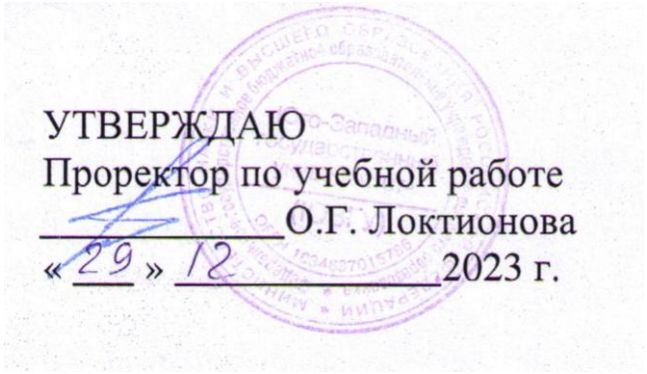
МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра инфраструктурных энергетических систем



ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШКИ СО СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по теоретическим основам электротехники

Курск 2023

УДК 621.3 (076.1)

Составители: А. С. Романченко, И. А. Башмакова

Рецензент
Кандидат технических наук, доцент *А .С. Чернышёв*

Исследование катушки со стальным сердечником : методические указания по выполнению лабораторной работы по теоретическим основам электротехники для студентов технических специальностей и направлений подготовки / Юго-Зап. гос. ун-т ; сост.: А. С. Романченко, И. А. Башмакова. - Курск, 2023. - 11 с.: ил. 6, табл. 1. Библиогр.: с. 11.

Методические указания содержат сведения по выполнению лабораторной работы «Исследование реактивной катушки со стальным сердечником», исследуется вариант катушки с магнитопроводом разомкнутого типа из разного материала. Указывается порядок выполнения лабораторной работы, правила оформления отчета. Лабораторная работа относится к разделу магнитных цепей переменного тока.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Теоретическим основам электротехники».

Предназначены для студентов технических специальностей и направлений подготовки при проведении лабораторных занятий.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. . Уч.-изд.л. . Тираж 50 экз. Заказ . Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является изучение основ линейной теории распространенного элемента электротехники – индуктивной катушки со стальным сердечником.

Для этого в работе экспериментально исследуется вариант катушки с магнитопроводом разомкнутого типа. В опытах с разными сердечниками выявляется влияние материала сердечника. А для случая со стальным сердечником выполняется полная обработка данных измерения режима, включающая расчет всего комплекса характеризующих режим величин, построение векторной диаграммы и определение эквивалентной схемы замещения.

2. ПОДГОТОВКА К ИССЛЕДОВАНИЯМ

2.1. Изучить по конспекту лекций и рекомендованному учебнику в разделе «Магнитные цепи переменного тока» параграфы, относящиеся к анализу работы индуктивной катушки с магнитопроводом в цепи переменного тока.

2.2. Освоить методику выполнения лабораторной работы по настоящим методическим указаниям.

2.3. Заготовить таблицу для экспериментальных данных.

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Индуктивная катушка со стальным сердечником является основой большинства электрических машин и аппаратов, применяемых в электротехнике низких и повышенных частот. Как правило, рассчитывается катушка так, что предельные режимы соответствуют началу магнитного насыщения. Поэтому для описания рабочих режимов можно применять линейную теорию, в которой искажения синусоидальной формы тока, напряжения и магнитного потока, вызванные некоторой нелинейностью рабочего участка магнитной характеристики, рассматриваются как несущественные, либо учитываются заменой несинусоидальных кривых эквивалентными синусоидальными.

Если стальной сердечник катушки образует замкнутый магнитопровод, то вследствие высокой магнитной проницаемости стали основная часть магнитного потока Φ_0, созданного током катушки, замыкается по сердечнику. Небольшая его доля, называемая потоком

рассеяния Φ_S, замыкается частично по воздуху (рисунок 1). В соответствии с этим полное потокосцепление ψ делят на две части: основную $\psi_0=N\Phi_0$, где N – число витков обмотки, и потокосцепление рассеяния $\psi_S=L_Si$, где L_S – коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью рассеяния; i – ток катушки. Пропорциональность здесь объясняется тем, что поток Φ_S определяется, в основном, линейным магнитным сопротивлением воздуха.

