

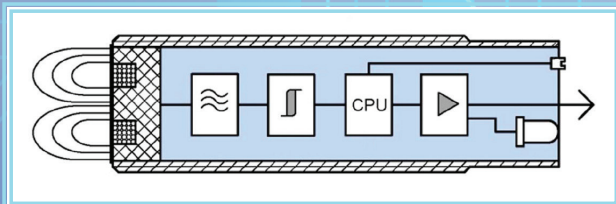


тольяттинский
государственный
университет

А.В. Прядилов,
М.В. Позднов

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Лабораторный практикум



Тольятти
Издательство ТГУ
2025

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

А.В. Прядилов, М.В. Позднов

**МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

Лабораторный практикум

Тольятти
Издательство ТГУ
2025

УДК 621.318:621.38(075.8) +681.586.7(075.8)

ББК 22.37 я73+32.965-044.3я73

П858

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Сервис
технических и технологических систем» Поволжского
государственного университета сервиса *Б.М. Горшков*;
д-р техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника»
Тольяттинского государственного университета *В.П. Певчев*.

П858 Прядилов, А.В. Магнитные элементы электронной техники : лабораторный практикум / А.В. Прядилов, М.В. Позднов. — Тольятти : Издательство ТГУ, 2025. — 45 с. — ISBN 978-5-8259-1730-6.

Лабораторный практикум содержит методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Магнитные элементы электронной техники» и «Микромагнитоэлектроника».

Предназначен для студентов бакалавриата очной формы обучения направления подготовки 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

УДК 621.318:621.38(075.8) +681.586.7(075.8)

ББК 22.37 я73+32.965-044.3я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© Прядилов А.В., Позднов М.В., 2025
ISBN 978-5-8259-1730-6 © ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2025

Введение

Курс «Магнитные элементы электронной техники» включает ряд лабораторных работ, предполагающих исследование и моделирование магнитных систем, использующихся в промышленной электронике и автоматике. В первой лабораторной работе предполагается изучение магнитной системы плоского электромагнита. Это происходит в опытах на лабораторных стендах и в последующем, при математическом моделировании в 3D-системе ELCUT (системе моделирования магнитных полей параметров). Во второй лабораторной работе исследуется бесконтактный магнитный датчик, определяются его характеристики и сравниваются с паспортными. В третьей работе исследуется магнитное поле соленоида с помощью датчика Холла, затем для проверки результата проводится 3D-моделирование магнитного поля соленоида расчетным методом с помощью программы ELCUT.

Цель дисциплины: формирование профессиональных компетенций, необходимых для анализа работы и расчета элементов промышленной электроники и автоматики.

Задачи дисциплины:

1. Научиться проводить измерения с помощью осциллографа и мультиметров.
2. Научиться проводить расчеты в среде ELCUT.
3. Научиться проводить расчеты по аналитическим формулам.
4. Научиться проводить анализ результатов измерений и вычислений.

Требования по оформлению отчета приведены в файле «Правила оформления ЛР.doc», расположенном на Яндекс-диске https://yadi.sk/d/Fs-9ts_VInrE3Q в папке «Ко всем предметам».

Образец титульного листа отчета приведен в приложении.

Требования по технике безопасности при выполнении лабораторной работы

1. Перед началом выполнения лабораторной работы необходимо получить допуск у преподавателя.
2. Запрещается включать питание установки до проверки схемы преподавателем.

3. Необходимо бережно относиться к используемому оборудованию, не дергать за провода, не допускать ударов или падения.

4. Перед началом выполнения цикла лабораторных работ необходимо пройти инструктаж по технике безопасности и расписаться в журнале.

5. В случае возникновения нестандартной ситуации (появление дыма, хлопков и т. д.) необходимо обесточить оборудование и сообщить преподавателю.

После выполнения лабораторного практикума студенты должны знать принципы аналитического расчета магнитных полей, уметь использовать измерительное оборудование и системы расчета магнитных полей, сформировать навык практического исследования установки с получением результатов измерений.

Лабораторная работа 1

Исследование магнитной системы

Цель работы — изучение способов исследования магнитных систем.

Используемые оборудование и материалы

1. Лабораторный стенд.
2. Блок питания постоянного напряжения.
3. Осциллограф (цифровой, запоминающий, с возможностью вывода информации в файл в цифровом виде).
4. Штангенциркуль.

Задачи работы

1. Изучить работу стенда посредством визуального осмотра и чтения сопровождающей документации.
2. Осуществить замер размеров детали (штангенциркулем) и выполнить ее чертеж.
3. С помощью цифрового двухканального осциллографа снять несколько сигналов в точках схемы (по очереди, с последующей синхронизацией).
4. Произвести загрузку и первичную обработку осциллограмм в систему MathCAD (считывание информации из файла, фильтрация помех, коррекция нулевого положения, домножение на коэффициенты).
5. Произвести в MathCAD визуальное отображение осциллограмм и расчетных зависимостей на рисунках.
6. Произвести обработку информации (осциллограмм) в MathCAD (интегрирование одиночного сигнала, сложение, умножение и интегрирование нескольких осциллограмм, математические расчеты, вычисление различных зависимостей).
7. Изучить работу с датчиками холла.
8. Осуществить расчет магнитных систем по упрощенным формулам (в MathCAD).
9. Осуществить математическое моделирование магнитных систем в программном пакете Elcut.
10. Осуществить (графически и численно) сравнение результатов, полученных разными способами.

План проведения работы

1. Изучение конструкции стенда и замер размеров магнитопровода.
2. Проведение экспериментальных исследований.
3. Математическая обработка результатов экспериментальных исследований.
4. Теоретический расчет магнитной системы и математическое моделирование.
5. Сравнение результатов, полученных различными экспериментальными и теоретическими способами.

Методические рекомендации

Магнитная система лабораторного стенда (рис. 1.1) состоит из верхнего и нижнего магнитопроводов, подвижных друг относительно друга; немагнитных прокладок, задающих зазор между магнитопроводами; обмотки электромагнита, создающей магнитодвижущую силу; потокоизмерительной обмотки и датчика холла. Нижний магнитопровод полностью симметричен верхнему, за исключением центрального полюса, укороченного на 2,5 мм для размещения в образовавшемся зазоре датчика Холла.

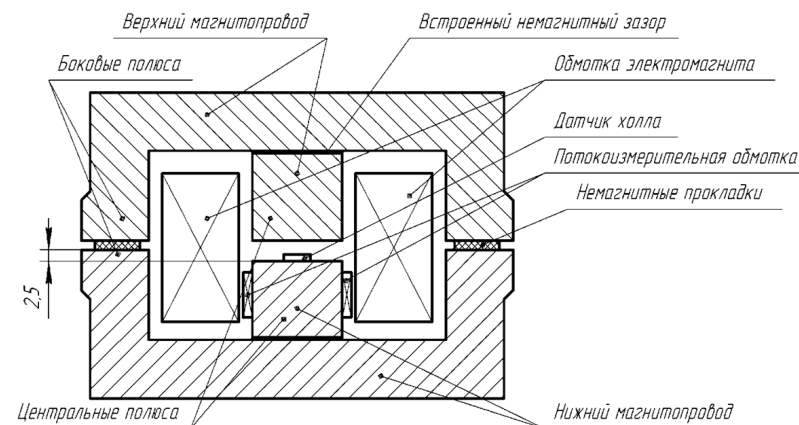


Рис. 1.1. Магнитная система стенда

К гнездам XS1 (+) и XS2 (–) подключается источник постоянного напряжения 15 В (рис. 1.2). Обмотка электромагнита подключена к источнику постоянного напряжения (через выключатель S1). Обратный диод VD2 служит для замыкания тока при размыкании выключателя. Потокотизмерительная обмотка ($W_\phi = 5$ витков) служит для измерения магнитного потока (ее витковое напряжение равно скорости изменения магнитного потока).

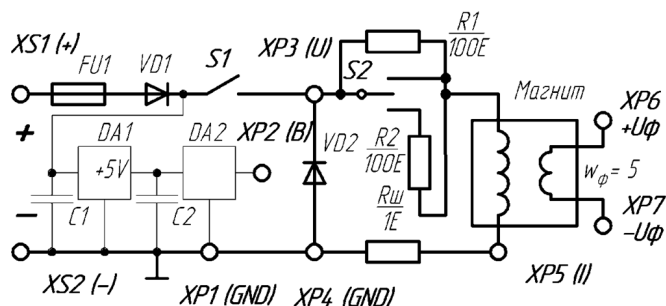


Рис. 1.2. Электрическая схема стенда

Шунт $R_\text{ш}$ (1 Ом) предназначен для замера тока. Трехпозиционный переключатель S2 и резисторы R1, R2 (100 Ом) позволяют подключить последовательно с обмоткой электромагнита добавочное сопротивление для задания вариантов для бригад. Интегральный стабилизатор DA1 (типа 7805) и фильтровые конденсаторы C1, C2 обеспечивают питание +5 В для датчика Холла DA2 (типа SS49E).

