

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОХОДИМОСТИ МЕЖДУ СТАЛЕНЫМИ БРУСАМИ

Цель работы - экспериментальное определение магнитной

проводимости между параллельными брусками различных сечений и ознакомление с методикой магнитных измерений, а также со сравнительно простым и наглядным методом теоретического анализа потоков рассеяния — методом ожидаемых путей потока.

I. Основные теоретические положения

Аналитический расчет магнитной проводимости

В установках автоматики и телемеханики широко применяются электромагнитные устройства, реле, автоматы, устройства преобразования неэлектрических величин в электрические и т.п., принцип действия которых основан на изменении магнитной проводимости (энергии электромагнитного поля) в некоторых участках магнитопровода.

Магнитная проводимость участка магнитопровода определяется как отношение потока Φ $[B_s]$ между частями магнитопровода к разности магнитных потенциалов U_m $[A]$, действующей на этом участке:

$$g_m = \frac{\Phi}{U_m} \quad (1)$$

Величина магнитной проводимости легко находится для случая, когда расстояние между полюсами l мало по сравнению с линейными размерами сечения полюсов S . Тогда можно считать, что весь магнитный поток сосредоточен в межполюсном пространстве и имеют место равенства: $\Phi = B \cdot S$; $U_m = H \cdot l$. Используя выражение (1), найдем

$$g_m = \frac{B}{H} \cdot \frac{S}{l} = \mu_a \frac{S}{l} \quad (2)$$

где $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$ — абсолютная магнитная проницаемость внешней среды; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, $\frac{H}{m}$ — магнитная постоянная. Для воздуха $\mu = 1$ и $\mu_a = \mu_0$.

Формулой (2) можно пользоваться для значений $\frac{l}{\sqrt{S}} \leq 0,2$.

Эту же формулу можно найти и на основании метода электростатической аналогии, заменив в известной формуле емкости плоского конденсатора $C = \epsilon_a \frac{S}{l}$ емкость C на магнитную проводимость g_m , ϵ_a на μ_a . Эту связь необходимо помнить при анализе магнитных систем.

В большинстве реальных магнитных систем воздушные зазоры между участками магнитопровода значительны, следовательно,

велики и потоки рассеяния (выпучивания). В этом случае разбивают весь магнитный поток на характерные участки и определяют составляющие магнитной проводимости. К наиболее простым методам разбивки относят метод вероятного пути потока (метод Ротерса). Он основывается на условном представлении путей отдельных магнитных потоков в виде простых геометрических фигур. В выводе аналитического выражения проводимости каждой фигуры исходят из формулы (2):

$$g_M = \mu_0 \frac{S_{cp}}{l_{cp}}$$
, где S_{cp} - средняя площадь поперечного сечения фигуры, перпендикулярная линиям магнитного потока; l_{cp} - средняя длина силовой линии.

В качестве примера, позволяющего получить большинство фигур, используемых для разделения магнитного поля, рассмотрим определение магнитной проводимости между двумя полюсами призматической формы (рис. I). Как следует из рисунка, пространство, через которое происходит магнитный поток, может быть разбито на следующие фигуры:

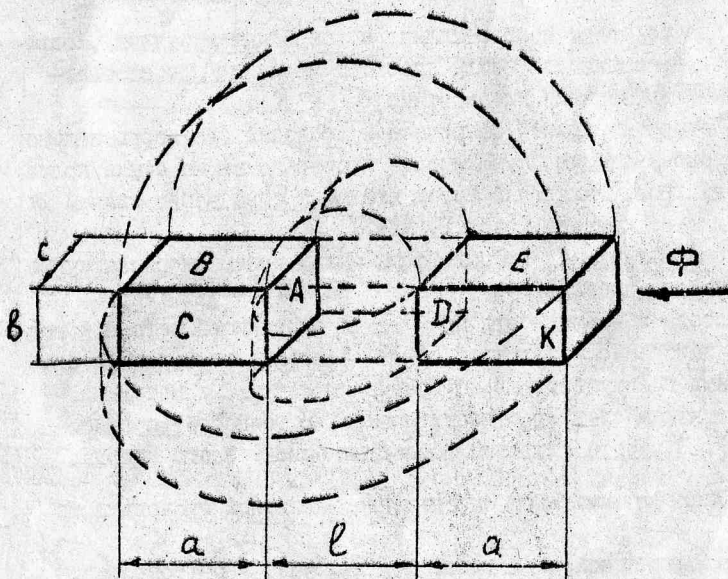


Рис. I

I. Призму сечением $b \times c$ и длиной l , определяющей

проводимость между торцевыми плоскостями A и D (табл. I, № 1).

2. Два полуцилиндра (верхний и нижний), определяющие проводимость между ребрами длиной C , образованными плоскостями A, B и D, E . Магнитный поток входит в одно ребро (см. табл. I, № 2) и выходит из другого. Средняя длина силовой линии равна $1,22 l$.

3. Два полуцилиндра (передний и задний), определяющие проводимость между ребрами длиной B плоскостей A, C и D, K .

4. Четыре сферических квадранта, определяющие проводимость пространства на стыке четырех рассмотренных ранее полуцилиндров. Магнитные линии входят в один угол и выходят из другого (табл. I, № 3). Средняя длина магнитной линии равна $1,3 l$.

5. Две половины полого цилиндра (верхняя и нижняя), определяющие проводимость между плоскостями B и E и соответствующими им нижними плоскостями B' и E' . Магнитные силовые линии полагаются концентрическими окружностями (табл. I, № 4).

6. Две половины полого цилиндра (передняя и задняя), определяющие проводимость между плоскостями C и K и соответствующими им задними плоскостями C' и K' .

7. Четыре квадранта сферической оболочки (четверть полого шара), определяющие проводимость пространства на стыке полых полуцилиндров. Магнитный поток входит в одно ребро длиной A и выходит из другого (табл. I, № 5).

Полная магнитная проводимость между призмами равна сумме проводимостей всех фигур.

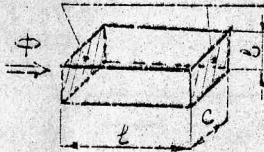
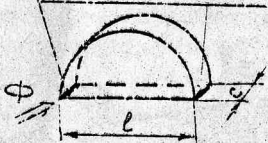
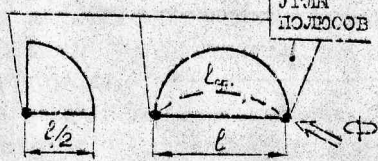
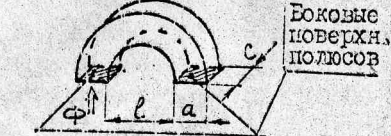
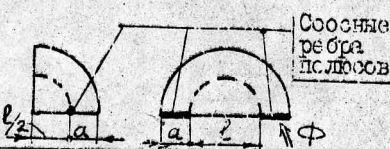
Простота и возможность применения описанного метода к воздушным зазорам с конфигурацией любой сложности являются его основными преимуществами по сравнению с другими методами. К недостаткам следует отнести невысокую точность (ошибка 15-25%). В работе студенты исследуют ошибку этого метода.

2. Экспериментальное определение магнитной проводимости

Схема магнитной цепи (рис. 2, а) включает магнитопровод, образованный двумя стальными брусками, расположенными параллельно на расстоянии l друг от друга. В них за счет действия магнитодвижущей силы $\vec{F}_g = W_g \cdot I_g$ (катушки возбужде-

