среде с учетом зависимости магнитной проницаемости и глубины проникновения электромагнитной волны в вал от напряженности магнитного поля в каждой его точке. С учетом ряда упрощений выражения для построения линий поля и эквипотенциалов некоторыми авторами получены [19, 20, 38], но тем не менее эти выражения не дают возможности рассчитать магнитные сопротивления соответствующих участков вала.

Автором предложена упрощенная методика расчета дифдукторов на базе константы C_D [34, 36]. На основании ряда проведенных экспериментов получены опытные значения величины

$$C_D = \frac{K_\mu}{\mu^2 h}$$

при следующих допущениях:

а) глубина проникновения магнитного потока в тело вала h одинакова по всей поверхности вала;

б) начальная (т. е. при $M=0$) магнитная проницаемость μ и магнитоупругая чувствительность K_μ одинаковы как по всей поверхности вала, так и по всей глубине проникновения магнитного потока в тело вала.

Решим уравнение (143) относительно величины C_D :

$$C_D = \frac{U}{45\rho_{ВД}G_{В\delta}G_{И\delta}\omega_{И} \frac{r_{Н}}{r+r_{Н}} \tau f F_{В.п} \sin 2\varphi}, \quad (144)$$

где магнитная проводимость воздушного зазора под полюсом возбуждения

$$G_{B\delta} = \frac{\mu_0 s_B}{\delta};$$

магнитная проводимость воздушного зазора под измерительным полюсом

$$G_{M\delta} = \frac{\mu_0 s_M}{\delta}.$$

Величина C_D имеет размерность

$$\frac{\frac{B}{H}}{\frac{H}{m^2} \Gamma_H^2 \cdot \Gamma_C \cdot A} = \frac{m^2}{H \cdot \Gamma_H}.$$

Из выражения (144) и его размерности следует, что параметр C_D представляет собой напряжение дифдуктора, приходящееся на единицу механического напряжения вала, на квадрат единицы индуктивности, на единицу частоты и МДС возбуждения; а также в расчете на один полюс возбуждения, на один виток измерительной обмотки и на единицу других параметров и размеров.

В приложении (рис. 1П—6П) приведены зависимости $C_D (F_{B.п})$, пользуясь которыми, можно рассчитать выходное напряжение дифдуктора с шихтованными магнитопроводами. Значения параметров C_D вычислены с помощью формулы (144) и экспериментальных зависимостей $U (F_{B.п})$ для валов из наиболее употребительных сталей (нормализованных сталей 45 и 40Х) при частотах $f=50, 400$ и 1000 Гц. В качестве МДМ использовали дифдуктор типа ИПМ-120 с шихтованными магнитопроводами, а зависимости $U (F_{B.п})$ получены для воздушных зазоров $\delta=0,25 \div 0,65$ мм, сопротивлений измерительной схемы $r=100$ Ом и при различных сопротивлениях нагрузки r_H и $M=\text{const}$.

Параметры обмотки возбуждения МДМ (напряжение питания, число витков и др.) можно определить, вычислив индуктивное сопротивление полюсной катушки обмотки возбуждения по формуле

$$x_B = 2\pi f L_B, \quad (145)$$

где L_B — индуктивность полюсной катушки.

Величина L_B может быть выражена следующим образом:

$$L_B = \frac{w_B^2}{R_B}, \quad (146)$$

где магнитное сопротивление

$$R_B = R_{B\delta} + R_{B.ж} + R_{B.в};$$

$R_{B\delta}$, $R_{B.ж}$, $R_{B.в}$ определяется по формулам (16), (28) и (30). Поскольку $R_{B\delta} \gg R_{B.ж} + R_{B.в}$, можно приближенно считать $R_B \approx R_{B\delta}$. При этом формула (146) с учетом выражения (28) примет вид

$$L_B \approx \frac{w_B^2 \mu_0 s_B}{\delta}. \quad (147)$$

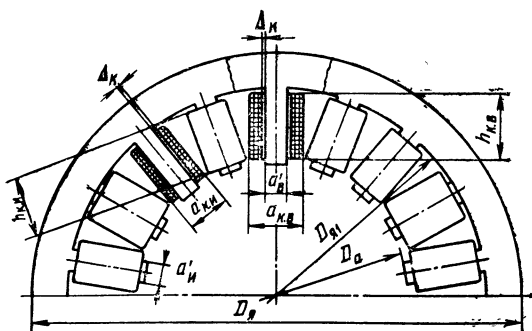


Рис. 70. Основные размеры дифдуктора (к примеру расчета)

Ввиду того, что величина L_B зависит от площади проекции торцов полюсов возбуждения и числа витков, введем понятие удельной индуктивности

$$L_{B.y} = \frac{L_B}{w_B^2 s_B} = \frac{\mu_a}{\delta}.$$

В приложении (рис. 7П) помещены зависимости $L_{B.y}(\delta)$, пользуясь которыми, можно рассчитать x_B в соответствии с выражениями (145—147). Значения параметров $L_{B.y}$ вычислены с помощью формулы (147) на основе экспериментальных зависимостей $L_B(\delta)$, которые были получены с помощью дифдуктора ИПМ-120 для частот $f=50, 400$ и 1000 Гц на нормализованных валах из сталей 45 и 40Х в пределах изменения воздушных зазоров $\delta=0,25 \div 0,65$ мм.

Пример расчета. Рассчитать дифдуктор для измерения крутящего момента вала из стали 40Х. Пределы изменения крутящего момента вала $M=0 \div 3000$ Н·м; вал — сплошного сечения с наружным диаметром $D_B=0,085$ м. Место, где возможна установка МДМ, ограничено размерами: по диаметру — $0,2$ м, в осевом направлении — $0,08$ м. Частота тока возбуждения 50 Гц, частота вращения вала $50 \div 1000$ об/мин.

Определяем напряжения кручения вала при максимальном крутящем моменте:

$$\tau = \frac{M}{w_p} = \frac{M}{0,2 D_B^3} = \frac{3000}{0,2 \cdot 0,085^3} = 2,45 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2 = 24,5 \text{ Н/мм}^2.$$

При таких напряжениях кручения линейность функции преобразования дифдуктора будет обеспечена.

Исходя из допустимых габаритных размеров МДМ, выбираем следующие размеры и параметры активной части дифдуктора (рис. 70):

Число пар полюсов возбуждения p_B	3
Внутренний диаметр расточки дифдуктора $D_{a,м}$	$85,5 \cdot 10^{-3}$

Односторонний воздушный зазор δ , м	$0,25 \cdot 10^{-3}$
Наружный диаметр магнитопровода $D_{\text{я}}$, м	0,16
Внутренний диаметр магнитопровода $D_{\text{я}}$, м	0,136
Поперечные размеры полюса возбуждения (ширина \times толщину) $a_{\text{В}} \times a'_{\text{В}}$, м	$7 \cdot 10^{-3} \times 7 \cdot 10^{-3}$
То же, измерительных полюсов $a_{\text{И}} \times a'_{\text{И}}$, м	$7 \cdot 10^{-3} \times 7 \cdot 10^{-3}$
Число витков полюсной катушки измерительной обмотки $w_{\text{И}}$	500
Соединение катушек измерительной обмотки	Последовательное
Сопротивление измерительной схемы r , Ом	10^5
Сопротивление нагрузки $r_{\text{Н}}$, Ом	$0,2 \cdot 10^5$
Материал магнитопроводов дифдуктора	Сталь электротехническая листовая Э21, толщина 0,5 мм

Определяем полюсное деление по расточке МДМ (см. рис. 34):

$$\tau_p = \frac{\pi D_a}{2p_B} = \frac{3,14 \cdot 85,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} = 44,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Передний полюсный шаг

$$\tau_1 = \frac{2}{3} \tau_p = \frac{2}{3} \cdot 44,5 \cdot 10^{-3} = 29,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \approx 30 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Задний полюсный шаг

$$\tau_0 = \tau_p - \tau_1 = (44,5 - 30) 10^{-3} = 14,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Площади проекций полюсов возбуждения и измерительных на поверхности вала с учетом бокового выпучивания магнитного потока с ребер полюсов

$$a_{\text{В}} = b_{\text{В}} = a_{\text{И}} = b_{\text{И}} = a'_{\text{В}} + 1,04\delta = (7 + 1,04 \cdot 0,25) 10^{-3} = 7,26 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Определим размер b_0 (см. рис. 34) из условия равенства $\psi = 45^\circ$ по формуле

$$b_0 = 0,5(\tau_1 - b_{\text{В}} - b_{\text{И}}) = 0,5(30 - 7,26 - 7,26) 10^{-3} = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Толщина кольца между магнитопроводами возбуждения и измерительными

$$b'_0 = b_0 + (b_{\text{В}} - b'_0) + (b_{\text{И}} - b'_0) = [7,8 + (7,26 - 7) + (7,26 - 7)] 10^{-3} = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Магнитная проводимость воздушных зазоров под полюсами возбуждения и измерительными

$$G_{\text{В}\delta} = G_{\text{И}\delta} = \frac{\mu_0 s_{\text{В}}}{\delta} = \frac{\mu_0 a_{\text{В}} b_{\text{В}}}{\delta} = \frac{1,256 \cdot 10^{-12} \cdot 7,26 \cdot 10^{-3} \cdot 7,26 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 10^{-3}} = 0,265 \cdot 10^{-12} \text{ Гн.}$$

Угол

$$\psi = \operatorname{arctg} \left(\frac{2b_0 + b_B + b_H}{\tau_1} \right) = \operatorname{arctg} \frac{(2 \cdot 7,8 + 7,26 + 7,26) 10^{-3}}{30 \cdot 10^{-3}} \approx \\ \approx \operatorname{arctg} 1 \approx 45^\circ; \\ \sin 2\psi = \sin 2 \cdot 45^\circ = \sin 90^\circ = 1.$$

Определим величину y_D . Ее можно вычислить по выражениям (101)—(104) или определить по кривым (см. рис. 37, 39—41). Воспользуемся вторым способом, который требует значительно меньшего объема вычислений.

Относительные значения величин:

$$\tau_0^* = \tau_0 / \tau_1 = 14,5 \cdot 10^{-3} / 30 \cdot 10^{-3} = 0,48; \\ a_B^* = b_B^* = a_H^* = b_H^* = a_B / \tau_1 = 7,26 \cdot 10^{-3} / 30 \cdot 10^{-3} = 0,24.$$

По относительным значениям τ_0^* и a_B^* , b_B^* , a_H^* , b_H^* , пользуясь одним из графиков (см. рис. 37, 39—41), определяем

$$y_D = 0,043.$$

Пользуясь выражением (144), вычисляем

$$U = (45 p_B y_D G_{B\delta} G_{H\delta} w_H \tau f \frac{r_H}{r + r_H} \cdot \sin 2\psi) C_D F_{B.n} = \\ = 45 \cdot 3 \cdot 0,043 \cdot 0,265 \cdot 10^{-12} \cdot 0,265 \cdot 10^{-12} \cdot 500 \cdot 24,5 \cdot 50 \times \\ \times \frac{0,2 \cdot 10^6}{(1 + 0,2) \cdot 10^6} \cdot 1 C_D \cdot F_{B.n} = 0,0417 C_D F_{B.n}.$$

Задаваясь рядом значений МДС полюсной катушки $F_{B.n}$ дифдуктора по графику (см. приложение, рис. 4П, а), определяем значения константы C_D и вычисляем ряд значений функции $U = f(C_D F_{B.n})$. Результаты вычислений сведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Расчетные данные

МДС полюсной катушки возбуждения $F_{B.n}$, А	60	100	150	200	300	400
Константа C_D , $m^2/(H \cdot Гн)$	0,044	0,039	0,032	0,028	0,020	0,014
Выходное напряжение дифдуктора $U = 0,0417 C_D F_{B.n}$, В	0,11	0,16	0,20	0,23	0,25	0,23

Из условия максимального значения выходного напряжения МДМ следовало бы принять $F_{B.n} = 300$ А, однако размещение числа витков полюсных катушек возбуждения, обеспечивающего такую МДС, потребует увеличения габаритных размеров дифдуктора.

Исходя из этих соображений, выбираем $F_{В.п}=150$ А, при этом снижение выходного напряжения по сравнению с его максимальным значением составит величину всего 20%.

Принимаем напряжение питания обмотки возбуждения $U_B=48$ В, соединение катушек в обмотке возбуждения — последовательное (ток обмотки I_B равен току катушки $I_{В.п}$).