Для замера величин земляной разъем щупа осциллографа («крокодил») подключается к XP1,4 (GND), а измерительный подключается:

- к XP3 (U) для замера напряжения на электромагните;
- к XP5 (I) для замера тока;
- к XP2 (B) для замера напряжения на выходе датчика Холла $U_\text{дх}$ (для последующего расчета напряженности магнитного поля H или индукции B).

Для замера напряжения на потокотизмерительной обмотке щуп подключается измерительным разъемом к XP6 (+ U_ϕ) и земляным разъемом к XP7 (– U_ϕ).

1. Алгоритм проведения опытов

1.1. Изучение конструкции стенда и замер размеров магнитопровода

Порядок действий

1. Изучить конструкцию стенда по описанию, приведенному в данных методических указаниях.
2. В сети Интернет с помощью поисковых запросов найти (распечатать и принести) справочные данные к датчику Холла (типа SS49E), пример поискового запроса: «SS49E pdf».
3. Замерить (штангенциркулем и линейкой) геометрические размеры магнитопровода и сделать его чертеж. Величину встроенного немагнитного зазора замерять необязательно, так как она очень мала и в дальнейших расчетах ею рекомендуется пренебречь.
4. Определить, являются ли ферромагнитными стальные боковые планки, скрепляющие пластины магнитопровода. В случае, если они являются ферромагнитными, их толщину необходимо прибавить к толщине магнитопровода (при математических расчетах и моделировании).

1.2. Проведение экспериментальных исследований

Перед началом экспериментов необходимо:

1. Выключить тумблер S1 (нижнее положение).
2. В соответствии с номером бригады выставить на блоке питания постоянное напряжение U (табл. 1.1) и выставить переключатель S2 в заданное положение, выбрав тем самым величину добавочного сопротивления. В дальнейшем напряжение U и положение переключателя S2 не менять!
3. Подключить блок питания к разъемам XS1, XS2, соблюдая указанную полярность.

Таблица 1.1

Положение переключателя S2 в зависимости от номера бригады

Номер бригады	Напряжение питания U , В	Положение переключателя S2
1	14,5	Верхнее
2	14,5	Нижнее
3	14,5	Среднее

Номер бригады	Напряжение питания U , В	Положение переключателя S2
4	12	Верхнее
5	12	Нижнее
6	12	Среднее

При экспериментах необходимо снимать осциллограммы:

- напряжения на электромагните U ;
- тока через него I ;
- напряжения на потокоизмерительной обмотке U_ϕ ;
- напряжения на выходе датчика Холла $U_{\text{дх}}$.

Двухканальным осциллографом за один раз можно снять только 2 сигнала. Значит, необходимо снимать каждый опыт за 2 раза с последующей синхронизацией сигналов (снять сначала U , I , а затем U_ϕ , $U_{\text{дх}}$, и синхронизировать осциллограммы).

Для дальнейшей синхронизации экспериментов между собой необходимо настраивать запуск осциллографа на момент переключения тумблера S1. Для этого в качестве источника синхронизации необходимо выбирать канал, к которому подключен сигнал напряжения U или напряжения с потокоизмерительной обмотки U_ϕ .

Масштабы осциллографа по напряжениям необходимо устанавливать такими, чтобы амплитуды сигналов занимали как можно большую часть экрана. Масштаб осциллографа по времени необходимо выбирать таким, чтобы ток успевал достичь своего установившегося значения, но переходные процессы оставались четко видны. Снимаемые осциллограммы необходимо сохранять в файл для дальнейшей обработки, записывая на бумаге номера файлов.

Опыт с подачей постоянного напряжения

Необходимо снять осциллограммы напряжения U , тока I , напряжения на потокоизмерительной обмотке U_ϕ и напряжения с выхода датчика Холла $U_{\text{дх}}$ при подаче постоянного напряжения на обмотку электромагнита при различных величинах немагнитного зазора.

1. Подключить осциллограф для снятия напряжения U и тока I (земляные разъемы щупов подключить к цепи GND (XP1,4), а измерительные — к сигналам XP3 (U) и XP5 (I)). Настроить ждущий (или однократный) режим с синхронизацией по фронту напряжения U .

2. Включением тумблера S1 подать постоянное напряжение на электромагнит, снять кривые U, I . Выключить тумблер S1.

3. Здесь и далее: при необходимости повторить эксперимент, подкорректировав масштабы по напряжениям и по времени так, чтобы амплитуды сигналов занимали значительную (не менее трети) часть экрана, а ток успевал достигать своего установившегося значения. Для удобства синхронизации и обработки осциллограмм в дальнейшем рекомендуется больше не менять настройки осциллографа по времени (масштаб и положение нулевого отсчета).

Примерный вид ожидаемых осциллограмм приведен на рис. 1.3.

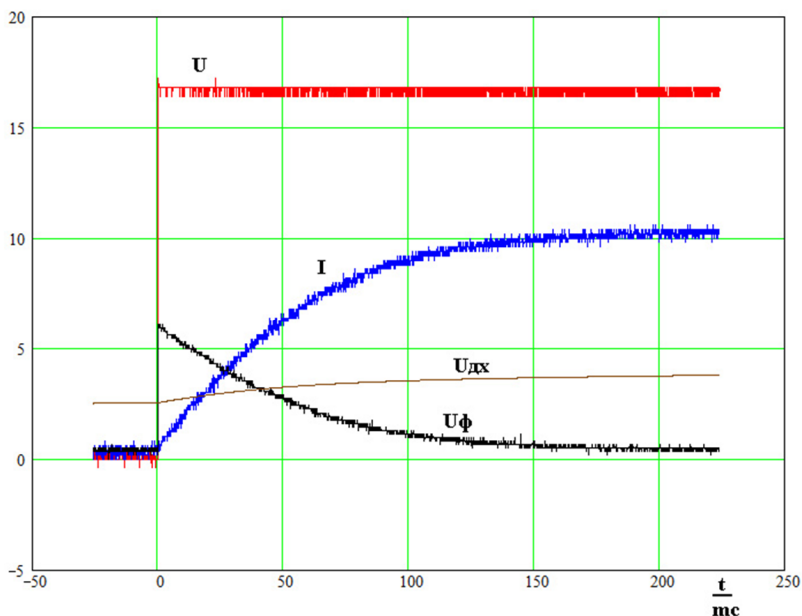


Рис. 1.3. Примерный вид осциллограмм при подаче напряжения (размерность графиков по осям $U, I, U_{дх}, U_{ф}$ соответственно в В, мА, мВ, мВ)

4. Здесь и далее: сохранить снятые осциллограммы в файл, записав на бумаге номер файла и перечень осциллограмм, которые в нем содержатся.

5. Выставить величину немагнитного зазора $\delta = 0,5$ мм. Для этого установить между двумя боковыми полюсами магнитопровода по одной немагнитной прокладке толщиной 0,5 мм (см. рис. 1.1). Повторить снятие осциллограмм U, I (пп. 1–4).

6. Выставить величину немагнитного зазора в 1 мм. Для этого установить между двумя боковыми полюсами магнитопровода по две немагнитные прокладки толщиной 0,5 мм. Повторить снятие осциллограмм U, I .

7. Выставить величину немагнитного зазора в 1,5 мм, поставив по три немагнитные прокладки. Снять осциллограммы U, I . Извлечь все немагнитные прокладки.

8. Подключить осциллограф для снятия напряжения на выходе датчика Холла $U_{\text{дх}}$ (земляной разъем щупа к цепи GND (XP1), а измерительный к XP2 (B)) и напряжения на потокоизмерительной обмотке (земляной разъем щупа к цепи XP7 ($-U_{\text{ф}}$), а измерительный к XP6 ($+U_{\text{ф}}$)). Настроить ждущий (или однократный) режим с синхронизацией по напряжению $U_{\text{ф}}$. Снять и записать осциллограммы $U_{\text{ф}}, U_{\text{дх}}$ (подав напряжение включением тумблера S1). Выключить тумблер S1.

9. Снять осциллограммы $U_{\text{ф}}$ и $U_{\text{дх}}$ для значений немагнитного зазора $\delta = 0,5; 1$ и 1,5 мм (добавляя прокладки аналогично пп. 5–7 и повторяя опыт п. 8).

Именно по этим осциллограммам будут производиться дальнейшие расчеты.

Опыт с отключением постоянного напряжения

Необходимо снять осциллограммы напряжения U , тока I , напряжения на потокоизмерительной обмотке $U_{\text{ф}}$ и напряжения с выхода датчика Холла при отключении напряжения с закорачиванием тока через диод.

