

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Цель работы: экспериментальная проверка графического метода расчета электрической цепи при последовательном, параллельном и смешанном соединениях линейных и нелинейных элементов.

Краткие теоретические сведения

На практике часто встречаются электрические цепи, параметры отдельных элементов которых резко меняются с изменением тока. Зависимость тока, протекающего через элемент, от напряжения на нем не будет линейной. Такие элементы называются **нелинейными**, а электрическая цепь, содержащая хотя бы один нелинейный элемент, – **нелинейной электрической цепью**. Нелинейные элементы подразделяются на резистивные, индуктивные и емкостные.

Нелинейные элементы широко используются в различных областях техники. Они имеют разнообразные вольтамперные характеристики (ВАХ). Нелинейные элементы могут быть с симметричными (рис. 11.1) и несимметричными (рис. 11.2) ВАХ относительно осей координат.

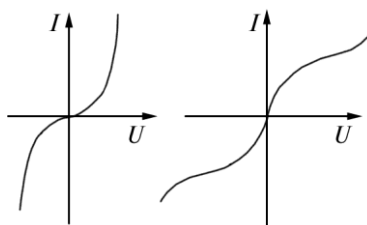


Рис. 11.1

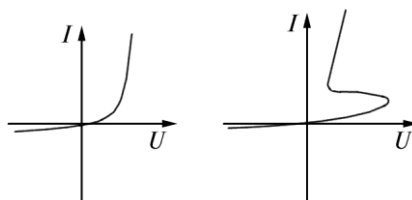


Рис. 11.2

Нелинейные резисторы могут быть подразделены на две большие группы: неуправляемые и управляемые. В **управляемых** нелинейных резисторах, кроме основной цепи, как правило, есть еще, по крайней мере, одна вспомогательная или управляющая цепь, воздействуя на ток или напряжение

которой можно деформировать ВАХ основной цепи. В **неуправляемых** нелинейных резисторах вольтамперная характеристика изображается одной кривой, а в управляемых – семейством кривых.

В группу неуправляемых нелинейных резисторов входят лампы накаливания, бареттеры, газотроны, вилитовые сопротивления, полупроводниковые вентили (диоды) и некоторые другие.

В группу управляемых нелинейных резисторов входят трехэлектродные лампы (триоды), транзисторы, тиристоры, терморезисторы, фоторезисторы, фотодиоды и другие элементы.

В данной лабораторной работе рассматриваются цепи с неуправляемыми нелинейными резисторами.

Процессы в нелинейных электрических цепях описываются нелинейными алгебраическими уравнениями, составленными на основании законов Кирхгофа. Для решения этих уравнений **не применим принципа наложения**, что не позволяет использовать методы расчета, разработанные для линейных цепей.

Система нелинейных алгебраических уравнений может быть решена:

- графическим методом (характеристики нелинейных и линейных элементов представляются в виде графиков, система алгебраических уравнений по законам Кирхгофа решается графическими построениями на координатной плоскости в выбранных масштабах I и U);
- аналитическим методом (характеристики нелинейных элементов, известные обычно из опыта и заданные графиком, аппроксимируют аналитическими функциями);
- комбинированными (графоаналитическими) методами расчета.

В данной работе исследуется графический метод расчета нелинейной цепи постоянного тока.

На рис. 11.3, *а* изображена схема последовательного соединения нелинейных элементов НЭ1 и НЭ2, вольтамперные характеристики которых $I(U_1)$ и $I(U_2)$ представлены на рис. 11.3, *б*. Необходимо построить результирующую ВАХ цепи

$$I(U) = I(U_1 + U_2).$$

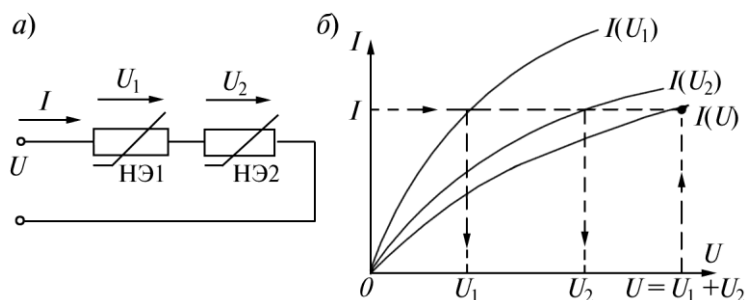


Рис. 11.3

Построение результирующей вольтамперной характеристики при **последовательном соединении элементов** основано на применении второго закона Кирхгофа

$$U = U_1 + U_2. \quad (11.1)$$

Так как при последовательном соединении элементов через них проходит одинаковый ток, то для построения результирующей ВАХ **задаются** произвольным **током** I и находят по ВАХ каждого элемента соответствующие напряжения U_1 и U_2 . Отложив $U = U_1 + U_2$, строят точку, которая принадлежит результирующей ВАХ всей схемы. Аналогично находят и другие точки результирующей ВАХ последовательной цепи.