Таблица I

Основные фигуры и аналитическое выражение их магнитных проводимостей

№ пп.	Эскиз фигуры	Формула магн. пров.
1	<p style="text-align: center;"><u>Полка</u></p>  <p style="text-align: right;">Торцевые поверхности полюсов</p>	<p style="text-align: center;">Торцевая проводимость</p> $g_r = \mu_0 \frac{b \cdot c}{l}$
2	<p style="text-align: center;"><u>Полуцилиндр</u></p>  <p style="text-align: right;">Параллельные ребра полюсов</p>	<p style="text-align: center;">Реберная проводимость</p> $g_p = 0,26 \mu_0 c$
3	<p style="text-align: center;"><u>Сферический квадрант</u></p>  <p style="text-align: right;">Углы полюсов</p>	<p style="text-align: center;">Угловая проводимость</p> $g_y = 0,077 \mu_0 l$
4	<p style="text-align: center;"><u>Половина полого цилиндра</u></p>  <p style="text-align: right;">Боковые поверхности полюсов</p>	<p style="text-align: center;">Боковая проводимость</p> $g_b = \mu_0 \frac{2 \cdot c}{\pi (\frac{l}{a} + 1)}$ $a \leq l$
5	<p style="text-align: center;"><u>Квадрант сферической оболочки</u></p>  <p style="text-align: right;">Сосные ребра полюсов</p>	<p style="text-align: center;">Реберно-угловая проводимость</p> $g_{py} = \mu_0 \frac{a}{4}$

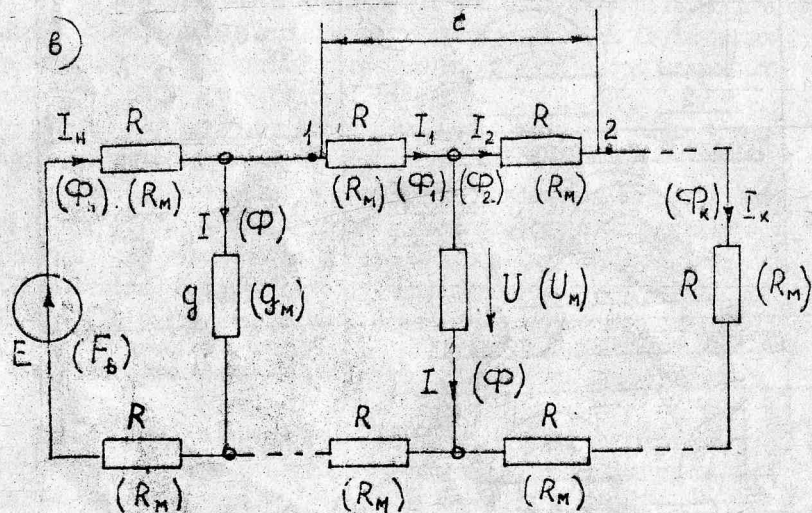
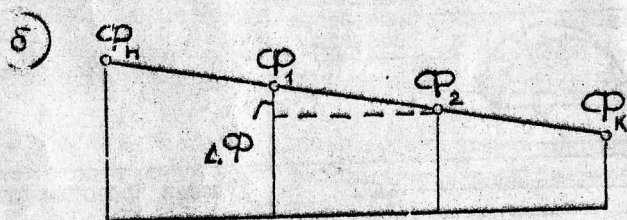
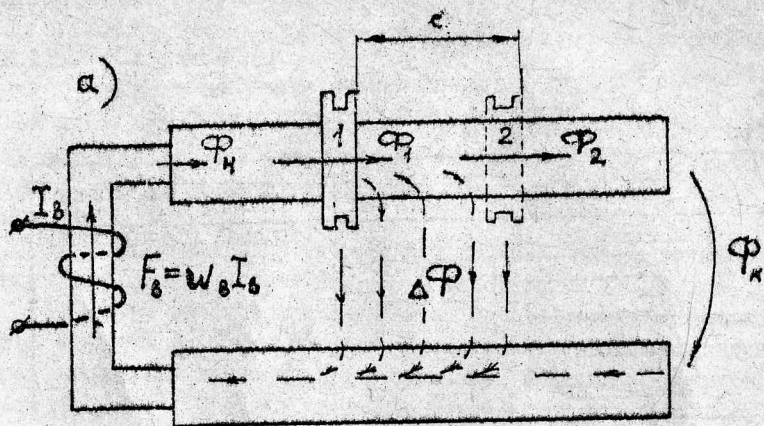