1. Установить нулевой немагнитный зазор (убрать немагнитные прокладки).

2. Подключить осциллограф для снятия напряжения U и тока I (земляные разъемы щупов подключить к цепи GND (XP1,4), а из-

мерительные — к сигналам ХР3 (U) и ХР5 (I)). Настроить ждущий (или однократный) режим с синхронизацией по спаду напряжения U .

3. Включить тумблер S1 (верхнее положение).

4. Выключением тумблера S1 отключить постоянное напряжение, снять кривые U , I .

5. Подключить осциллограф для снятия напряженности магнитного поля (земляной разъем щупа к цепи GND (ХР1), а измерительный к ХР2 (В)) и напряжения на потокоизмерительной обмотке (земляной разъем щупа к цепи ХР7 ($-U_\phi$), а измерительный к ХР6 ($+U_\phi$)). Настроить ждущий (или однократный) режим с синхронизацией по напряжению U_ϕ . Снять и записать осциллограммы (подав напряжение включением тумблера S1).

6. Включить тумблер S1 (верхнее положение).

7. Выключением тумблера S1 отключить постоянное напряжение, снять кривые U_ϕ , $U_{дх}$.

Примерный вид ожидаемых осциллограмм приведен на рис. 1.4.

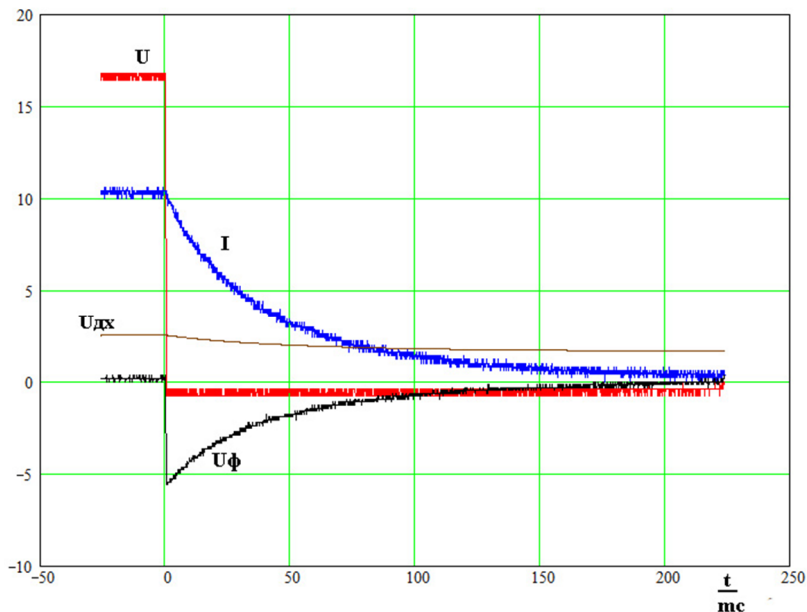


Рис. 1.4. Примерный вид осциллограмм при отключении напряжения (размерность по осям U , I , $U_{дх}$, U_ϕ соответственно в В, мА, В, мВ)

2. Алгоритмы математической обработки экспериментальных результатов

2.1. Первичная обработка снятых осциллограмм

Обработка снятых осциллограмм включает (при необходимости):

1. Корректировку уровня нуля.
2. Фильтрацию помех.
3. Преобразование к интересующим величинам (домножение на масштабные коэффициенты).

Для обработки осциллограмм, имеющих в цифровом виде, рекомендуется воспользоваться программным пакетом MathCAD. При оформлении осциллограмм в отчете необходимо не забыть обозначить изображенные кривые и масштабы по осям. Пример обработанных и оформленных осциллограмм приведен на рис. 1.5.

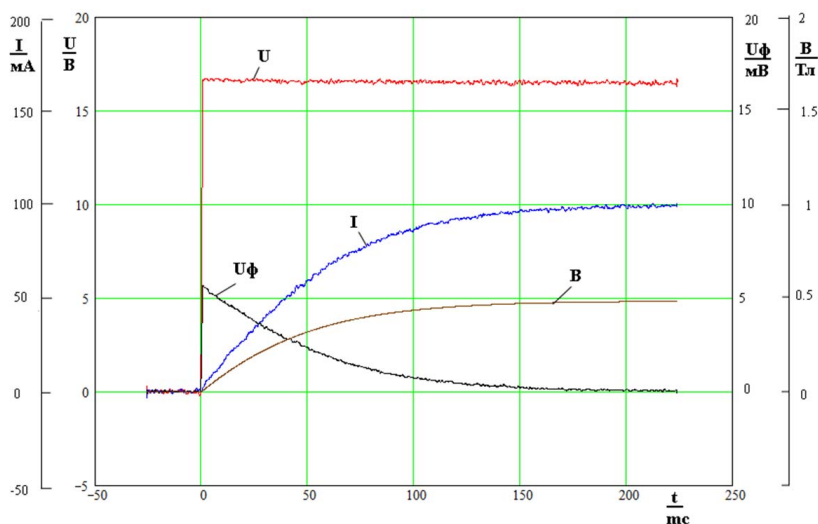


Рис. 1.5. Результат первичной обработки осциллограмм

Корректировка уровня нуля

Во многих случаях бывают заранее известны значения величин в определенные моменты времени. Например, до подачи напряжения на обмотку (отрицательные времена на рис. 1.3) ток по ней не протекает, то есть $I = 0$. Однако осциллограф (в силу погрешно-

стей измерения) фиксирует малое ненулевое значение тока. В ряде случаев такое (даже небольшое) значение тока может внести значительную погрешность в результаты при дальнейшей обработке осциллограмм. Поэтому необходимо скорректировать уровень нуля, «опустив» всю осциллограмму вниз на величину начального смещения, зафиксированного осциллографом. Для этого можно вычесть из ординат (игреков) всех точек величину начального смещения. Для случая, показанного на рис. 1.3, эта величина может быть получена усреднением значений первых 50 точек, заснятых осциллографом.

Необходимо разобраться в начальных значениях снимаемых сигналов и откорректировать те из них, которые не соответствуют действительности (пример результата см. на рис. 1.5).

Фильтрация помех

На экспериментальных осциллограммах (см. рис. 1.3, 1.4) могут быть видны помехи (сигнал шершавый). В этом случае необходимо сгладить их, обработав сигналы численными методами (пример результата см. на рис. 1.5).

Домножение на масштабирующие коэффициенты

Снятые осциллограммы представляют собой временные зависимости напряжений, снятых с элементов схемы. Если интересующим нас параметром является не напряжение, а, например, ток, то его пропускают через шунт $R_{\text{ш}}$ (или датчик тока), фиксируя напряжение $U_{R_{\text{ш}}}$ на нем. В этом случае ток должен быть высчитан по формуле

$$I = U_{R_{\text{ш}}} / R_{\text{ш}}. \quad (1.1)$$

То есть для получения величины тока необходимо помножить снятую осциллограмму напряжения шунта на масштабирующий коэффициент:

$$KI = 1/R_{\text{ш}}. \quad (1.2)$$

Для пересчета напряжения $U_{\text{дх}}$, снятого с датчика Холла, в индукцию $B_{\text{дх}}$ необходимо самостоятельно разобраться с пересчетом, воспользовавшись документацией на датчик.

Пример результата см. на рис. 1.5.

Напряжение U_ϕ потокоизмерительной обмотки нужно для определения так называемого виткового напряжения, приходящегося на один виток этой обмотки:

$$U_v = U_\phi / w_\phi, \quad (1.3)$$

где $w_\phi = 5$ — число витков потокоизмерительной обмотки.

2.2. Пересчет осциллограмм для получения временных зависимостей, не снимаемых непосредственно

Витковое напряжение U_v потокоизмерительной обмотки равно скорости изменения потока, протекающего через нее (то есть по центральному полюсу):

$$U_v = d\Phi/dt. \quad (1.4)$$

До начала протекания тока I по обмотке электромагнита магнитный поток практически равен нулю. Из (1.3) и (1.4) выразим значение магнитного потока Φ :

$$\Phi(t) = \frac{1}{w_\phi} \int_0^t U_\phi(t) dt. \quad (1.5)$$

Таким образом, для получения кривой потока необходимо проинтегрировать кривую U_ϕ . Интегрирование необходимо реализовать численными методами.

Вначале определить амплитуды потоков.

Теперь, разделив поток на площадь сечения центрального полюса, получим кривую индукции $B(t)$ в нем (результат — нижняя возрастающая кривая на рис. 1.5).

$$B(t) = \Phi(t)/S, \quad (1.6)$$

где S — площадь сечения центрального полюса.