Расчет цепи с двумя **параллельно соединенными нелинейными элементами** (рис. 11.4, а) сводится к построению результирующей характеристики $I = I_1 + I_2 = f(U)$, показанной на рис. 11.4, б. Нахождение результирующей ВАХ основано на применении первого закона Кирхгофа.

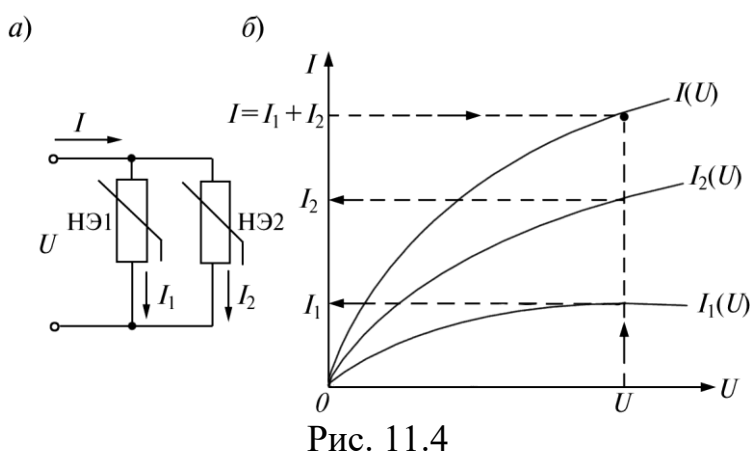


Рис. 11.4

При построении результирующей ВАХ исходят из того, что напряжения на параллельно соединенных нелинейных элементах равны. Для некоторого значения **напряжения** U находят по ВАХ каждого элемента соответствующие токи I_1 и I_2 . Отложив

$$I = I_1 + I_2, \quad (11.2)$$

строят точку на результирующей ВАХ параллельного соединения. Аналогично определяются и другие точки ВАХ.

Графический метод расчета цепей со **смешанным (последовательно-параллельным) соединением нелинейных элементов** (рис. 11.5, а) заключается в построении общих ВАХ для разветвленных участков цепи и для последовательно соединенных. Построение $I(U)$ приведено на рис. 11.5, б.

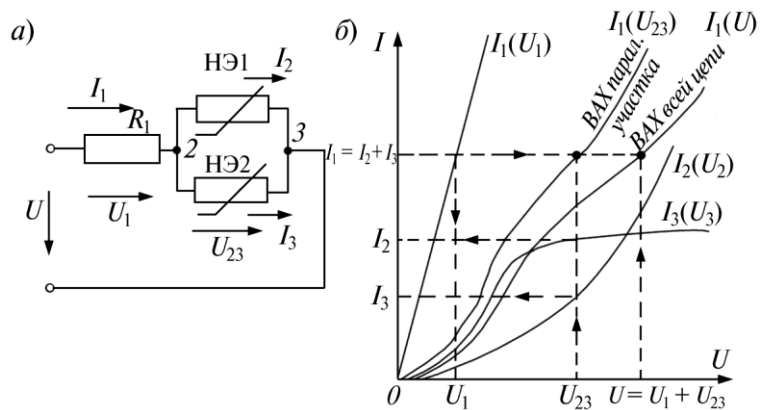


Рис. 11.5

Сначала по заданным ВАХ параллельных ветвей $I_2(U_2)$ и $I_3(U_3)$ находят ВАХ параллельного участка $I_1(U_{23})$, учитывая, что $U_{23} = U_2 = U_3$. Для этого **складывают ординаты** ВАХ ветвей, соответствующие одним и тем же значениям напряжения, как и на рис. 11.4, б. Полученная ВАХ $I_1(U_{23})$ представляет собой зависимость суммарного тока параллельных ветвей от общего напряжения между узлами U_{23} .