Полагая, что индуктивное сопротивление обмотки возбуждения x_B равно ее полному сопротивлению z_B , найдем выражение

$$U_B = I_{В.п} x_B. \quad (a)$$

Ток возбуждения полюсной катушки

$$I_{В.п} = \frac{F_{В.п}}{w_B}. \quad (б)$$

В соответствии с выражениями (145)—(147)

$$x_B = 2x_{B.п} p_B = 2\pi f L_{B.y} w_B^2 a_B b_B. \quad (в)$$

Удельную индуктивность определяем по графику (см. приложение, рис. 7П, б):

$$L_{B.y} = 0,0054 \text{ Г/м}^2.$$

С учетом выражений (a)—(в)

$$w_B = \frac{U_B}{4\pi F_{В.п} f p_B L_{B.y} a_B b_B} = \frac{48}{4 \cdot 3,14 \cdot 150 \cdot 50 \cdot 3 \cdot 0,0054 \cdot 7,26 \cdot 10^{-3} \cdot 7,26 \cdot 10^{-3}} = 600.$$

Ток возбуждения

$$I_B = I_{В.п} = \frac{F_{В.п}}{w_B} = \frac{150}{600} = 0,25 \text{ А}.$$

Принимаем плотность тока в обмотке возбуждения $\Delta_B = 6 \times 10^6 \text{ А/м}^2$. Требуемое сечение обмоточного провода

$$q_B = \frac{I_{В.п}}{\Delta_B} = \frac{0,25}{6 \cdot 10^6} = 42 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2.$$

Выбираем для катушек обмотки возбуждения медный обмоточный провод марки ПЭТВ диаметром по меди $d_B = 0,23 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ с площадью поперечного сечения меди $q_B = 41,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.

Площадь поперечного сечения меди катушки обмотки возбуждения

$$Q_B = w_B q_B = 600 \cdot 41,5 \cdot 10^{-9} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Определяем допустимые размеры поперечного сечения катушки обмотки возбуждения (см. рис. 70). Высота полюса возбуждения

$$h_{П.В} = 0,5 (D_{j1} - D_a) = 0,5 (136 - 85,5) 10^{-3} = 25,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Принимаем высоту катушки полюса возбуждения

$$h_{\text{к.в}} = 23 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Исходя из размеров полюсов и расстояний между ними, принимаем зазор между катушкой и полюсом $\Delta_{\text{к}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, ширину катушки $a_{\text{к.в}} = 18 \cdot 10^{-3}$ м.

Коэффициент заполнения площади поперечного сечения катушки обмотки возбуждения медью

$$K_{3.м} = \frac{Q_{\text{в}}}{0,5h_{\text{к.в}}(a_{\text{к.в}} - a'_{\text{в}} - 2\Delta_{\text{к}})} = \\ = \frac{25 \cdot 10^{-6}}{0,5 \cdot 23 \cdot 10^{-3}(18 - 7 - 2 \cdot 0,5) 10^{-3}} = 0,22,$$

что находится в допустимых пределах.

Проверим коэффициент заполнения медью площади поперечного сечения катушки измерительной обмотки. Высота катушки измерительной обмотки

$$h_{\text{к.и}} = h_{\text{к.в}} = 23 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

а ее ширина

$$a_{\text{к.и}} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для катушек измерительной обмотки также выбираем провод ПЭТВ диаметром $d_{\text{и}} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м и площадью поперечного сечения меди $q_{\text{и}} = 31,4 \cdot 10^{-9}$ м².

Площадь поперечного сечения меди катушки измерительной обмотки

$$Q_{\text{и}} = w_{\text{и}} q_{\text{и}} = 500 \cdot 31,4 \cdot 10^{-9} = 15,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Коэффициент заполнения площади поперечного сечения катушки измерительной обмотки медью

$$K_{3.м} = \frac{Q_{\text{и}}}{0,5h_{\text{к.и}}(a_{\text{к.и}} - a'_{\text{и}} - 2\Delta_{\text{к}})} = \\ = \frac{15,7 \cdot 10^{-6}}{0,5 \cdot 23 \cdot 10^{-3}(14 - 7 - 2 \cdot 0,5) 10^{-3}} = 0,23,$$

что находится в допустимых пределах.

Оценим величину магнитной индукции в полюсе возбуждения. Приблизительное значение магнитной индукции с учетом коэффициента заполнения пакета сердечника сталью $K_{3.с} = 0,95$

$$B_{\text{в.п}} \approx \frac{\mu a F_{\text{в.п}}}{\delta K_{3.с}} = \frac{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 150}{0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 0,76 \text{ Тл,}$$

что ниже допустимых значений индукции.

ПРИМЕНЕНИЕ МДМ В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ

23. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОБРАЗЦЫ МДМ

Рассмотрим устройство МДМ, выпускаемых для применения в различных промышленных объектах.

Дифдуктор типа ИПМ-220, спроектированный в Киевском институте автоматики, предназначен для измерения крутящего момента шпинделя станка 1Б732ФЗ. Он состоит (рис. 71) из шихтованного магнитопровода возбуждения 1 с числом полюсов возбуждения $2p_v=12$ и двух шихтованных измерительных магнитопроводов 2 с 24 полюсами на каждом магнитопроводе. Пакет магнитопроводов с торцов зажат двумя фланцами 3 и 4 с помощью винтов 5. Внутренняя полость дифдуктора залита эпоксидным компаундом. Дифдуктор соответствует техническим условиям ТУ 25.15(2Ж2.782.022ТУ)—73 и устанавливается на вал диаметром 220 мм. Габаритные размеры ИПМ-220 $360 \times 360 \times 75$ мм, масса 9 кг. Датчик предназначен для работы при температуре воздуха от ± 5 до $+80^\circ\text{C}$, относительной влажности до 80% и воздействии смазочных масел.

Выходное напряжение при номинальном крутящем моменте 500 Н·м составляет 1 В, основная приведенная погрешность всего измерительного устройства $\pm 2,5\%$, порог чувствительности 5 Н·м. Срок службы дифдуктора 6 лет.

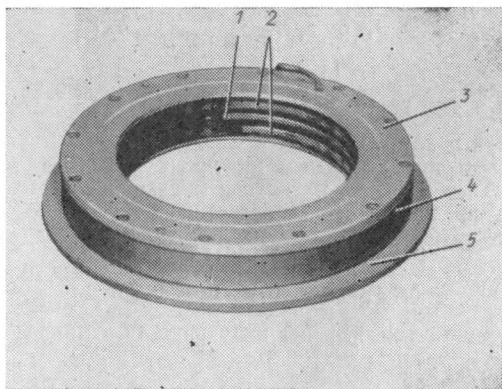


Рис. 71. Внешний вид дифдуктора ИПМ-220

Некоторые технические данные и размеры дифдукторов типа МИМ

Тип дифдуктора	Диаметр вала D , мм	Основные размеры дифдукторов, мм					Число полюсов		Число витков катушек	
		$D_я$	h	L	L_1	δ	возбуждения	измерительных	возбуждения	измерительных
МИМ-45	45	219	124	370	330	1,5	2	8	9500	500
МИМ-55	55									
МИМ-70	70									
МИМ-85	85	299	144	450	350	2,5	4	16	6500	
МИМ-110	110									
МИМ-140	140									
МИМ-175	175									
МИМ-215	215	351		500	405		6	24		

Исследования различных типов МДМ показали возможность выполнения магнитопроводов массивными из низкоуглеродистой стали, что значительно упрощает их конструкцию. Такие МДМ спроектированы в Челябинском политехническом институте и применены для измерения крутящих моментов в бумагоделательных машинах и прокатных станах [37]. Основой дифдуктора такой конструкции является ядро 5 (рис. 72) в виде отрезка трубы с тремя рядами круглых отверстий. В средний ряд вставлены полюсы 7, несущие катушки возбуждения 6, в крайние ряды — полюсы 8 с измерительными катушками 9.

Дифдуктор устанавливают по отношению к валу концентрично с воздушным зазором δ . Для удобства монтажа датчика на валу его ядро выполняют разъемным, состоящим из двух половин, к каждой из которых приварены пластины 1 и 3. Половины МДМ стягивают болтами 2, обеспечивая плотное прижатие поверхностей разъема, исключающее появление в процессе эксплуатации зазора между ними. Обе половины МДМ с торцов закрыты крышками 4.

Катушки возбуждения В соединены между собой параллельно так, что полюсы возбуждения имеют чередующуюся полярность (рис. 73). Цепь возбуждения питается от промышленной сети переменного тока (220 В, 50 Гц) через стабилизатор типа ФСН-200. Катушки И соединены в две измерительные обмотки. Для коммутации с внешними цепями используют штепсельные разъемы Ш.

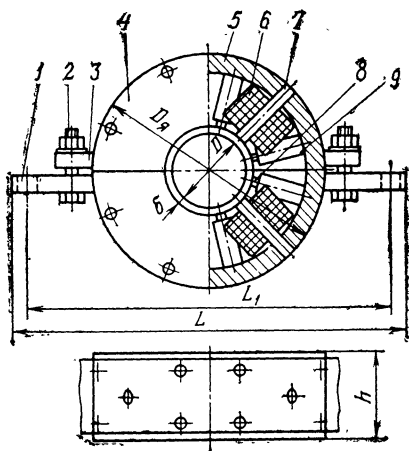


Рис. 72. Дифдуктор типа МИМ с магнитопроводом из сплошной стали

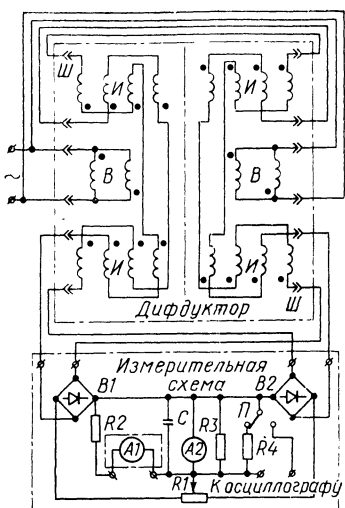


Рис. 73. Принципиальная электрическая схема дифдуктора типа МИМ

Разработанный ряд дифдукторов типа МИМ включает восемь типоразмеров для валов с диаметрами от 45 до 215 мм. Основные размеры и некоторые параметры дифдукторов этого ряда приведены в табл. 2, обозначение размеров — на рис. 72.

При проектировании было обращено внимание на унификацию деталей и заготовок (см. табл. 2). Ярма дифдукторов изготовлены из горячекатаной стали, полюсы — из круглой стали марки 10.

Необходимым условием качественной работы МДМ является постоянство зазора между его расточкой и валом. Исследования показали, что радиальное смещение вала по отношению к расточке МДМ из-за наличия вращающегося эксцентриситета и других причин не должно превышать значения $\delta/4$. При этом дополнительная приведенная погрешность МДМ из-за изменений чувствительности, по данным разработчиков, не выходит за пределы 2%.

Для машин и механизмов, у которых возможны большие перемещения валов, разработано другое исполнение дифдукторов, где вместо боковых крышек установлены подшипниковые щиты. В этом случае дифдуктор устанавливается на валу на шарикоподшипниках. Для исключения вращения датчика вместе с валом предусмотрено рычажно-пружинное удерживающее устройство.

Электрическая измерительная схема состоит из выпрямительных мостов В1 и В2 (см. рис. 73), регулирующего резистора R1, добавочных резисторов R2—R4, переключателя П и двух микроамперметров типа М4204 на 50 мкА. Один из них (А1) установлен на посту управления контролируемой машины, его шкала градуирована в единицах момента. Для введения прибора в шкалу служат резисторы R2 и R3. Второй прибор (А2) монтируется в блоке измерения и

служит для настройки схемы, проверки работы устройства и т. п. Резистор $R1$ служит для регулировки нулевого значения выходного напряжения при нулевом значении крутящего момента на контролируемом валу. В измерительной схеме предусмотрена также возможность присоединения вибратора осциллографа с сопротивлением, равным сопротивлению замещающего резистора $R4$.

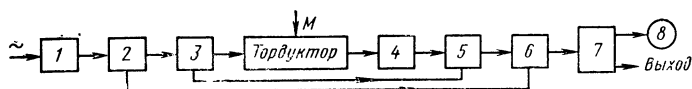


Рис. 74. Структурная схема устройства измерения крутящего момента фирмы ASEA

Для получения достаточно высокой точности измерений (приведенная погрешность не выше 3%) градуировка дифдуктора должна производиться на рабочем валу.

Фирма ASEA (Швеция) выпускает торсиометр QUTT108 — новое стандартизированное устройство для измерения крутящего момента неподвижных или вращающихся валов [57]. Основой этого устройства является тордуктор. Устройство рассчитано на номинальные крутящие моменты от 50 до 1000 Н·м.