Кривую $B(t)$ отобразить на рисунке с результатами первичной обработки осциллограмм. В случае правильности произведенных расчетов полученная кривая $B(t)$ должна совпасть с кривой индукции $B_{дх}$, полученной с помощью датчика Холла. Из-за неидеальности постановки эксперимента отличие между кривыми может достигать $\pm 20\%$.

Определить максимальное значение индукции B_m .

2.3. Расчет параметров магнитной системы

Расчет числа витков обмотки электромагнита

Число витков обмотки w заранее неизвестно, и посчитать их механически не представляется возможным. Поэтому определим число витков по результатам экспериментов.

Напряжение на индуктивной составляющей равно скорости изменения потока и может рассчитываться по формулам.

Напряжение на обмотке:

$$U = R \cdot I + U_L, \quad (1.7)$$

где R — активное сопротивление цепи обмотки (произведение значений сопротивления и тока соответствует падению напряжения на активной составляющей сопротивления обмотки); $U_L = L dI / dt = d\Psi / dt = w \cdot d\Phi / dt$ — падение напряжения на индуктивности обмотки; w — число витков.

В момент подачи напряжения на обмотку ток по ней еще не протекает ($I = 0$). Тогда получим:

$$U = w \cdot d\Phi / dt.$$

Выразим скорость изменения потока:

$$d\Phi / dt = U / w. \quad (1.8)$$

Напомним, что величину $U_B = U / w$ называют витковым напряжением. Магнитный поток, протекающий через обмотку электромагнита, одновременно является потоком, протекающим через потокоизмерительную обмотку, поэтому их витковые напряжения равны. Объединив (1.3), (1.4) и (1.8), получим

$$\frac{U}{w} = \frac{U_\Phi}{w_\Phi}.$$

Отсюда выразим число витков:

$$w = U / U_B = U \cdot w_\Phi / U_\Phi, \quad (1.9)$$

где U и U_Φ — значения напряжений на обмотке электромагнита и на его потокоизмерительной обмотке в момент подачи напряжения. То есть это их амплитудные значения (определяются по обработанным осциллограммам, аналогичным рис. 1.5). Должно получиться около 3020 витков.

Определение активного сопротивления обмотки электромагнита

В установившемся режиме (когда ток возрос до своего максимального значения и больше не увеличивается) все напряжение U падает на активном сопротивлении:

$$U = R \cdot I_m, \quad (1.10)$$

где I_m — амплитуда тока, установившегося на обмотке; $R = R_o + R_d$ — сумма сопротивлений обмотки R_o и добавочных сопротивлений R_d , стоящих последовательно с ней.

Величина R_d складывается из сопротивления шунта $R_{ш}$ и добавочных сопротивлений R_1 и R_2 , подключенных или не подключенных в зависимости от положения переключателя S2 (см. табл. 1.1). Студенты каждой из бригад должны самостоятельно определить величину R_d .

Необходимо рассчитать:

$$R = U/I_m. \quad (1.11)$$

Далее найти собственное сопротивление обмотки.

$$R_o = R - R_d. \quad (1.12)$$

Расчет энергии, запасенной в магнитном поле по кривым напряжения и тока

Энергия, поступающая в систему магнита, частично тратится на потери на активном сопротивлении R , а частично запасается в магнитном поле. Напряжение U равно сумме падения напряжения на активной составляющей $I \cdot R$ и на индуктивной составляющей U_L :

$$U = I \cdot R + U_L. \quad (1.13)$$

Отсюда:

$$U_L = U - I \cdot R. \quad (1.14)$$

Домножая величину U_L на ток, получим мощность, уходящую в магнитное поле. Проинтегрировав ее, получим энергию, запасенную в магнитном поле:

$$W = \int_0^{tk} (U - I(t) \cdot R) \cdot I(t) dt, \quad (1.15)$$

где tk — время нарастания тока до установившегося значения.

Расчет эквивалентной индуктивности

Тремя способами рассчитать и сравнить между собой эквивалентные индуктивности:

- 1) по энергии поля, рассчитанной по кривым напряжения и тока;
- 2) по магнитному потоку;
- 3) по постоянной времени.

По энергии поля, рассчитанной по кривым напряжения и тока

Из известной формулы

$$W = L \cdot I^2 / 2 \quad (1.16)$$

выразим индуктивность L :

$$L = 2 \cdot W / I_m^2, \quad (1.17)$$

где W — энергия магнитного поля, определенная в предыдущем пункте; I_m — установившееся значение тока.

По магнитному потоку

Согласно другому определению, индуктивность L — это коэффициент пропорциональности между током I и потокоцеплением Ψ :

$$\Psi = L \cdot I. \quad (1.18)$$

Выразив потокоцепление через поток $\Psi = w \cdot \Phi$, получим:

$$L = \Psi / I = w \cdot \Phi_m / I_m, \quad (1.19)$$

где w — число витков обмотки электромагнита; Φ_m, I_m — амплитудные значения тока и потока; Ψ — потокоцепление электромагнита, находится по формуле

$$\Psi = \Phi \cdot w. \quad (1.20)$$

По постоянной времени

Исходя из соотношения для постоянной времени нарастания тока

$$\tau = L / R, \quad (1.21)$$

выразим

$$L = \tau \cdot R, \quad (1.22)$$

где R — сопротивление цепи электромагнита.

2.4. Построение энергетических диаграмм

По результатам экспериментов построить энергетические диаграммы при различных зазорах. Энергетические диаграммы — это зависимость потокоцепления Ψ от тока I . Величина потокоцепления находится по формуле (1.20). Примерный вид диаграмм приведен на рис. 1.6.

Построить семейство зависимостей индукции B от тока I . Величина индукции B пропорциональна потоку Φ и только что рассчитанному потокоцеплению Ψ , то есть кривые $B(I)$ будут отличаться от $\Psi(I)$ только масштабом по вертикальной оси. Формулу для расчета индукции B студентам необходимо найти самостоятельно, внимательно прочитав данные методические указания. Кривые $B(I)$ необходимо изобразить на одном графике с аналогичными кривыми, рассчитываемыми в п. 3.

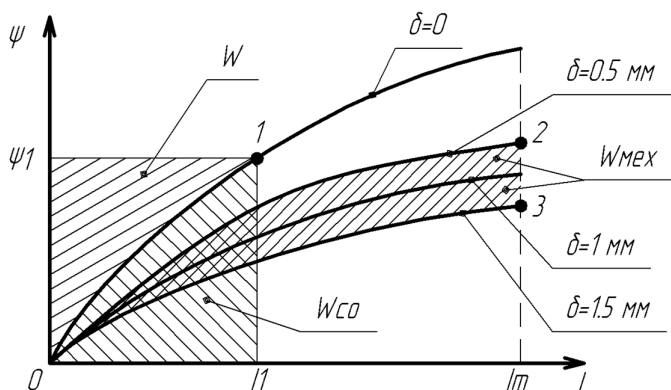


Рис. 1.6. Энергетические диаграммы (зависимость $\Psi(I)$)

По энергетическим диаграммам возможно анализировать энергетические процессы в магнитных системах. Заштрихованная площадь слева от кривой $\Psi(I)$ соответствует магнитной энергии W , запасенной в системе.

$$W = \int_0^{\Psi_1} I(\Psi) d\Psi. \quad (1.23)$$

Площадь, заштрихованная под графиком Ψ , называется ко-энергией W_{co} . Ее можно рассчитать либо через энергию магнитного поля, либо непосредственно интегрированием.

$$W_{co} = \int_0^{I_1} \Psi(I) dI = I_1 \cdot \Psi_1 - W. \quad (1.24)$$

Механическая сила, развиваемая электромагнитом, может быть рассчитана:

$$P = \left. \frac{dW}{d\delta} \right|_{\Psi=\text{const}} = \left. \frac{dW_{co}}{d\delta} \right|_{i=\text{const}}.$$

Рассчитаем силу при максимальном токе I_m на зазоре 1 мм.

$$P = \frac{W_{co\delta=0,5} - W_{co\delta=1,5}}{(1,5 - 0,5) \cdot 10^{-3}}, \quad (1.25)$$

где $W_{co\delta=0,5}$ и $W_{co\delta=1,5}$ — ко-энергии поля при одинаковом максимальном токе I_m для зазоров 0,5 и 1,5 мм. Если при экспериментах величины максимальных токов I_m немного отличались друг от друга для зазоров 0,5 и 1,5 мм, то необходимо брать меньшее из значений.

Числитель формулы (1.25) соответствует заштрихованной площади $W_{\text{мех}}$ (рис. 1.6). Энергия $W_{\text{мех}}$ равна механической работе, которую совершит электромагнит при сближении его магнитопроводов от $\delta = 1,5$ до 0,5 мм.