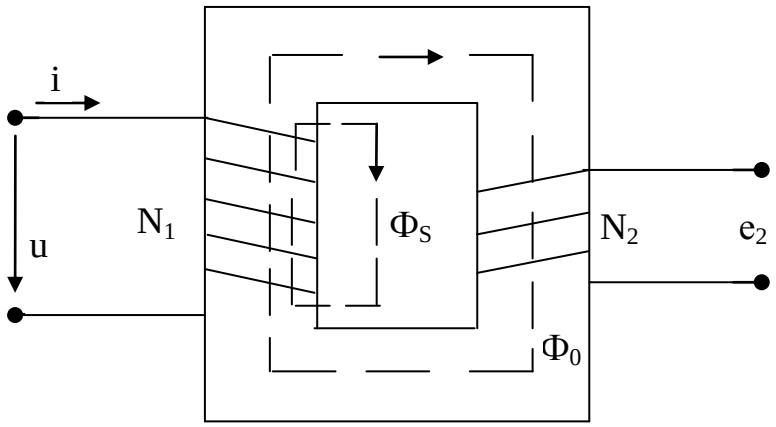


Рисунок 1. Линии магнитного потока при наличии рассеяния

Если представить потокосцепление катушки как $\psi=\psi_0+L_Si$, то ЭДС самоиндукции катушки будет равна:

$$e=-\frac{d\psi}{dt}=-L_S\frac{di}{dt}-\frac{d\psi_0}{dt}. \qquad (3.1)$$

Тогда для катушки со стальным сердечником полное уравнение напряжений получает вид:

$$u=Ri+L_S\frac{di}{dt}+\frac{d\psi_0}{dt}, \qquad (3.2)$$

где R – активное сопротивление обмотки (сопротивление провода, из которого изготовлена индуктивная катушка).

Заменяя несинусоидальные кривые эквивалентными синусоидальными, можно перейти к записи в комплексной форме:

$$\underline{U}=R\underline{I}+j\omega L_S\underline{I}+\underline{U_0}. \qquad (3.3)$$

Общие потери энергии в катушке с сердечником составляют потери в проводе обмотки («потери в обмотке») и потери в сердечнике, которые слагаются из затрат на перемагничивание и на возбуждение вихревых токов. В уравнении напряжений (3.3) потерям в обмотке, очевидно, соответствует первый член RI. Второй член представляет падение напряжения на индуктивном сопротивлении рассеяния

$X_S=\omega L_S$. Тогда величину U_0 можно рассматривать как напряжение на зажимах некоторой идеализированной катушки с током I, у которой нет потерь в обмотке, но существуют потери в сердечнике. Тогда активная составляющая I_C тока такой катушки, совпадающая по фазе с U_0, будет учитывать только потери в сердечнике, а назначением реактивной составляющей I_μ, отстающей по фазе от U_0 на угол $\pi/2$, будет создание основного магнитного потока Φ_0 и потокосцепления ψ_0. Отсюда виден смысл употребляемых терминов: «ток потерь в стали» (I_C), «намагничивающий ток» (I_μ). Отсюда также видна связь комплексных и действующих значений полного тока и его составляющих:

$$\underline{I} = \underline{I}_\mu + \underline{I}_C, \quad I = \sqrt{I_S^2 + I_\mu^2}, \qquad (3.4)$$

Из-за потерь в сердечнике намагничивающий ток I_μ сдвинут по фазе относительно полного тока I на некоторый «угол потерь» $\delta=arctg(Ic/I_\mu)$.