Далее по полученной ВАХ параллельного участка $I_1(U_{23})$ и заданной ВАХ $I_1(U_1)$ первого элемента R_1 находят ВАХ всей цепи $I_1(U)$. Для этого **складывают абсциссы** вольтамперных характеристик $I_1(U_1)$ и $I_1(U_{23})$, т.е. ВАХ последовательно соединенных участков, соответствующие одним и тем же значениям тока, как и на рис. 11.3, б. Суммарная абсцисса соответствует сумме напряжений последовательно соединенных участков и равна напряжению питания $U = U_1 + U_{23}$.

Описание установки

Работа выполняется на лабораторном стенде с блоком линейных и нелинейных элементов, который получает питание от источника регулируемого постоянного напряжения.

Для измерения токов и напряжений используются приборы магнитоэлектрической системы, расположенные на приборной панели стенда.

Задание

Снять и построить вольтамперные характеристики линейных и нелинейных элементов. Построить графическим методом результирующую ВАХ для заданной схемы.

Изменяя входное напряжение цепи, измерить токи и напряжения на всех участках последовательно-параллельной цепи.

Сравнить экспериментальную ВАХ цепи с вольтамперной характеристикой, полученной графическими построениями.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами, применяемыми в работе, и записать их технические данные.

2. Снять опытным путем вольтамперные характеристики линейного сопротивления R_1 и двух нелинейных элементов НЭ1 и НЭ2. Для этого необходимо поочередно включать эти элементы в схему рис. 11.6*. Измерения проводить для 5 – 6 точек ВАХ. Входное напряжение U изменять от нуля до $U_{\max}$, величина которого указана на блоке элементов на стенде.

* **Примечание.** Для экономии времени на сборку схем (по указанию преподавателя) вольтамперные характеристики обоих нелинейных элементов НЭ1 и НЭ2 можно снять одновременно. Для этого надо, не собирая схему рис. 11.6, собрать схему параллельного участка, состоящего из двух ветвей. В каждую ветвь последовательно с нелинейным элементом необходимо подключить амперметр. Далее этот участок уже будет готовой частью общей схемы эксперимента (см. рис. 11.7). ВАХ линейного сопротивления R_1 можно построить по одной точке, ток и напряжение для которой измеряют по общей схеме эксперимента.

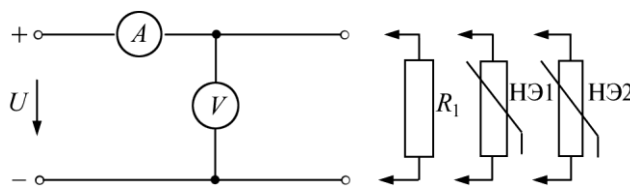


Рис. 11.6

Результаты измерений записать в табл. 11.1.

Таблица 11.1

R_1	U	В					
	I	А					
НЭ1	U	В					
	I	А					
НЭ2	U	В					
	I	А					

3. Собрать последовательно-параллельную схему соединения элементов рис. 11.7. Задавая величину входного напряжения цепи U , измерить токи в ветвях I_1 , I_2 и I_3 и напряжения на элементах цепи U_1 и U_{23} . Входное напряжение

U необходимо изменять в пределах от нуля до $U_{\max}$ (3 – 4 значения). Результаты измерений занести в левую часть табл. 11.2.

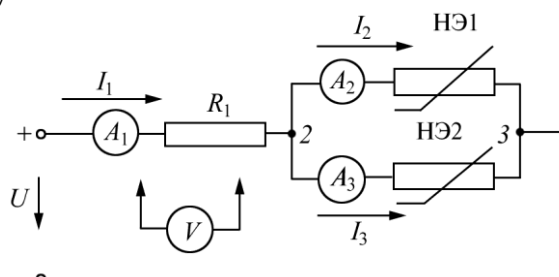


Рис. 11.7

Таблица 11.2

Измерено						Вычислено					
U	I_1	I_2	I_3	U_1	U_{23}	U	I_1	I_2	I_3	U_1	U_{23}
В	А	А	А	В	В	В	А	А	А	В	В

4. По данным измерений п. 2 (табл. 11.1) построить в одних осях координат ВАХ отдельных элементов. Графическими построениями получить сначала ВАХ параллельного участка цепи, а затем ВАХ всей последовательно-параллельной цепи (см. примеры в теоретическом разделе).