Рис. 2

ния, имеющей W_2 витков, и тока источника I_p) возникает магнитное поле. Силовые линии магнитного поля замыкаются во всем пространстве между брусками. Распределение магнитного потока внутри брусков таково, что он постепенно уменьшается от начала Φ_1 к концу брусков Φ_2 за счет ответвления части магнитного потока через воздушный промежуток на всем протяжении магнитопровода и в том числе в его центральной части

C . Это явление поясняет рис. 2, б: магнитный поток Φ_1 будет больше магнитного потока Φ_2 на величину их разности Φ :

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2. \quad (3)$$

Этот поток и подлежит определению в работе.

Процесс ответвления магнитного потока можно показать на электрической схеме замещения (рис. 2, в), для которой в соответствии с методом электростатической аналогии указаны взаимные соответствия между электрическими и магнитными величинами: $E - F_0$, $I - \Phi$, $U - U_m$, $g - g_m$, $R - R_m$. Эта схема аналогична цепочечной модели линии с распределенными параметрами для цепи постоянного тока с продольным сопротивлением R и поперечной проводимостью g . Их аналоги — магнитное сопротивление участка магнитопровода R_m и магнитная проводимость g_m воздушного промежутка в центральной части магнитопровода.

Как следует из схемы замещения, для определения магнитной проводимости g_m необходимо измерить: Φ_m — магнитный поток в воздушном зазоре на участке между точками 1 и 2, а также U_m — магнитное падение напряжения между брусками на этом же участке. Оба эти измерения в лабораторной работе производятся на основе прибора, измеряющего магнитный поток, — цифрового микроверметра Ф 5050. Порядок работы с прибором описан в прил. 3.1.

Магнитный поток Φ измеряется посредством катушки, охватывающей брусок. Катушка имеет W витков и свободно перемещается на длину C , ограниченную двумя планками. Крайние положения катушки соответствуют точкам 1 и 2. Параметры катушек для всех брусков одинаковы.

Показание микроверметра определяется сигналом, возбуждаемым в катушке, при включении или выключении тока источника питания I_p , и зависит от числа витков катушки. Факти-

чески микроверметр измеряет потокосцепление $\Psi_r = W \cdot \Phi$. Поэтому формулу (3) для опытного определения магнитного потока записывает в виде

$$\Phi = \frac{\Psi_{r1} - \Psi_{r2}}{W}, \quad (4)$$

где Ψ_{r1} и Ψ_{r2} потокосцепления, измеренные для точек 1 и 2.

Для каждого фиксированного положения катушки делается несколько измерений. Результаты суммируются с табло микроверметра, заносится в табл. 2 (в графу Ψ_{r1} или Ψ_{r2}) и усредняются. Опытное значение магнитного потока рассчитывается по формуле (4) на основе найденных усредненных значений

Ψ_{r1cp} и Ψ_{r2cp} .

Магнитное падение напряжения U_m измеряется катушкой специальной формы, которая называется магнитным поясом, или поясом Роговского. В лабораторной работе пояс изготовлен из гибкой резиновой трубки, обмотанной равномерно по всей длине тонким проводом. Оба вывода обмотки скоятся в одном месте во избежание образования паразитного контура, охватывающего поток, не подлежащий измерению. При изгибе пояса поперечное сечение трубки остается практически неизменным.

Пусть магнитный пояс помещен в магнитное поле напряженностью H (рис. 3). Концы пояса находятся в точках m и n . Магнитное падение напряжения между этими точками определяется выражением $U_m = U_{mn} = \int_m^n \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \int_m^n H \cdot \cos \beta \cdot d\ell$.