Устройство состоит из тордуктора типа QGTB101 и приборного блока типа QJPA108. Тордуктор имеет магнитопровод с обмотками возбуждения и измерительной (см. п. 2), размещенный в корпусе, стальной измерительный вал, два подшипниковых щита и два подшипника, с помощью которых корпус опирается на вал. Номинальный момент датчика зависит от размеров измерительного вала, который включается в тракт передачи крутящего момента последовательно. Корпус тордуктора может устанавливаться на специальной панели, предотвращающей перекус вала при монтаже и вращении корпуса относительно вала.

Приборный блок (рис. 74) состоит из выпрямителя сетевого напряжения 1, стабилизатора выпрямленного напряжения 2, генератора высокой частоты 3, блока согласования 4, фазочувствительного выпрямителя 5, потенциометра установки нуля прибора 6, фильтра нижних частот 7 и индикаторного прибора 8.

Для питания обмотки возбуждения тордуктора применяется напряжение 220 В частотой 1000 Гц, получаемое от генератора 3. Эта частота обеспечивает достаточно высокую точность измерений при высоких скоростях вращения вала. Выпрямление выходного напряжения тордуктора производится фазочувствительным выпрямителем 5 для достижения чувствительности к знаку момента. Блок установки нуля 6 служит для приведения в соответствие нулевого значения индикаторного прибора с нулевым значением момента, а фильтр 7 обеспечивает сглаживание пульсаций выходного напряжения, которое поступает на индикаторный прибор и внешний выход для использования его в других устройствах управления. В качестве индикаторного прибора применяется магнитоэлектрический прибор с зеркальной шкалой, проградуированной в единицах измерения момента. При необходимости с помощью переключателя прибор может быть выключен и заменен резистором, с тем, чтобы избежать его повреждения в наладочных режимах работы.

Технические и метрологические характеристики устройства измерения крутящего момента QUTT108 следующие:

Ряд номинальных измеряемых моментов, Н·м 50, 100, 200, 500, 1000

Диапазон частот вращения вала, об/мин:

при использовании стандартных подшипников:
в длительном режиме работы 0—10 000
в кратковременном 0—12 000
при использовании специальных подшипников 0—15 000

Устройство питается от сети переменного тока
частотой, Гц 45—450
напряжением, В 110 или 220
Допустимые колебания напряжения питания, % ± 10

Потребляемая мощность, В·А, не более 90
Выходное напряжение устройства при номинальном крутящем моменте, В $\pm 0,8$

Погрешность от напряжения помех при вращении вала, % 1
Входной импеданс нагрузки, кОм, не менее 200
Диапазон измеряемых частот, Гц 0—250
Погрешность измерения, % 1,5
Допускаемая температура окружающей среды, °С:
для тордуктора 0—60
для приборного блока 10—40
Общая масса устройства, кг 28
в том числе приборного блока 15

Устройство QUTT108 предназначено в основном для лабораторного использования и нашло применение при разработке и испытаниях редукторов, компрессоров, насосов, вентиляторов, турбин, двигателей внутреннего сгорания, тормозных систем и мостов автомобилей на заводах, в научно-исследовательских учреждениях и учебных заведениях.

Для измерения крутящего момента в промышленных установках, главным образом гребных валах морских судов, фирмой ASEA разработан ряд тордукторов типа QGTA101—*m**, включающий девять типоразмеров для валов диаметром от 60 до 950 мм. Предельная частота вращения вала для каждого из типоразмеров

Т а б л и ц а 3

Некоторые технические характеристики тордукторов QGTA 101 фирмы ASEA

Число полюсов возбуждения	Диаметр вала, мм		Частота вращения вала, об/мин, не более при частоте тока возбуждения, Гц		
	минимальный	максимальный	50	60	400
4	60	150	1000	1200	8000
8	150	250	500	600	4000
12	250	350	330	400	2600
16	350	450	250	300	2000
20	450	550	200	240	1600
24	550	650	170	200	1300
28	650	750	140	170	1100
32	750	850	125	150	1000
36	850	950	110	135	900

* Вторая цифра (*m*) в обозначении типа тордуктора соответствует числу полюсов возбуждения.

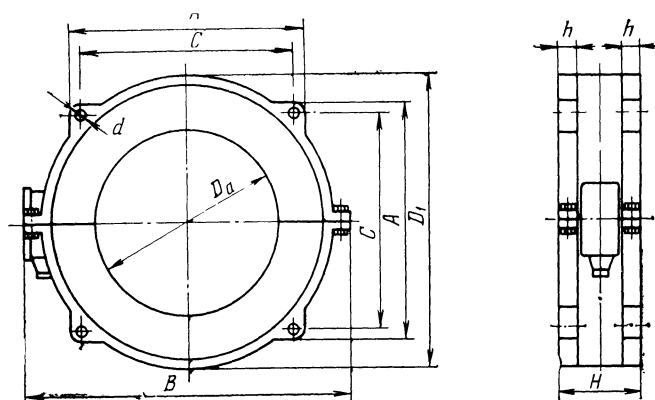


Рис. 75. Внешний вид тордуктора QGTA 101 фирмы ASEA

тордукторов зависит от числа полюсов и частоты тока возбуждения (50, 60 или 400 Гц) и лежит в пределах 110—8000 об/мин.

На рис. 75 показан наружный вид тордукторов QGTA101, а в табл. 4 приведены габаритно-присоединительные размеры различных типоразмеров этих МДМ. Магнитопроводы и корпуса тордукторов выполнены разъемными, что упрощает их встройку в существующие механизмы.

Таблица 4

Габаритно-присоединительные размеры тордукторов QGTA 101 Фирмы ASEA

Число полюсов возбуждения	Размеры, мм							Масса, кг
	D_1	A	B	C	H	h	d	
4	346	320	416	280	135	20	15	40
8	440	400	515	350	135	20	15	60
12	542	480	612	420	135	20	18	80
16	650	560	720	500	135	20	18	100
20	750	640	830	570	145	25	22	130
24	850	740	930	650	145	25	22	150
28	950	830	1045	730	155	30	25	180
32	1050	900	1145	800	155	30	25	200
36	1160	960	1270	880	165	35	28	230

Примечание. Диаметр расточки тордукторов $D_a = D_B + 3$ мм, где D_B — диаметр вала.

Тордукторы QGTA101 можно устанавливать на валах из магнитной стали различных марок. Для достижения высокой точности измерения поверхность вала должна быть подвергнута чистовой проточке или шлифованию, а в качестве термообработки должна быть выполнена нормализация как перед финишной обработкой, так и после нее.

Амплитуда паразитных пульсаций выходного напряжения тордукторов QGTA101, возникающих при вращении термообработанных валов, не превышает, по данным фирмы, 1—3%, а начальное выходное напряжение (при $M=0$) составляет $\pm 10\%$ от номинального напряжения. Для тех же валов без термообработки паразитные пульсации составляют 10—20%, а начальное напряжение достигает 50%. Приведенные цифры свидетельствуют о большом влиянии термообработки на точность измерения момента.

Напряжения кручения в валу должны находиться в пределах 20—60 Н/мм², а для получения стандартного выходного напряжения они должны составлять 30 Н/мм². Участок вала, на котором устанавливается тордуктор QGTA101, должен иметь постоянное поперечное сечение длиной не менее 250 мм. Некруглость вала и его эксцентриситет не должны превышать $\pm 0,5$ мм. Односторонний воздушный зазор между валом и полюсами должен составлять 1,5 мм.

Фирма оговаривает необходимость тарирования тордуктора совместно с валом и фиксации датчика на валу от смещения в осевом направлении.

Обычно тордуктор поставляют с приборным блоком QIPB153,

Это комплектное устройство измерения крутящего момента характеризуется следующими техническими и метрологическими данными:

Напряжение питания однофазного переменного тока частотой	
400 Гц, В	110, 127, 220, 240
Допустимые колебания напряжения и частоты, %	± 1
Потребляемая мощность, В·А, не более	350
Допустимая температура окружающей среды, °С:	
при монтаже приборного блока в общем шкафу	0—55
при монтаже в виде отдельного прибора	0—70
Номинальное выходное напряжение устройства (постоянный ток) при напряжениях кручения в валу 30 Н/мм ² , В	
Предельный ток нагрузки, мА	10
Погрешность тарирования тордуктора зависит от метода тарирования и погрешности эталонной измерительной системы.	5
Погрешность линейности функции преобразования, %	± 1
Погрешность от гистерезиса, %	± 1
Изменение чувствительности от температуры, %/°С	$\pm 0,01$
Уход нулевых показаний устройства, %/°С	$\pm 0,01$

В научно-производственном объединении «Геотехника» разработан и выпускается ряд типоразмеров тордукторов, которые применяются в системах наземного контроля крутящего момента, передаваемого колонной труб при бурении скважин [15]. Устройство тордукторов описано в п. 2, а некоторые их технические данные приведены в табл. 5. После сборки внутреннюю полость тордуктора заливают эпоксидным компаундом, обеспечивающим его защиту от механических воздействий и проникновения влаги. Наилучшие результаты при измерении крутящих моментов были получены для валов из стали марок 38ХМЮА и 40Х, подвергнутых двукратному отжигу с последующей нормализацией. Такая термообработка снимает внутренние напряжения и улучшает магнитные свойства валов. Эксцентриситет расточки тордуктора относительно вала не должен превышать 0,05 мм, поверхность вала должна быть подвергнута чистовой проточке или шлифованию.

Тордукторы обеспечивают погрешность преобразования не хуже $\pm 1,5\%$ при температурной погрешности не более $\pm 0,5\%$ на

Таблица 5

Некоторые технические данные и размеры тордукторов типа ДМ

Тип тордуктора	Диаметр вала, мм	Номинальный крутящий момент*, Н·м	Диаметр расточки тордуктора, мм	Наружный диаметр тордуктора, мм
ДМ $\frac{40}{25}$	40	250	40,8	90
ДМ $\frac{50}{50}$	50	500	50,8	90
ДМ $\frac{60}{90}$	60	900	60,8	115
ДМ $\frac{75}{175}$	75	1750	75,8	145
ДМ $\frac{90}{300}$	90	3000	90,8	140
ДМ $\frac{105}{500}$	105	5000	105,8	160
ДМ $\frac{120}{750}$	120	7500	120,8	170

* Номинальный крутящий момент относится к валам сплошного сечения.

каждые 10°C. Напряжение возбуждения равно 36 В при частоте 50 Гц. Потребляемая мощность не превышает 2,5 В·А, выходное напряжение при номинальном крутящем моменте составляет 1,5 В. С изменением знака момента фаза выходного напряжения изменяется на 180°.

24. КОНТРОЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Крестовой МДМ был применен для записи величины крутящего момента на гребном валу буксира с крыльчатым движителем [48]. Основной задачей, поставленной при проведении замеров момента на гребном валу буксира при работе его в ледовых условиях, было получение сведений о количестве и относительной интенсивности ударов лопастей движителя о лед при ходе судна в битом льду с различной скоростью. С этой целью осциллограф подключали к МДМ в момент прохождения судном полосы льда, который, попадая под лопасти крыльчатого движителя, вызывал соответствующие удары по лопастям. Последнее приводило к изменению величины момента в гребном валу, что и фиксировалось на осциллограмме.

Изучение осциллограмм показало, что характер изменения момента предполагает попадание под лопасти довольно значительных масс битого льда и шуги с включением отдельных крупных льдин.

С помощью МДМ оказывается возможным не только непрерывно измерять крутящий момент, но и контролировать эффективность

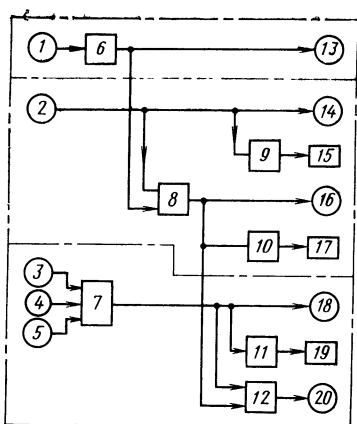


Рис. 76. Структурная схема измерителя крутящего момента и мощности на гребном валу и удельного расхода топлива судов

На гребном валу устанавливают тордуктор 1, выходной сигнал которого через измерительный преобразователь 6 поступает на показывающий или регистрирующий прибор 13 (схема приборного блока тордуктора описана в п. 22). С гребным валом сочленяется также тахометр 2, представляющий собой тахогенератор переменного тока, в качестве выходного сигнала которого используется частота. Импульсы тахогенератора преобразуются в прямоугольные импульсы постоянной длительности, следующие с частотой, пропорциональной выходной частоте тахогенератора. К тахогенератору подсоединен прибор 14, индицирующий или регистрирующий частоту вращения вала. Одновременно выходной сигнал тахогенератора проходит через блок интегрирования 9 и поступает на счетчик числа оборотов вала 15.