3. Алгоритм расчета магнитной системы по упрощенным формулам в MathCAD

Пользуясь формулами расчета магнитных систем, рассматриваемыми на лекционных или практических занятиях, осуществить расчет магнитной системы.

В качестве исходных данных для этого и следующего пунктов необходимо использовать следующие значения, замеренные и определенные экспериментально:

1) геометрические размеры магнитопровода, знание о том, являются ли боковые планки магнитопровода ферромагнитными. В случае, если они являются ферромагнитными, их толщину необходимо прибавить к толщине магнитопровода (при математических расчетах и моделировании);

2) число витков w , ток I_m .

Падением намагничивающей силы на магнитопроводах допускается пренебречь, то есть считать $\mu = \infty$, что даст значительное упрощение формул.

В результате расчетов определить величины:

- 1) магнитную проводимость G ;
- 2) намагничивающую силу F ;
- 3) магнитный поток Φ_m ;
- 4) индукцию в центральном полюсе B и в боковых полюсах $B_{\text{бок}}$;
- 5) электромагнитную силу P при токе I_m и зазоре $\delta = 1$ мм;
- 6) индуктивность L ;
- 7) энергию, запасаемую в системе W .

4. Алгоритм моделирования в программном пакете Elcut

Промоделировать исследуемую конструкцию в программном пакете Elcut. Подробные инструкции приведены в учебно-методическом пособии по практике. В результате расчетов определить величины:

1. Магнитный поток Φ .
2. Индукции в центральном полюсе B и в боковом полюсе $B_{\text{бок}}$.
3. Электромагнитную силу P при токе I_m и зазоре $\delta = 0; 0,5; 1; 1,5$ мм, построить график $P(\delta)$.
4. Индуктивность L .
5. Энергию, запасаемую в системе W .
6. Построить семейство графиков зависимости индукции B в центральном полюсе от тока I при различных величинах зазора δ . Кривые $B(I)$ необходимо изобразить на одном графике с аналогичными кривыми, рассчитываемыми в п. 2.4.

Содержание и форма отчета

Оформить результаты по описанным выше алгоритмам. Сравнить результаты, полученные разными способами. По результатам сравнения сделать выводы и оформить их отдельным разделом, в виде заключения. Ниже приведен перечень результатов, которые должны присутствовать в отчете.

Перечень рисунков

1. Электрическая схема стенда.
2. Чертеж магнитопровода с размерами.
3. Снятые зависимости U , I , U_{ϕ} , $U_{\text{дх}}$ при зазоре $\delta = 0$ для опыта подачи постоянного напряжения. Допускается вставка непосредственно картинки с осциллографа (см. рис. 1.3).
4. Снятые зависимости U , I , U_{ϕ} , $U_{\text{дх}}$ при зазоре $\delta = 0$ для опыта отключения постоянного напряжения. Допускается вставка непосредственно картинки с осциллографа (см. рис. 1.4).
5. Обработанные осциллограммы U , I , U_{ϕ} , B , $B_{\text{дх}}$ при зазоре $\delta = 0$ для опыта подачи постоянного напряжения.
6. Семейство кривых $B(I)$, рассчитанных согласно п. 2.4 и математическим моделированием п. 4 для зазоров $\delta = 0$; 0,5; 1; 1,5 мм (итого – 8 кривых на одном рисунке).
7. Энергетические диаграммы $\Psi(I)$ п. 2.4.
8. График $P(\delta)$ электромагнитной силы P при токе I_m и зазорах $\delta = 0$; 0,5; 1; 1,5 мм построить по расчетам Elcut.

Перечень рассчитываемых величин

Для удобства сравнения все рассчитываемые величины свести в табл. 1.2. В ячейках таблицы, которые не нужно заполнять, поставить прочерки.

Таблица 1.2

Рассчитываемые величины

Величина	Способ расчета Номер пункта (формулы)	Зазор δ , мм			
		0,0	0,5	1,0	1,5
Число витков обмотки w	(1.9)		—	—	—
Активное сопротивление R	(1.11)		—	—	—
Собственное сопротивление обмотки R_o	(1.12)		—	—	—
Амплитуда тока I_m , мА	По осциллограммам тока I				

Окончание табл. 1.2

Величина	Способ расчета Номер пункта (формулы)	Зазор δ , мм			
		0,0	0,5	1,0	1,5
Амплитуда магнитного потока Φ_m	По кривой (1.5)				
	MathCAD, п. 3				
	Elcut, п. 4				
Амплитуда индукции (в центральном полюсе) B , мТл	По диаграмме B , пересчитанной с U_ϕ (1.6)				
	По сигналу с датчика Холла ($B_{дх}$) п. 2.1				
	MathCAD, п. 3				
	Elcut, п. 4				
Амплитуда индукции в боковых полюсах $B_{бок}$, мТл	MathCAD, п. 3				
	Elcut, п. 4				
Амплитуда энергии, запасённой в магнитном поле W , Дж	(1.15)				
	По энергетическим диаграммам (1.23)		—	—	—
	MathCAD, п. 3				
	Elcut, п. 4				
Индуктивность L , мГн	(1.17)				
	(1.19)				
	(1.22)		—	—	—
	MathCAD, п. 3				
	Elcut, п. 4		—	—	—
Амплитуда силы P , Н	(1.25)	—	—		—
	Elcut, п. 4				

Заключение и выводы

В выводе по лабораторной работе происходит обобщение полученных результатов, говорится о зависимостях и закономерностях, выявленных в ходе работы. Делаются выводы по сравнению результатов, полученных различными способами, между собой и с теоретическими предпосылками.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое эффект Холла и как он применяется в технике?
2. Какими способами можно измерить магнитный поток в сердечнике?
3. Опишите математически, как измерить магнитный поток с помощью потокоизмерительной обмотки.
4. Изобразите в виде кривых напряжение и ток на обмотке магнита, магнитный поток в сердечнике магнита при включении питания. Почему магнитный поток имеет такую форму?
5. Изобразите в виде кривых напряжение и ток на обмотке магнита, магнитный поток в сердечнике магнита при выключении питания. Почему магнитный поток имеет такую форму?
6. Как получить временные зависимости напряжения и тока на обмотке магнитного потока?
7. Как рассчитать магнитную энергию поля магнита?
8. Приведите соотношение для определения индуктивности магнита по энергии поля и поясните процесс расчета.
9. Приведите соотношение для определения индуктивности магнита по магнитному потоку поля и поясните процесс расчета.
10. Приведите соотношение для определения индуктивности магнита по постоянной времени изменения тока обмотки и поясните процесс расчета.

Лабораторная работа 2

Исследование бесконтактного индукционного датчика приближения (концевого выключателя)

Цель работы — достижение знания и понимания устройства и принципа действия бесконтактного индукционного датчика приближения, а также определение зоны срабатывания и отпускания в зависимости от расстояния от датчика до металлической пластины при различной ее толщине и различных типах металла.

Используемые оборудование и материалы

1. Набор металлических пластин.
2. Стенд с датчиком приближения.

Задачи работы

1. Теоретически изучить работу бесконтактного индукционного датчика приближения.
2. Провести измерения характеристик бесконтактного индукционного датчика приближения и сделать выводы.

План проведения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями об устройстве и принципе действия бесконтактного индукционного датчика приближения, схемой лабораторной установки, назначением ее измерительных приспособлений и правилами их использования.
2. Снять экспериментальные зависимости расстояния срабатывания бесконтактного индукционного датчика приближения от различных типов металла, из которых изготовлены пластины.
3. Провести обработку экспериментальных результатов и на основании полученных данных построить графики зависимости расстояния срабатывания от различного типа металла и его толщины.

Краткие теоретические сведения

1. Устройства и принцип действия бесконтактных индукционных датчиков

Индуктивные бесконтактные выключатели (индуктивные датчики) являются самыми распространенными устройствами в составе низового оборудования систем управления автоматизированным производством. Индуктивные датчики находят широкое применение в машиностроении, пищевой, текстильной и других отраслях. Они наиболее эффективно используются в качестве конечных выключателей в автоматических линиях и станках, так как индуктивные датчики срабатывают только на металлы и не чувствительны к остальным материалам. Это увеличивает защищенность индуктивных датчиков от помех. Например, введение в зону чувствительности выключателя рук оператора, эмульсии, воды, смазки и т. д. не приведет к ложному срабатыванию. Объектом воздействия для индуктивных выключателей (датчиков) являются металлические детали: зубья шестерен, кулачки, ползуны; часто это металлическая пластина, прикрепленная к соответствующей детали оборудования. Согласно статистике, 90 % дискретных датчиков положения — индуктивные датчики. Это объясняется высокими эксплуатационными характеристиками, надежностью и низкой стоимостью индуктивных датчиков по сравнению с другими типами датчиков. Устройство индуктивных датчиков показано на рис. 2.1.