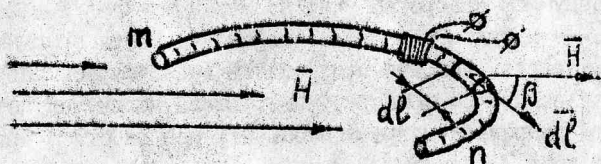


Рис. 3

Если на единицу длины пояса приходится W_1 витков, а на элемент $d\ell$ - $W_1 d\ell$ витков, то потокосцепление с этими витками определяется выражением $d\Psi = \Phi \cdot W_1 d\ell = \mu_0 H \cos \beta \cdot S_n \cdot W_1 d\ell$, где S_n - площадь поперечного сечения пояса.

Магнитный поток, сцепленный со всеми витками магнитного

пояса, находится интегрированием по линейной координате

$$\Psi_{mn} = \int_m^n d\Psi = \mu_0 S_n W_l \int_m^n H \cos \varphi \cdot dl = \mu_0 \cdot S_n \cdot W_l \cdot U_{mn}.$$

Следовательно, U_m пропорционально потоку сцепления, измеренному магнитным поясом:

$$U_m = \frac{1}{\mu_0 \cdot S_n \cdot W_l} \cdot \Psi_{mn} = K_n \cdot \Psi_{mn}, \quad (5)$$

где $K_n = \frac{1}{\mu_0 \cdot S_n \cdot W_l}$ называется постоянной магнитного пояса и измеряется в амперах на вебер. Эту постоянную определяют расчетным или опытным путем.

Для измерения магнитного напряжения между брусками следует плотно прижать концы магнитного пояса к двум противоположно лежащим брускам в их центральной части и, открыв вход микроверметра, выключить или включить ток источника питания. Опыт повторяют несколько раз, результаты считывают с табло и заносит в табл.2 в графу Ψ_{mn} , а затем усредняют.

Напряжение между брусками рассчитывается по формуле (5) по найденному значению усредненному значению $\Psi_{mn \text{ ср.}}$. Значение K_n определяется в п.2.4 программы работ.

3. Программа работы

3.1. Исследование магнитной проводимости брусков квадратного сечения. - рис.4,д.

3.2. Исследование магнитной проводимости брусков прямоугольного сечения:

а) для расположения - рис.4,в;

б) для расположения - рис.4,г.

3.3. Исследование магнитной проводимости брусков полосообразной формы:

а) для расположения полос в одной плоскости - рис.4,а;

б) для расположения плоскости полос параллельно - рис.4,б.

3.4. Опытное определение постоянной магнитного пояса -

K_n .

3.5. Обработка результатов эксперимента. Составление отчета.

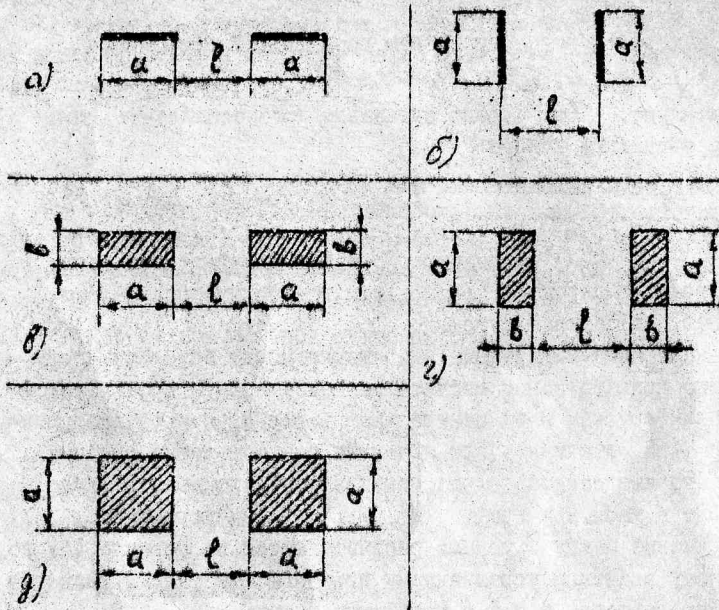


Рис.4

4. Порядок выполнения работы.*

4.1. Собирается схема (рис.5). Катушка возбуждения W_b подключается к источнику постоянного тока через ключ K . Величина тока I_b устанавливается ручками регулировки источника и контролируется амперметром.

Микроверметр посредством перекидного ключа $ПК$ переключается либо на измерение магнитного потока (положение 1), либо на измерение магнитного падения напряжения (положение 2). После сборки схемы микроверметр и источник питания включаются в сеть. Приборы готовы к работе после нескольких минут прогрева.

Для каждого взаимного расположения брусков производится опыт по измерению магнитного потока Φ в двух крайних по-

* Примечание. Программа работ может быть сокращена по указанию преподавателя.

ложения катушки W и определению потокосцепления Ψ_{mp} в магнитном поле. Порядок каждого эксперимента описан в п.2.1. Данные опыта заносятся в табл.2.

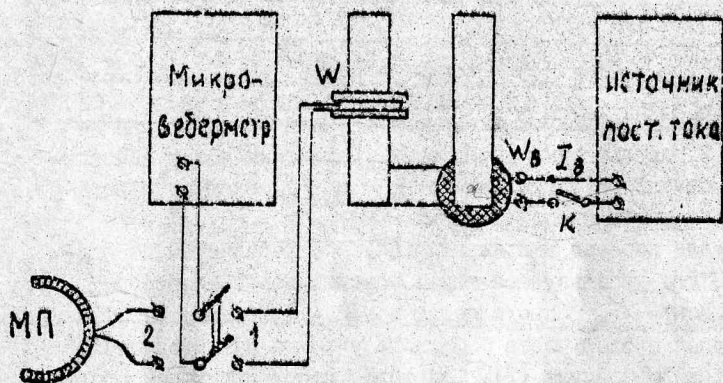


Рис.5

Величина тока возбуждения устанавливается в пределах $I_{\text{в}} = 1...2$ А. Если в процессе опыта цифровые показания табло, измеряющие Ψ_x или Ψ_{mp} станут близкими к крайним значениям измеряемого предела, следует изменить величину тока в ту или другую сторону. Иногда необходимо перейти на другой предел измерения. То же следует сделать в случае переполнения табло микровексметра (см. приложение 3.1).

Для каждой пары брусков измерения проводятся для трех расстояний ℓ . Это расстояние изменяется переносом части магнитопровода вместе с бруском в одной из трех фиксированных положений. С помощью линейки измеряют ℓ и записывают в табл.2. При измерении расстояния следует учитывать определения линейных размеров в соответствии с обозначениями рис.4.

4.2. Для определения постоянного магнитного поля K_n вместо катушки возбуждения к источнику питания присоединяется измерительная катушка, имеющая $W_0 = 100$ витков. Магнитный полюс пропускается внутрь катушки W_0 , и концы полюса - точки m и n - соединяют между собой с помощью стерженька или за счет усилия рук.

В катушке устанавливается некоторый ток I_0 , значение которого нужно определить как можно точнее. Затем с помощью

микробарметре производится измерение потока сцепления

$\Psi_{м,г} = \Psi_0$, и на основании выражений (5) определяется постоянная

$$K_n = \frac{F_0}{\Psi_0} = \frac{W_0 I_0}{\Psi_0} \cdot \frac{A}{B_S} \quad (6)$$

4.3. Обработка данных эксперимента начинается с заполнения табл.2 результатами вычислений. Магнитный поток вычисляется по формуле (4), где вместо $\Psi_{н1}$ и $\Psi_{н2}$ следует подставить опытно-усредненные значения $\Psi_{н1 ср}$ и $\Psi_{н2 ср}$.

Магнитное падение напряжением U_m определяется по формуле (5), где используется также усредненное значение $\Psi_{мп ср}$, а коэффициент K_n определяется в п.2.4 программы работ.

Магнитная проводимость g_m на участке магнитопровода вычисляется по формуле (1). Для того, чтобы магнитная проводимость измерялась в генри (Гн), следует преобразовать размерности всех промежуточных переменных в соответствии с требованиями системы СИ.

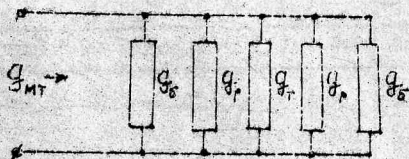
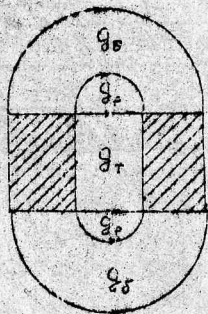
Теоретический расчет магнитной проводимости производится по формулам табл.1. Эта проводимость складывается из проводимостей отдельных участков, которые следует мысленно построить для каждого расположения исследуемой пары брусков. Например, проводимость прямоугольных брусков на длине C складывается из торцевой, двух боковых и двух реберных проводимостей (см. рис.6): $g_{мг} = g_t + 2g_b + 2g_r$. Для других поперечных сечений брусков и их взаимных расположений расчетные формулы приведены в табл.3. Для расчета составляющих проводимости следует учитывать определения линейных размеров a, b, c, C , указанных на рис.4.

Расчет по теоретическим выражениям производится для тех же положений, что и в табл.2.

Полученные расчетные значения $g_{мг}$ из табл.3 переписываются в соответствующие графы табл.2, после чего определяется относительная погрешность метода ожидаемых путей потока по формуле

$$\Delta = \frac{g_m - g_{мг}}{g_m} \cdot 100\%$$

Делается вывод о проделанной работе, обсуждаются причины расхождения опытных и расчетных данных.



$$I_{\text{мг}} = I_1 + 2I_r + 2I_0$$

Рис.6

5. Содержание отчета

1. Схемы измерений и спецификация приборов.
2. Таблицы результатов измерений и вычислений.
3. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Чем отличается магнитная проводимость от магнитного сопротивления участка магнитной цепи?
2. В чем состоит методика экспериментального определения магнитной проводимости между брусками?
3. Как с помощью магнитного пояса производится измерение магнитного напряжения?
4. Укажите основные положения метода ожидаемых путей потока.
5. Что называют торцевой, боковой и реберной проводимостью? Что кладется в основу их расчета?
6. Чем отличается магнитодвижущая сила от магнитного падения напряжения?
7. Как связана магнитная проводимость с электрической проводимостью и емкостью в аналоговых модельных задачах?

Пункты программы		2.1, а		2.1, б		2.2, в		2.2, з		2.2, г	
Расчетные формулы		$g_{MT} = 2g_5 + 2g_6$		$g_{MT} = g_T + 2g_6$		$g_{MT} = g_T + 2g_5 + 2g_6$		$g_{MT} = g_T + 2g_5 + 2g_6$		$g_{MT} = g_T + 2g_5 + 2g_6$	
Неизменяемые параметры		$a = \dots M$ $c = \dots M$		$a = \dots M$ $c = \dots M$		$a = \dots M$ $b = \dots M$ $c = \dots M$		$a = \dots M$ $b = \dots M$ $c = \dots M$		$a = \dots M$ $b = \dots M$ $c = \dots M$	
	№ пол.	ϵ М	g_{MT} Гн	ϵ М	g_{MT} Гн	ϵ М	g_{MT} Гн	ϵ М	g_{MT} Гн	ϵ М	g_{MT} Гн
Магнитная проводимость	1										
g_{MT} по методу ожидаемых	2										
пут. пот.	3										

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. - М.: Энергия, 1973 /и др. издания/, §§ 17, 20.
2. Теоретические основы электротехники, т. II. /Под ред. Ионкина П.А. - М.: Высшая школа, 1976, гл. 29.
3. Новиков Ю.Н. Теория и расчет электрических аппаратов. - Л.: Энергия, 1970.
4. Русин Ю.С. Расчет электромагнитных систем. - Л.: Энергия, 1968.
5. Говорков В.А., Купалин С.Д. Теория электромагнитного поля в упражнениях и задачах. - М.: Высшая школа, 1970, с. 275-280.