5. По этим ВАХ определить для схемы рис. 11.7 графическим методом при тех же значениях напряжения U , что и в опыте п. 3, токи I_1 , I_2 , I_3 и напряжения U_1 и U_{23} . Последовательность этих построений показана на рис. 11.5, б.

Для задаваемого значения U по ВАХ всей цепи $I_1(U)$ определяют ток в неразветвленной части I_1 . Затем, зная I_1 , по ВАХ линейного элемента $I_1(U_1)$ находят напряжение на нем U_1 , а по ВАХ параллельного участка $I_1(U_{23})$ узнают напряжение U_{23} . Определив напряжение на параллельном участке $U_{23} = U_2 = U_3$ находят по ВАХ НЭ1 $I_2(U_2)$ ток I_2 и по ВАХ НЭ2 $I_3(U_3)$ ток I_3 .

Полученные значения записать в правую часть табл. 11.2. Для какого-либо из опытов на графиках ВАХ показать последовательность построений для определения токов и напряжений.

6. Для оценки результатов построить в тех же осях координат (п. 4) экспериментальную ВАХ разветвленной цепи $I_1(U)$ по данным левой части табл. 11.2. Качественно сравнить две вольтамперные характеристики разветвленной цепи: экспериментальную и полученную графическими построениями п.4.

Сделать заключение по выполненной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие электрические цепи называются нелинейными?
2. Чем отличаются линейные электрические цепи от нелинейных?
3. Каким образом по вольтамперным характеристикам элементов строится вольтамперная характеристика цепи с последовательным соединением этих элементов?
4. Как заменить несколько параллельных ветвей, содержащих нелинейные элементы, одной эквивалентной ветвью?
5. Как строятся ВАХ последовательно-параллельной цепи?
6. Как по вольтамперным характеристикам последовательной, параллельной или смешанной цепи определить напряжения на отдельных элементах и токи в ветвях для задаваемых входных напряжений?

Лабораторная работа № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Цель работы: практическое изучение распределения магнитных потоков в неразветвленной магнитной цепи с изменяющимся воздушным зазором, определение коэффициента магнитного рассеяния, проверка выполнения закона полного тока для магнитных цепей с использованием методики расчета магнитных цепей постоянного тока.

Краткие теоретические сведения

Магнитной цепью называют совокупность катушек с током, ферромагнитных тел и иных сред, служащих для сосредоточения магнитного поля в определенной части прибора, машины, аппарата. В состав магнитной цепи входят: магнитопровод с обмотками, обтекаемыми током, и воздушные зазоры.

Основная часть магнитной цепи – магнитопровод – выполняется из ферромагнитного материала, который под действием тока, протекающего по обмоткам, намагничивается и создает главную часть магнитного потока.

На рис. 12.1 изображен магнитопровод, состоящий из сердечника с катушкой, по которой протекает ток I , и якоря. Магнитный поток Φ_1 , создаваемый током I , почти целиком замыкающийся по магнитопроводу, называют **основным магнитным потоком**. Магнитный поток, замыкающийся частично по воздуху Φ_{p1} , а частично вокруг витков катушки Φ_{p2} , образует так называемый **поток рассеяния**. Обычно потоком Φ_{p2} ввиду его малой величины пренебрегают.

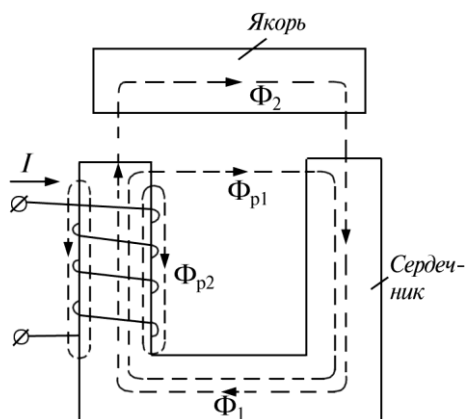


Рис. 12.1

Как видно из рис. 12.1, основной магнитный поток Φ_1 складывается из двух магнитных потоков: магнитного потока якоря Φ_2 и потока рассеяния Φ_{p1}

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_{p1}. \quad (12.1)$$

Величину потока рассеяния оценивают коэффициентом магнитного рассеяния σ :

$$\sigma = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}. \quad (12.2)$$

При расчете магнитных цепей делают следующие допущения:

- предполагают, что магнитный поток перпендикулярен сечению сердечника и распределяется по нему равномерно, т.е. магнитная индукция $B = \frac{\Phi}{S}$ во всех точках данного сечения является постоянной величиной;
- считают, что все магнитные линии имеют одинаковую длину, равную длине средней линии магнитопровода.

В основе расчета неразветвленной магнитной цепи лежит **закон полного тока**, который формулируется так: *циркуляция вектора напряженности магнитного поля H вдоль любого замкнутого контура l равна алгебраической сумме токов, охваченных этим контуром*

$$\oint_l \overline{H} d\overline{l} = \sum I. \quad (12.3)$$

Применяя закон полного тока к магнитной цепи, изображенной на рис. 12.1, за контур интегрирования выбирают контур, образованный средней линией магнитопровода. В этом случае закон полного тока можно переписать следующим образом:

$$\sum H_k l_k = I w,$$

где $H_k l_k = U_{mk}$ – магнитное напряжение на k -ом участке цепи;

I – ток в обмотке;

w – число витков обмотки;

$Iw = F$ – намагничивающая или магнитодвижущая сила (МДС).

В общем случае контур магнитной цепи может содержать несколько обмоток, тогда последнее выражение запишется так:

$$\sum U_{mk} = \sum I_l w_l. \quad (12.4)$$

Закон полного тока в записи (12.4) по существу выражает второй закон Кирхгофа для магнитной цепи, который формулируется так: *в замкнутом магнитном контуре алгебраическая сумма намагничивающих сил (магнитодвижущих сил) $I_l w_l$ равна алгебраической сумме падений магнитных напряжений U_{mk} .*

Как известно, магнитная индукция B связана с напряженностью магнитного поля H равенством

$$\overline{B} = \mu_a \overline{H} = \mu \mu_0 \overline{H}, \quad (12.5)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость данного вещества;

μ – относительная магнитная проницаемость данного вещества;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, называемая магнитной постоянной, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Для ферромагнитных тел μ_a величина переменная, поэтому зависимость $B = f(H)$ является нелинейной. Эта связь устанавливается опытным путем и представляется в виде кривых намагничивания, имеющих различный вид для разных ферромагнитных материалов. На рис. 12.2 приведена кривая намагничивания $B = f(H)$ для электротехнической стали.

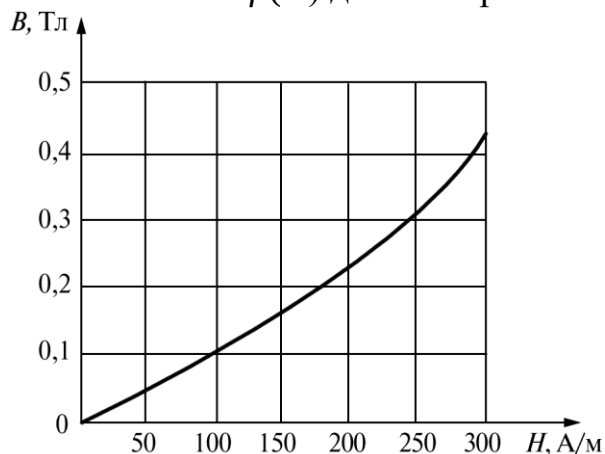


Рис. 12.2

Для неферромагнитных сред (пара- и диамагнетиков) магнитная индукция B линейно связана с напряженностью магнитного поля выражением

$$B = \mu_0 H,$$

так как для этих веществ $\mu \approx 1$.

Для расчета напряженности магнитного поля в воздушном зазоре $H_{вз}$ (воздух является немагнитным материалом) следует воспользоваться формулой

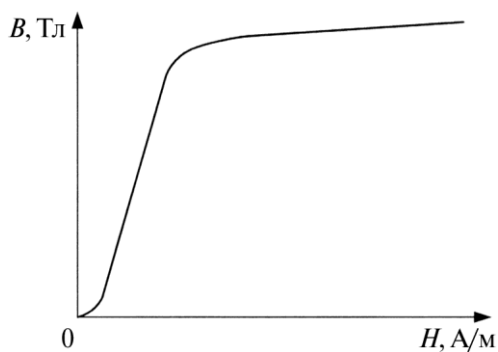
$$H_{вз} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 0,8 \cdot 10^6 B,$$

где $H_{вз}$ – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре, А/м;

B – магнитная индукция в воздушном зазоре, Тл.

При расчете электромагнитных устройств магнитная цепь разбивается на однородные участки, каждый из которых выполнен из определенного материала и имеет одинаковое поперечное сечение S вдоль всей своей длины. Длину каждого участка l будем считать равной длине средней магнитной линии в пределах этого участка.

Если в магнитной цепи есть воздушный зазор, то он чаще всего и является участком с наибольшим магнитным сопротивлением. Если в магнитную цепь входит ферромагнитный материал, то поток в ее ветвях при одной и той же МДС и одинаковой геометрии цепи окажется во много раз больше, чем в случае отсутствия ферромагнитного материала. Поэтому магнитные цепи электрических машин выполняют преимущественно из ферромагнитных материалов, а участки цепей из неферромагнитных материалов, т.е. неизбежные или необходимые воздушные зазоры, делают, как правило, возможно малыми.



На рис. 12.3 приведена реальная схема исследуемой цепи с двумя рабочими обмотками по $w/2$ витков каждая, которые подключены последовательно к источнику постоянного напряжения для создания магнитного потока Φ_1 . С помощью двух измерительных катушек с числом витков w_1 и w_2 производится измерение магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 .

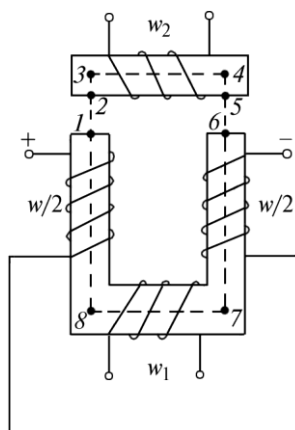
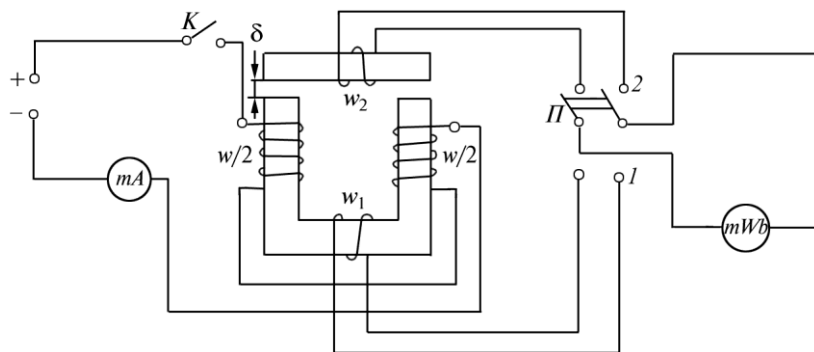


Рис. 12.3

В лабораторной работе исследуется влияние воздушного зазора на распределение магнитных потоков: в сердечнике Φ_1 , в якоре Φ_2 и в пространстве между полюсными наконечниками Φ_{p1} .

Описание установки



Исследуемая магнитная цепь (рис. 12.4) состоит из П-образного неподвижного сердечника и подвижного якоря, величину воздушного зазора между

которыми можно регулировать с помощью специального винта. Сердечник и якорь собраны из листовой электротехнической стали.

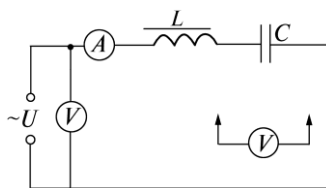


Рис. 13.5

В лабораторной установке на сердечнике расположены две намагничивающие катушки, которые включены последовательно, суммарное число витков $w = 5000$; и измерительная катушка с числом витков w_1 ; на подвижном якоре – измерительная катушка w_2 . Катушки w_1 и w_2 в создании магнитодвижущей силы не участвуют. Число витков измерительных катушек

$$w_1 = w_2 = 20.$$

В процессе выполнения лабораторной работы для измерения магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 к катушкам w_1 и w_2 с помощью переключателя П поочередно подключается милливеберметр. Метод измерения милливеберметром и правила пользования им описаны в Приложении.

Задание

Исследовать влияние воздушного зазора на распределение магнитных потоков в сердечнике и якоре. Оценить изменение коэффициента магнитного рассеяния σ в зависимости от величины воздушного зазора.

Проверить выполнение закона полного тока для магнитной цепи.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы и записать их технические данные.
2. Собрать схему рис. 12.4.
3. Установить величину тока в цепи намагничивающей катушки около 20 мА, записать его значение в табл. 12.2.
4. Изменяя величину воздушного зазора δ от 0 до 3 ÷ 5 мм (величина зазора фиксируется вставлением немагнитных прокладок между сердечником и якоре), записать показания милливеберметра $\Delta\alpha_1$ и $\Delta\alpha_2$ (переключатель П сначала установить в положение 1, а затем – в 2). Результаты измерений занести в табл. 12.1.

Измерение магнитного потока милливеберметром производится в момент замыкания ключа К.

Таблица 12.1

δ	$\Delta\alpha_1$	$\Delta\alpha_2$	Φ_1	Φ_2	σ
мм	дел.	дел.	Вб	Вб	—

5. По данным, полученным в п. 4, подсчитать магнитные потоки в сердечнике Φ_1 и якоря Φ_2 магнитной цепи (см. Приложение):

$$\Phi_{1(2)} = C_{\Phi} \frac{\Delta\alpha_{1(2)}}{w_{1(2)}}.$$

Определить при различных значениях воздушного зазора δ коэффициент магнитного рассеяния σ по формуле (12.2). Результаты расчетов занести в табл. 12.1.

6. Записать уравнение закона полного тока для исследуемой магнитной цепи (рис.12.4). Индекс «1» соответствует сердечнику, индекс «2» – якорю, индекс «вз» – воздушному зазору.

7. Измерить площадь поперечного сечения сердечника S_1 и якоря S_2 , длину средней линии сердечника l_1 между точками 1 и 6 через точки 8 и 7, длину средней линии якоря l_2 между точками 2 и 5 через точки 3 и 4 (см. рис. 12.3), полную длину воздушного зазора $l_{вз} = 2\delta$ (рис. 12.5). Результаты измерений занести в табл. 12.2.

8. При заданных преподавателем значениях воздушного зазора δ и токе намагничивания I подсчитать значения величин табл. 12.3.

Расчет ведется в следующем порядке:

а) по известным потокам Φ_1 и Φ_2 и сечениям S_1 и S_2 находят магнитные индукции B_1 и B_2 ;

б) для ферромагнитных участков магнитной цепи по кривым намагничивания (для конкретных электротехнических сталей эти кривые приведены на стендах в лаборатории) определяют напряженность магнитного поля в сердечнике H_1 и якоря H_2 ;

в) для воздушного зазора вычисляют напряженность магнитного поля $H_{вз} = 0,8 \cdot 10^6 B_2$, так как при незначительной длине воздушного зазора магнитная индукция в нем равна индукции в якоря;

г) подсчитывают падения магнитного напряжения на участках магнитной цепи: $H_1 l_1$, $H_2 l_2$, $H_{вз} l_{вз}$, учитывая, что $l_{вз} = 2\delta$;

д) находят сумму падений магнитного напряжения на участках магнитной цепи $\sum H_k l_k$ и сравнивают с МДС $F = Iw$.

Результаты вычислений занести в табл. 12.3.

Таблица 12.2

Измерено								
δ	S_1	S_2	l_1	l_2	$l_{вз}$	Φ_1	Φ_2	I
мм	м ²	м ²	м	м	м	дел.	дел.	А

Таблица 12.3

Вычислено									
I_w	B_1	B_2	H_1	H_2	$H_{вз}$	$H_1 l_1$	$H_2 l_2$	$H_{вз} l_{вз}$	$\Sigma H_k l_k$
А	Тл	Тл	А/м	А/м	А/м	А	А	А	А

9. Построить в одних осях координат зависимости $\Phi_1 = f(\delta)$, $\Phi_2 = f(\delta)$, $\sigma = f(\delta)$.
 10. Дать заключение по проведенной работе.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать закон полного тока для магнитной цепи.
2. Сформулировать законы Кирхгофа для магнитных цепей.
3. В каких единицах измеряются: магнитный поток, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, падение магнитного напряжения, МДС?
4. Как определить направление МДС?
5. С какой целью стремятся выполнить магнитную цепь с возможно меньшим воздушным зазором?
6. Как изменяются потоки Φ_1 и Φ_2 с увеличением воздушного зазора?