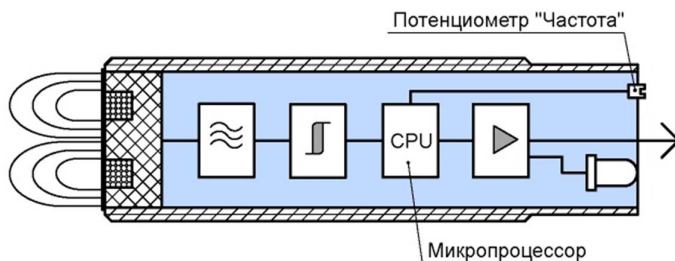


Рис. 2.1. Устройство индуктивного бесконтактного концевого выключателя

Индуктивный датчик (бесконтактный концевой выключатель) функционирует следующим образом:

1. Генератор создает электромагнитное поле взаимодействия с объектом.

2. Триггер обеспечивает гистерезис при переключении и необходимую длительность фронтов сигнала управления.

3. Усилитель увеличивает амплитуду сигнала до необходимого значения.

4. Светодиодный индикатор показывает состояние выключателя, обеспечивает контроль работоспособности, оперативность настройки.

5. Компаунд обеспечивает необходимую степень защиты от проникновения твердых частиц и воды.

6. Корпус обеспечивает монтаж выключателя, защищает от механических воздействий. Выполняется из латуни или полиамида, комплектуется метизными изделиями.

При подаче напряжения питания перед активной поверхностью индуктивного выключателя образуется переменное магнитное поле частотой около 100–200 кГц, создаваемое катушкой индуктивности генератора. При попадании объекта воздействия в зону чувствительности выключателя снижаются добротность колебательного контура и амплитуда колебаний, что вызывает срабатывание триггера и изменение состояния выхода выключателя.

Номинальное расстояние воздействия (S_n) и гарантированный интервал воздействия (S_a), указанные в технических характеристиках выключателей, относятся к стандартному объекту воздействия. Это квадратная пластина из стали Ст 40 толщиной 1 мм, сторона квадрата равна большему из значений: диаметру активной поверхности выключателя или значению $3S_n$. Соотношение для определения реального расстояния воздействия (S_r): $0,9S_n < S_r < 1,1S_n$ — справедливо для стандартного объекта воздействия. Если объект воздействия имеет размеры меньше стандартного, то расстояния воздействия S_n , S_r , S_a следует умножить на поправочный коэффициент К (рис. 2.2). Поправочные коэффициенты К вводят также, если объект воздействия выполнен не из стали, а из других металлов и сплавов (табл. 2.1).

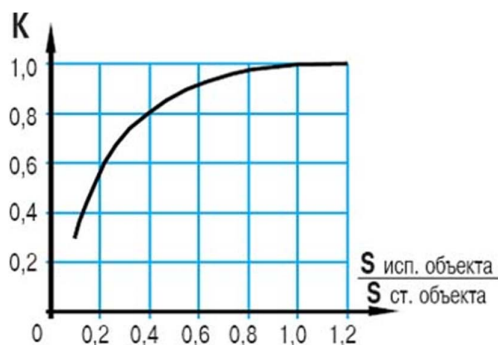


Рис. 2.2. График зависимости K от площади объекта воздействия:
 S исп. объекта — площадь используемого объекта воздействия;
 S ст. объекта — площадь стандартного объекта воздействия

Таблица 2.1

Поправочные коэффициенты K

Тип металла	Поправочный коэффициент K
Сталь 40	1,0
Медь	0,25...0,45
Латунь	0,35...0,50
Нержавеющая сталь	0,60...1,00
Никель	0,65...0,75
Алюминий	0,35...0,45
Чугун	0,93...1,05

Разновидности и основные определения бесконтактных датчиков

Бесконтактный выключатель — позиционный выключатель, осуществляющий коммутационную операцию при определенном взаимном положении объекта воздействия и чувствительного элемента выключателя без механического контакта выключателя с объектом воздействия. Бесконтактные выключатели бывают следующих типов:

1. Индуктивный бесконтактный выключатель — бесконтактный выключатель, создающий электромагнитное поле в зоне чувствительности и имеющий полупроводниковый коммутирующий элемент.

2. Оптический бесконтактный выключатель — бесконтактный выключатель, обнаруживающий объекты, прерывающие или отражающие видимое или невидимое оптическое излучение, и имеющий полупроводниковый коммутирующий элемент.

3. Емкостный бесконтактный выключатель — бесконтактный выключатель, создающий электрическое поле в зоне чувствительности и имеющий полупроводниковый коммутирующий элемент.

4. Магниточувствительный бесконтактный выключатель — бесконтактный выключатель, обнаруживающий изменение напряженности постоянного магнитного поля, имеющий полупроводниковый коммутирующий элемент и не содержащий подвижных частей в чувствительном элементе.

Все бесконтактные датчики имеют активную поверхность. Индуктивные или емкостные бесконтактные датчики создают поле, взаимодействующее с объектом вокруг активной поверхности (рис. 2.3). Магниточувствительные бесконтактные датчики в отличие от индуктивных и емкостных датчиков не создают поля вокруг активной поверхности, а воспринимают изменение напряженности внешнего постоянного магнитного поля.

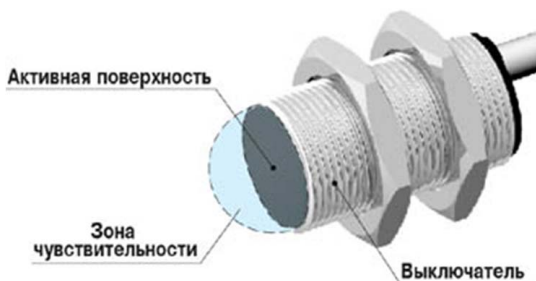


Рис. 2.3. Зона чувствительности и активная поверхность бесконтактного датчика

Зоной чувствительности называют область свободного пространства перед активной поверхностью бесконтактного выключателя, где имеется максимальная напряженность электромагнитного или электрического полей. При попадании объекта в зону чувствительности происходит изменение коммутационного состояния выключателя.

Расстояние срабатывания (S) – расстояние, при котором объект воздействия, приближаясь к активной поверхности бесконтактного выключателя, изменяет коммутационное состояние (выходной сигнал) выключателя (рис. 2.4).

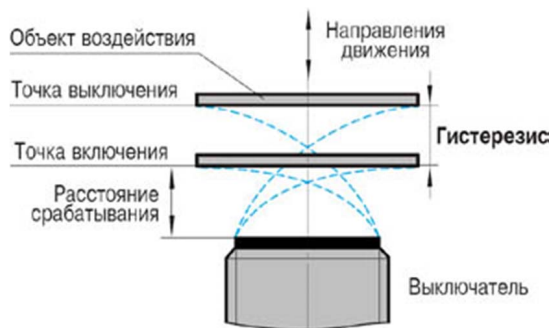


Рис. 2.4. Гистерезис бесконтактного датчика

Реальное расстояние срабатывания (S_r) – расстояние срабатывания конкретного бесконтактного выключателя, измеренное при номинальном напряжении питания и температуре окружающей среды (23 ± 5) градусов Цельсия. Для индуктивных и емкостных выключателей должно быть в пределах: $0,9S_n < S_r < 1,1S_n$.

Используемое расстояние срабатывания (S_u) – расстояние срабатывания конкретного бесконтактного выключателя, измеренное во всех рабочих диапазонах напряжений питания и температур окружающей среды. Для индуктивных и емкостных выключателей должно быть в пределах: $0,9S_r < S_u < 1,1S_r$.

Гарантированный интервал срабатывания (S_a) – интервал, начинающийся от активной поверхности, внутри которого гарантируется надежная работа бесконтактного выключателя в условиях эксплуатации, указанных изготовителем. Должен быть в пределах: для индуктивных выключателей – $0 < S_a < 0,81S_n$, для емкостных выключателей – $0 < S_a < 0,72S_n$.

Гистерезис (Н) – разность расстояний между точкой включения при приближении объекта воздействия к активной поверхности и точкой выключения при удалении от активной поверхности. Значение гистерезиса указывается в процентах от значения реального расстояния срабатывания (S_r).

Максимальная частота срабатывания (f) — максимальная возможная частота перехода выключателя из неактивированного состояния в активированное и наоборот, при которой выходной каскад бесконтактного выключателя еще выдает определенную последовательность сигналов, соответствующую воздействию.

Методические рекомендации

Предупреждение. Данный лабораторный стенд питается от сети переменного тока 220 вольт. Во избежание получения травм и вреда здоровью пользователя и находящихся рядом людей ЗАПРЕЩАЕТСЯ производить со стендом любые манипуляции, кроме тех, что описаны в данном документе.