По основным уравнениям (3.3) и (3.4) определяется структура эквивалентной электрической схемы замещения катушки со стальным сердечником (рисунок 2). Согласно (3.3) реальная катушка представляется в виде последовательного соединения элементов R и X_S и идеализированной катушки с напряжением на зажимах U_0. Структуру последней указывают уравнения (3.4), где полный ток I является как бы суммой параллельных токов: тока I_C, совпадающего по фазе с U_0, и тока I_μ, отстающего от U_0 на $\pi/2$. Соответственно этому в схеме замещения должен присутствовать активный элемент с проводимостью G_C и параллельный ему индуктивный элемент с проводимостью B_μ. Схема на рисунке 2 получила название параллельной схемы замещения. На рисунке 3 представлена схема, которую будем называть последовательной схемой замещения реальной индуктивной катушки с магнитопроводом.

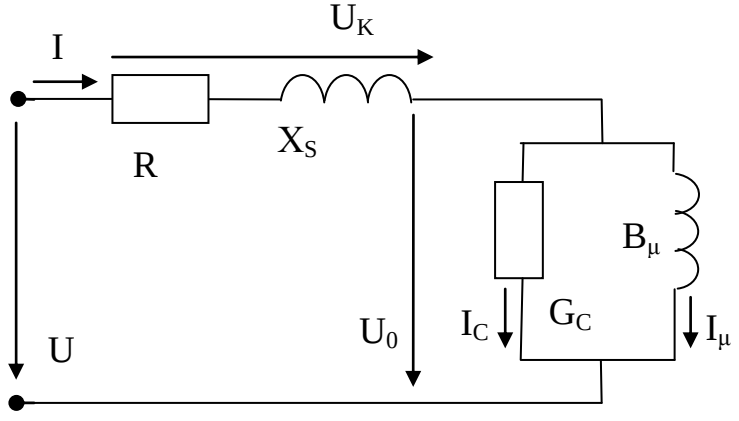


Рисунок 2. Параллельная схема замещения катушки

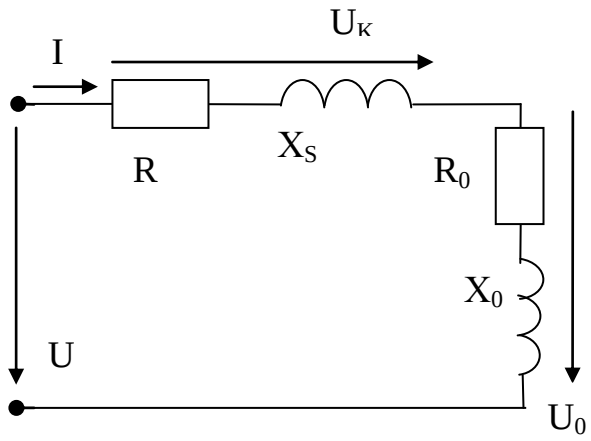


Рисунок 3. Последовательная схема замещения катушки

Назначение элементов на последовательной схеме замещения: X_0 – характеризует наличие основного магнитного потока в магнитопроводе, X_S – характеризует наличие магнитного потока рассеяния, R_0 – определяет величину магнитных потерь в магнитопроводе, R – определяет величину электрических потерь в обмотке. Условно можно считать, что на рисунке 3 изображено последовательное соединение реальной индуктивной катушки без магнитопровода (X_S, R) и идеальной катушки с магнитопроводом (X_0, R_0).

Эквивалентные электрические схемы применяют как для расчета самих устройств электротехники, так и для замещения этих устройств в более сложных цепях с целью облегчить анализ режимов всей цепи.

Векторная диаграмма схемы замещения является диаграммой катушки, так как графически изображает ее основные уравнения (3.3) и (3.4) и поэтому наглядно представляет исследуемый режим. Диаграмма показана на рисунке 4. Исходным вектором диаграммы обычно является вектор Φ_m основного магнитного потока, определяемого для расчета U_0. Сдвиг фаз между Φ_m и опережающим вектором U_0 равен $\pi/2$, так как $\underline{U_0}=j\omega\Psi_0=j\omega N(\Phi_m/\sqrt{2})$. Следовательно, Φ_m совпадает по фазе с намагничивающим током I_μ. Направления прочих векторов определяются при последовательном построении.

Исследуемая в настоящей работе катушка имеет стержневой сердечник. Такой магнитопровод катушки – разомкнутый, и магнитный поток вынужден замыкаться через относительно большой воздушный участок. В таком случае полное потокосцепление Ψ нельзя разделить на строго определяемые части, поскольку неизвестно число витков, с которыми сцепляется та или иная часть магнитного потока. Поэтому уравнением напряжений будет:

$u=Ri+d\psi/dt$ или $\underline{U}=R\underline{I}+(-\underline{E})$,

где $\underline{E}=j\omega\Psi$ – ЭДС самоиндукции, Ψ – полное потокосцепление.

Векторная диаграмма такой катушки с указанием последовательности построений (номера в скобках) приведена на рисунке 5.

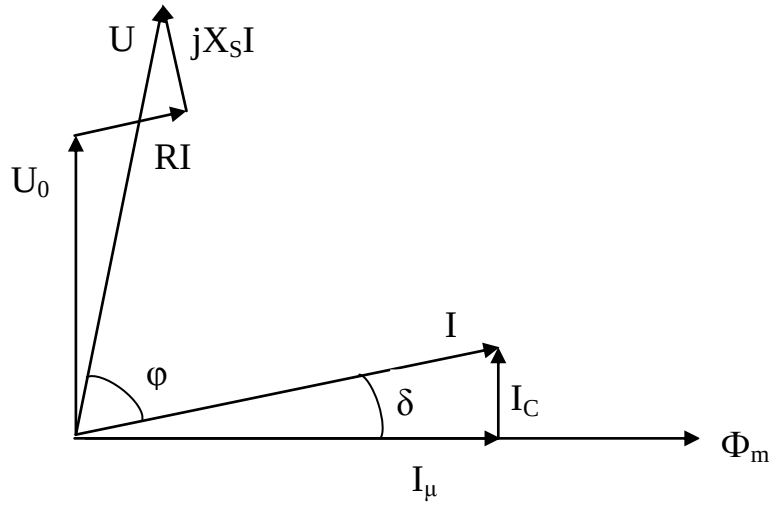


Рисунок 4. Векторная диаграмма индуктивной катушки с замкнутым магнитопроводом

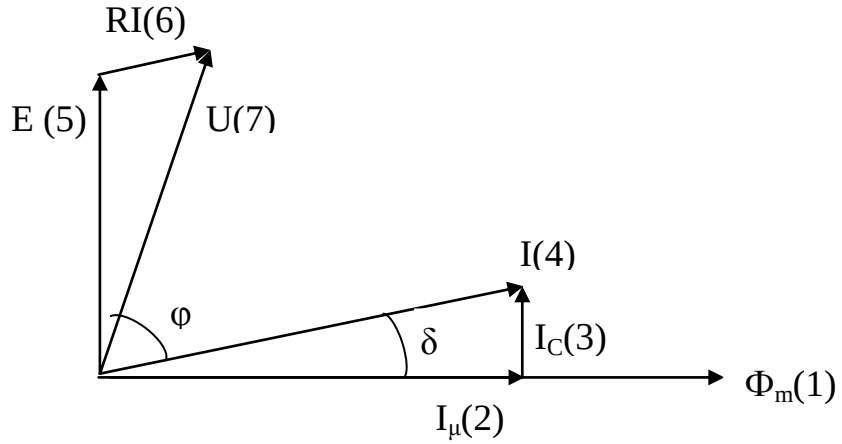


Рисунок 5. Векторная диаграмма индуктивной катушки со стержневым (разомкнутым) магнитопроводом

Экспериментальное определение векторов диаграммы и параметров элементов схемы замещения выполняется по результатам измерений напряжения U, тока I и мощности полных потерь P. В катушке с замкнутым магнитопроводом измеряется еще ЭДС E_2 дополнительной обмотки N_2 (рисунок 1), которая при синусоидальном процессе позволяет найти:

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}E_2}{\omega N_2} \qquad \text{и} \qquad U_0=E_2N_1/N_2.$$

Для катушки со стержневым сердечником необходимые расчеты на основании данных опытов выполняются в следующем порядке.

ЭДС самоиндукции E, как видно из рисунка 5, можно найти по теореме косинусов:

$$E = \sqrt{U^2 + (RI)^2 - 2URI\cos\varphi},$$

где $\cos\varphi = P/(UI)$.

Ток потерь в стали равен: $I_C = (P - RI^2)/E$.

Сопротивление обмотки R определяется на постоянном токе или на переменном токе низкой частоты по результатам измерений U, I и P для катушки без сердечника.

Намагничивающий ток равен: $I_\mu = \sqrt{I^2 - I_C^2}$.

Параметры G_c и B_μ параллельной схемы замещения равны:

$G_c = I_C/E$ и $B_\mu = I_\mu/E$.

Участок схемы замещения, представляющий идеализированную катушку с параллельно соединенными элементами G_c и B_μ, можно заменить последовательным соединением элементов R_0 и X_0:

$R_0 = G_c/(G_c^2 + B_\mu^2)$ и $X_0 = B_\mu/(G_c^2 + B_\mu^2)$.

Очевидно, что $R_K = R + R_0$ и $X_K = X_S + X_0$ представляют соответственно активное и реактивное сопротивления катушки со стальным сердечником.

При наличии замкнутого магнитопровода вместо E в соответствующих формулах используется U_0, а сопротивление рассеяния X_S рассчитывается по формуле $X_S = X - X_0$, где

$$X = \sqrt{(U/I)^2 - (P/I^2)^2}.$$

4. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

Объектом исследований в работе является катушка лабораторного стенда, обозначенная символом L1. В рабочую цепь включается только одна из секций её обмотки с зажимами 1–2, 2–3 или 3–4. Число витков каждой секции N=2000.

Источником питания в работе является лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) АТ, установленный внутри стенда (зажимы 0 ... 250 В) и подключаемый тумблером ЛАТР. Перед сборкой схемы тумблер ЛАТР должен быть в положении ВЫКЛ, а ручка регулировки напряжения автотрансформатора – в нулевом положении, т.е. против часовой стрелки до упора.

Рабочий ток рекомендуется выбирать в пределах 0,6–0,8 А. Максимально допустимое значение – 0,85 А.

Опыты проводятся с сердечниками, изготовленными из стали и алюминия в виде сплошного цилиндра, свободно перемещаемого в отверстии катушки.

Используемые измерительные приборы: амперметр электромагнитной системы на 1 А, вольтметр электромагнитной системы на 75 и 150 В, ваттметр электродинамической системы на 150 Вт.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Ознакомиться с используемыми приборами и аппаратурой, определить цену деления измерительных приборов.

5.2. Собрать рабочую цепь по схеме на рисунке 6.

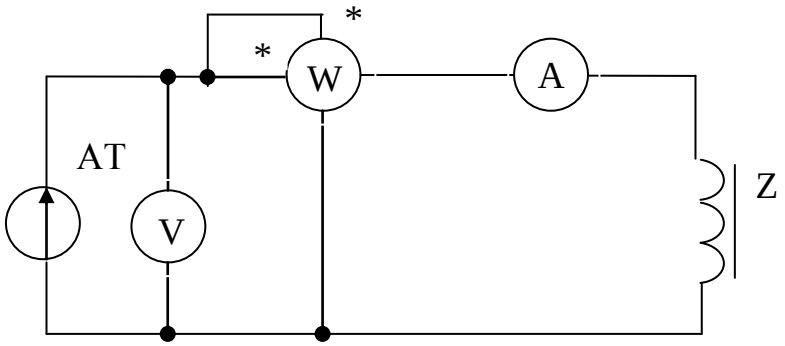


Рисунок 6. Схема рабочей цепи

5.3. Во всех опытах – сначала без сердечника, затем с каждым из имеющихся сердечников – измерить параметры *U, I* и *P* одного режима и занести в таблицу 1. Рекомендуется устанавливать одно и то же значение тока, взятое в указанных выше пределах.

Таблица 1. Данные исследования индуктивной катушки

Измерено			Вычислено							Примечание
I, А	U, В	P, Вт	Z, Ом	R, Ом	X, Ом	G_C, 1/Ом	B_μ, 1/Ом	R_o, Ом	X_o, Ом	
						--	--	--	--	без сердечника
						--	--	--	--	алюминиевый сердечник
										стальной сердечник

5.5. Выключить стенд и, не разбирая цепи, дать проверить результаты измерений преподавателю.

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. Для всех вариантов опытов рассчитать полное, активное и реактивное сопротивления катушки. Сравнив результаты, дать выводы о влиянии сердечников. Привести объяснение причин влияния.

6.2. Для случая со стальным сердечником рассчитать элементы векторной диаграммы и параметры R, G_C, B_μ, R_0 и X_0 эквивалентной схемы замещения. Сопротивление обмотки R можно приравнять активному сопротивлению катушки без сердечника.

Запись всех расчетов представить в виде последовательной цепи: формула – подстановка числовых значений – результат.

6.3. Построить векторную диаграмму по образцу на рисунке 5, где принять $\Psi=U/\omega$. На диаграмме указать масштабы всех величин.

6.4. Начертить последовательную и параллельную электрические схемы замещения и проставить рядом с изображениями элементов найденные значения соответствующих параметров.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы особенности режимов катушки со стальным сердечником, для описания которых пригодна линейная теория?

2. Приведите обоснование полного уравнения напряжений для катушки с замкнутым магнитопроводом. Объясните отличия в случае со стержневым сердечником.

3. Поясните происхождение таких понятий, как ток потерь в стали, намагничивающий ток и угол потерь. Напишите соотношения, связывающие полный ток и его составляющие.

4. Что представляет собой векторная диаграмма катушки с замкнутым стальным сердечником? Поясните порядок ее построения.

5. Что представляет собой векторная диаграмма катушки с разомкнутым стальным сердечником? Поясните порядок ее построения.

6. Какое значение имеет эквивалентная электрическая схема замещения? Как выявляется ее структура с помощью основных уравнений?

7. Объясните физический смысл элементов последовательной схемы замещения катушки с замкнутым магнитопроводом.

8. Объясните физический смысл элементов параллельной схемы замещения катушки с замкнутым магнитопроводом.

9. Как выполняется экспериментальное определение векторной диаграммы и параметров элементов схемы замещения?

10. Почему катушка с алюминиевым сердечником потребляет больше мощности, чем катушка без сердечника, при том же напряжении источника?

11. Почему при одном и том же токе источника катушка со стальным сердечником потребляет больше мощности и требует большего напряжения, чем катушка без сердечника?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 10-е изд. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с. – Текст непосредственный.

2. Попов, В. П. Основы теории цепей : учебник для вузов / В. П. Попов. - 3-е изд., испр. - М. : Высшая школа, 2000. - 575 с. – Текст непосредственный.

3. Бакалов, В. П. Основы теории электрических цепей и электроники : учебник для вузов / В. П. Бакалов, А. Н. Игнатов, Б. И. Крук. – М.: Радио и связь, 1989. – 525 с. – Текст непосредственный.

4. Основы теории цепей : учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с. – Текст непосредственный.