Устройство измерения мощности на гребном валу имеет блок умножения 8, в котором происходит перемножение выходных сигналов тордуктора и тахогенератора и показывающего или регистрирующего прибора 16. С выхода блока умножения 8 сигнал поступает также на блок интегрирования 10, выход которого соединен со счетчиком энергии 17.

Система содержит также устройство измерения расхода дизельного топлива, которое состоит из датчика расхода топлива 3, датчика температуры топлива 4, задатчика плотности топлива 5, измерительного преобразователя 7, блока интегрирования 11, блока деления 12, а также показывающего или регистрирующего прибора расхода топлива 18, счетчика общего расхода топлива 19 и прибора удельного расхода топлива (на единицу мощности) 20.

Проведенные фирмой ASEA сравнительные испытания показали, что данные о крутящем моменте и мощности, определенные указанной измерительной системой, хорошо согласуются с величинами, вычисленными на основании данных о расходе топлива, тем-

работы приводных двигателей, что имеет особенно большое значение для неэлектрического привода судовых двигательных установок, поскольку оценка мощности на гребном валу по расходу топлива и скорости движения судна является очень неточной из-за влияния ветра, волнения моря, обрастания днища ракушками и других факторов.

Для непрерывного контроля крутящего момента гребного вала, его мощности произведенной работы и расхода топлива на судах фирмой ASEA (Швеция) разработана измерительная система, одним из основных узлов которой является устройство измерения крутящего момента, выполненное на базе тордуктора [54]. На рис. 76 изображена структурная схема этой системы, установленной на ряде судов морского флота.

пературе отработанных газов и охлаждающей воды и др. Вычисления основывались на КПД, полученных во время испытания двигательной установки с помощью водяного тормоза.

При наличии сведений о крутящем моменте и мощности и сравнении их с результатами стендовых испытаний легко обнаруживается ухудшение КПД машины и может быть принято своевременное решение о необходимости проведения ремонта. Все приборы измерительной системы располагаются на центральном пульте машинного отделения, что позволяет осуществлять непрерывный контроль эффективности работы двигательной установки судна.

Проведены также работы по автоматическому управлению гребными валами с переменным шагом винта с целью поддержания крутящего момента и нагрузки на дизельный двигатель постоянными [56].

25. ИЗМЕРЕНИЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ВАЛОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Для измерения крутящего момента на вращающихся валах прокатных станов с целью использования этих данных в АСУ ТП применение МДМ оказывается весьма эффективным [31, 56].

На рис. 77 представлена принципиальная электрическая схема устройства измерения крутящего момента (УИКМ). Конкретный состав УИКМ определяется назначением и алгоритмом функционирования АСУ ТП, в состав которой данное устройство входит.

В простейшем случае УИКМ состоит из дифдуктора D и измерительной схемы $ИС$, включающей выпрямительные мосты Bn и резисторы $R1, R2$, один из которых регулируемый, служащий для установки нуля выходного напряжения. На выход $ИС$ можно включать показывающие и самопишущие приборы, вход осциллографа и т. п.

Подобная схема применена в УИКМ, предназначенных для непрерывного контроля нагрузок на одноклетевом стане холодной прокатки «кварто-1400», реверсивном листовом стане горячей прокатки «кварто-1500», реверсивном стане холодной прокатки «кварто-2800», листовом стане «трио-2850» и т. д.

Для получения от УИКМ стандартного выходного напряжения при номинальном значении крутящего момента (10 В с амплитудой паразитных пульсаций не более 0,5%) на выходе $ИС$ включены последовательно пассивный фильтр $ПФ$, активный фильтр $АФ$ и измерительный усилитель $ИУ$.

Пассивный фильтр выполнен в виде одного или двух двойных Т-образных мостов, которые настраиваются на резонансные частоты f и $2f$ и служат для подавления основных гармонических составляющих пульсаций напряжения на выходе $ИС$. Активный фильтр на базе операционного усилителя обеспечивает подавление помех в широком диапазоне частот. Для компенсации снижения коэффициента передачи $ПФ$ на предрезонансных частотах обратные связи операционного усилителя подбирают так, чтобы $АФ$ обладал свойствами колебательного звена. Измерительный усилитель создает необходимое усиление выходного напряжения $ИС$ и служит для развязки $ПФ$ и $АФ$. В разработанных УИКМ в качестве операционных усилителей использованы интегральные полупроводниковые микросхемы.

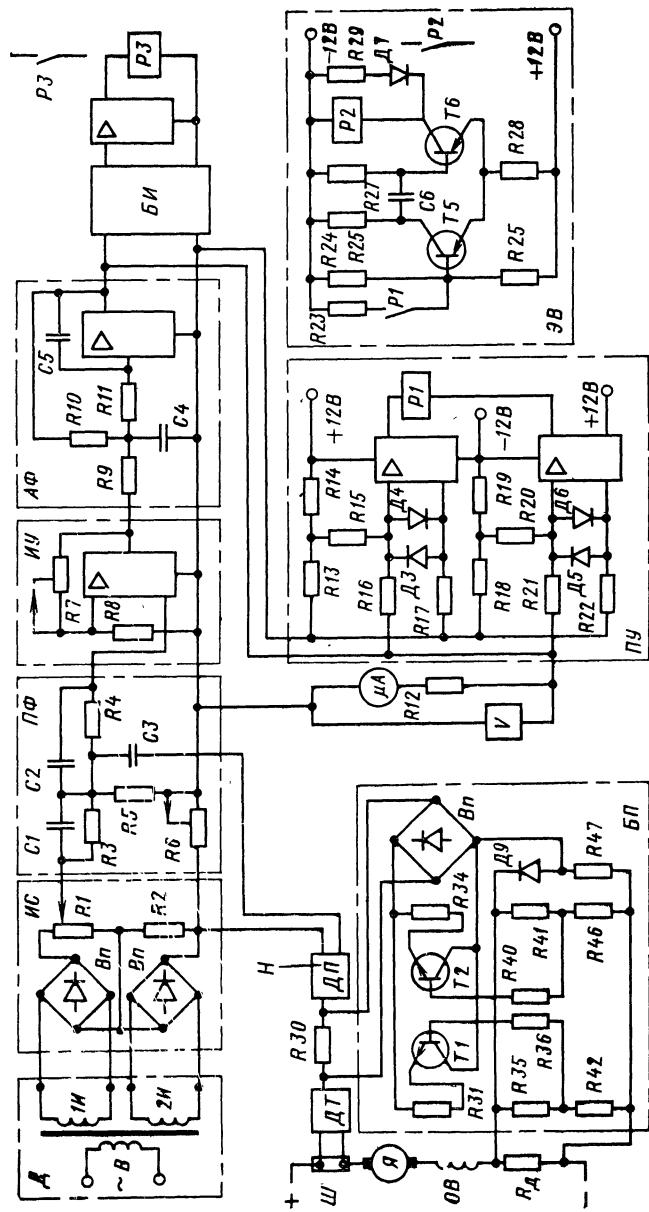


Рис. 77. Принципиальная электрическая схема устройства измерения крутящего момента на валах прокатных станов

Введение в УИКМ сложных фильтров позволяет включать на его выходе наряду с аналоговыми и цифровые приборы, которые, преобразуя выходное напряжение в дискретную форму, могут быть использованы для связи с ЭЦВМ.

Для сигнализации о достижении заданного значения момента в УИКМ применены пороговые устройства (компараторы) ПУ на двух интегральных микросхемах с выходным реле Р1. Компаратор может иметь регулировку времени запаздывания срабатывания реле Р1, для чего имеется элемент времени ЭВ. Необходимость регулировки времени срабатывания может возникать при коротких пропусках на листопрокатных станах, при кратковременных циклах момента и т. п. В качестве ЭВ используется полупроводниковый одновибратор с эмиттерной связью и выходное реле Р2.

Описанные схемы УИКМ применены в автоматизированных системах измерения и регистрации технологических параметров 17-клетового и восьмиклетового сортовых станов.

При использовании УИКМ в качестве индикатора наличия металла в клету для автоматизации летучих ножиц или другого оборудования, расположенного на некотором расстоянии от клетки, на выход АФ включают блок индикации БИ, состоящий из релейного элемента задержки, создающего сдвиг во времени сигнала о входе заготовки в клету и выходе ее из клетки. Для подключения на выходе БИ катушки контактора РЗ введен усилитель мощности.

Блок индикации применен в УИКМ, установленном на шпинделе клетки непрерывного заготовочного стана и включенном в схему автоматизации летучих ножиц стана.

При использовании УИКМ на валу машины, работающей с изменяющейся частотой вращения ω_b , измеряемый крутящий момент M включает в себя кроме статического момента M_c также динамический момент $M_{д1}$, определяемый угловым ускорением вала $d\omega_b/dt$ и моментом инерции J_1 вращающихся масс, расположенных за дифдуктором, т. е.

$$M = M_c + M_{д1} = M_c + J_1 \frac{d\omega_b}{dt}. \quad (148)$$

В некоторых случаях момент $M_{д1}$ оказывается соизмеримым с моментом M_c , и для выделения статического момента необходимо скомпенсировать составляющую выходного напряжения УИКМ, определяемую моментом $M_{д1}$. В разработанных устройствах измерения статического момента $M_{И}$ измеряется момент приводного электродвигателя $M_{Э}$ который расходуется на покрытие момента M_c и полного динамического момента системы электропривод — рабочая машина:

$$M_{д} = J \frac{d\omega_b}{dt} = M'_{Э} - M_c, \quad (149)$$

где J — приведенный к контролируемому валу момент инерции всех вращающихся масс системы; $M'_{Э}$ приведенный к контролируемому валу момент электродвигателя.

Подстановка величины $d\omega_b/dt$ из формулы (149) в выражение (148) дает выражение, которое можно рассматривать как алгоритм определения статического момента:

$$M_C = \frac{J}{J - J_1} \left(M - \frac{J_1}{J} M'_\Theta \right).$$

В электроприводах постоянного тока момент M_Θ может быть определен по току, протекающему в якоре двигателя. Наиболее просто эта задача решается, когда электродвигатель работает с неизменным током возбуждения, т. е. с неизменным магнитным потоком. При этом для определения M_C производят алгебраическое суммирование выходного напряжения УИКМ с выходным напряжением датчика тока якоря $ДТ$, связанного с шунтом $Ш$, (см. рис. 77). Такая схема применена в измерителях статического момента на валах петледержателей непрерывного листопрокатного стана «кварто-2800», в которых используется дифдуктор типа МИМ-220, где он применен в составе системы автоматического регулирования натяжения прокатываемой полосы.

При работе электродвигателя постоянного тока с изменяющимся магнитным потоком определение момента M_Θ усложняется. В измерителе статического момента на блюминге в узле измерения момента двигателя использован блок перемножения $БП$ релейного типа на транзисторах $T1$ и $T2$, благодаря которому напряжение, снимаемое с выхода датчика тока $ДТ$ и нагрузочного сопротивления $R6$, подаваемого через датчик напряжения $ДН$ в схему сравнения, оказывается пропорциональным моменту электродвигателя M_Θ .

Опыт, накопленный за годы эксплуатации на металлургических заводах УИКМ с дифдукторами, показывает, что они являются эффективным средством непрерывного контроля нагрузок рабочих машин и важным элементом АСУ ТП прокатных станов.

В качестве индикаторов наличия металла между валками разработанные УИКМ способны обеспечить выдачу командного импульса на изменение режима работы привода клетки и механизмов прокатного стана (запуск, синхронизация, торможение), а также выполнение функции блокировки взаимосвязанных механизмов. На блюминге выходной сигнал УИКМ может быть использован для команды на ускорение валков после захвата слитка, блокировки линеек манипулятора, кантователя и т. д. Этот же сигнал можно использовать в измерителе длины недокатанной части слитка и других устройствах автоматики.

По сравнению с другими техническими средствами, применяемыми для той же цели в АСУ ТП прокатных станов, рассмотренные измерители статического момента обладают более высокой точностью, быстродействием, возможностью индикации наличия металла, между валками стана с групповым приводом клеток, более удобны в эксплуатации. Применение УИКМ с дифдукторами позволяет создавать комбинированные системы автоматического управления с каналом компенсации статического момента, что существенно улучшает статические и динамические характеристики электропривода.

26. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

МДМ в последнее десятилетие нашли применение также в различных металлорежущих станках с числовым программным управ-

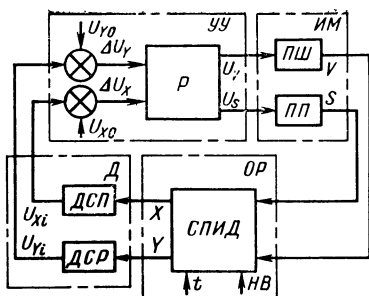


Рис. 78. Двухпараметрическая система управления режимами резания:

P — регулятор; $ПШ$ — привод шпинделя; $ПП$ — привод подачи; $СПИД$ — система «станок-приспособление — инструмент-деталь»; $ДСП$ — датчик силового параметра резания; $ДСР$ — датчик скорости резания; s — подача; v — скорость резания; t — глубина резания; $HВ$ — твердость материала заготовки; U — напряжение сигнала

лением (ЧПУ) для измерения силовых параметров резания [1, 35, 49]. Станки с ЧПУ обеспечивают выполнение любого автоматического цикла обработки по программе, однако они также имеют недостатки, снижающие их эффективность и ограничивающие область применения. В процессе резания имеют место колебания припуска и твердости обрабатываемого материала детали, а также другие внешние возмущения. Наличие жесткой программы системы ЧПУ, предписывающей исполнение фиксированных траекторий и режимов резания, часто ведет к снижению производительности, так как в программе не могут быть учтены особенности обработки каждой детали и расчет программы ведется по среднестатистическим данным, причем исходные граничные условия выбираются по наименее удачным вариантам.

Стремление преодолеть эти недостатки привело к появлению нового типа систем управления, которые позволяют оптимизировать процесс обработки каждой детали благодаря использованию текущей информации по параметрам, определяющим условия и качество процесса резания. Такие системы, получившие в литературе наименование самонастраивающихся, или адаптивных, состоят из станков с ЧПУ, одного или нескольких дополнительных автоматических управляющих устройств и осуществляют автоматическое управление производительностью обработки.

По характеру задач, решаемых адаптивными системами (АС), их можно разделить на три группы: 1) АС, обеспечивающие повышение производительности (или снижение себестоимости) процесса резания; 2) АС, обеспечивающие повышение точности или уменьшение шероховатости поверхности обработанной детали; 3) АС, обеспечивающие совершенствование всей совокупности операций для получения годных деталей. Как правило, АС кроме основной функции выполняют и некоторые другие. Например, АС первой группы одновременно обеспечивают повышение точности деталей.

АС первого типа представляют собой соответствующие системы регулирования режимов резания, в которых производится изменение одного или нескольких параметров в соответствии с выбранными технологическими законами регулирования.

В большинстве АС регулируется подача и скорость резания при наличии возмущающих воздействий, под которыми подразумеваются главным образом изменение глубины резания и твердости обрабатываемой заготовки. Вследствие этого АС должна обеспечивать изменение одного или двух параметров режима резания и

включать соответствующее число контуров управления (рис. 78) и, как минимум, четыре структурных единицы: собственно устройство УУ, датчики параметров процесса Д, исполнительные механизмы ИМ и объект регулирования ОР.

Регулируемые приводы подачи широко распространены в станкостроении и имеют широкую номенклатуру. Регулируемые приводы главного движения (вращения шпинделя) распространены мало, поскольку введение контура регулирования скорости резания сопряжено с определенными трудностями.

В отечественных и зарубежных АС управления режимами резания реализуются различные технологические законы постоянства параметров резания, выбираемые из следующего ряда:

$$P_Z = \text{const}, n_{\text{III}} = \text{const};$$

$$P_Y = \text{const}, n_{\text{III}} = \text{const};$$

$$P_X = \text{const}, n_{\text{III}} = \text{const};$$

$$N = \text{const}, n_{\text{III}} = \text{const};$$

$$M = \text{const}, n_{\text{III}} = \text{const};$$

здесь P_Z , P_Y , P_X — соответственно тангенциальная, радиальная и осевая составляющие усилия резания; n_{III} — частота вращения шпинделя станка; N — мощность, затрачиваемая на резание; M — момент силы резания (крутящий момент шпинделя).

Силовые характеристики процесса резания определяют измерением силы резания или ее составляющих по координатным осям, момента силы резания или мощности, затрачиваемой на резание. Специальные требования к средствам, измеряющим силовые параметры резания, определяются спецификой конструкции металлорежущих станков:стройка датчика силы или момента в станок не должна приводить к снижению жесткости, ухудшению динамических характеристик, уменьшению производительности и универсальности станка. Кроме того, с целью уменьшения погрешности измерения датчики силовых параметров следует располагать возможно ближе к зоне резания, т. е. использовать узлы, где крепится либо деталь, либо инструмент. Этим требованиям хорошо удовлетворяют МДМ, и поэтому они нашли применение в АС для некоторых типов токарных и фрезерных станков.

В случае применения МДМ для измерения крутящего момента шпинделя тангенциальная составляющая силы резания вычисляется в АС посредством деления величины крутящего момента на радиус фрезы (во фрезерных станках) или на радиус точения (в токарных станках). Вопросы использования МДМ и егостройки в шпиндельный узел токарного станка уже рассматривались в п. 4. Другим примером применения МДМ может служить измерительный узел в токарном станке 1А616ФЗ с АС ЧПУ. В существующей конструкции (рис. 79,а) вращение от электропривода главного движения к шпинделю 1 передается через пару шестерен 3 и 4, промежуточный валик 5 и пару шестерен 2 и 6. В станке со встроенным дифдуктором концентрично с валиком 11 установлен стакан 7 (рис. 79,б), один конец которого соединен с шестерней 5 и валиком, а другой конец имеет посадку движения относительно этого валика. Дифдуктор 8 помещен в корпус 6, установленный относительно стакана 7 на двух шарикоподшипниках 4 и 9. Кру-

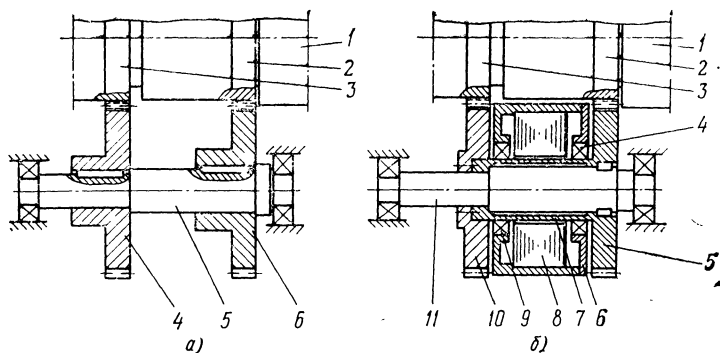


Рис. 79. Часть кинематической цепи шпинделя токарного станка 1А616ФЗ:

a — в существующей конструкции станка; *б* — в конструкции станка со встроенным дифдуктором

тящий момент передается шпинделю 1 через шестерни 3 и 10, стакан 7, шестерни 5 и 2, при этом стакан подвергается кручению и дифдуктор измеряет величину крутящего момента.

На рис. 80 показана осциллограмма крутящего момента стакана этого станка, полученная с помощью дифдуктора при резании ступенчатой заготовки.

В обоих примерах МДМ встроены в существующие конструкции шпиндельных узлов станков, чем и определяется необходимость переделки кинематической цепи. В случае проектирования шпиндельного узла станка заново, с учетом применения МДМ, егостройка может быть выполнена более рационально.

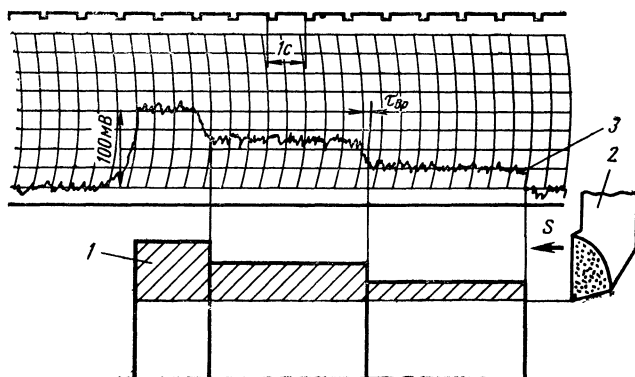


Рис. 80. Осциллограмма крутящего момента в чувствительном элементе МДМ токарного станка 1А616ФЗ при переменной глубине резания:

1 — ступенчатая заготовка; 2 — резец; 3 — осциллограмма выходного сигнала МДМ; $\tau_{вр}$ — время врезания

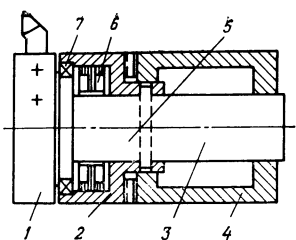


Рис. 81. Поворотная резцедержавка со встроенным МДМ

Известно также применение МДМ для измерения усилия резания на резцедержавке токарного станка [авт. свид. № 424666, 466956 (СССР)]. На рис. 81 показан продольный разрез резцедержавки. Резцовая головка 1 и индексированный диск 2 закреплены на оси 3, установленной в корпусе 4, в котором размещены механизмы зажима и поворота резцовой головки (на чертеже не показаны). Участок 5 оси 3, соединяющей резцовую головку и индексированный

диск является чувствительным элементом МДМ 6. Снаружи датчика 6 резцовая головка 1 опирается на индексированный диск 2 через радиально-упорный подшипник 7.

На станке резцедержавка располагается так, чтобы измеряемая составляющая усилия резания создавала на резцовой головке крутящий момент относительно оси 3. Так, например, при измерении тангенциальной составляющей усилия резания P_z ось резцедержавки должна быть параллельна оси шпинделя. При необходимости измерения осевой составляющей P_x ось резцедержавки располагается перпендикулярно оси шпинделя.

Крутящий момент, создаваемый на головке 1 измеряемой составляющей усилия резания, передается на индексированный диск 2 через участок 5 оси 3, в материале которой возникают напряжения кручения, регистрируемые датчиком 6.

Другие составляющие, действующие вдоль оси 3 или поперек нее, воспринимаются радиально-упорным подшипником 7. Усилия индексации и прижима резцовой головки также не будут нагружать участок 5 оси 3, так как передаются с оси 3 на индексированный диск 2, минуя участок 5 оси.

При известном вылете резца МДМ может быть протарирован непосредственно в единицах соответствующей составляющей силы резания.

Рассмотренные примеры указывают на высокую перспективность применения МДМ в металлорежущих станках различных типов.

27. ПРИМЕНЕНИЕ МДМ В ДРУГОМ ПРОМЫШЛЕННОМ ОБОРУДОВАНИИ

МДМ различных типов применяются в других машинах и механизмах. Фирма ASEA сообщает о применении крестового МДМ в дефибрерах [56], где он применяется в качестве датчика в системе регулирования подачи древесины.

Требования к величине погрешности измерения крутящих моментов дефибреров невысокие, и поэтому здесь оказалось возможным применение крестовых МДМ.

Измерение крутящего момента в буровой технике производится с помощью МДМ типа тордукторов, которые устанавливаются или на наземных узлах буровой установки или в глубине скважины вблизи породоразрушающего инструмента [14].

В первом случае измерение момента производится с помощью МДМ, установленного на промежуточном валу привода ротора бу-

рового станка. Однако этот метод применим лишь в тех случаях, когда можно пренебречь погрешностями, вносимыми трением буровой колонны о стенки скважины и ее колебаниями, а также трением и колебаниями, возникающими в наземных узлах буровой установки.

Наземный метод контроля совершенно неприменим при исследовании динамических нагрузок на породоразрушающий инструмент, поскольку колонна буровых труб, являясь фильтром низких частот, практически полностью подавляет высокочастотные составляющие, вызванные дискретным характером разрушения породы в забое.

Разработаны глубинные МДМ [14], предназначенные для регистрации и измерения в комплекте с глубинным регистрирующим прибором ГРП-2 и телеизмерительной системой ТИС-1200 крутящего момента, действующего на породоразрушающий инструмент. В качестве чувствительного элемента МДМ используется участок колонковой трубы, подвергнутый после окончательной механической обработки отжигу. Датчик установлен внутри чувствительного элемента на трубопроводе, по которому циркулирует промывочная жидкость.

Для исключения влияния гидростатического давления полость между чувствительным элементом и трубопроводом для циркуляции промывочной жидкости заполняют маслом и гидравлически соединяют ее с затрубным пространством через резиновый разделитель, чем обеспечивается одинаковое давление на внутреннюю и наружную стенки чувствительного элемента.

Фирмой Avco Locoming (США) разработан МДМ типа трансдуктора и применен для измерения крутящего момента на валах газовых турбин, вращающихся со скоростью до 25 000 об/мин [52, 59]. Трудности измерения крутящего момента на валу газовой турбины определяются большой скоростью вращения вала турбины, высокой и неравномерно распределенной температурой вала и высоким уровнем вибраций. Эти особенности затрудняют применение крутильных торсиометров, основанных на принципе измерения момента по углу закручивания упругого элемента, в то время как МДМ к перечисленным факторам малочувствительны.

Чувствительный элемент трансдуктора выполнен в виде стакана, включенного соосно с валом (их конструкция и расчет описаны в пп. 3 и 4). Материалом стакана является слабокремнистая сталь, обладающая положительной магнитоупругой чувствительностью, линейной до напряжений сдвига 28 Н/мм^2 , что соответствует пределу текучести материала, при этом напряжения в валу, на котором установлен стакан, не превышают предела пропорциональности. Полярные моменты сопротивления вала и стакана подбирают такими, чтобы после снятия предварительных напряжений остаточные напряжения в стакане составили примерно 56 Н/мм^2 . Направление этих напряжений кручения обратно направлению рабочих напряжений, возникающих в валу турбины.

Выходная характеристика трансдуктора с таким чувствительным элементом линейна в диапазоне крутящих моментов, соответствующих напряжениям сдвига $0-105 \text{ Н/мм}^2$. Обмотка возбуждения трансдуктора питается переменным током частотой 1000 Гц. По данным публикаций погрешность измерительного устройства составляет 2%, скоростная погрешность при изменении частоты вращения в пределах 7500—15 000 об/мин — не более 0,6%.

БЕСКОНТАКТНЫЙ МАГНИТОУПРУГИЙ ДАТЧИК ОСЕВОГО УСИЛИЯ ВАЛА

В ряде случаев возникает необходимость измерять не только крутящие моменты, передаваемые валами различных машин и механизмов, но и осевые усилия этих валов. Осевое усилие может быть измерено бесконтактным магнитоупругим датчиком, усовершенствованная конструкция которого показана на рис. 82. Датчик размещается с зазором относительно контролируемого вала 1 и состоит из двух шихтованных кольцевых магнитопроводов 2 и 3 с полюсными выступами и промежуточного кольца 6. На двух диагонально расположенных полюсах размещены катушки обмотки возбуждения 4, которые образуют пару полюсов возбуждения N и S ; другие два полюса I_1 и I_2 несут катушки 5, соединенные в одну измерительную обмотку. В зависимости от диаметра вала число пар полюсов датчика может быть любым. Стержневые шихтованные магнитопроводы 7 вставлены в пазы, проходящие через ядро магнитопроводов и промежуточное кольцо.

На рис. 83 изображена схема замещения магнитной цепи двух-полюсного датчика, составленная на основе картины магнитных потоков в магнитопроводах. Переменный магнитный поток, возникающий под действием МДС полюсов $F_{в.п.}$, через воздушные зазоры проходит в вал от северного полюса возбуждения к южному, далее по одному полюсу возбуждения, по яруму, по дополнительным поперечным магнитопроводам, снова по яруму и по другому полюсу возбуждения.

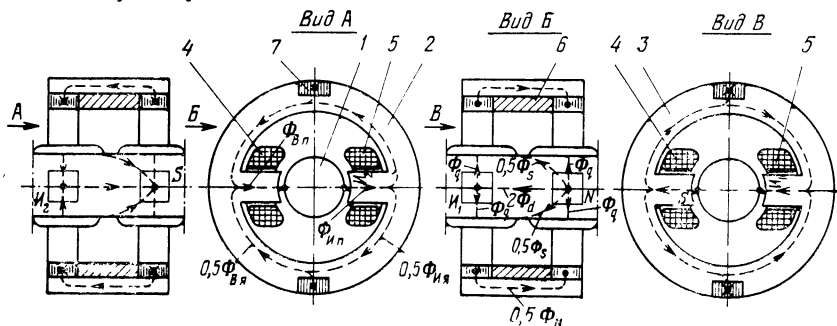


Рис. 82. Конструкция двухполюсного магнитоупругого датчика осевого усилия вала и магнитные потоки в его магнитопроводах (потоки рассеяния не показаны)

Датчик без стержневых магнитопроводов [авт. свид. № 142445 (СССР)] имеет значительно меньшее выходное напряжение, так как при переходе из одного кольцевого шихтованного магнитопровода в другой магнитные потоки идут поперек шихтовки и по сплошному промежуточному кольцу. Картина магнитного поля в поверхностном слое вала может быть представлена в виде, показанном на рис. 84.

При отсутствии осевого усилия вала магнитные сопротивления участков вала $R_d = 1/G_d$ и $R_q = 1/G_q$ равны между собой, магнитные потенциалы участков вала под измерительными полюсами I_1 и I_2 равны и поэтому магнитные потоки в них $\Phi_{И.п}$ равны нулю. При появлении осевого усилия Q вала $R_d \neq R_q$, магнитные потенциалы под измерительными полюсами I_1 и I_2 изменяются, в них появится магнитный поток и в измерительной обмотке будет наводиться переменная ЭДС, зависящая от величины осевого усилия.

Наличие крутящего момента практически не сказывается на показаниях датчика осевого усилия, так как одна половина магнитного потока вала совпадает с направлением главных растягивающих, а другая — с направлением главных сжимающих напряжений. В результате одна часть магнитного потока уменьшится, другая — настолько же возрастет, а суммарный магнитный поток останется без изменения.

Как и в других типах рассмотренных магнитоупругих датчиков, будем считать, что магнитный поток рассеяния учтен с помощью коэффициента рассеяния как некоторая доля потока полюса возбуждения. Пренебрежем также магнитными сопротивлениями участков магнитопровода (полюсов — $R_{в.п}$ и $R_{И.п}$ ярм — $R_{в.я}$ и $R_{И.я}$, поперечного стержневого магнитопровода — R_M) как величинами более высокого порядка малости по сравнению с магнитными сопротивлениями воздушных зазоров соответствующих участков магнитных цепей. С учетом этого, мгновенное значение магнитного потока в измерительном полюсе при отсутствии осевого усилия

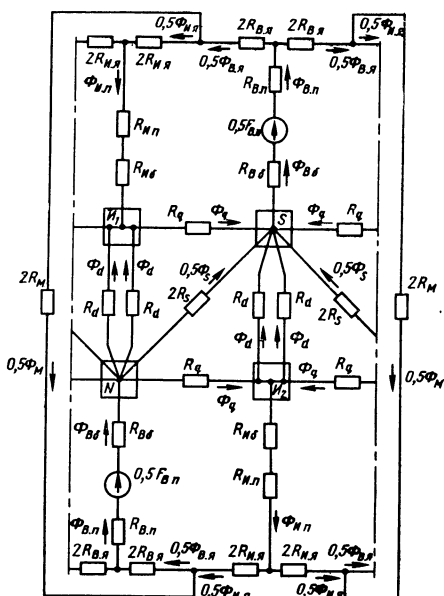


Рис. 83. Схема замещения магнитной цепи двухполюсного магнитоупругого датчика осевого усилия вала

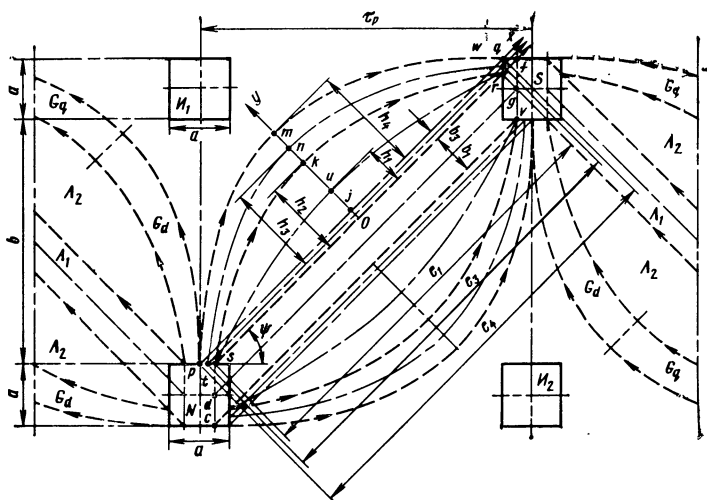


Рис. 84. Картина магнитного поля в поверхностном слое вала датчика осевого усилия вала:

N, S — проекции полюсов возбуждения; I_1, I_2 — проекции измерительных полюсов

$$\Phi_{И.п} = \frac{f_{В.п} (R_d - R_q) R_s}{4R_{В\delta} R_{И\delta} \left[4R_s + R_d + R_q + \frac{(R_{В\delta} + R_{И\delta})(R_d + R_q)R_s}{2R_{В\delta} R_{И\delta}} + \left(1 + \frac{R_s}{2R_{В\delta}} \right) \frac{R_d R_q}{2R_{И\delta}} \right]}, \quad (150)$$

где R_d, R_q — участки магнитного сопротивления вала между проекциями полюсов возбуждения и измерительных (см. рис. 83, 84); R_s — участок магнитного сопротивления вала между проекциями полюсов возбуждения; $R_{В\delta}, R_{И\delta}$ — магнитное сопротивление воздушного зазора под полюсом возбуждения и измерительным соответственно; $f_{В.п}$ — мгновенное значение МДС возбуждения пары полюсов возбуждения.

При появлении в валу осевого усилия, например сжимающего, магнитное сопротивление R_d возрастает на некоторую величину ΔR_d (при растяжении приращение ΔR_d будет иметь знак минус), а величина R_q остается неизменной. Выражение (150) при этом примет вид

$$\Phi_{И.п} = \frac{f_{В.п} (R_d - R_q + \Delta R_d) R_s}{4R_{В\delta} R_{И\delta} \left[4R_s + R_d + R_q + \Delta R_d + \left(1 + \frac{R_s}{2R_{В\delta}} \right) \frac{(R_d + \Delta R_d) R_q}{2R_{И\delta}} \right]}$$

$$\begin{aligned} & \rightarrow \frac{(R_{B\delta} + R_{И\delta})(R_d + R_q + \Delta R_d) R_s}{2R_{B\delta}R_{И\delta}} + \\ & \rightarrow \frac{\left(1 + \frac{R_s}{2R_{B\delta}}\right) \frac{(R_d + \Delta R_d) R_q}{2R_{И\delta}}}{} \end{aligned} \quad (151)$$

Датчик следует проектировать так, чтобы магнитные сопротивления R_d и R_q при отсутствии осевого усилия были равны друг другу, так как в противном случае выходное напряжение не будет равно нулю при $Q=0$.

Кроме того, анализ показывает, что значением ΔR_d в знаменателе выражения (151) можно пренебречь как величиной более высокого порядка малости. С учетом изложенного

$$\begin{aligned} \Phi_{И.п} = & \frac{f_{В.п} R_s \Delta R_d}{4R_{B\delta}R_{И\delta} \left[4R_s + 2R_d + \frac{(R_{B\delta} + R_{И\delta}) R_s R_d}{R_{B\delta}R_{И\delta}} + \right.} \\ & \left. \rightarrow \frac{\left(1 + \frac{R_s}{2R_{B\delta}}\right) \frac{R_d^2}{2R_{И\delta}}}{} \right] \end{aligned} \quad (152)$$

Выражение (152) следует применять, когда датчик посажен на вал с очень малым воздушным зазором, например на невращающемся валу, или когда датчик вращается вместе с валом, а токосъем осуществляется при этом каким-нибудь контактным или индукционным способом [25]. Если же воздушный зазор достаточно велик ($\delta > 0,1$ мм), то значениями второго и третьего слагаемых в скобках знаменателя формулы (152) можно пренебречь как величинами более высокого порядка малости. В этом случае выражение (152) упростится и примет вид

$$\Phi_{И.п} = \frac{f_{В.п} R_s \Delta R_d}{8R_{B\delta}R_{И\delta} (2R_s + R_d)}.$$

Магнитные сопротивления воздушных зазоров

$$\begin{aligned} R_{B\delta} &= \frac{\delta_B}{\mu_0 a^2} = \frac{\delta_B}{\mu_0 s_{\Pi}}; \\ R_{И\delta} &= \frac{\delta_{И}}{\mu_0 a^2} = \frac{\delta_{И}}{\mu_0 s_{\Pi}}, \end{aligned}$$

где a , s_{Π} —соответственно ширина проекции на вал и площадь проекции полюсов.

Как и в случае тордуктора, при допущении, что глубина проникновения переменного магнитного потока в тело вала одинакова на всех его участках и равна некоторой средней величине h , магнитные сопротивления соответственно равны

$$R_s = \frac{l_s}{\mu_s h b_s} = \frac{\alpha}{\mu_s h};$$

$$R_d = R_q = \frac{l_d}{\mu_d h b_d} = \frac{\beta}{\mu_d h},$$

где l_s, b_s — средние длина и ширина участка магнитной проводимости вала G_s ; l_d, b_d — то же, участков магнитной проводимости G_d, G_q ; μ_s, μ_d — абсолютная магнитная проницаемость этих же участков вала.

С учетом формулы (35) можно записать

$$\Delta\mu_d = K_{\mu 1} \sigma = K_{\mu 1} \frac{Q}{q},$$

где $K_{\mu 1}$ — магнитоупругая чувствительность материала вала при деформации сжатия (растяжения); σ — напряжения осевого сжатия (растяжения) вала; q — поперечное сечение вала.

С учетом соотношений (37), (40), (42), выведенных для тордуктора, мгновенное ЭДС в полюсной катушке измерительной обмотки

$$e_{и.п} = \sqrt{2} K_{11} I_B A \sin(\omega t + \varphi), \quad (153)$$

$$A \approx 2\pi f \left| \pm \frac{1}{\delta_B \delta_{и} \mu_d (2\alpha \mu_d + \beta \mu_s)} \right|; \quad (154)$$

$$\varphi \approx 0;$$

$$K_{11} = \frac{\mu_0^2 K_{\mu} \omega_B \omega_{и} s_{П}^2 \alpha \beta Q}{4 h q}; \quad (155)$$

ω определяют по выражению (46).

Для датчика осевого усилия на одну пару полюсов приходится две полюсные катушки измерительной обмотки. С учетом выражений (153)–(155), векторной диаграммы измерительной обмотки (см. рис. 18), числа пар полюсов возбуждения p_B , а также с учетом выпрямления переменного напряжения мостовой схемой выходное напряжение датчика

$$U_y = S_y Q, \quad (156)$$

где чувствительность датчика

$$S_y = \frac{1,4 \mu_0^2 K_{\mu 1} \omega_B \omega_{и} p_B s_{П}^2 \alpha \beta f I_B r_H}{h \delta_B \delta_{и} (2\alpha \mu_d^2 + \beta \mu_s \mu_d) \sqrt{r_H^2 + x_{и}^2 q}}.$$

Из выражения (156) следует, что при $S_y = \text{const}$ выходное напряжение пропорционально осевому усилию. Экспериментальная зависимость $U(Q)$ приведена в работе [25].

Для магнитоизотропного вала при отсутствии вращающегося эксцентриситета по аналогии с тордуктором можно принять

$$\mu_s = \mu_d = \mu = \text{const};$$

$$\delta_B = \delta_{и} = \delta = \text{const}.$$

Тогда выражение чувствительности примет вид

$$S_y = \frac{1,4\mu_0^2 K \mu \omega_{\text{ВН}} \omega_{\text{ПВ}} s_{\text{П}}^2 y y_f I_{\text{ВН}}}{\mu^2 h \delta^2 \sqrt{r_{\text{Н}}^2 + x_{\text{Н}}^2}}, \quad (157)$$

где

$$y y_f = \frac{\alpha \beta}{2\alpha + \beta}.$$

Зависимость чувствительности датчика осевого усилия от его параметров и размеров в соответствии с выражением (157) такая же, как и у тордуктора.

Исследуем функцию $y y_f$. Участки магнитных сопротивлений вала представлены в виде простых геометрических фигур, средние длина и ширина которых выражаются аналитически (см. рис. 83). Для того чтобы магнитные проводимости G_d и G_q были равны между собой, необходимо как полюсы возбуждения, так и измерительные полюсы выполнять квадратного поперечного сечения, одинаковой площади, а угол ψ выдерживать равным 45° , что соответствует соотношению

$$b = \tau_p - 1,5, \quad (158)$$

где τ_p — полюсный шаг; b — расстояние между рядами полюсов.

Считая, что магнитная проводимость G_s состоит из двух параллельно включенных участков проводимости Λ_1 , ограниченных отрезками прямых линий sr и cv , и четырех участков проводимости Λ_2 , ограниченных отрезками квадратичных парабол skr и отрезками прямых sr , а также полагая, что средние магнитные линии участков проводимости Λ_2 также квадратичные параболы, получаем при условии, оговоренном выражением (158),

$$\alpha = \frac{1}{\frac{\sqrt{2}a}{e_4} + \frac{512e_1 h_1^2 h_2}{3 \left(4h_1 \sqrt{16h_1^2 + e_1^2} + e_1^2 \ln \frac{4h_1 + \sqrt{16h_1^2 + e_1^2}}{e_1} \right)^2}}. \quad (159)$$

Если принять, что участки магнитной проводимости G_d и G_q ограничены отрезками квадратичных парабол pm и sk , а средние линии этих участков также квадратичные параболы, то

$$\beta = \frac{3 \left(4h_3 \sqrt{16h_3^2 + e_3^2} + e_3^2 \ln \frac{4h_3 + \sqrt{16h_3^2 + e_3^2}}{e_3} \right)^2}{32h_3^2 [8(e_4 h_4 - e_1 h_2) + 3\sqrt{2}ae_3]}. \quad (160)$$

В формулах (159), (160), а также на рис. 84

$$e_1 = \sqrt{2}(\tau_p - 0,75a); \quad h_4 = 0,25e_4;$$

$$e_2 = \sqrt{2}(\tau_p - 0,625a); \quad h_2 = h_4 - 0,5a;$$

$$e_3 = \sqrt{2}(\tau_p - 0,5a); \quad h_3 = 0,5(h_2 + h_4) \\ h_1 = 0,5h_2.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ

ЗАВИСИМОСТЬ КОНСТАНТЫ C_D ДИФДУКТОРОВ ОТ МДС ПАРЫ ПОЛЮСОВ

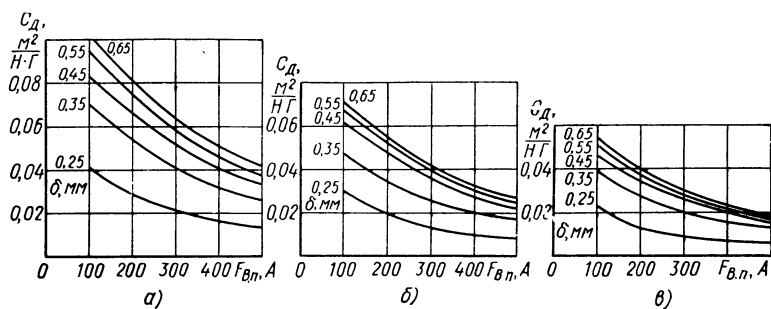


Рис. 1П. Зависимости $C_D(F_{B.n.})$ для дифдукторов с валом из стали 45 при $f=50$ Гц, $r=0,1$ МОм и различных δ :
а, б, в — для отношений $r_H/r=0,2$; 0,5 и 1,0 соответственно

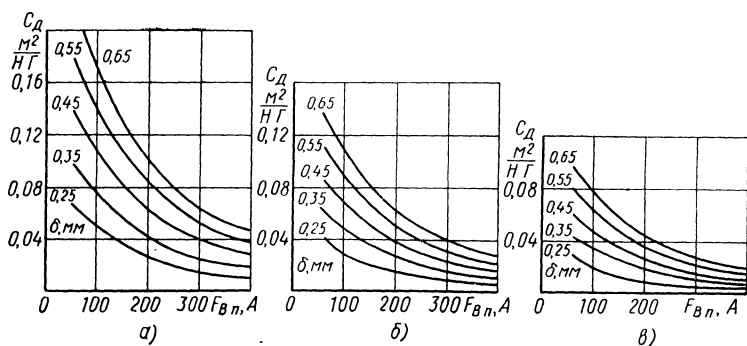


Рис. 2П. Зависимости $C_D(F_{B.n.})$ для дифдукторов с валом из стали 45 при $f=1000$ Гц, $r=0,1$ МОм и различных δ :
а, б, в — для отношений $r_H/r=0,2$; 0,5 и 1,0 соответственно

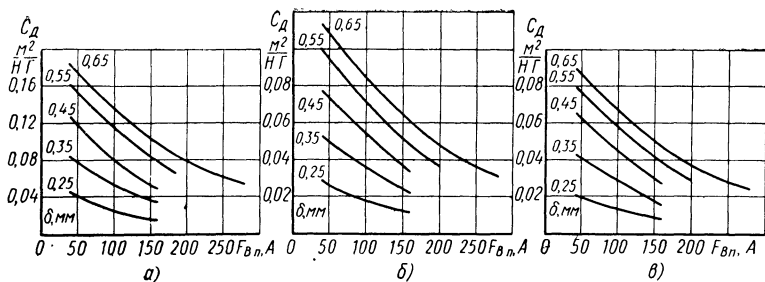


Рис. 3П. Зависимости $C_D (F_{в.п})$ для дифдукторов с валом из стали 45 при $f=1000$ Гц, $r=0,1$ МОм и различных δ :
а, б, в — для отношений $r_H/r=0,2$; 0,5 и 1,0 соответственно

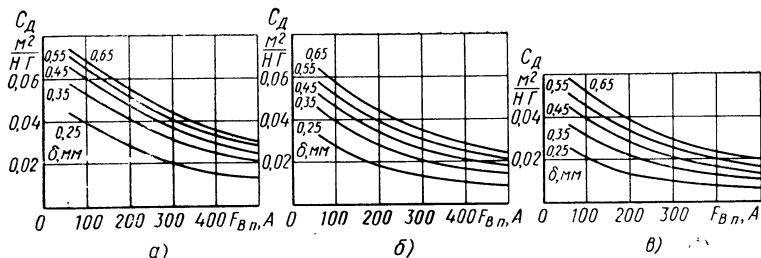


Рис. 4П. Зависимости $C_D (F_{в.п})$ для дифдукторов с валом из стали 40X при $f=50$ Гц, $r=0,1$ МОм и различных δ :
а, б, в — для отношений $r_H/r=0,2$; 0,5 и 1,0 соответственно

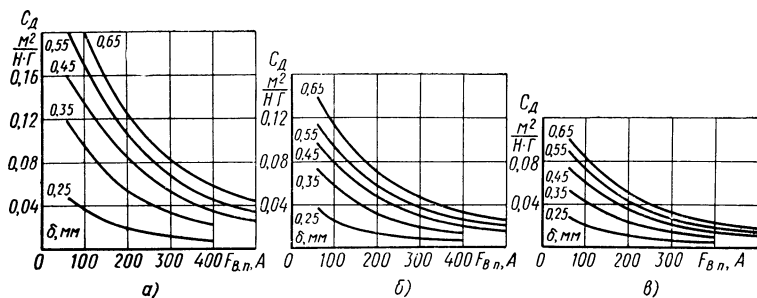


Рис. 5П. Зависимости $C_D (F_{в.п})$ для дифдукторов с валом из стали 40X при $f=400$ Гц, $r=0,1$ МОм и различных δ :
а, б, в — для отношений $r_H/r=0,2$; 0,5 и 1,0 соответственно

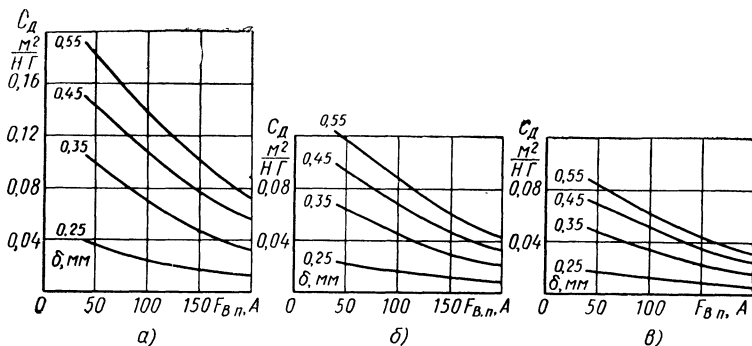


Рис. 6П. Зависимости $C_d(F_{B.n.})$ для дифдукторов с валом из стали 40X при $f = 1000$ Гц, $r = 0,1$ МОм и различных δ :
 а, б, в — для отношений $r_H/r = 0,2; 0,5$ и $1,0$ соответственно

ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ МДМ $L_{в.у}$ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

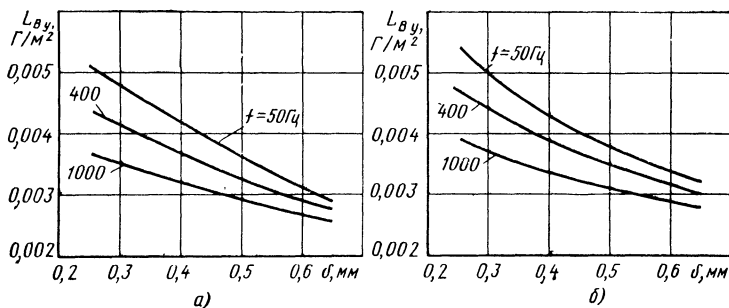


Рис. 7П. Зависимости $L_{в.у.}(\delta)$ для дифдукторов с шихтованным магнитопроводом при различных значениях f :
 а — для вала из стали 45; б — для вала из стали 40X

1. Адаптивное управление металлорежущими станками / Г. В. Бронштейн, М. С. Городецкий, Е. Р. Гордон, В. В. Каминская, Л. Н. Цейтлин. М.: НИИМАШ, 1973. 227 с.
2. Белов К. П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. М.: Гостехиздат, 1957, 279 с.
3. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
4. Бессонов Л. А. Линейные электрические цепи. М.: Высшая школа, 1974. 316 с.
5. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: Изд. иностр. лит., 1956. 784 с.
6. Богаенко И. Н., Рыбальченко Ю. И. Анализ работы магнитоупругого измерительного преобразователя крутящего момента. — В кн.: Автоматизация прокатных станов. М.: Металлургия, 1976, с. 212—224.
7. Богаенко И. Н., Рыбальченко Ю. И. Анализ работы магнитоупругого измерительного преобразователя крутящего момента с двойным числом измерительных полюсов. — В кн.: Приборы и средства автоматики. Киев, Техника, 1976, с. 21—29.
8. Борисов А. М. Зависимость магнитной проницаемости конструкционных сталей от механических напряжений в слабых магнитных полях. — В кн.: Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. Челябинск: Челябинское областное правление НТО энергетики и электротехнической промышленности, 1969, с. 204—210.
9. Борисов А. М., Левинтов С. Д. Расчет выходной характеристики магнитоупругого измерителя момента. — В кн.: Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. Челябинск: Челябинское областное правление НТО энергетики и электротехнической промышленности, 1969, с. 200—203.
10. Борисов А. М., Левинтов С. Д. Расчет магнитной цепи возбуждения магнитоупругих измерителей момента. — В кн.: Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. Челябинск: Челябинское правление НТО энергетической промышленности, 1967, вып. 3, с. 151—155.
11. Борисов А. М., Левинтов С. Д., Стасяк В. Н. Экспериментальное исследование влияния скорости на выходные характеристики магнитоупругих датчиков момента. — В кн.: Исследование электрических машин и автоматизированных электроприводов. Челябинск: Челябинский политехнический институт, 1970, вып. 69, с. 161—166.

12. Буль Б. К. Основы теории и расчета магнитных цепей. М.—Л.: Энергия, 1964. 463 с.
13. Гинзбург В. Б. Магнитоупругие датчики. М.: Энергия, 1970. 72 с.
14. Гинзбург В. Б. Глубинные магнитоупругие датчики. — В кн.: Машины и нефтяное оборудование, 1968, № 8, с. 24—27.
15. Гуманюк М. Н. Магнитоупругие датчики в автоматике. Киев: Техника, 1972. 262 с.
16. Ершов Р. Е., Шель М. М. К вопросу измерения напряжений магнитоупругим методом. — Заводская лаборатория, 1965, № 7, с. 811—814.
17. Жадобин Н. Е. Основы расчета кольцевых магнитоупругих датчиков момента. — Труды центрального научно-исследовательского института морского флота, 1968, вып. 99, с. 72—85.
18. Коновалов П. И. К вопросу о влиянии внутренних напряжений на магнитоупругие свойства стали. — В кн.: Электромашиностроение и электрооборудование, Харьков: Издательство Харьковского государственного университета, 1969, вып. 8, с. 120—130.
19. Левинтов С. Д. Анализ работы магнитоупругих силоизмерительных преобразователей приставного типа на основе теории электромагнитного поля в анизотропной среде. — Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 1977, 20, № 5, с. 46—52.
20. Левинтов С. Д. К теории магнитоупругого преобразователя крутящего момента. — Известия высших учебных заведений. Электромеханика, 1977, № 3, с. 304—310.
21. Левинтов С. Д., Борисов А. М. Бесконтактные магнитоупругие измерители момента на вращающихся валах и их применение для технологического контроля и автоматизации рабочих машин. — В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по автоматическому управлению, 1968. Технические средства автоматизации, М.: Наука, 1971, с. 352—361.
22. Левинтов С. Д., Борисов А. М. Кольцевой магнитоупругий измеритель вращающего момента. — Электротехника, 1969, № 7, с. 56—58.
23. Левинтов С. Д., Борисов А. М., Стасяк В. И. Знакочувствительный магнитоупругий измеритель момента. — Электричество, 1970, № 8, с. 90.
24. Левинтов С. Д., Стасяк В. И. Плоскопараллельное поле заряженных осей в среде с прямоугольной анизотропией. — Электричество, 1975, № 4, с. 82—83.
25. Михайлов В. С. Бесконтактное измерение упора гребного винта. — Судостроение, 1965, № 4, с. 30—33.
26. Мосевич Э. В., Рыбальченко Ю. И. К вопросу об измерении крутящего момента вала магнитоупругим измерительным преобразователем. — В кн.: Автоматизация прокатных станов. М.: Металлургия, 1974, с. 240—250.
27. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1959. 190 с.
28. Пановко Я. Г. Основы прикладной теории упругих колебаний. М.: Машиностроение, 1967. 316 с.
29. Подлесный Н. И., Рубанов В. Г. Элементы систем автоматического управления и контроля. Киев: Выща школа, 1975. 271 с.
30. Попов В. И., Локтев В. И. Динамика станков. Киев: Техника, 1975. 136 с.

31. **Применение бесконтактных измерителей крутящего момента в АСУ ТП прокатных станов** / С. Д. Левинтов, А. М. Борисов, В. И. Стасяк, А. П. Протасов, Г. Г. Толмачев. — Механизация и автоматизация производства, 1976, № 7, с. 21—23.
32. **Рыбальченко Ю. И.** Магнитоупругие датчики крутящего момента. — Электричество, 1977, № 7, с. 46—52.
33. **Рыбальченко Ю. И.** Основное уравнение тордуктора. — В кн.: Числовые системы автоматического управления машинами, Киев: Техника, 1975, с. 97—103.
34. **Рыбальченко Ю. И.** Теоретические и экспериментальные исследования магнитоупругих датчиков крутящего момента. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Киев: Институт автоматики, 1976. 31 с.
35. **Рыбальченко Ю. И., Богаенко И. Н.** Автоматические системы управления металлорежущими станками. М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1973. 48 с.
36. **Рыбальченко Ю. И., Бочковская Р. Е., Сбитнев В. В.** Расчет магнитоупругих измерительных преобразователей крутящего момента. — В кн.: Автоматизированные системы управления технологическими процессами в прокатном производстве. Киев: Киевский институт автоматики, 1978, с. 128—136.
37. **Ряд бесконтактных измерителей крутящего момента** / С. Д. Левинтов, А. М. Борисов, А. П. Протасов, В. И. Стасяк, М. В. Поздеева. — Приборы и системы управления, 1974, № 10, с. 41—42.
38. **Стасяк В. И.** Исследование влияния параметров магнитоупругого датчика крутящего момента на его характеристики. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Челябинский политехнический институт, 1974. 24 с.
39. **Стасяк В. И., Левинтов С. Д.** Экспериментальные исследования влияния конструктивных параметров магнитоупругого датчика момента на его характеристики. — В кн.: Сборник научных трудов Челябинского политехнического института. Челябинск: Челябинский политехнический институт, 1973, № 124, с. 96—103.
40. **Тимофеев Б. Б.** Магнитоупругий метод исследования напряжений в стали. — Известия Тбилисского научно-исследовательского института сооружений и гидроэнергетики. Тбилиси: Издательство Грузинского сельскохозяйственного института, 1954, т. 6, с. 3—21.
41. **Тимофеев Б. Б.** Специальные задачи теории поверхностного эффекта. Киев: Наукова думка, 1966. 190 с.
42. **Тимошенко С. П.** Колебания в инженерном деле. М.: Физматгиз, 1959. 439 с.
43. **Томсон Я. Я.** О методике расчета магнитоупругого датчика момента. — Труды Таллинского политехнического института, 1964, серия А, № 213, с. 91—101.
44. **Томсон Я. Я.** О расчете магнитного сопротивления магнитоупругого датчика вращающего момента. — Труды Таллинского политехнического института, 1965, серия А, № 220, с. 113—122.
45. **Туричин А. М.** Электрические измерения неэлектрических величин. Л.—М.: Госэнергоиздат, 1951. 686 с.
46. **Устройства для измерения крутящих моментов на прокатных станах** / С. Д. Левинтов, А. М. Борисов, А. П. Протасов, В. И. Стасяк. — Приборы и системы управления, 1976, № 7, с. 37—38.
47. **Фролов Л. Б.** Измерение крутящего момента. М.: Энергия, 1967. 120 с.

48. Хайкин А. Б., Штумпф Э. П. Измерение вращающего момента на гребных валах при испытаниях судов. — Судостроение, 1963, № 1, с. 69—72.
49. Цейтлин Л. Н., Шимохин А. К. Применение магнитоупругих датчиков крутящего момента в станках с адаптивным управлением. — Станки и инструмент, 1974, № 8, с. 35—37.
50. Экспериментальные частотные характеристики магнитоупругих датчиков момента / А. М. Борисов, С. Д. Левинтов, А. М. Протасов, В. И. Стасяк. — В кн.: Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. Челябинск: Челябинский политехнический институт, 1970, вып. 80, с. 115—120.
51. Электрические измерения неэлектрических величин / А. М. Турчин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина, В. С. Гутников, С. А. Спектор, И. А. Зорграф, Б. Э. Аршанский, В. Г. Кнорринг, П. Д. Пресняков. Л.: Энергия, 1975. 576 с.
52. Angeid E. Noncontacting torque meters utilising magnetoelastic properties of steel shafts. "Paper of American Society Mechanical Engineering", 1969, N. GT-64, p. 36—42.
53. Barton T., Solar L. Industrial torque measurement using magnetostrictive torque meters. "IEEE Transactions of Industry and General Application", 1967, 3. N. 4, p. 310—314.
54. Berger S., Kleine L., Naeser J. The measurement of torque in propeller shafts of ships. "ASEA Journal", 1968, 41, N. 1, p. 9—13.
55. Beth R. A. Magnetic measurements of torque in a rotation shaft. "The Scientific Instruments". 1954, 25, N. 6, p. 71—74.
56. Dahle O. The ring toroductor — torque-gauge without slip rings for industrial measurement and control. "ASEA Journal", 1960, 33, N. 3, p. 23—32.
57. Drakensjo. I. Momentmatutrustning baserad pa Toroductor momentgivare. "ASEA's tidning", 1969, 61, N. 8—9, p. 111—114.
58. Myers H. Torque measurement. Part 3. "Instrument Practice", 1967, 21, N. 12, p. 1119—1123.
59. Scoppe F. E. Magnetostrictive torque transducer. "Instrumentations of Technology", 1969, 16, N. 10, p. 95—99.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Условные обозначения	5
ГЛАВА I. Принцип действия и устройство магнитоупругих датчиков крутящего момента (МДМ)	9
1. Физические основы магнитоупругого метода измерения крутящего момента	9
2. Типы МДМ	14
3. Встройка МДМ в машины и механизмы	20
4. Расчет чувствительных элементов МДМ	22
ГЛАВА II. Анализ работы тордуктора	27
5. Электрическая схема замещения магнитной цепи	27
6. Основное уравнение	30
7. Чувствительность при магнитоизотропном вале и отсутствии вращающегося эксцентриситета вала	35
8. Чувствительность при магнитоанизотропном вале и наличии вращающегося эксцентриситета вала	42
9. Тордуктор с полюсами круглого поперечного сечения	44
10. Тордуктор с П-образными измерительными магнитопроводами	45
ГЛАВА III. Анализ работы дифдуктора	48
11. Электрическая схема замещения магнитной цепи	48
12. ЭДС измерительной обмотки	52
13. Основное уравнение и чувствительность при магнитоизотропном вале и отсутствии вращающегося эксцентриситета вала	53
14. Основное уравнение и чувствительность при магнитоанизотропном вале и наличии вращающегося эксцентриситета вала	59
15. Дифдуктор с полюсами круглого поперечного сечения	61
16. Трансформаторный МДМ	63
17. Дифференциальные измерительные схемы МДМ	68
ГЛАВА IV. Динамические свойства и погрешности МДМ	71
18. Структурные схемы и передаточные функции	71
19. Погрешности МДМ	80
ГЛАВА V Экспериментальные исследования и основы расчета МДМ	83
20. Испытательные стенды	83
21. Экспериментальные зависимости между параметрами МДМ	87
22. Расчет дифдукторов	89
ГЛАВА VI. Применение МДМ в промышленных установках	98
23. Промышленные образцы МДМ	98
24. Контроль эффективности работы судовых двигателей	105
25. Измерение крутящего момента валов прокатных станов	107
26. Измерение силовых параметров резания металлорежущих станков	110
27. Применение МДМ в другом промышленном оборудовании	114
ГЛАВА VII. Бесконтактный магнитоупругий датчик осевого усилия вала	116
Приложение	122
Список литературы	125

40 коп.



«МАШИНОСТРОЕНИЕ»