Стенд, схематически изображенный на рис. 2.5, состоит из следующих основных элементов: корпус, на котором закреплен датчик с механическим приспособлением. Механическое приспособление позволяет фиксировать металлическую пластину и перемещать ее в двух координатах (x и y). Координаты нанесены на корпус устройства.

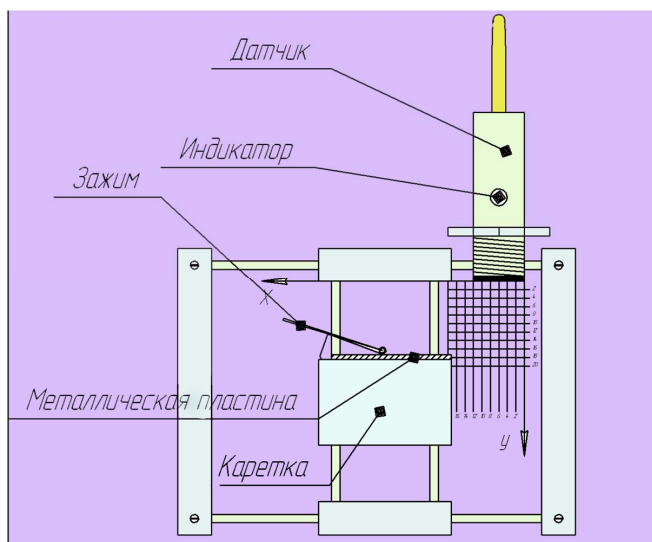


Рис. 2.5. Лабораторный стенд

Для снятия зависимости срабатывания датчика от той или иной пластины необходимо зафиксировать пластину при помощи зажима на каретке так, как это показано на рис. 2.5. Надавив пальцем руки на рычаг зажима, добиться обжатия скобы на расстояние, достаточное для свободного помещения пластины между скобой и кареткой. Затем, придерживая пластину, отпустить рычаг для прижатия пластины. При смене пластины повторить описанные выше действия.

Перемещая каретку рукой по направлениям, указанным на корпусе, установить ее в нужное положение. Измеряемое значение по осям x и y фиксировать, используя края пластины.

Не допускать воздействия на датчик постоянных и переменных магнитных полей. Не применять к элементам стенда чрезмерных физических усилий. В случае невозможности выполнения какого-либо действия со стендом обратиться к преподавателю за разъяснениями.

Алгоритм проведения опытов

Закрепить в фиксаторе одну металлическую пластину, приблизить каретку вплотную к датчику так, чтобы вся площадь активной поверхности датчика перекрывалась пластиной. При этом световой индикатор датчика начнет светиться (что соответствует сработавшему состоянию датчика). Плавным движением отодвигать каретку влево по оси x до тех пор, пока не погаснет индикатор. Занести в табл. 2.2 координаты гашения индикатора. При этом координатой x является координата правого торца пластины, а координатой y — расстояние между пластиной и торцом датчика. Затем плавно двигать каретку обратно (вправо) по оси x до тех пор, пока индикатор вновь не зажжется. Записать результат x .

Далее вернуть каретку в начальное (нулевое) состояние по оси x и, увеличивая с каждым разом расстояние на один миллиметр по оси y , повторять снятие моментов гашения и зажигания индикатора. Действия повторять до момента, когда световой индикатор не перестанет загораться даже при нулевом положении x (зона нечувствительности).

Повторить описанное выше снятие характеристики для остальных пластин. Результаты занести в табл. 2.2. Для каждой из пластин

необходимо замерять ее толщину d (штангенциркулем) и определять, является ли пластина ферромагнитной.

Таблица 2.2

Координаты x (мм) включения (срабатывания) и выключения датчика при различных координатах y , типах и толщинах металла

y , мм	*		*		*		*		*	
	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Вкл.	Выкл.	Вкл.
0										
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										

* В эти ячейки необходимо вписать типы использованных пластин. Например: «Ферромагнитная $d = 0,7$ мм» или «Алюминий, не ферромагнитная $d = 1$ мм».

По данным табл. 2.2 построить графики зависимости координат включения и отключения x от значения по оси x . На графиках определить гистерезис датчика (расстояния между моментом срабатывания датчика при приближении пластины и моментом отключения при отдалении пластины).

Содержание и форма отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать наименование, цель и программу работы, описание хода работы с включением по его тексту:

- таблиц с экспериментальными данными и графиков экспериментально снятых значений, указанных в программе работы;

- результатов обработки экспериментальных данных, оформленных в виде отдельных вычислений;
- анализа полученных результатов с выводами, оформленного в виде заключения.

Заключение и выводы

В выводе по лабораторной работе происходит обобщение полученных результатов, говорится о зависимостях и закономерностях, выявленных в ходе работы. Делаются выводы по сравнению результатов, полученных различными способами, между собой и с теоретическими предпосылками.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем заключается цель данной работы, и какова программа исследований, которую нужно выполнить в ней?
2. Какими основными преимуществами обладают бесконтактные индуктивные выключатели по сравнению с другими типами выключателей?
3. Объяснить устройство индуктивного датчика и назначение его основных компонентов.
4. Каких типов бывают бесконтактные выключатели?
5. Что называется активной поверхностью и зоной чувствительности?
6. Что такое поправочный коэффициент K , и для чего он нужен?
7. Что называется расстоянием срабатывания?
8. Что называется гистерезисом (H)?
9. Что называется максимальной частотой срабатывания датчика?
10. Для чего нужен генератор в устройстве индуктивного датчика?
11. Для чего нужен триггер в устройстве индуктивного датчика?
12. Для чего нужен усилитель в устройстве индуктивного датчика?
13. Какую нагрузку можно подключать к выходу датчика?
14. Что может являться объектом воздействия для индуктивных выключателей (датчиков)?
15. Могут ли объектом воздействия являться неметаллы и почему?

Лабораторная работа 3

Исследование магнитного поля соленоида

Цели работы: изучение особенностей распространения магнитных полей соленоида, определение зависимости индукции магнитного поля в соленоиде от величины тока катушки, определение закономерности изменения индукции магнитного поля по длине соленоида и за его пределами.

Используемые оборудование и материалы

1. Лабораторный стенд с встроенным датчиком Холла.
2. Соленоид (катушка).

Задачи работы:

1. Изучить способы измерения напряженностей и индукций магнитных полей.
2. Научиться пользоваться стрелочными приборами для измерения тока и напряжения.
3. Получить навыки проведения измерений при изменяющихся от времени и температуры параметров измерительного усилителя.
4. Сравнить полученные результаты с теоретическими представлениями.

План проведения работы

1. Изучить стенд для проведения исследований магнитных цепей.
2. Измерить зависимость изменения величины индукции магнитного поля внутри соленоида от величины тока катушки для 2–3 положений датчика Холла внутри катушки.
3. Измерить зависимости индукции магнитного поля от положения датчика Холла на оси катушки (установить форму магнитного поля в соленоиде) для 2–3 значений тока соленоида.
4. Построить графики результатов измерений, оформить отчет о проведении лабораторной работы.

Краткие теоретические сведения

Соленоидом называется проводник, намотанный плотно, виток к витку, на длинный цилиндрический каркас. Внутри бесконечно длинного соленоида магнитное поле однородно, то есть вектор B во всех точках одинаков (при постоянном токе через обмотку), а вне такого соленоида магнитное поле ничтожно мало.

В соленоиде конечной длины (рис. 3.1) магнитная индукция B постоянна лишь в центральной его части и уменьшается по мере удаления от центра соленоида к его торцам. Протяженность зоны однородного магнитного поля в соленоиде конечной длины зависит от отношения длины к диаметру соленоида.



Рис. 3.1. Соленоид конечной длины

Магнитное поле внутри соленоида можно представить как сумму магнитных полей, создаваемых каждым витком. Вектор индукции магнитного поля внутри соленоида перпендикулярен плоскости витков, то есть направлен по оси соленоида и образует с направлением кольцевых токов витков правовинтовую систему. Примерная картина силовых линий магнитного поля соленоида показана на рис. 3.2. Силовые линии магнитного поля замкнуты.

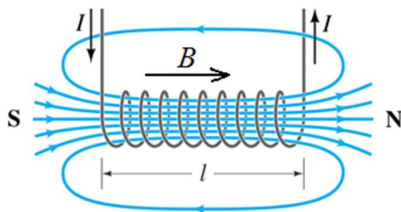


Рис. 3.2. Индукция магнитного поля в соленоиде конечной длины

Магнитную индукцию в длинном соленоиде можно упрощенно вычислить по формуле

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot I \cdot \frac{N}{l},$$

где μ — магнитная проницаемость среды (для воздуха $\mu = 1$); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная; I — ток соленоида; N — число витков соленоида; l — длина соленоида.

