

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Промышленная электроника»

С. Н. Кухаренко

ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

ПРАКТИКУМ

**по одноименной дисциплине для студентов
специальности 1-53 01 07 «Информационные
технологии и управление в технических системах
дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2019

УДК 621.38-52(075.8)
ББК 32.859-051я73
К95

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 31.08.2017 г.)*

Рецензент: доц. каф. «Автоматизированный электропривод»
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *М. Н. Погуляев*

Кухаренко, С. Н.

К95 Элементы и устройства систем управления : практикум по одной дисциплине для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах» днев. формы обучения / С. Н. Кухаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 44 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-411-7.

Даны общие принципы выбора и проектирования электромагнитных устройств, применяемых в системах управления. Приведены данные о серийно выпускаемых элементах, таких, как ферромагнитные сердечники и асинхронные двигатели.

Для студентов специальности 1-53 01 07 «Информационные технологии и управление в технических системах».

УДК 621.38-52(075.8)
ББК 32.859-051я73

ISBN 978-985-535-411-7

© Кухаренко С. Н., 2019
© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2019

1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучить методику проектирования трансформаторов малой мощности и приобрести навыки расчета их характеристик.

Задание: определить конструктивные (размер магнитопровода, количество витков) и эксплуатационные параметры трансформатора для заданного в таблице варианта.

Основные определения

Трансформатором называется электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования одной (или нескольких) первичной системы переменного тока в другую – вторичную, той же частоты, имеющую в общем случае другие характеристики, в частности, другое напряжение и другой ток.

Трансформатор в общем смысле можно рассматривать как систему индуктивно связанных токоведущих шин. Применение ферромагнитного сердечника необходимо для увеличения взаимной индуктивности. В технической литературе ферромагнитный сердечник трансформатора принято называть магнитопроводом.

Как правило, трансформатор состоит из ферромагнитного сердечника и двух или большего числа обмоток. Та из обмоток трансформатора, к которой подводится энергия переменного тока, называется первичной, другие, от которых энергия отводится, называются вторичными обмотками. В соответствии с названием все величины, относящиеся к первичной обмотке, такие, как напряжение, ток, мощность, сопротивление, называются первичными, а относящиеся к вторичной обмотке – вторичными.

Расчет трансформатора для заданной мощности и рабочего напряжения обмоток необходимо начинать с определения полной мощности нагрузки трансформатора S :

$$S_{\text{тр}} = \sum_{i=2}^n U_i I_i, \quad (1.1)$$

где U_i , I_i – эффективные значения напряжений и токов в каждой вторичной обмотке трансформатора, заданные при электрическом расчете.

Токи первичной и вторичных обмоток можно определить из выражения

$$i_i = \frac{S_i}{U_i}. \quad (1.2)$$

Полная номинальная мощность обмоток трансформатора $S_{\text{пол}}$:

$$S_{\text{пол}} = \frac{P_{\text{тр}}}{\eta \cos \varphi}, \quad (1.3)$$

где $P_{\text{тр}}$ – активная мощность трансформатора; η – КПД трансформатора; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности нагруженного трансформатора.

1.1. Выбор плотности тока в обмотках трансформатора

Выбор плотности тока в обмотках зависит от многих факторов, таких, как режим эксплуатации, требуемый КПД, условий охлаждения, свойств применяемых конструкционных и изоляционных материалов.

Плотность тока в обмотке, выполненной медным проводом, может находиться в пределах $i_{\text{уд}} = 1,8 \div 10 \text{ А/мм}^2$. Для трансформаторов мощностью $S = 0,04 \div 1 \text{ кВА}$, работающих в умеренно холодном климате при свободном конвективном охлаждении рекомендуемая плотность тока обмоток может быть определена по графику (рис. 1.1).

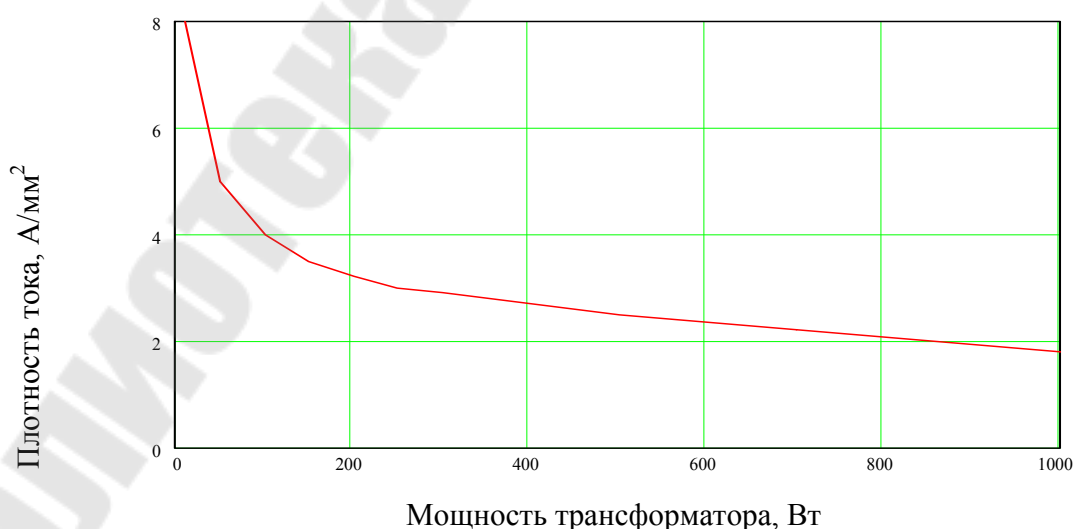


Рис. 1.1. График для определения допустимой плотности тока в обмотках трансформатора, выполненных медным проводом

В соответствии с требуемым значением тока I_i необходимо определить сечение медного провода S_M :

$$S_M = \frac{I_i}{i_{уд}}. \quad (1.4)$$

Соответствующий диаметр провода d :

$$d = \sqrt{\frac{4S_M}{\pi}}. \quad (1.5)$$

Выбрать соответствующий диаметр обмоточного провода из стандартного ряда значений табл. 1.1.

Таблица 1.1

Сортамент обмоточных проводов

Диаметр провода по меди, мм	Сечение, мм ²	Сопротивление 1 км при 20 °С, Ом	Длина на 1 Ом, м	Коэффициент укладки k_y
0,05	0,00196	9290	0,108	0,6
0,06	0,00283	6440	0,156	0,6
0,07	0,00385	4730	0,212	0,61
0,08	0,00502	3630	0,276	0,61
0,09	0,00636	2860	0,35	0,62
0,10	0,00785	2240	0,448	0,63
0,11	0,00950	1850	0,541	0,64
0,12	0,01131	1550	0,645	0,65
0,13	0,01327	1320	0,757	0,65
0,14	0,01539	1140	0,877	0,65
0,15	0,01767	994	1,01	0,65
0,16	0,02011	873	1,145	0,66
0,17	0,02270	773	1,295	0,66
0,18	0,02545	688	1,455	0,66
0,19	0,02835	618	1,62	0,67
0,20	0,03142	558	1,795	0,67
0,21	0,03464	507	1,975	0,68
0,23	0,04155	423	2,36	0,68
0,25	0,04909	357	2,8	0,68
0,27	0,05726	306	3,27	0,69
0,29	0,06605	266	3,76	0,69
0,31	0,07548	233	4,3	0,7
0,33	0,08553	205	4,88	0,7
0,35	0,09621	182	5,5	0,7

Продолжение табл. 1.1

Диаметр провода по меди, мм	Сечение, мм ²	Соппротивление 1 км при 20 °С, Ом	Длина на 1 Ом, м	Коэффициент укладки k_y
0,38	0,11341	155	6,45	0,7
0,41	0,13202	133	7,53	0,71
0,44	0,15205	115	8,7	0,71
0,47	0,17349	101	9,9	0,7
0,49	0,18848	93,1	10,75	0,7
0,51	0,20428	85,9	11,67	0,7
0,53	0,22051	79,3	12,65	0,7
0,55	0,23758	73,9	13,55	0,69
0,57	0,25565	68,7	14,62	0,68
0,59	0,27340	64,3	15,55	0,67
0,62	0,30191	57,9	17,65	0,66
0,64	0,32170	54,6	18,32	0,65
0,67	0,35256	49,7	20,05	0,65
0,69	0,37393	46,9	21,33	0,64
0,72	0,40715	43,0	23,25	0,64
0,74	0,43008	40,8	24,5	0,63
0,77	0,46556	37,6	26,6	0,63
0,80	0,50265	34,9	28,7	0,62
0,83	0,54060	32,4	30,85	0,61
0,86	0,58088	30,2	33,15	0,6
0,90	0,63617	27,5	36,4	0,6
0,93	0,67929	25,8	38,77	0,59
0,96	0,72382	24,2	41,35	0,59
1,00	0,78540	22,4	44,7	0,58
1,04	0,84950	20,6	48,5	0,58
1,08	0,91610	19,2	58,2	0,57
1,12	0,98520	17,1	56,45	0,57
1,16	1,0568	16,6	60,25	0,56
1,20	1,1310	15,5	64,5	0,56
1,25	1,2272	14,3	70	0,55
1,30	1,3273	13,2	75,7	0,55
1,35	1,4314	12,2	82	0,54
1,40	1,5394	11,4	87,6	0,52
1,45	1,6514	10,6	94,5	0,5
1,50	1,7670	9,89	101,2	0,49
1,56	1,9113	9,18	108,8	0,49
1,62	2,0612	8,50	117,7	0,49
1,68	2,2167	7,92	126,8	0,48

Диаметр провода по меди, мм	Сечение, мм ²	Сопротивление 1 км при 20 °С, Ом	Длина на 1 Ом, м	Коэффициент укладки k_y
1,74	2,3780	7,36	135,7	0,48
1,81	2,573	6,8	147,7	0,48
1,88	2,802	6,3	158,4	0,48
1,95	2,9865	5,9	169,5	0,48
2,02	3,2047	5,5	182	0,47
2,10	3,4637	5,1	186	0,47
2,28	3,8	4,4	227,5	0,47

Примечание. Иногда с целью улучшения укладки или при проектировании трансформаторов на повышенные рабочие частоты используют несколько параллельных проводников. На повышенных частотах из-за протекания тока по поверхности эффективное сечение провода снижается, для повышения эффективности применения материалов рекомендуется выбирать диаметр провода, соизмеримый с толщиной скинслоя. На высоких частотах, свыше 100 кГц, рекомендуется использовать обмоточный провод – литцендрат, состоящий из большого числа тонких изолированных проводников.

1.2. Выбор материала магнитопровода трансформатора

При выборе материала магнитопровода руководствуются соображениями экономической и энергетической эффективности. С точки зрения энергетической эффективности материал магнитопровода должен соответствовать рабочему частотному диапазону трансформируемого напряжения (тока). Правильно подобранный материал обеспечит минимум потерь энергии в сердечнике и, соответственно, минимальные фазовые и амплитудные искажения сигнала. При выборе материала следует придерживаться следующих правил: электротехнические стали применяют в диапазоне частот: от нуля до несколько сотен герц; сердечники из мелкодисперсных металлов и сплавов – в диапазоне: от нескольких сотен до нескольких килогерц; ферритовые изделия: от нескольких килогерц до больших в высокочастотном диапазоне.

Часто производители ферромагнитных материалов указывают типичный частотный диапазон, в котором применяют данный материал. Как правило, для этого частотного диапазона производители нормируют удельные параметры: рабочая магнитная индукция, удельные потери, магнитная проницаемость. Перечисленные параметры для некоторых ферритовых материалов приведены в табл. 1.2, 1.3.

1.3. Выбор максимальной индукции в магнитопроводе B_m

Для маломощных силовых трансформаторов с сердечником из электротехнической стали B_m зависит в основном от материала магнитопровода, толщины листа, из которого набран магнитопровод, частоты рабочего тока, условий охлаждения трансформатора и допустимых температур окружающей среды. Так как все эти величины связаны с мощностью трансформатора $P_{тр}$, то выбор величины B_m зависит от мощности. Аналитическое выражение этой зависимости весьма сложное, поэтому обычно используют экспериментальные зависимости или типовые зависимости B_m от $P_{тр}$ приведенные в табл. 1.2.

В трансформаторах с ферритовым магнитопроводом производят выбор рабочей индукции в соответствии с частотой и значением относительных потерь в сердечнике (табл. 1.3). Выбранное значение индукции B_m не должно превышать значения B_S .

Таблица 1.2

Рекомендуемые значения индукции в сердечниках из электротехнической стали

Мощность трансформатора, Вт	10–50	50–150	150–300	300–1000
Максимальная индукция B_m , Тл	1,0–1,2	1,2–1,5	1,5–1,7	1,7–1,8

Таблица 1.3

Основные характеристики ферритов

Предпочтительное применение			Силовые трансформаторы			
Материал			N 49	N 92	N 95	N 87
Основное вещество			MnZn	MnZn	MnZn	MnZn
Параметр	Символ	Единица измерения				
Начальная проницаемость ($T = 25\text{ °C}$)	μ_i		$1500 \pm \pm 25\%$	$1500 \pm \pm 25\%$	$2300 \pm \pm 25\%$	$2200 \pm \pm 25\%$
Магнитная индукция ($H = 1200\text{ А/м}$, $f = 10\text{ кГц}$)	$B_S (25\text{ °C})$	мТ	490	500	510	490
	$B_S (100\text{ °C})$	мТ	400	440	410	390
Коэрцитивная сила ($f = 10\text{ кГц}$)	$H_c (25\text{ °C})$	А/м	38	24	21	21
	$H_c (100\text{ °C})$	А/м	33	13	12	13
Типичный частотный диапазон		кГц	300–1000	25–500	25–500	25–500

Предпочтительное применение			Силовые трансформаторы			
Материал			N 49	N 92	N 95	N 87
Основное вещество			MnZn	MnZn	MnZn	MnZn
Параметр	Символ	Единица измерения				
Постоянная гистерезиса	μ_B	$10^{-6}/\text{MT}$	< 0,4	< 1,4	< 1,0	< 1,0
Температура Кюри	T_c	°C	> 240	> 280	> 230	> 210
Плотность (тип)		кг/м ³	4800	4850	4920	4850
Удельные потери в сердечнике (тип)	$P_{уд}$					
25 кГц, 200 мТ, 100 °C		кВт/м ³	–	70	45	57
100 кГц, 200 мТ, 100 °C		кВт/м ³	–	410	300	375
300 кГц, 100 мТ, 100 °C		кВт/м ³	330	410	340	390
500 кГц, 50 мТ, 100 °C		кВт/м ³	80	230	205	215
1 кГц, 50 мТ, 100 °C		кВт/м ³	475	–	–	–
Удельное сопротивление	ρ	Ом	17	8	8	10

1.4. Выбор размера магнитопровода и определение количества витков обмоток

Известно, что ЭДС обмотки трансформатора определяется выражением

$$E = \frac{WS_c dB_m}{dt}, \quad (1.6)$$

где W – количество витков обмотки; S_c – поперечное сечение сердечника магнитопровода, определяемое по выражению $S_c = ab$, где a и b – справочные значения размеров сердечника, представленные на рис. 1.2 и в табл. 1.4; B_m – максимальное значение индукции в материале сердечника; $\frac{dB_m}{dt}$ – скорость изменения магнитной индукции.

Одним из рациональных методов выбора типа магнитопровода принята величина произведения площади окна $S_{ок}$ на площадь поперечного сечения магнитопровода S_c , которую можно определить по-

сле решения уравнения, связывающего основные геометрические размеры ферромагнитных сердечников и мощности:

$$S_{\text{ок}}S_{\text{с}} = P_{\text{тр}} \left[\frac{k_{y1} + k_{y2}}{2,22 \cdot \Delta B \cdot f \cdot i_{\text{уд}} \cdot \eta \cdot k_{\text{из}} \cdot k_{y1} \cdot k_{y2}} \right], \quad (1.7)$$

где $P_{\text{тр}}$ – заданная мощность трансформатора; k_{y1}, k_{y2} – коэффициенты укладки обмоточного провода первичной и вторичной обмоток (табл. 1.1); ΔB – изменение индукции в магнитопроводе; f – заданная рабочая частота трансформатора; $i_{\text{уд}}$ – удельная плотность тока в обмотках; η – коэффициент полезного действия; $k_{\text{из}}$ – коэффициент, учитывающий уменьшение окна магнитопровода за счет дополнительной изоляции (каркас между первичной и вторичной обмоткой) (табл. 1.5).

Определив величину произведения $S_{\text{ок}}S_{\text{с}}$, необходимо подобрать линейные размеры магнитопровода из стандартного ряда значений. В табл. 1.4 приведены типоразмеры сердечников из электротехнической стали, в табл. 1.6 – размеры ферритовых сердечников. Искомое произведение можно рассчитать: $S_{\text{ок}}S_{\text{с}} = hcab$, где c, h, a, b – геометрические размеры сердечника (рис. 1.2).

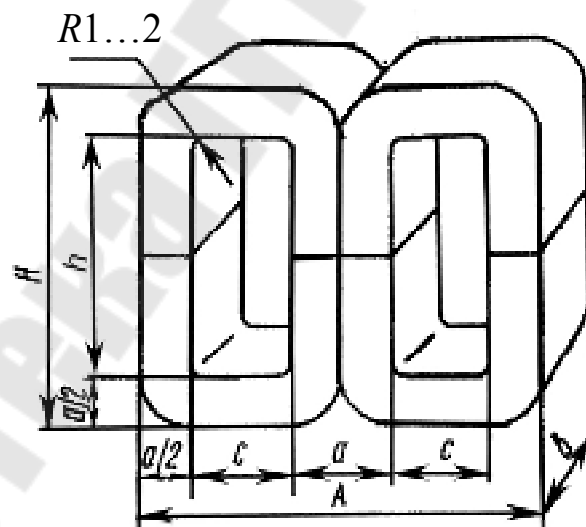


Рис. 1.2. Геометрические размеры магнитопроводов типа ШЛ (ШЛМ) из электротехнической стали броневого конструктива

Таблица 1.4

**Справочная таблица типоразмеров магитопроводов
из электротехнической стали**

Обозначение типоразмера магитопровода, $a \times b$		A , мм	H , мм	c , мм	h , мм	$S_{ст}$, см ²	$l_{ср}$, см	Масса G , г
ШЛМ	8	26	21	5	13	0,54	4,9	22
						0,72		28
						0,95		35
						1,22		45
ШЛМ	10	32	28	6	18	0,9	6,4	45
						1,0		56
						1,5		72
						1,9		91
ШЛМ	12	40	35	8	23	1,26	8,1	90
						1,76		115
						2,0		150
						2,7		180
ШЛМ	16	50	42	9	26	2,3	9,5	175
						2,9		215
						3,6		270
						4,6		350
ШЛМ	20	64	56	12	36	3,6	12,7	370
						4,6		435
						6,1		580
						7,6		730
ШЛМ	25	80	70	15	45	5,6	15,9	710
						7,2		905
						9,5		1120
						10,8		1390
ШЛМ	40	128	112	24	72	14,4	25,5	2750
						18,0		3400
						23,0		4400
ШЛ	16	64	56	16	40	2,9	13,6	300
						3,6		370
						4,6		470
ШЛ	20	80	70	20	50	3,6	17,1	460
						4,6		580
						6,1		740
						7,6		920

Обозначение типоразмера магнитопровода, $a \times b$			A , мм	H , мм	c , мм	h , мм	$S_{ст}$, см ²	$l_{ср}$, см	Масса G , г
ШЛ	25	× 25	100	87,5	25	62,5	5,6	21,3	900
		× 32					7,2		1200
		× 40					9,5		1500
		× 50					10,8		1800
ШЛ	32	× 32	128	112	32	80	9,3	27,3	1900
		× 40					11,6		2400
		× 50					14,4		3000
		× 64					18,7		3800
ШЛ	40	× 40	160	140	40	100	14,4	34,2	3700
		× 50					18,0		4700
		× 64					23,0		6000
		× 80					29,0		7500

Таблица 1.5

**Коэффициент заполнения окна обмотками $k_{из}$
для трансформаторов с рабочей частотой 50 Гц**

Конструкция магнитопровода	Суммарная мощность обмоток			
	10–50	50–150	150–300	300–1000
Стержневая	0,26–0,37	0,37–0,43	0,43–0,47	0,43–0,5
Броневая	0,3–0,4	0,4–0,5	0,5–0,51	0,51–0,54

Искомое произведение для тороидальных сердечников из феррита можно рассчитать по формуле: $S_{ок} S_c = \frac{\pi d_B^2}{4} k_{и} \frac{D_H - d_B}{2} h$, где d_B , D_H , h – геометрические размеры тороидального сердечника на рис. 1.3 и табл. 1.6; $k_{и}$ – коэффициент использования окна. Технологически сложно выполнить обмотку тороидального сердечника с полным заполнением окна. Как правило, выполняют укладку обмоток с равномерным распределением по всему периметру сердечника и используют не более половины площади окна. Соответственно, $k_{и}$ необходимо выбирать в пределах $0,3 \div 0,5$.

После выбора необходимого сердечника выполняется расчет ЭДС одного витка по формуле

$$e_B = 4,44 \cdot f \cdot S_c \cdot B_m \cdot \quad (1.8)$$

При этом частота рабочего тока f задана при расчете трансформатора, а величина B_m выбирается в соответствии со сделанными выше рекомендациями.

Определяем число витков первичной обмотки:

$$W_1 = \frac{U_1}{e_B}. \quad (1.9)$$

Число витков вторичных обмоток определяется аналогично.

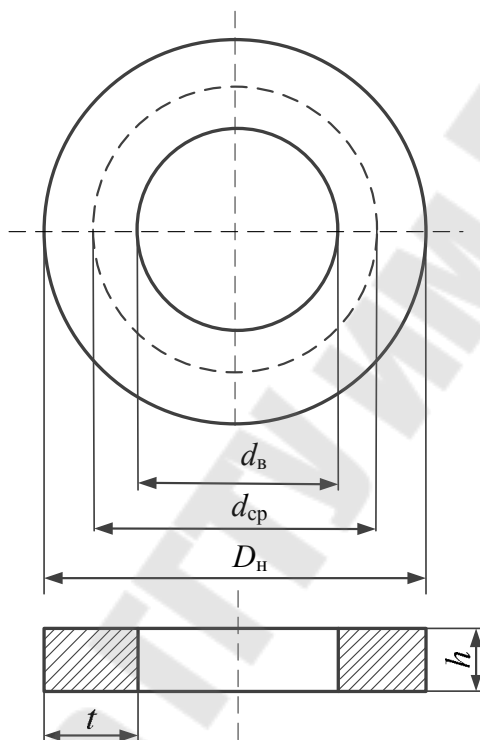


Рис. 1.3. Геометрические размеры ферритовых магнитопроводов тороидального типа

Таблица 1.6

Перечень производимых типоразмеров сердечников тороидальной конструкции

Типоразмер $D_n \times d_b \times h$, мм	Материал	A_L , нГ/виток ²	$S \cdot S$
R 3,43 × 1,78 × 1,78	N 95	760 ± 25 %	3,65
R 3,43 × 1,78 × 2,03	N 95	760 ± 25 %	4,17
R 5,84 × 3,05 × 1,52	N 95	580 ± 25 %	15,48
R 6,30 × 3,80 × 2,50	N 49	330 ± 25 %	35,42
	N 87	560 ± 25 %	35,42
R 8,00 × 4,00 × 4,00	N 87	1200 ± 25 %	100,48

Типоразмер $D_H \times d_B \times h$, мм	Материал	A_L , нГ/виток ²	$S \cdot S$
$R 9,53 \times 4,75 \times 3,17$	N 87	$970 \pm 25 \%$	134,19
$R 10,0 \times 6,00 \times 4,00$	N 49	$610 \pm 25 \%$	226,08
	N 87	$900 \pm 25 \%$	226,08
$R 12,5 \times 7,50 \times 5,00$	N 49	$660 \pm 25 \%$	551,95
	N 87	$1120 \pm 25 \%$	551,95
$R 13,3 \times 8,30 \times 5,00$	N 87	$1040 \pm 25 \%$	675,98
$R 12,7 \times 7,90 \times 6,35$	N 87	$1330 \pm 25 \%$	746,64
$R 14,0 \times 9,00 \times 5,00$	N 87	$970 \pm 25 \%$	794,81
$R 18,4 \times 5,90 \times 5,90$	N 87	$2950 \pm 25 \%$	1007,64
$R 15,8 \times 8,90 \times 4,70$	N 87	$1190 \pm 25 \%$	1008,25
$R 15,0 \times 10,4 \times 5,30$	N 87	$850 \pm 25 \%$	1035
$R 16,0 \times 9,60 \times 6,30$	N 49	$970 \pm 25 \%$	1458,49
	N 87	$1420 \pm 25 \%$	1458,49
$R 17,0 \times 10,7 \times 6,80$	N 87	$1390 \pm 25 \%$	1925,12
$R 20,0 \times 10,0 \times 7,00$	N 87	$2130 \pm 25 \%$	2747,5
	N 95	$2600 \pm 25 \%$	2747,5
$R 20,0 \times 10,0 \times 10,00$	N 87	$3000 \pm 25 \%$	3925
$R 22,1 \times 13,7 \times 6,35$	N 87	$1340 \pm 25 \%$	3929,47
$R 22,1 \times 13,7 \times 7,90$	N 87	$1660 \pm 25 \%$	4888,63
$R 22,1 \times 13,7 \times 7,90$	N 49	$1130 \pm 25 \%$	4888,63
$R 20,0 \times 10,0 \times 15,0$	N 87	$4500 \pm 25 \%$	5887,5
$R 22,6 \times 14,7 \times 9,20$	N 87	$1740 \pm 25 \%$	6164,38
$R 22,1 \times 13,7 \times 12,5$	N 87	$2630 \pm 25 \%$	7735,17
$R 25,3 \times 14,8 \times 10,0$	N 87	$2360 \pm 25 \%$	9027,19
	N 95	$3200 \pm 25 \%$	9027,19
$R 25,3 \times 14,8 \times 15,0$	N 87	$3500 \pm 25 \%$	13540,78
$R 25,3 \times 14,8 \times 20,0$	N 87	$4680 \pm 25 \%$	18054,37
$R 30,5 \times 20,0 \times 12,5$	N 87	$2320 \pm 25 \%$	20606,25
$R 29,5 \times 19,0 \times 14,9$	N 87	$2880 \pm 25 \%$	22167,79
	N 95	$3700 \pm 25 \%$	22167,79
$R 34,0 \times 20,5 \times 10,0$	N 87	$2230 \pm 25 \%$	22268
$R 34,0 \times 20,5 \times 12,5$	N 87	$2790 \pm 25 \%$	27835
$R 38,1 \times 19,05 \times 12,7$	N 87	$3870 \pm 25 \%$	34461,04
$R 36,0 \times 23,0 \times 15,0$	N 49	$1300 \pm 25 \%$	40488,34
	N 87	$2940 \pm 25 \%$	40488,34
$R 41,8 \times 26,2 \times 12,5$	N 87	$2560 \pm 25 \%$	52538,4

Окончание табл. 1.6

Типоразмер $D_H \times d_B \times h$, мм	Материал	A_L , нГ/виток ²	$S \cdot S$
$R 40,0 \times 24,0 \times 16,0$	N 87	$3590 \pm 25 \%$	57876,48
$R 50,0 \times 30,0 \times 20,0$	N 87	$4460 \pm 25 \%$	141300
$R 58,3 \times 32,0 \times 18,0$	N 87	$4800 \pm 25 \%$	190268,93
$R 58,3 \times 40,8 \times 17,6$	N 87	$2760 \pm 25 \%$	201238,33
$R 58,3 \times 40,8 \times 20,2$	N 87	$3200 \pm 25 \%$	230966,72
$R 68,0 \times 48,0 \times 13,0$	N 87	$1990 \pm 25 \%$	235123,2
$R 63,0 \times 38,0 \times 25,0$	N 87	$5000 \pm 25 \%$	354231,25
$R 87,0 \times 54,3 \times 13,5$	N 87	$2790 \pm 25 \%$	510882,28
$R 102 \times 65,8 \times 15,0$	N 87	$2880 \pm 25 \%$	922765,35
$R 140 \times 103 \times 25,0$	N 87	$3400 \pm 25 \%$	3851730,06

Таблица 1.7

**Удельные потери при частоте 50 Гц и магнитная индукция стали
в сильных полях**

Марка стали	Толщина листа, мм	Удельные потери $P_{уд}$, Вт/кг, не более, при индукции, Тл			Магнитная индукция B_m , Тл, не менее, при напряженности магнитного поля, А/м, равной		
		1,0	1,5	1,7	100	1000	2500
3311	0,8	4,0				1,75	
3411	0,35 0,20		1,75 1,50			1,45	1,75 1,70
3412	0,50 0,35		2,10 1,50				1,80 1,80
3413	0,35 0,30		1,30 1,19	1,90 1,75	1,58 1,58		1,85 1,85
3414	0,35 0,30 0,27		1,10 1,03	1,60 1,50	1,60		1,88 1,85
3415	0,35 0,30		0,97	1,40	1,61		1,90
3404	0,35 0,30			1,60 1,50	1,61		
3405	0,30 0,27			1,40 1,38	1,61		
3406	0,35 0,30 0,27			1,43 1,33 1,27	1,62		

1.5. Определение мощности потерь и КПД трансформатора

Потери мощности в трансформаторе состоят из потерь, связанных с перемагничиванием магнитопровода, и потерь, вызванных протеканием тока в омическом сопротивлении обмоток.

Рассчитать потери в магнитопроводе можно, воспользовавшись справочными данными удельных потерь.

Потери в электротехнической стали:

$$P_{\text{маг}} = GP_{\text{уд}}, \quad (1.10)$$

где G – масса магнитопровода из табл. 1.4; $P_{\text{уд}}$ – удельные потери из табл. 1.7.

Потери в ферритовых сердечниках:

$$P_{\text{маг}} = \frac{h\pi}{4} (D_{\text{н}}^2 - d_{\text{в}}^2) P_{\text{уд}}, \quad (1.11)$$

где $D_{\text{н}}$, $d_{\text{в}}$, h – размеры сердечника из табл. 1.6; $P_{\text{уд}}$ – удельные потери из табл. 1.7.

Расчет потерь в обмотке для номинального режима работы трансформатора (в данном случае заданного режима) выполняется по формуле

$$P_{\text{обм}} = i_1^2 R_1 + i_2^2 R_2 + \dots + i_n^2 R_n, \quad (1.12)$$

где i_n – номинальное значение тока в обмотке, вызванной ее нагрузкой; R_n – активное сопротивление соответствующей обмотки.

Ток первичной обмотки состоит из тока намагничивания (тока холостого хода) и тока нагрузки. Поэтому, значение тока для первичной обмотки i_1 необходимо определить следующим образом:

$$i_1 = \sqrt{i_{\text{н}}^2 + i_{\text{м}}^2}, \quad (1.13)$$

где $i_{\text{н}}$ – номинальный ток первичной обмотки, определяемый по формуле (1.2); $i_{\text{м}}$ – ток намагничивания (необходимый для изменения магнитного состояния сердечника с заданным значением магнитной индукции). Значение тока намагничивания для замкнутого сердечника определяют:

$$i_{\text{м}} = \frac{Hl_{\text{ср}}}{W_1}, \quad (1.14)$$

где H – напряженность магнитного поля, определяемая по соответствующим кривым намагничивания (рис. 1.4, 1.5) для ранее определенных значений индукции; l_{cp} – средняя длина магнитной линии магнитопровода; W_1 – количество витков первичной обмотки.

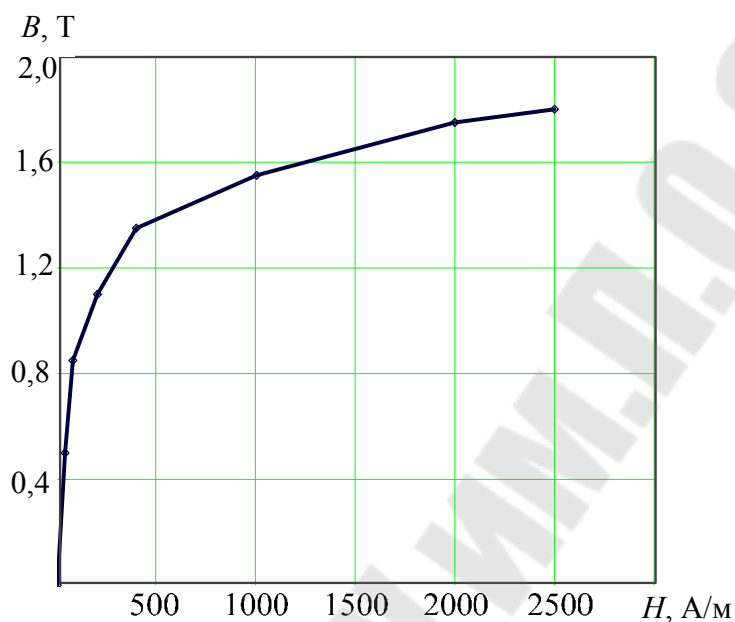


Рис. 1.4. Типовая зависимость индукции в электротехнической стали от напряженности поля

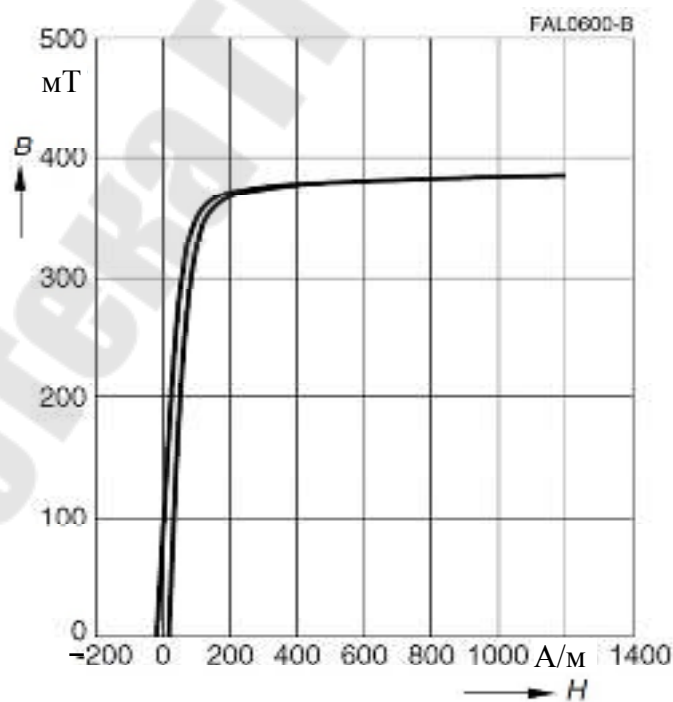


Рис. 1.5. Типовая зависимость индукции в ферритах от напряженности поля

Для определения активной составляющей сопротивления обмотки необходимо рассчитать длину провода в обмотке. Методика определения длины провода основана на определении средней длины витка обмотки.

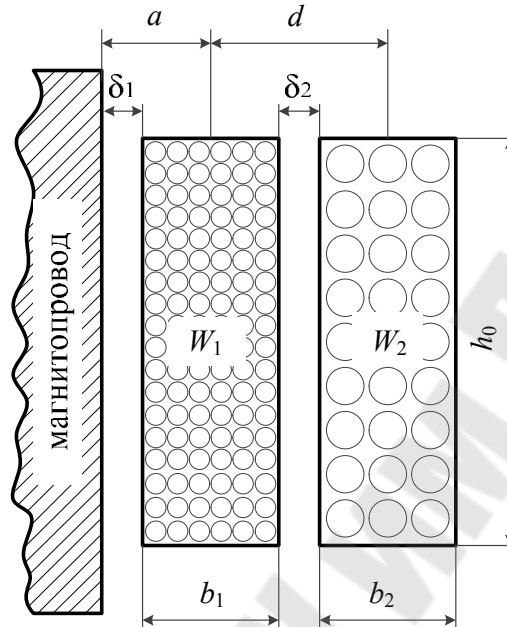


Рис. 1.6. Сечение обмоток трансформатора:

a – расстояние от магнитопровода до середины обмотки;
 b_1, b_2 – толщина укладки первичной и вторичной обмоток;
 d – расстояние между серединами обмоток; δ_1, δ_2 – толщина изоляции; h_0 – длина обмотки (для тороидальных обмоток средняя длина сектора)

Средние длины витков обмоток определяются на основании действительных геометрических размеров. Толщина укладки обмоток:

$$b_1 = \frac{W_1 S_{1\text{ВИТ}}}{k_{1\text{УК}} h_0};$$

$$b_2 = \frac{W_2 S_{2\text{ВИТ}}}{k_{2\text{УК}} h_0},$$

где W_1, W_2 – количество витков обмоток, рассчитанных по формуле (1.9); $S_{1\text{ВИТ}}, S_{2\text{ВИТ}}$ – сечение проводов обмоток (1.4); $k_{1\text{УК}}, k_{2\text{УК}}$ – соответствующие коэффициенты укладки.

Так, средняя длина витка для первичной обмотки составит:

$$l_{m1} = 2(t + h + b_1 + 2\delta_1). \quad (1.15)$$

Средняя длина витка вторичной обмотки вычисляется по формуле

$$l_{m2} = 2(t + h + 2(b_1 + \delta_1 + \delta_2) + b_2), \quad (1.16)$$

где t, h – линейные размеры магнитопровода в соответствии с рис. 1.3.

Оценить активное сопротивление обмотки можно по формуле

$$R_{\text{обм1}} = \frac{l_{m1} W_1 \rho}{S_{\text{1вит}}} [1 + \alpha(T_{\text{доп}} - T_0)], \quad (1.17)$$

где $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом · м – удельное сопротивление меди; $\alpha = 0,004$ 1/°C – температурный коэффициент сопротивления меди; $T_{\text{доп}}$ – максимально допустимая температура нагрева обмотки; $T_0 = 20$ °C.

Рассчитать КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н}} + P_{\text{маг}} + P_{\text{обм}}} 100 \%$$

Сопоставить значение полученного КПД с заданным в табл. 1.8. Если полученное значение отличается от заданного более чем на 5 %, необходимо изменить значения выбираемых параметров и произвести расчет повторно.

Таблица 1.8

Таблица вариантов заданий

Номер варианта	Мощность нагрузки $P_{\text{н}}$, Вт	Напряжение первичной обмотки U_1 , В	Напряжение вторичной обмотки U_2 , В	Частота питающей сети f , Гц	Марка стали магнитопровода	Коэффициент полезного действия η , %
1	20	110	25	50	3311	65
				5000		
2	50	220	36	50	3411	65
				7000		
3	70	380	42	50	3412	70
				10000		
4	100	110	10	50	3413	70
				12000		
5	150	220	15	50	3414	75
				15000		
6	200	380	20	50	3415	75
				20000		

Номер варианта	Мощность нагрузки $P_{нв}$, Вт	Напряжение первичной обмотки U_1 , В	Напряжение вторичной обмотки U_2 , В	Частота питающей сети f , Гц	Марка стали магнитопровода	Коэффициент полезного действия η , %
7	250	110	220	50	3404	80
				25000		
8	300	220	110	50	3405	80
				30000		
9	350	380	380	50	3406	85
				5000		
10	400	110	42	50	3411	85
				7000		
11	450	220	50	50	3412	85
				10000		
12	500	380	60	50	3413	85
				12000		
13	550	110	72	50	3413	85
				15000		
14	600	220	110	50	3414	90
				20000		
15	700	380	600	50	3415	90
				30000		

Контрольные вопросы

Ответы на все вопросы должны содержать расчетные и фактические значения.

1. Как изменятся параметры трансформатора, если увеличить плотность тока в обмотке?

2. Каким диаметром провода выполнять обмотку наиболее эффективно и почему?

3. Почему трансформаторы, работающие на промышленной частоте, изготавливают с использованием стального магнитопровода, но не феррита?

4. Как значение магнитной индукции в магнитопроводе влияет на массогабаритные показатели (ответ обосновать расчетными соотношениями)?

5. В каких частотных диапазонах используют ферритовые магнитопроводы силовых трансформаторов?

6. Какие значения индукции в магнитопроводе рекомендуют производители ферромагнитных материалов? Как это связано с рабочей частотой трансформатора?

7. Как изменится количество витков в обмотке трансформатора, если увеличить сечение магнитопровода в два раза, как при этом изменится расход меди (ответ обосновать расчетными соотношениями)?

8. Перечислите основные факторы, которые определяют габаритные параметры трансформатора.

9. От каких параметров зависит КПД трансформатора? Как увеличить (уменьшить) КПД трансформатора?

10. Как изменится расход активных материалов (обмоточного провода, ферромагнитного материала), если снизить КПД трансформатора на 20 % (ответ подтвердить значениями, полученными в расчетах)?

2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Цель работы: освоение методики расчета и проектирования индуктивности с магнитопроводом и немагнитным зазором.

Задание: определить значение индуктивности обмоток трансформатора, спроектированного в предыдущем разделе, а также рассчитать индуктивность катушки с сердечником и воздушным зазором.

2.1. Основные определения

Индуктивностью (коэффициентом самоиндукции) называют коэффициент пропорциональности между током и возбуждаемым им потокосцеплением. Если речь идет об отношении потокосцепления одного из двух контуров к силе обуславливающего его тока в другом контуре, то говорят о взаимной индуктивности (коэффициенте взаимной индукции).

Поскольку индуктивность, как это следует из определения, зависит от распределения тока в проводниках, при ее расчете надо учитывать влияние частоты. Под низкой частотой понимается такая, при которой можно пренебречь неравномерностью распределения тока по сечениям проводов; длина электромагнитной волны при этом значительно больше линейных размеров сечения. Под весьма высокой частотой понимают частоту, длина волны которой значительно меньше

размеров поперечного сечения провода; при этом ток можно считать сосредоточенным в поверхностном слое нулевой толщины. Высокие частоты занимают промежуточное положение.

С практической точки зрения целесообразно рассмотреть отдельно методы расчета индуктивности воздушных контуров, катушек с замкнутыми сердечниками и катушек с сердечниками, имеющими воздушный зазор.

Получение расчетных соотношений для индуктивности возможно на основе следующих соображений. По определению индуктивность:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \omega^2 G, \quad (2.1)$$

где I – ток; Ψ – обусловленное им потокосцепление; ω – число витков; G – некоторая величина, являющаяся функцией геометрических размеров системы и имеющая размерность магнитной проводимости.

Если частные потоки сцепляются со всеми витками, то для расчета индуктивности берется проводимость пространства, в котором распространяется суммарный поток.

На практике, однако, необходимо суммировать отдельные величины потокосцеплений. Находить индуктивность как сумму слагаемых произведений проводимостей частных потоков на квадрат числа витков, с которым этот поток сцепляется. Таким образом:

$$L \approx \sum_{k=1}^n W_k^2 G_k, \quad (2.2)$$

где G_k – проводимость для k -го потока, сцепленного с W_k витками.

Вычисление частных проводимостей в общем случае является весьма сложной задачей, поэтому приходится прибегать к приближенным методам аппроксимации возможных путей потока объемами простой геометрической формы.

Часто на практике приходится определять индуктивность катушек, для которых расчет имеет некоторые особенности. Во-первых, катушки можно рассматривать как сложные контуры в форме спирали, витки которой имеют ход в осевом или поперечном направлении к оси. Пренебрежение спиральностью витков приводит к незначительной погрешности и весьма облегчает расчет; в связи с этим такое допущение при практических расчетах делается всегда. Во-вторых, при расчете индуктивности катушек необходимо учитывать наличие

неполного заполнения, т. е. вводить поправку на расстояние между витками (в частности, на изоляцию).

Расчет индуктивностей катушек выполняют по одному из двух методов: суммирования или массивного витка. Метод суммирования, заключающийся в учете частичных собственных и взаимных индуктивностей отдельных витков, не имеет явных преимуществ и применяется довольно редко (главным образом для численных расчетов катушек сложной формы). Методом массивного витка сравнивают индуктивность рассматриваемой катушки с индуктивностью массивного витка, имеющего такую же форму и размеры, при этом предполагая, что коэффициент заполнения равен единице. Таким образом, находят расчетную индуктивность, к которой затем вычисляют поправки на изоляцию.

Рассмотрим катушки с замкнутыми магнитопроводами (сердечниками). Расчет индуктивности катушек в магнитопроводах замкнутой формы осуществляют по общим соотношениям для магнитных цепей. В конечном своем виде эти соотношения отличаются от результатов, полученных для воздушных катушек, наличием множителя, учитывающего свойства сердечника и равного его магнитной проницаемости.

Для получения практических формул принимают, как правило, что весь магнитный поток проходит через магнитопровод (без утечек и рассеяния), а средняя магнитная силовая линия пронизывает центры масс поперечных сечений магнитной цепи (т. е. совпадает со средней линией магнитопровода). Исключением являются особые случаи, например, катушки на сердечниках тороидальной формы с неполной обмоткой.

2.2. Катушки индуктивности на замкнутых сердечниках

Наиболее распространены катушки индуктивности на тороидальных сердечниках (рис. 1.3). Связь между магнитной проницаемостью материала кольцевого магнитопровода μ_r и индуктивностью обмотки L в этом случае устанавливает формула

$$L = \mu_0 \omega^2 \frac{(\mu_r - 1)S_c + S_k}{\pi d_{к.ср}}, \quad (2.3)$$

где S_c и S_k – площади поперечных сечений сердечника и каркаса; $d_{к.ср}$ – длина средней силовой линии; ω – количество витков обмотки.

Наличие каркаса или первичной обмотки изменяет площадь, охватываемую витком, а следовательно, и индуктивность обмотки.

Для тороидального сердечника длина средней силовой линии с учетом каркаса:

$$d_{\text{к.ср}} = \frac{D_{\text{к}} - d_{\text{к}}}{\ln(D_{\text{к}} / d_{\text{к}})}, \quad (2.4)$$

где $D_{\text{к}}$ и $d_{\text{к}}$ – наружный и внутренний диаметры каркаса (обмотки).

Приближенная формула расчета индуктивности тороидальной обмотки:

$$L = \frac{\mu_a \omega^2 h t}{\pi d_{\text{ср}}}, \quad (2.5)$$

где $\mu_a = \mu_0 \mu_r$ (μ_r – относительная магнитная проницаемость; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость).

2.3. Катушки индуктивности на разомкнутых сердечниках

Разомкнутым сердечником принято называть магнитопровод, содержащий немагнитный зазор в поперечном сечении. Немагнитный зазор в магнитопроводах реакторов и трансформаторов вводится для различных целей:

1. Линеаризации вебер-амперной характеристики.
2. Если напряжение, воздействующее на обмотку трансформатора, содержит постоянную составляющую, это приводит к перегрузке обмотки, формированию нелинейных искажений. Воздушный зазор позволяет обеспечить симметричное перемагничивание сердечника.
3. Для изготовления индуктивности небольшого значения, но со значительным током обмотки.
4. Подбором немагнитного зазора можно уменьшить объем магнитопровода реактора. Энергоемкость реактора:

$$LI^2 = \frac{\mu_a S_{\text{м}} \omega^2}{l_{\text{м}}} \frac{H^2 l_{\text{м}}^2}{\omega^2} = \mu_{\text{эк}} H^2 V_{\text{м}}. \quad (2.6)$$

где ω – количество витков обмотки, $l_{\text{м}}$ – длина средней магнитной линии.

Если учесть зависимость $\mu_{\text{эк}}$ от длины немагнитного зазора, из (2.6) следует:

$$V_{\text{м}} = \frac{LI^2}{\mu_{\text{эк}}H^2}.$$

Подбор такого зазора, при котором реактор (индуктивность) обладает наибольшей индуктивностью, наибольшей добротностью и наименьшим объемом при заданной энергоемкости, называют оптимизацией немагнитного зазора.

Для магнитопроводов с малыми воздушными зазорами полностью применимы все формулы и методы, употребляемые для замкнутых магнитопроводов, при замене магнитной проницаемости материала сердечника на некоторую величину, называемую проницаемостью сердечника. Проницаемость сердечника вычисляют по увеличению магнитного сопротивления за счет введения малого зазора. Заметим, что индуктивность обратно пропорциональна магнитному сопротивлению (при прочих равных условиях). Отношение магнитных сопротивлений зазора и магнитопровода называют коэффициентом размагничивания N .

Под малыми зазорами понимают такие, ширина которых много меньше любого линейного размера поперечного сечения магнитопровода. Для таких случаев расчетные формулы выводят в предположении, что поле в зазоре близко к однородному и потоки рассеяния пренебрежимо малы по сравнению с рабочим потоком. При этом используют связь между индуктивностью и магнитным сопротивлением, рассматривая магнитную цепь, состоящую из двух участков с разными магнитными сопротивлениями, причем сечение зазора принимают равным сечению полюсов; длину магнитного пути по зазору принимают равной расстоянию между полюсами.

Рассмотрим катушки с сердечниками, имеющими воздушный зазор. Для магнитопроводов с большим воздушным зазором необходимо учитывать отклонение распределения поля в зазоре от идеализированного. При этом магнитные сопротивления для основного потока и потока рассеяния становятся соизмеримыми, и расчетные формулы существенно усложняются.

Поэтому для таких катушек применяют различные приближенные методы, основанные либо на аппроксимации картины поля простыми геометрическими фигурами, либо на выборе так называемых расчетных полюсов, либо на использовании картин плоскопараллельных полей.

На практике удобно применять метод эквивалентного зазора, позволяющий использовать все формулы для сердечников с малыми зазорами. При этом эквивалентным зазором называют такой, который имеет ту же проводимость, что и реальный, а геометрия его определяется сечением полюсов магнитопровода и некоторой эквивалентной длиной. Эквивалентную длину находят из условия равенства проводимостей на основе аппроксимации возможных путей потока.

Применительно к элементам радиоэлектронных цепей случай больших зазоров встречается сравнительно редко (исключение – катушки на стержневых сердечниках), и большая точность расчетов при этом не требуется. Индуктивность катушек на стержневых сердечниках определяют с помощью магнитной проницаемости тела (сердечника), выражаемой через коэффициент размагничивания. В этом случае коэффициент размагничивания равен проводимости (формально введенной) окружающего сердечник пространства при условии, что весь поток проходит через торцы сердечника.

Если известен для данного сердечника коэффициент размагничивания, то индуктивность катушки легко найти путем рассмотрения магнитной цепи, состоящей из двух участков с известными магнитными сопротивлениями.

В тех случаях, когда для расчетов используют коэффициент размагничивания, в формулы вместо μ_r подставляют $\mu_{\text{эк}}$ (эквивалентную магнитную проницаемость сердечника):

$$\mu_{\text{эк}} = \frac{\mu_r}{1 + (\mu_r - 1)N / (4\pi)}, \quad (2.7)$$

где N – коэффициент размагничивания:

$$N = \frac{S_M \delta}{S_3 l_M}, \quad (2.8)$$

где S_3 и δ – поперечное сечение и толщина зазора; S_M и l_M – поперечное сечение и длина средней силовой магнитной линии в магнитопроводе, соответственно. При отсутствии специальных полюсных наконечников, изменяющих равенство $S_M = S_3$, можно принять:

$$N = \frac{\delta}{l_M}. \quad (2.9)$$

С достаточной для инженерной практики точностью можно принять l_M равной средней линии магнитопровода. В частности, для тороидального сердечника с зазором $\delta < \pi d_{cp}$:

$$N = \frac{\delta}{\pi d_{cp}}. \quad (2.10)$$

Задание

1. Для магнитных систем трансформаторов, спроектированных в предыдущем разделе, рассчитайте индуктивность обмоток. Для определения магнитной проницаемости электротехнической стали необходимо воспользоваться выражением

$$\mu_r = \frac{B_M}{\mu_0 H_M}, \quad (2.11)$$

где B_M и H_M – магнитная индукция и соответствующая ей напряженность магнитного поля из табл. 1.7.

2. Для тороидального трансформатора, спроектированного в предыдущем разделе, рассчитайте индуктивность обмоток с учетом немагнитного зазора в сердечнике из феррита. Толщины зазора δ взять равными 0,01; 0,05; 0,1; 0,3; 0,5 мм.

3. Для полученных значений постройте график зависимости $L(\delta)$.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение индуктивности.
2. Передайте смысл методов расчета индуктивности суммирования и массивного витка.
3. Поясните термин «разомкнутый сердечник».
4. Зачем в магнитопровод вводят немагнитный зазор?
5. Какая толщина немагнитного зазора считается малой?
6. Каков физический смысл коэффициента размагничивания?
7. Во сколько раз изменится индуктивность обмотки трансформатора в случае увеличения сечения магнитопровода в два раза (учесть необходимое изменение количества витков (выражение 1.6)) и во сколько раз при этом изменится индуктивность этой обмотки?

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИНДУКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО ТИПА

Цель работы: освоение методики расчета и проектирования датчиков перемещения индуктивного и емкостного типа.

3.1. Индуктивные датчики

Принцип работы индуктивных датчиков основан на изменении индуктивности катушки с магнитопроводом под воздействием различных факторов. Они широко применяются при преобразовании линейных и угловых перемещений, при контроле изменения давления, расходов жидкостей и газов и т. д. Индуктивность L катушки с магнитопроводом при наличии воздушного зазора δ равна:

$$L = \frac{\omega^2}{R_{\text{м.ст}} + R_{\delta}}, \quad (3.1)$$

где ω – число витков катушки; $R_{\text{м.ст}} = l_{\text{м}} / (\mu\mu_0 S_{\text{м}})$; $R_{\delta} = 2\delta / (\mu_0 S_{\delta})$ – магнитные сопротивления магнитопровода и воздушного зазора, Гн¹; $l_{\text{м}}$ – средняя длина стального магнитопровода, м; δ – длина воздушного зазора, м; μ, μ_0 – магнитные проницаемости стального магнитопровода и воздуха, Гн/м; $S_{\text{м}}, S_{\delta}$ – площади поперечного сечения стального магнитопровода и воздушного зазора, м².

Согласно (3.1), индуктивные датчики можно построить на использовании изменения величин, входящих в это выражение. Наибольшее применение находят индуктивные датчики с переменными величинами воздушного зазора, площадью зазора или магнитной проницаемостью (магнитоупругие датчики).

На рис. 3.1, а изображен простейший индуктивный датчик линейного перемещения с переменной величиной воздушного зазора δ .

Изменение воздушного зазора δ при перемещении якоря 1 относительно неподвижного магнитопровода 2 приводит к изменению индуктивности катушки датчика 3. Магнитное сопротивление $R_{\text{м}}$ определяется сопротивлениями стального магнитопровода (сердечника) $R_{\text{м.ст}}$ и двух воздушных зазоров R_{δ} . Если $R_{\text{м}} > R_{\text{м.ст}}$, то индуктивность катушки:

$$L \approx \frac{\omega^2}{R_{\delta}} = \frac{\mu_0 \omega^2 S}{2\delta}. \quad (3.2)$$

Из уравнения (3.2) следует, что индуктивность катушки обратно пропорциональна величине воздушного зазора. Ток в цепи катушки:

$$I = U_1 / \sqrt{(X_k + X_n)^2 + (R_k + R_n)^2}, \quad (3.3)$$

где R и X – активное и индуктивное сопротивление катушки и нагрузки.

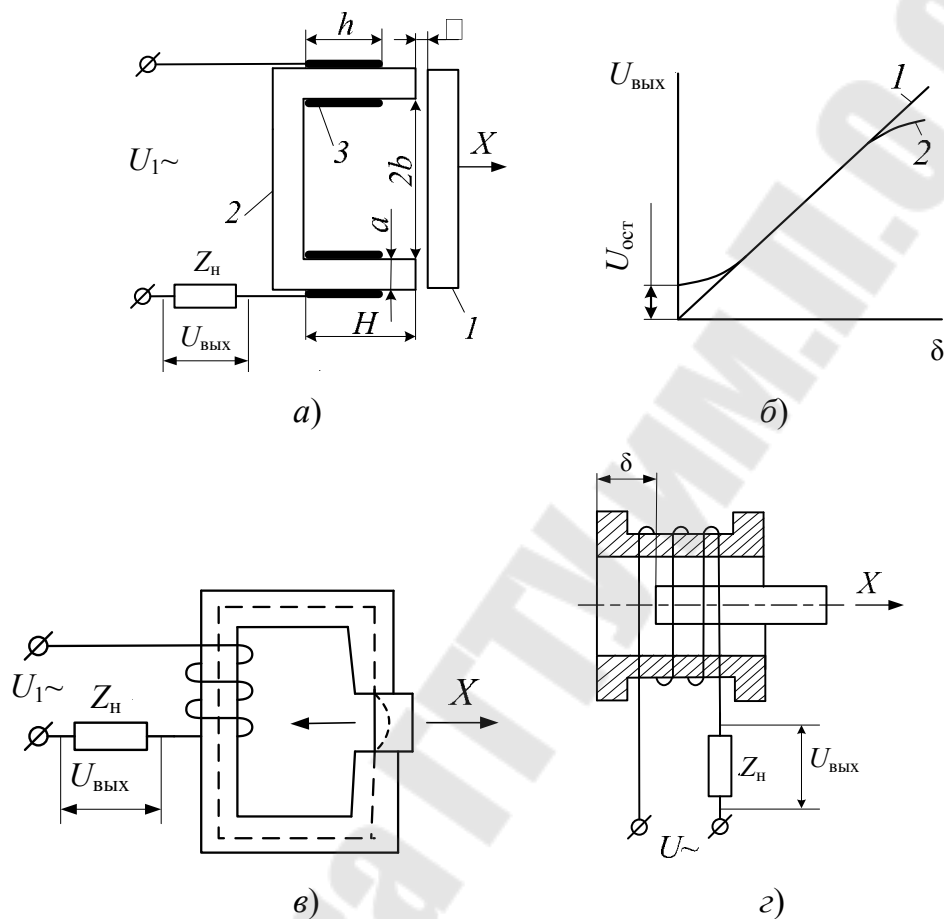


Рис. 3.1. Индуктивные датчики с переменной величиной воздушного зазора (а) и его характеристики (б), с переменной площадью сечения (в), плунжерного типа (г)

Уравнение (3.2) дает качественное представление о процессе преобразования перемещения в электрический параметр. Для расчета функциональной зависимости между величиной зазора и индуктивностью применяются более сложные расчетные выражения. Причем для каждого конструктивного решения необходимо разработать свою систему допущений и уравнений, описывающих эту зависимость.

Наибольшее распространение в датчиках перемещений получила система – схема с применением П-образного сердечника (рис. 3.1, а). При этом малый зазор расположен между торцами стержней и плоско-

стью, которая является магнитным экраном. Для этой схемы приняты следующие предположения: $(H - h) \geq b$; $\delta \ll a$; $\delta \ll l$, где l – ширина сердечника в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа; h – высота обмотки.

Предварительно определяют размерные коэффициенты:

$$k^2 = \left[\frac{b}{(a+b)} \right]^2; \quad (3.4)$$

$$A = \frac{2}{\pi} \left(\ln \frac{4}{\sqrt{1-k^2}} - \frac{1-k^2}{4} \right); \quad (3.5)$$

$$\tau = \frac{\delta A}{2b + \pi \delta}. \quad (3.6)$$

Индуктивность датчика с переменным зазором (рис 3.1, а) определяется по формуле

$$L = 0,5 \mu_0 \omega^2 \left[\left(A + \frac{l}{2b} \right) \left(H - \frac{2}{3} h \right) + \frac{a\tau}{30} \left(\frac{a+b}{b} + 20,5 \right) + \tau A + \frac{la}{2\delta} \right]. \quad (3.7)$$

Задание

1. Для параметров, соответствующих варианту из табл. 3.1, постройте график зависимости $L = f(\delta)$ для заданного диапазона $\delta_{\min} - \delta_{\max}$.

2. В одних координатных осях с предыдущим графиком постройте график зависимости тока в обмотке от зазора.

Примечание. При выполнении задания рекомендуется использование вычислительной техники.

Таблица 3.1

Варианты заданий

Номер варианта	a , мм	b , мм	l , мм	H , мм	h , мм	δ_{\min} , мм	δ_{\max} , мм	ω , витков	U , В	f , Гц
1	11	5	18	28	18	0,1	5,0	330	2,4	50
2	10	10	20	30	25	0,1	10,0	660	6,3	50
3	12	20	50	50	45	0,1	10,0	500	12,6	100
4	15	30	30	30	25	0,1	10,0	1000	36	200
5	20	50	20	50	45	0,1	15,0	500	24	100
6	10	100	50	40	35	0,1	15,0	500	36	100

Номер варианта	a , мм	b , мм	l , мм	H , мм	h , мм	$\delta_{\text{мин}}$, мм	$\delta_{\text{макс}}$, мм	ω , витков	U_{\sim} , В	f , Гц
7	5	50	10	30	27	0,1	10,0	1000	2,4	50
8	10	70	20	50	48	0,1	10,0	1000	6,3	25
9	15	90	30	30	25	0,1	5,0	1000	12,6	25
10	20	100	20	50	47	0,1	5,0	1000	36	50

Контрольные вопросы

1. Каков физический принцип работы индуктивных датчиков перемещения?
2. Как связана индуктивность катушки с величиной воздушного зазора?
3. Перечислите основные конструктивные принципы индуктивных датчиков.
4. Приведите структурные схемы основных типов индуктивных датчиков.
5. Дайте определение термина «сопротивление».

3.2. Емкостные датчики

Принцип действия емкостных датчиков, которые также являются преобразователями параметрического типа, основан на изменении емкости конденсатора при воздействии входной величины. В большинстве случаев используются конденсаторы плоскопараллельного или цилиндрического типов. Основными параметрами и характеристиками емкостных датчиков являются: начальная емкость C_0 ; реактивное $X_c = 1/\omega C$ и активное R_c сопротивления, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$; постоянная времени $T = R_c C_0$; максимальное изменение емкости ΔC ; сила взаимодействия электродов; чувствительность; статическая и динамическая характеристики.

Так как величина емкости плоского конденсатора зависит от площади электродов S , м^2 , составляющих конденсатор, расстояния между электродами d , м, диэлектрической проницаемости среды ε и абсолютной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12}$ Ф/м между электродами, то определяется выражением

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}. \quad (3.8)$$

В соответствии с выражением емкостные датчики выполняют трех типов (с изменяющимися S , d или ϵ). В зависимости от типа емкостного датчика рассматривают следующие статические характеристики:

$$\Delta C = f(S); \Delta C = f(d); \Delta C = f(\epsilon).$$

Емкостные датчики с изменяющейся площадью электродов S применяют для преобразования линейных и угловых перемещений (рис. 3.2, *a–в*). Изменение емкости у плоского (рис. 3.2, *a*) и цилиндрического конденсаторов (рис. 3.2, *б*) пропорционально линейному перемещению Δl .

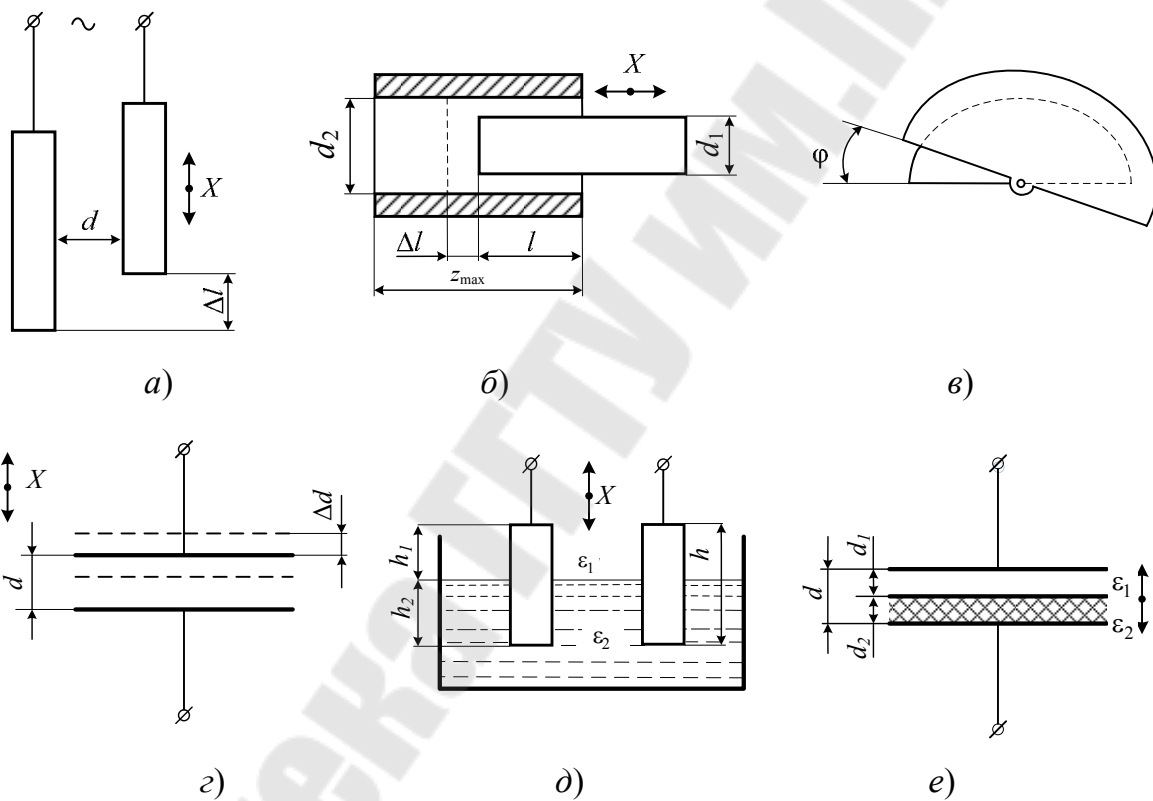


Рис. 3.2. Емкостные датчики:

a–в – с переменной площадью электродов; *г* – с изменяющимся расстоянием между электродами; *д, е* – с изменяющейся диэлектрической проницаемостью

Для плоского конденсатора без учета краевых эффектов:

$$\Delta C = \epsilon \epsilon_0 \frac{\Delta S}{d} = \epsilon \epsilon_0 b \frac{\Delta l}{d}, \quad (3.9)$$

где b – ширина электродов.

Для цилиндрического конденсатора емкость определяется:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}. \quad (3.10)$$

Изменение емкости, вызванное линейным перемещением внутреннего электрода на Δl , составит:

$$\Delta C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \Delta l, \quad (3.11)$$

где d_1 и d_2 – диаметры внешнего и внутреннего электродов, соответственно.

Емкость датчиков поворотного типа (рис. 3.2, в) линейно зависит от угла поворота φ :

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S \left(1 - \frac{\varphi}{\pi}\right)}{d}. \quad (3.12)$$

Емкостные датчики с изменяющимся зазором d (рис. 3.2, г) имеют в общем случае нелинейную статическую характеристику $C = \varphi(\Delta d)$. Емкость плоского конденсатора при величине зазора $d - \Delta d$:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d \left(1 - \frac{\Delta d}{d}\right)} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S (1 + \Delta d / d)}{d \left(1 - \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2\right)}. \quad (3.13)$$

При малых перемещениях, когда $(\Delta d \ll d)$, величиной $\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2$ можно пренебречь. Тогда, соответственно, емкость конденсатора и ее изменение:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} \left[1 + \frac{\Delta d}{d}\right]; \quad \Delta C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d^2} \Delta d. \quad (3.14)$$

Следовательно, при малых перемещениях статическая характеристика емкостного датчика с изменяющимся зазором будет линейной. Датчики этого типа обладают большой чувствительностью и поэтому

используются для контроля очень малых перемещений от 0 до 1 мм. Датчики с изменяющейся площадью электродов применяются для измерения перемещений, превышающих 1 мм.

Емкостные датчики с изменяющейся диэлектрической проницаемостью ε применяют для контроля уровня, состава и концентрации жидкости, а также толщины и влажности твердых диэлектриков. Датчик для измерения уровня жидкости (рис. 3.2, *д*) представляет собой сложный конденсатор, общая емкость которого равна емкости двух параллельно включенных конденсаторов с диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2 :

$$\Delta C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d^2} \Delta d C = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_0 b h_1}{d} + \frac{\varepsilon_2\varepsilon_0 b h_2}{d} = \left(\frac{\varepsilon_1\varepsilon_0 b h_1}{d} \right) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \frac{b h_2}{d}. \quad (3.15)$$

По изменению емкости, которая в рассматриваемом случае линейно зависит от h_2 , контролируют уровень жидкости.

Конденсатор с двухслойным диэлектриком (рис. 3.2, *е*) представляет собой два последовательно включенных конденсатора, эквивалентная емкость которых:

$$C = \frac{S}{\frac{d_1}{\varepsilon_1\varepsilon_0} + \frac{d_2}{\varepsilon_1\varepsilon_0}}. \quad (3.16)$$

При постоянных S и d изменение толщины (уровня) диэлектрика приводит, согласно (3.16), к изменению емкости. Данный вид датчиков применяется для измерения малых перемещений.

Задание

1. Для параметров, соответствующих варианту из табл. 3.2, определите значения изменений емкости системы ΔC , вызванных перемещением.

Таблица 3.2

Варианты заданий

Номер варианта	Тип датчика	Размерные параметры датчика			
		b , см	d , мм	Δl , мм	S , см ²
1	а	10	0,05	150	100
2		1	0,1	10	200

Номер варианта	Тип датчика	Параметры					
		d_1 , мм	d_2 , мм	Δl , мм	Z_{\max} , см		
3	б	10	10,2	150	100		
4		50	50,5	10	10		
		S , см ²	d , мм	φ_1 , град	φ_2 , град		
5	в	1	0,01	2	47		
6		100	0,2	120	30		
		S , см ²		d , мм		Δd , мм	
7	г	3		1		0,001	
8		200		1		0,05	
		b , см	h , см	h_1 , см	d , мм	ε_1 , Ф/м	ε_2 , Ф/м
9	д	10	0,5/10	49,5/40	5	1	90
10		1	30	от 0,5 до 25	0,2	1	8
		S , см ²	d , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	ε_1 , Ф/м	ε_2 , Ф/м
11	е	50	1	0,5/0,1	0,5/0,9	1	80
12		1	0,1	0,05/0,01	0,05/0,09	1	7

Контрольные вопросы

1. Каков физический принцип действия емкостных датчиков перемещения?
2. Перечислите основные особенности применения емкостных датчиков (отличительные особенности от датчиков индуктивного типа).
3. Перечислите основные типы емкостных датчиков.
4. Начертите структуру емкостного датчика с переменной площадью.
5. Начертите структурную схему датчика с изменяющимся расстоянием между электродами.
6. Начертите структуру датчика с изменяющейся диэлектрической проницаемостью.
7. Каков диапазон измерения у датчиков с изменяющейся площадью электродов?
8. Каков диапазон измерения у датчиков с изменяющимся расстоянием между электродами?
9. Каково назначение датчиков поворотного типа?
10. Каково назначение датчиков с изменяющейся диэлектрической проницаемостью?

4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

Цель работы: Изучить методику выбора электродвигателя для длительного режима по нагрузочным диаграммам. Используя методику произвести выбор асинхронного двигателя по каталожным данным в соответствии с заданием.

4.1. Методика выбора двигателя

Многие производственные механизмы работают в длительном режиме с переменной нагрузкой. График такой нагрузки приведен на рис. 4.1. За период больших нагрузок двигатель нагревается, а за периоды малых нагрузок – охлаждается. Таким образом, в процессе работы температура двигателя колеблется в пределах усредненного значения. Вследствие такого теплового режима задача выбора номинальной мощности электродвигателя становится более сложной в сравнении с постоянной нагрузкой.

Избыточная установленная мощность электродвигателя (выбор по максимуму) снижает КПД установки, увеличивает стоимость в силу большей стоимости мощного двигателя, снижает коэффициент мощности в электрической сети. Недостаточная установленная мощность (выбор по минимуму) вызывает перегрев двигателя, что, в свою очередь, приводит к отказам оборудования, снижает КПД. Будет неправильным также выбор электродвигателя по среднему току или средней мощности, так как среднее значение не учитывает квадратичной зависимости между переменными потерями и током двигателя. Выбор по среднему значению занижает установленную мощность.

Сущность методики выбора электродвигателя, рассчитанного для длительного режима работы, с механизмом, имеющим переменный характер нагрузки, заключается в определении такого продолжительного режима, который эквивалентен режиму переменной нагрузки по тепловому режиму.

Продолжительный режим с постоянной нагрузкой эквивалентен режиму с переменной нагрузкой, если в том и другом случаях за одно и то же время цикла выделяется одинаковое количество тепла:

$$Q_{\text{экв}} t_{\text{ц}} = Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \dots + Q_n t_n,$$

где $Q_{\text{экв}}$ – количество тепла, выделяемое в секунду при работе электродвигателя с постоянной нагрузкой; Q_1, Q_2, Q_n – количество тепла, выделяемое в секунду при работе электродвигателя с соответствующими нагрузками P_1, P_2, P_n . Соответственно, мощность потерь в обмотках электрической машины пропорциональна квадрату протекающего в ней тока.

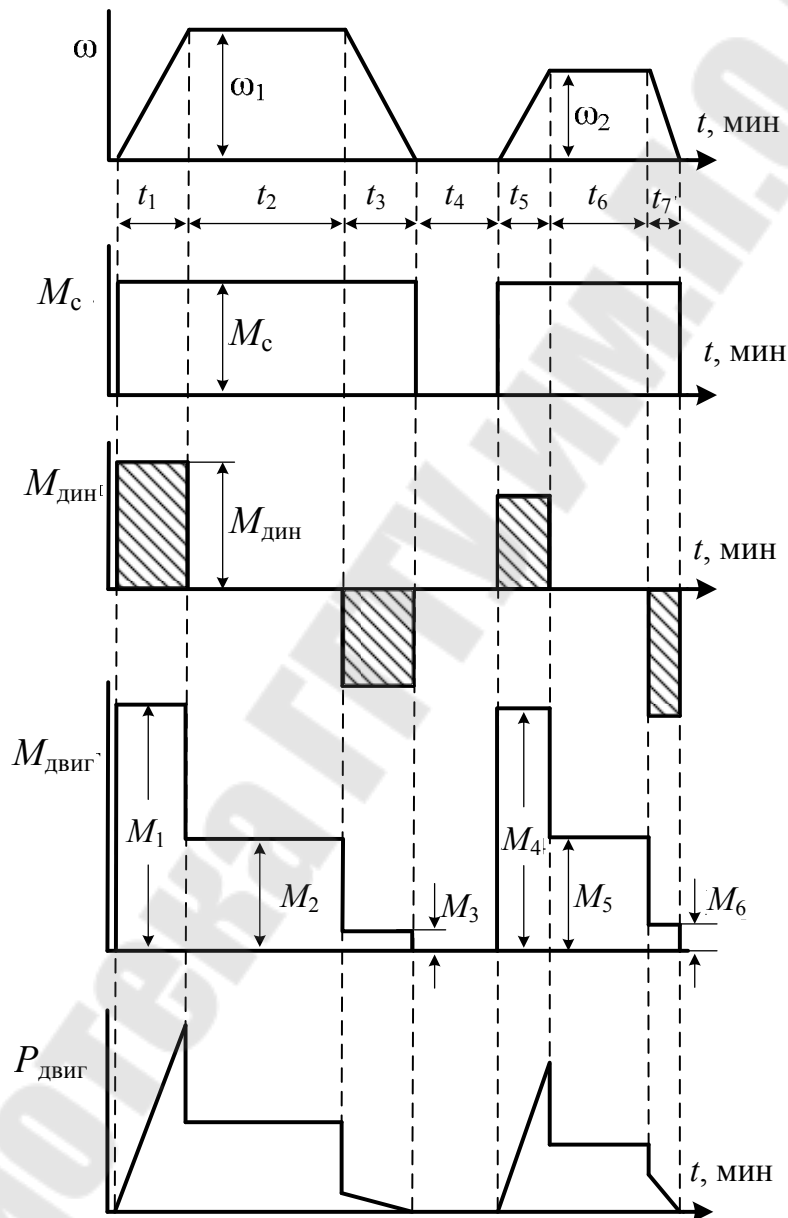


Рис. 4.1. Нагрузочная диаграмма рабочего цикла электродвигателя

В практической деятельности цикл работы механизма задан графиком моментов или мощностей. В таких случаях целесообразно пользоваться формулой эквивалентного момента $M_{\text{экв}}$ или мощности $P_{\text{экв}}$.

Формула эквивалентного момента получается из формулы эквивалентного тока, если момент электродвигателя будет пропорционален току якоря:

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_{\text{ц}}}} \quad (4.1)$$

Определив, таким образом, эквивалентный момент и зная требуемую скорость вращения n , можно рассчитать мощность электродвигателя:

$$P_{\text{двиг}} = M_{\text{экв}} \omega, \text{ Вт}, \quad (4.2)$$

где $\omega = \frac{2\pi}{60} n$, рад/с – циклическая частота вращения двигателя.

Далее по табл. 4.1 подобрать марку двигателя, исходя из условия $P_{\text{п}} \geq P_{\text{двиг}}$, где $P_{\text{п}}$ – табличная паспортная мощность двигателя.

Формула эквивалентного момента пригодна для определения мощности двигателей с жесткой механической характеристикой (асинхронных, постоянного тока независимого и параллельного возбуждения, синхронных). Для электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения не соблюдаются условия пропорциональности между током и моментом, поэтому формула (4.2) применяться не может.

Выбранный по нагреву электродвигатель следует проверить на перегрузочную способность и по пусковому моменту. Максимумы моментов не должны превышать паспортных значений.

Таблица 4.1

Каталожные данные асинхронных двигателей

Марка двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	Коэффициент мощности	$M_{\text{max}}/M_{\text{п}}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{п}}$	$M_{\text{min}}/M_{\text{п}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{н}}$
<i>Синхронная частота вращения 3000 об/мин</i>								
4ААМ56А2	0,18	8	66	0,76	2,2	2	1,2	5
4ААМ56В2	0,25	8	68	0,77	2,2	2	1,2	5
4АМ63А2	0,37	8,3	70	0,86	2,2	2	1,2	5

Марка двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	Коэффициент мощности	M_{\max}/M_n	M_p/M_n	M_{\min}/M_n	I_p/I_n
4AM63B2	0,55	8,5	73	0,86	2,2	2	1,2	5
4AM71A2	0,75	5,3	77	0,87	2,2	2	1,2	5,5
4AM71B2	1,1	6,3	77,5	0,87	2,2	2	1,2	5,5
4AM80A2	1,5	5	81	0,85	2,2	2	1,2	6,5
4AM80B2	2,2	5	83	0,87	2,2	2	1,2	6,5
4AM90L2	3	5,4	84,5	0,88	2,2	2	1,2	6,5
4AM100S2	4	4	86,5	0,89	2,2	2	1,2	7,5
4AM100L2	5,5	4	87,5	0,91	2,2	2	1,2	7,5
4AM112M2	7,5	2,6/2,5	87,5	0,88	2,2	2/2,1	1	7,5
4AM132M2	11	3,1/2,3	88	0,9	2,2	1,6/1,8	1	7,5
4AM160S2	15	2,3/3	88	0,91/0,9	2,2/2,7	1,4/1,6	1/1,3	7,5/7
4AM160M2	18,5	2,3/3	88,5/89	0,92/0,9	2,2/2,7	1,4/1,6	1/1,3	7,5/7
4AM180S2	22	2/2,5	88,5	0,91/0,89	2,2/2,7	1,4/1,5	1/1,3	7,5
4AM180M2	30	1,9/2	90,5/91	0,9/0,89	2,2/2,7	1,4/1,5	1/1,3	7,5
4AM200M2	37	1,9/2	90/91	0,89	2,2/2,8	1,4	1/1,2	7,5/7
4AM200L2	45	1,8/2	91	0,9/0,89	2,2/2,8	1,4	1/1,2	7,5/7
4AM225M2	55	2,1/2	91	0,92	2,2/2,8	1,2/1,4	1/1,2	7,5
4AM250S2	75	1,4/2	91	0,89	2,2/2,8	1,2/1,4	1/1,2	7,5
4AM250M2	90	1,4/2	92	0,9	2,2/2,8	1,2/1,4	1/1,2	7,5
4AM280S2	110	2	91	0,89	2,2	1,2	1	7
4AM280M2	132	2	91,5	0,89	2,2	1,2	1	7
4AM315S2	160	1,9	92	0,9	1,9	1	0,9	7
4AM315M2	200	1,9	92,5	0,9	1,9	1	0,9	7
4AM355S2	250	1,9	92,5	0,9	1,9	1	0,9	7
4AM355M2	315	2	93	0,91	1,9	1	0,9	7
Синхронная частота вращения 1500 об/мин								
4AAM56A4	0,12	8	63	0,66	2,2	2	1,2	5
4AAM56B4	0,18	8,7	64	0,64	2,2	2	1,2	5
4AAM63A4	0,25	8	68	0,65	2,2	2	1,2	5
4AAM63B4	0,37	9	68	0,69	2,2	2	1,2	5
4AM71A4	0,55	8,7	70,5	0,7	2,2	2	1,6	4,5
4AM71B4	0,75	8,7	72	0,73	2,2	2	1,6	4,5

Марка двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	Коэффициент мощности	M_{max}/M_n	M_p/M_n	M_{min}/M_n	I_p/I_n
4AM80A4	1,1	6,7	75	81	2,2	2	1,6	5
4AM80B4	1,5	6,7	77	0,83	2,2	2	1,6	5
4AM90L4	2,2	5,4	80	83	2,2	2	1,6	6
4AM100S4	3	5,3	82	0,83	2,2	2	1,6	6,5
4AM100L4	4	5,3	84	0,84	2,2	2	1,6	6
4AM112M4	5,5	5	85,5	0,86	2,2	2	1,6	7
4AM132S4	7,5	3	87,5	0,86	2,2	2	1,6	7,5
4AM132M4	11	2,8	87,5	0,86	2,2	2	1,6	7,5
4AM160S4	15	2,7/2,5	89	0,88	2,2/2,6	1,4/1,6	1/1,3	7/7,5
4AM160M4	18,5	2,7/2	90	0,88	2,2/2,6	1,4/1,6	1/1,3	7/7,5
4AM180S4	22	2	90/90,5	0,9/0,89	2,2/2,5	1,4/1,6	1/1,3	7/6,5
4AM180M4	30	2	91	0,89	2,2/2,5	1,4/1,5	1/1,3	7/6,5
4AM200M4	37	1,7/2	91,5	0,9/0,89	2,2/2,4	1,4/1,5	1/1,2	7/6,5
4AM200L4	45	1,8/2	92	0,9/0,89	2,2/2,4	1,4/1,5	1/1,2	7/6,5
4AM225M4	55	2	92,5	0,9/0,89	2,2	1,2/1,4	1/1,2	7/6,5
4AM250S4	75	1,4	93	0,9	2,2	1,2/1,3	1/1,2	7/6,5
4AM250M4	90	1,3	93	0,91	2,2	1,2/1,3	1/1,2	7/6,5
4AM280S4	110	2,3	92,5	0,9	2	1,2	1	7
4AM280M4	132	2,3	93	0,9	2	1,2	1	6,5
4AM315S4	160	2	93,5	0,91	1,9	1	0,9	7
4AM315M4	200	1,7	94	0,92	1,9	1	0,9	7
4AM355S4	250	1,7	94,5	0,92	1,9	1	0,9	7
4AM355M4	315	1,7	94,5	0,92	1,9	1	0,9	7
Синхронная частота вращения 1000 об/мин								
4AAM63A6	0,18	11,5	56	0,62	2,2	2	1,2	4
4AAM63B6	0,25	10,8	59	0,62	2,2	2	1,2	4
4AM71A6	0,37	8	64,5	0,69	2,2	2	1,6	4
4AM71B6	0,55	8	67,5	0,71	2,2	2	1,6	4
4AM80A6	0,75	8	69	0,74	2,2	2	1,6	4
4AM80B6	1,1	8	74	0,74	2,2	2	1,6	4
4AM90L6	1,5	6,4	75	0,74	2,2	2	1,6	5,5
4AM100L6	2,2	5,1	81	0,73	2,2	2	1,6	5,5

Марка двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	Коэффициент мощности	M_{max}/M_n	M_p/M_n	M_{min}/M_n	I_p/I_n
4AM112MA6	3	5,5	81	0,76	2,2	2	1,6	6
4AM112MB6	4	5,1	82	0,81	2,2	2	1,6	6
4AM132S6	5,5	4,1	85	0,8	2,2	2	1,6	7
4AM132M6	7,5	3,2	85,5	0,81	2,2	2	1,6	7
4AM160S6	11	3/2,5	86/86,5	0,86/0,82	2/2,5	1,2/1,5	1/1,3	6/6,5
4AM160M6	15	3/2,5	87,5/88	0,87/0,82	2/2,5	1,2/1,5	1/1,3	6/6,5
4AM180M6	18,5	2,7/2,5	88	0,87/0,85	2	1,2/1,5	1/1,3	6/6,5
4AM200M6	22	2,5/2	90	0,9/0,86	2/2,3	1,2/1,5	1/1,3	6,5
4AM200L6	30	2,3/2	90,5	0,9/0,86	2/2,3	1,2/1,5	1/1,3	6,5
4AM225M6	37	2	91	0,89/0,86	2	1,2/1,5	1/1,2	6,5
4AM250S6	45	1,5	91,5	0,89/0,85	2	1,2/1,3	1/1,1	7/6,5
4AM250M6	55	1,5	92	0,88/0,85	2	1,2/1,3	1/1,1	7/6,5
4AM280S6	75	2	92	0,89	1,9	1,2	1	7
4AM280M6	90	2	92,5	0,89	1,9	1,2	1	7
4AM315S6	110	2	93	0,9	1,9	1	0,9	7
4AM315M6	132	2	93,5	0,9	1,9	1	0,9	7
4AM355S6	160	1,8	93,5	0,9	1,9	1	0,9	7
4AM355M6	200	1,8	94	0,9	1,9	1	0,9	7
Синхронная частота вращения 750 об/мин								
4AM71B8	0,25	9,3/10	56/58	0,65/0,66	1,7	1,6	1,2	3,5
4AM80A8	0,37	10	61,5/62	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5
4AM80B8	0,55	10	64	0,65	1,7	1,6	1,2	3,5
4AM90LA8	0,75	6/7	68/70	0,62/0,66	1,7	1,6	1,2	3,5
4AM90LB8	1,1	7	70/72	0,68/0,7	1,7	1,6	1,2	3,5
4AM100L8	1,5	7/10	74/76	0,65/0,73	1,7	1,6	1,2	5,5
4AM112MA8	2,2	6	76,5	0,71	2,2	1,8	1,4	6
4AM112MB8	3	6,5	79	0,74	2,2	1,8	1,4	6
4AM132S8	4	4,1	83	0,7	2,2	1,8	1,4	6
4AM132M8	5,5	4,5	83	0,74	2,2	1,8/2	1,4	6
4AM160S8	7,5	2,7	86	0,75	2,2	1,4/1,5	1/1,1	6
4AM160M8	11	2,7	87	0,75	2,2	1,4/1,5	1/1,1	6
4AM180M8	15	2,6/2,5	87/88	0,82/0,83	2/2,2	1,2/1,4	1/1,1	6/5,5
4AM200M8	18,5	2,5/2	88,5	0,84/0,8	2,2/2	1,2/1,4	1/1,1	6/5,5

Марка двигателя	Мощность, кВт	Скольжение, %	КПД, %	Коэффициент мощности	M_{\max}/M_n	M_p/M_n	M_{\min}/M_n	I_p/I_n
4AM200L8	22	2,7/2	88,5	0,84/0,8	2	1,2/1,4	1/1,1	6/5,5
4AM225M8	30	2	90	0,81/0,8	2	1,2/1,4	1/1,1	6/5,5
4AM250S8	37	1,6/1,5	90/90,5	0,83/0,8	2	1,2/1,4	1/1,1	6/5,5
4AM250M8	45	1,4/1,5	91,5	0,82/0,8	2	1,2/1,3	1/1,1	6/5,5
4AM280S8	55	2,2	92	0,84	1,9	1,2	1	6,5
4AM280M8	75	2,2	92,5	0,85	1,9	1,2	1	6,5
4AM315S8	90	2	93	0,85	1,9	1	0,9	6,5
4AM315M8	110	2	93	0,85	1,9	1	0,9	6,5
4AM355S8	132	2	93,5	0,85	1,9	1	0,9	6,5
4AM355M8	160	2	93,5	0,85	1,9	1	0,9	6,5
Синхронная частота вращения 600 об/мин								
4AM250S10	30	1,9	88/88,5	0,81/0,8	1,9	1,2	1	6
4AM250M10	37	1,8/1,9	89	0,81/0,8	1,9	1,2	1	6
4AM280S10	37	2	91	0,78	1,8	1	1	6
4AM280M10	45	2	91,5	0,78	1,8	1	1	6
4AM315S10	55	2	92	0,79	1,8	1	0,9	6
4AM315M10	75	2	92	0,8	1,8	1	0,9	6
4AM355S10	90	2	92,5	0,83	1,8	1	0,9	6
4AM355M10	110	2	93	0,83	1,8	1	0,9	6
Синхронная частота вращения 500 об/мин								
4AM315S12	45	2,5	90,5	0,75	1,8	1	0,9	6
4AM315M12	55	2,5	91	0,75	1,8	1	0,9	6
4AM355S12	75	2	91,5	0,76	1,8	1	0,9	6
4AM355M12	90	2	92	0,76	1,8	1	0,9	6

Задание

1. Для параметров нагрузки из табл. 4.2, соответствующих варианту, и нагрузочной диаграмме, приведенной на рис. 4.1, выберите асинхронный двигатель.
2. Выполните проверку выбранного двигателя на соответствие пусковому моменту нагрузки.
3. Определите потребляемую из сети активную мощность.

Варианты заданий

Номер варианта	n , об/мин	t_1 , мин	t_2 , мин	t_3 , мин	t_4 , мин	t_5 , мин	t_6 , мин	t_7 , мин	M_c , Н · м	$M_{дин}$, Н · м
1	3000	0,15	20	0,1	5	0,2	30	0,1	10	8
2	3000	0,1	20	0,1	15	0,2	30	0,2	10	20
3	1500	0,05	45	0,5	10	0,3	60	0,05	150	300
4	1500	0,2	100	0,2	20	0,2	80	0,2	200	400
5	1500	1	50	1	30	1	90	1	250	500
6	1000	0,5	70	0,5	40	0,5	100	0,5	5	15
7	1000	0,2	100	0,2	50	0,2	150	0,2	10	10
8	1000	0,3	150	0,3	70	0,3	200	0,3	50	100
9	1000	0,5	200	0,5	100	0,5	200	0,5	70	200
10	1000	0,7	100	0,7	100	0,7	100	0,7	100	200
11	750	0,9	70	0,9	10	0,9	70	0,9	20	50
12	3000	1	60	1	20	1	60	1	30	30
13	3000	0,1	50	0,1	30	0,1	50	0,1	40	60
14	3000	0,4	40	0,4	40	0,4	40	0,4	40	40
15	3000	0,6	30	0,6	50	0,6	30	0,6	20	60

Контрольные вопросы

1. В чем сущность методики выбора электродвигателя для длительного режима работы с переменной нагрузкой?
2. К каким негативным последствиям приводит выбор двигателя с избыточной (недостаточной) установленной мощностью?
3. Почему эквивалентный момент определяют как среднеквадратическую сумму моментов?
4. Какие ограничения имеет метод эквивалентного момента (случаи, когда его применять нельзя)?
5. Зачем необходимо выполнять проверку выбранного электродвигателя на соответствие пусковому моменту, если использован метод эквивалентного момента?

Содержание

1. Проектирование однофазного двухобмоточного трансформатора...	3
1.1. Выбор плотности тока в обмотках трансформатора	4
1.2. Выбор материала магнитопровода трансформатора	7
1.3. Выбор максимальной индукции в магнитопроводе B_m	8
1.4. Выбор размера магнитопровода и определение количества витков обмоток	9
1.5. Определение мощности потерь и КПД трансформатора	16
2. Проектирование индуктивности с ферромагнитным сердечником.....	21
2.1. Основные определения	21
2.2. Катушки индуктивности на замкнутых сердечниках.....	23
2.3. Катушки индуктивности на разомкнутых сердечниках.....	24
3. Проектирование датчиков перемещения индуктивного и емкостного типа	28
3.1. Индуктивные датчики	28
3.2. Емкостные датчики	31
4. Расчет параметров и выбор электрического двигателя для длительного режима работы с переменной нагрузкой.....	36
4.1. Методика выбора двигателя	36

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

Кухаренко Сергей Николаевич

ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Практикум

**по одноименной дисциплине для студентов
специальности 1-53 01 07 «Информационные
технологии и управление в технических системах
дневной формы обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор
Компьютерная верстка

Т. Н. Мисюрова
Н. Б. Козловская

Подписано в печать 04.04.19.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 3,35.

Изд. № 42.

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
пр. Октября, 48, 246746, г. Гомель