Из соображений симметрии следует, что линии вектора магнитной индукции в соленоиде параллельны его оси, а направление их связано с направлением тока в витках правилом правой руки: если обхватить соленоид ладонью правой руки, направив четыре пальца по направлению тока в витках, то отставленный большой палец покажет направление линий магнитного поля внутри соленоида.

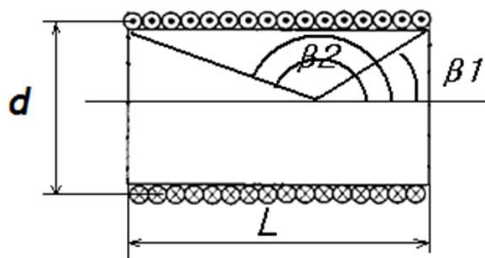


Рис. 3.3. Соленоид конечной длины (схематическое изображение)

Магнитная индукция B в разных точках на оси соленоида конечной длины определяется формулой

$$B = \mu \mu_0 \frac{N_1 I_1}{2L} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; μ — относительная магнитная проницаемость среды, заполняющей соленоид (для воздуха $\mu \approx 1$); I_1 — сила тока в соленоиде; N_1 — число витков соленоида; L — длина соленоида; β_1 и β_2 — углы между осью соленоида и радиус-векторами, проведенными из рассматриваемой точки на оси соленоида к его концам (рис. 3.3).

Для точки, выбранной в центре соленоида:

$$B = \frac{\mu_0 N_1 I_1}{\sqrt{d^2 + L^2}}.$$

Магнитную индукцию поля на оси соленоида можно определить экспериментально.

В работе изучается зависимость магнитной индукции в центре соленоида от силы тока в его витках, а также зависимость магнитной индукции на оси соленоида от расстояния до его центра.

Алгоритм проведения опытов

Проведение лабораторных работ производится на стенде «Соленоид», показанном на рис. 3.4.



Рис. 3.4. Общий вид стенда «Соленоид»

Работа включает два задания, первым из которых является определение индукции магнитного поля в соленоиде в зависимости от силы тока в его обмотке, а вторым — изучение распределения индукции при постоянном токе в обмотке как функции расстояния от центра соленоида к его краю.

1. Включите питание тумблером «Сеть», при этом должен загореться индикатор «Вкл» (рис. 3.5).
2. Дайте прибору прогреться в течение 3–5 минут.
3. Выведите датчик Холла в крайнее левое положение, для чего поверните тумблер в положение «Вправо» и нажмите кнопку «Ход».

Датчик Холла, размещенный внутри соленоида, переместится в крайнее левое положение. Остановка подвижной каретки будет произведена автоматически.

4. Установите минимальную силу тока в соленоиде, для чего регулятор «Ток соленоида» поверните в крайнее положение против часовой стрелки.



Рис. 3.5. Передняя панель стенда

5. Ручкой «Установка нуля» на панели индикации (рис. 3.6) по шкале правого прибора установите стрелку в положение «0».



Рис. 3.6. Панель индикации

6. Переместите указатель положения датчика в крайнее правое положение, в центр соленоида. Для этого тумблер (рис. 3.5) переместите в положение «Вправо» и нажмите кнопку «Ход».

7. Установите максимальный ток соленоида рукояткой «Ток соленоида», повернув ее в крайнее положение по часовой стрелке. Измерьте значение тока по левому прибору.

8. Рукояткой «Усиление» установите положение стрелки вольтметра на максимальном значении.

Повторять пп. 2–8 до тех пор, пока показания цикл от цикла не станут отличаться незначительно (обычно двух раз достаточно). На этом калибровку можно считать завершенной.

9. Переместите датчик в середину катушки. Изменяя величину тока в катушке соленоида, произведите измерение величины индукции магнитного поля для 4–5 значений тока. Зафиксируйте результаты измерений.

10. Перемещая датчик по длине соленоида, повторите п. 9 для 3–4 положений датчика.

11. Установите датчик в середину катушки соленоида, установив максимальное значение тока. Перемещайте датчик, производя измерение индукции в 5–7 точках по длине.

12. Постройте на одном графике зависимости индукции магнитного поля от величины тока соленоида для нескольких (например, трех) положений датчика.

13. Постройте на одном графике зависимости индукции магнитного поля от положения датчика для нескольких (например, трех) значений тока.

Алгоритм математического моделирования

Необходимо рассчитать поле (смоделировать картину поля) в программе математического моделирования Elcut (или аналогичной). Для проведения моделирования необходимо замерить геометрические размеры соленоида и определить его число витков (приблизительно).

По результатам моделирования:

1. Определить величины суммарного магнитного потока, энергии магнитного поля и индуктивности соленоида.

2. Построить на одном графике зависимости индукции магнитного поля от величины тока соленоида для нескольких (например, трех) положений датчика. Сравнить форму построенной зависимости с полученной экспериментально.

3. Построить на одном графике зависимости индукции магнитного поля от положения датчика для нескольких (например, трех) значений тока. Сравнить форму построенной зависимости с полученной экспериментально.

Содержание и форма отчета

В отчете отразить зависимости в виде графиков, экранной копии эскиза модели в ELCUT, расчеты в ELCUT в виде графиков. Сделать выводы по проделанной работе и оформить в виде заключения.

Заключение и выводы

В заключении по лабораторной работе происходит обобщение полученных результатов, говорится о зависимостях и закономерностях, выявленных в ходе работы. Делаются выводы по сравнению результатов, полученных различными способами, между собой и с теоретическими предпосылками.

Вопросы для самоконтроля

1. Какое магнитное поле называется однородным?
2. От каких величин зависит магнитная индукция в соленоиде конечной длины?
3. Какое физическое явление используется для измерения магнитной индукции в данной лабораторной работе?
4. Как зависит магнитная индукция в центре соленоида от силы тока в его витках?
5. Изобразите примерный вид зависимости магнитной индукции на оси соленоида от расстояния до его центра.

Рекомендуемая литература

1. Сорокин, В. С. Материалы и элементы электронной техники. Активные диэлектрики, магнитные материалы, элементы электронной техники. Том 2 : учебник для студентов вузов / В. С. Сорокин, Б. Л. Антипов, Н. П. Лазарева. — Изд. 2-е, испр. — Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2021. — 377 с. — URL: e.lanbook.com/book/168894 (дата обращения: 21.12.2022). — Режим доступа: по подписке. — ISBN 978-5-8114-2002-5.
2. Зонов, В. Н. Теоретические основы электротехники. Электрические и магнитные цепи постоянного тока : учеб. пособие / В. Н. Зонов, П. В. Зонов, Ю. Б. Ефимова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 79, [1] с. — URL: e.lanbook.com/book/152175 (дата обращения: 21.11.2022). — Режим доступа: по подписке. — ISBN 978-5-7782-4090-2.
3. Гуфан, А. Ю. Физика магнитных явлений : учебник / А. Ю. Гуфан, Ю. М. Гуфан. — Ростов-на-Дону [и др.] : Издательство Южного федерального университета, 2020. — 369, [2] с. — URL: www.iprbookshop.ru/115544.html (дата обращения: 21.12.2022). — Режим доступа: по подписке. — ISBN 978-5-9275-3552-1.

Образец оформления титульного листа

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра **«Промышленная электроника»**

(наименование кафедры полностью)

11.03.04 «Электроника и микроэлектроника»

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Интеллектуальные энергетические системы

(направленность (профиль))

ОТЧЕТ О ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ 1

«Исследование магнитной системы»

по дисциплине (учебному курсу)

Магнитные элементы электронной техники

(наименование дисциплины (учебного курса))

Группа **ЭЭТб-1906а**

Студент

Г.П. Ураксин

(И. О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

М.В. Позднов

(И. О. Фамилия)

(личная подпись)

Оценка: _____

Дата: _____

Тольятти 2025

Содержание

Введение	3
Лабораторная работа 1. Исследование магнитной системы	5
Лабораторная работа 2. Исследование бесконтактного индукционного датчика приближения (концевого выключателя)	25
Лабораторная работа 3. Исследование магнитного поля соленоида	35
Рекомендуемая литература	42
Приложение	43

Учебное издание

***Прядилов Алексей Вадимович,
Позднов Максим Владимирович***

МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ
Лабораторный практикум

Редактор *О.П. Корабельникова*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Дизайн обложки: *И.И. Шишкина*

*В оформлении обложки использовано
изображение от pikisuperstar на сайте ru.freepik.com*

Подписано в печать 14.04.2025. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 2,61.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-95-22.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru