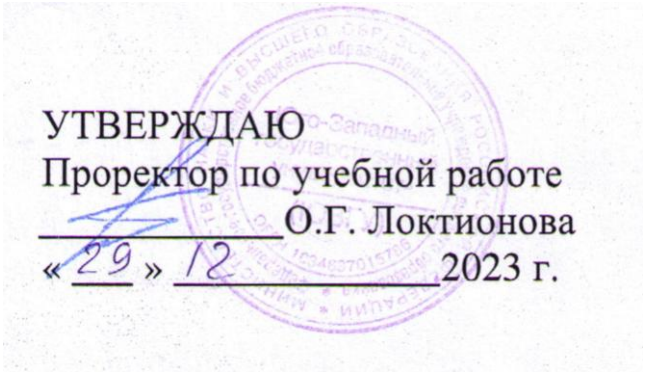
МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра инфраструктурных энергетических систем



ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ ТОКА В ЦЕПИ С НЕЛИНЕЙНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

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*

Искажения синусоидальной формы тока в цепи с нелинейной индуктивностью : 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. - 12 с.: ил. 5, табл. 1. - Библиогр.: с. 12.

Методические указания содержат сведения по выполнению лабораторной работы «Искажения синусоидальной формы тока в цепи с нелинейной индуктивностью», в которой выполняется экспериментальное определение магнитной характеристики индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником и её аппроксимация. Указывается порядок выполнения лабораторной работы, правила оформления отчета. Лабораторная работа относится к разделам нелинейных электрических и магнитных цепей и периодических несинусоидальных токов.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Теоретические основы 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 теоретическое и экспериментальное исследование условий и характера искажений синусоидальной формы тока для цепей, содержащих индуктивную катушку с ферромагнитным сердечником.

Для этого в работе выполняется экспериментальное определение магнитной характеристики индуктивной катушки с насыщающимся ферромагнитным сердечником и аппроксимация её посредством некоторых аналитических выражений. Полученные результаты затем используются для расчѐта кривой изменения тока, проверяемой с помощью осциллографа в случае синусоидального напряжения.

2. ПОДГОТОВКА К ИССЛЕДОВАНИЯМ

2.1. Изучить по конспекту лекций и рекомендованному учебнику в разделах «Нелинейные электрические и магнитные цепи переменного тока» и «Периодические несинусоидальные токи» параграфы, относящиеся к анализу работы индуктивной катушки с насыщающимся ферромагнитным сердечником 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

Мгновенные значения тока и напряжения реактивной катушки связывает уравнение

$$u = Ri + d\psi/dt, \qquad (3.1)$$

где R – сопротивление обмотки, ψ – потокосцепление, созданное током катушки. Если ψ и i пропорциональны, то отношение $\psi/i = L$, называемое индуктивностью, величина постоянная и не зависит от интенсивности режима. Тогда

$$u = Ri + Ldi/dt, \qquad (3.2)$$

откуда видно, что если одна из величин – напряжение или ток – изменяется синусоидально, то другая величина тоже будет синусоидальной.

Искажение синусоидальной формы тока получается, когда динамическая (для мгновенных значений) магнитная характеристика ка-

тушки $\psi(i)$ нелинейная. В этом случае индуктивность уже не является величиной постоянной. Нелинейность зависимости $\psi(i)$ характерна для катушек с магнитными сердечниками (магнитопроводами) и обусловлена нелинейными свойствами ферромагнитного материала, из которого изготовлен сердечник.

Магнитное состояние сердечника зависит не только от величины намагничивающего тока, но и от предыстории намагничивания. Поэтому при циклическом перемагничивании магнитная характеристика изображается в виде петли гистерезиса (рисунок 1).

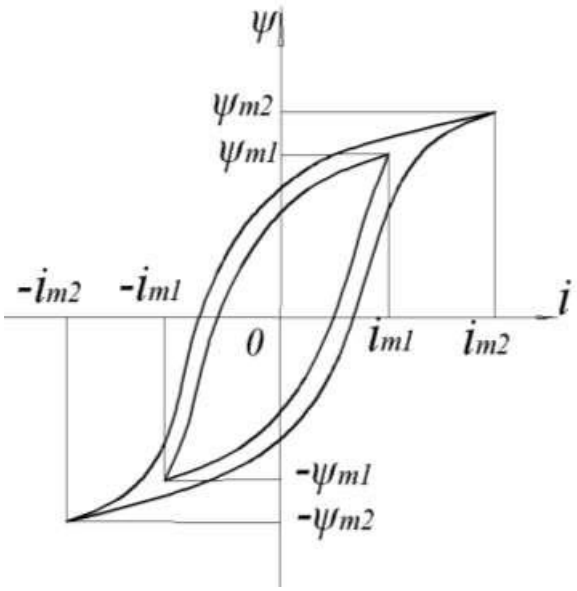


Рисунок 1. Магнитные характеристики катушки с ферромагнитным сердечником в виде петли гистерезиса

С изменением ψ_m и i_m происходит переход от одной петли гистерезиса к другой, причем существует и некоторая предельная петля, площадь которой при увеличении намагничивающего тока практически не растѐт.

Электромагнитная часть многих устройств электротехники по существу представляет индуктивную катушку с сердечником. При расчете таких устройств явлением гистерезиса часто пренебрегают, принимая, что магнитное состояние катушки изменяется не по петле гистерезиса, а по основной кривой намагничивания, представляющей геометрическое место вершин симметричных петель гистерезиса (рисунок 2).

На переменном токе все точки этой кривой равны амплитудным значениям ψ_m и i_m. Это позволяет, если R≈0, определить её экспериментально. Действительно, при R≈0 из (3.1) $u=d\psi/dt$, и если

$u=U_m\cos\omega t$, то $\psi=(U_m/\omega)\sin\omega t$, т.е. при синусоидальном напряжении потокосцепление изменяется тоже синусоидально, и его амплитудное значение равно

$$\psi_m = U_m/\omega. \qquad (3.3)$$

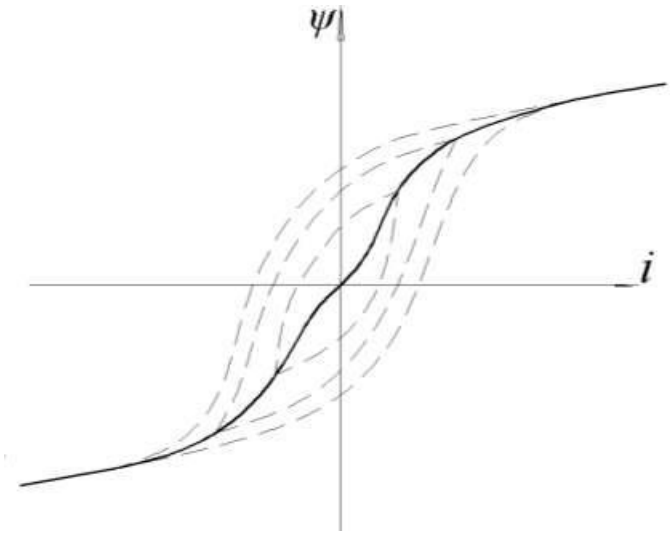


Рисунок 2. Основная кривая намагничивания

Необходимо отметить, что при $R\neq0$ в цепи будут несинусоидальными как ток i, так и напряжение на индуктивности U_L . Покажем, что при этом кривая тока будет несинусоидальной. Для этого изобразим зависимость $\psi(\omega t)$ и петлю гистерезиса в координатах $\psi(i)$. Порядок построения кривой $i(\omega t)$ показан на рисунке 3.

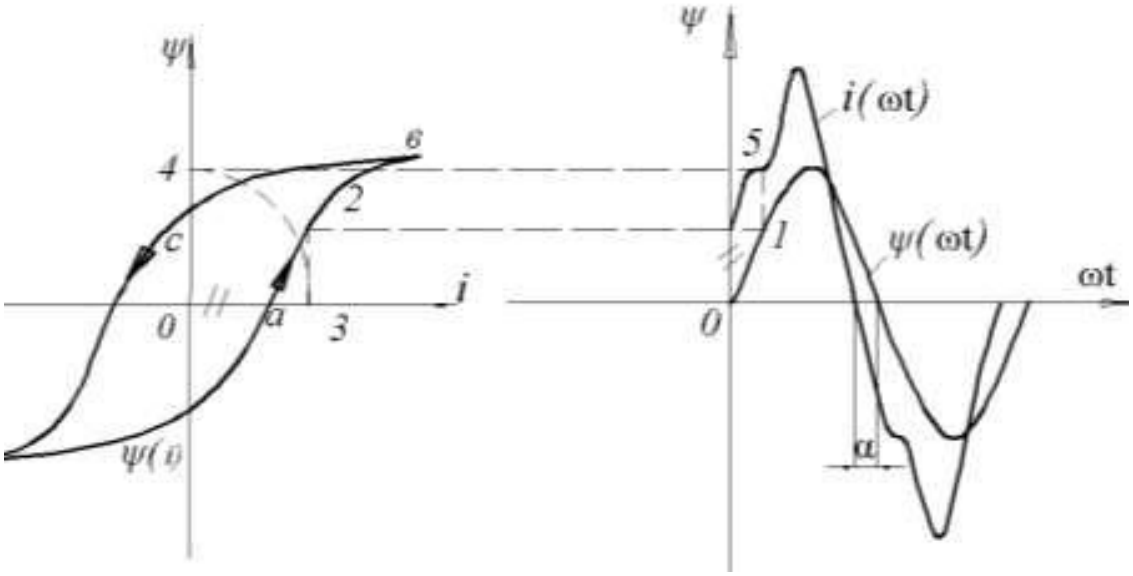


Рисунок 3. Построение кривой несинусоидального тока

На кривой потокосцепления $\psi(\omega t)$ произвольно выбирается точка 1. Посредством горизонтальной линии 1-2, пересекающей кривую $\psi(i)$, и вертикальной линии 2-3 определяется значение тока i, равное

абсциссе 0-3, соответствующее значению потокосцепления в точке 1. Это значение тока откладывается в виде ординаты 0-4 и переносится в координатную систему $i(\omega t)$ посредством проведения горизонтальной линии 4-5 до пересечения с вертикальной прямой 1-5. Причем координаты кривой тока для первой четверти определяются по восходящей ветви петли гистерезиса ab, для второй четверти – по нисходящей ветви bc и т.д.

Изображенная на рисунке 3 кривая тока несинусоидальна и симметрична относительно оси абсцисс, что означает отсутствие четных гармоник. Момент прохождения потокосцепления через нулевое значение отстает от момента прохождения тока через нуль. Если кривую тока заменить эквивалентной синусоидой, то кривая потокосцепления будет отставать от тока на некоторый угол α, который называют гистерезисным углом или углом магнитного запаздывания. На практике этот угол составляет 3...5°.

Замена кривой тока эквивалентной синусоидой позволяет воспользоваться методом векторных диаграмм, а также символическим методом расчета. Условием эквивалентности является равенство действующих значений тока данной кривой и эквивалентной, а также равенство потерь мощности. Чтобы найти действующее значение тока, нужно несинусоидальную функцию тока разложить в ряд Фурье.

Для определения амплитудных значений I_m достаточно включить последовательно с катушкой резистор с малым известным сопротивлением R_u и измерять амплитудное значение падения напряжения на нём U_{Ru}, тогда

$$I_m = U_{Ru}/R_u \,. \qquad (3.4)$$

Аналитический расчет неизвестной кривой $i(t)$ или $u_R(t)$ возможен, когда дано математическое выражение характеристики $\psi(i)$. Точное ее выражение не определяется. Практически пользуются тем или иным выражением, аналитическая кривая которого лишь приближенно совпадает с действительной кривой. Такое применение приближенных выражений называют аппроксимацией.

Если напряжение на зажимах катушки изменяется синусоидально, то подходящее аналитическое выражение для большей части магнитной характеристики получается как зависимость $i(\psi)$ в виде

$$i = a\psi + b\psi^3, \qquad (3.5)$$

где a и b – числовые коэффициенты. Для определения их на рабочем участке действительной характеристики нужно выбрать две точки, через которые должна пройти аналитическая кривая, подста-

вить их координаты ψ_1, i_1 и ψ_2, i_2 в (3.5), затем решить систему получающихся двух уравнений:

$i_1 = a\psi_1 + b{\psi_1}^3$,

$i_2 = a\psi_2 + b{\psi_2}^3$.

При $u = U_m \cos\omega t$ и, следовательно, синусоидальном потокосцеплении $\psi = \psi_m \sin\omega t$ используемое для аппроксимации уравнение (3.5) преобразуется к виду

$i = a\psi_m \sin\omega t + b{\psi_m}^3 \sin^3\omega t$.

Подставляя сюда $\sin^3\omega t = 0{,}25\,(3\sin\omega t - \sin^3\omega t)$, находят

$$i = I_{1m}\sin\omega t - I_{3m}\sin 3\omega t, \qquad (3.6)$$

где $I_{1m}=a\psi_m+0{,}75b{\psi_m}^3$, $I_{3m}=0{,}25b{\psi_m}^3$, $\psi_m=U_m/\omega$.

Таким образом, при синусоидальном напряжении в кривой тока нелинейной катушки содержатся синусоидальные составляющие с частотами ω и 3ω («первая» и «третья» гармоники). Так как их максимальные значения складываются, кривая $i(t)$ имеет заостренную форму с амплитудой $I_{1m}+I_{3m}$ (рисунок 4).

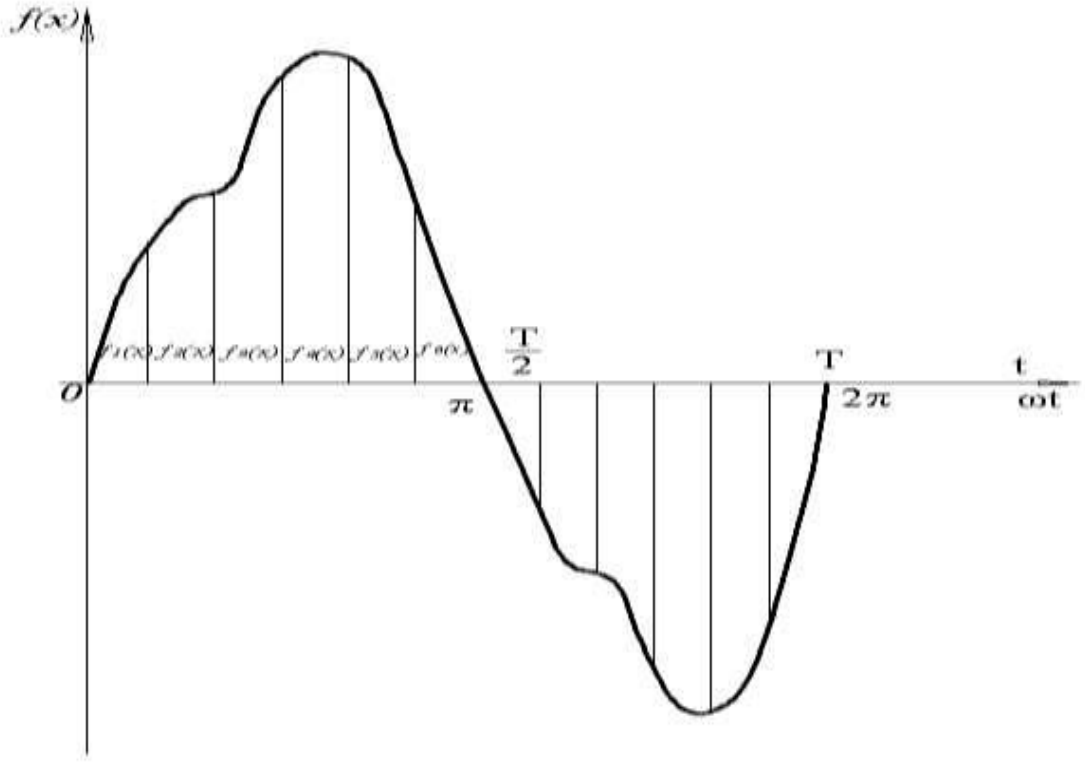


Рисунок 4. Несинусоидальная кривая тока $f(x) = i(t)$

Если есть изображение несинусоидального тока, полученное, например, с помощью осциллографа, то амплитудные значения первой и третьей гармоники могут быть определены графическим методом. Так как кривая тока симметрична относительно оси абсцисс, то в общем случае ряд записывается в виде:

$i(t) = A_{1m}\sin(\omega t+\varphi_1)+A_{3m}\sin(3\omega t+\varphi_3)+ \ldots =$
$=B_{1m}\sin\omega t+B_{3m}\sin3\omega t+ \ldots +C_{1m}\cos\omega t+C_{3m}\cos3\omega t+ \ldots$.

Графический метод определения гармоники ряда Фурье основан на замене определенного интеграла суммой конечного числа слагаемых. Перед тем как производить графическое разложение в ряд Фурье, необходимо выяснить наличие того или иного вида симметрии.

Сначала находится период T несинусоидальной функции $f(x)=i(t)$ по осциллограмме (рисунок 4). Разбивают период функции $f(x)$, равный 2π, на n равных частей $\Delta x=2\pi/n$, где n = 12, 24, 36...

Интегралы заменяют суммами:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(x)dx \approx \frac{1}{2\pi}\sum_{p=1}^{n} f_p(x)\Delta x = \frac{1}{n}\sum_{p=1}^{n} f_p(x). \qquad (3.7)$$

где p – текущий индекс, принимающий значение от 1 до n, $f_p(x)$ – значение функции при $x=(p\text{-}0{,}5)\Delta x$, т.е. в середине p-го интервала (рисунок 4).

Амплитуда синусной составляющей k-ой гармоники равна:

$$B_{km} = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(x)\sin kx dx \approx \frac{2}{2\pi}\sum_{p=1}^{n} f_p(x)\frac{2\pi}{n}\sin_p kx = \frac{2}{n}\sum_{p=1}^{n} f_p(x)\sin_p kx \qquad (3.8)$$

а амплитуда косинусной составляющей k-ой гармоники определяется по формуле:

$$C_{km} = \frac{2}{n}\sum_{p=1}^{n} f_p(x)\cos_p kx. \qquad (3.9)$$

Здесь $sin_p kx$ и $cos_p kx$ – значения функций при $x=(p\text{-}0{,}5)\Delta x$, т.е. в середине p-го интервала.

Для k-ой гармоники можно определить амплитуду и начальную фазу:

$$A_{km} = \sqrt{B_{km}^2 + C_{km}^2}, \qquad (3.10)$$

$$\varphi_k = arctg(C_{km}/B_{km}). \qquad (3.11)$$

Действующее значение несинусоидального тока I определяется как корень квадратный из суммы квадратов постоянной составляющей и действующих значений гармонических составляющих:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \ldots}. \qquad (3.12)$$

Активная мощность P равна сумме мощностей постоянной составляющей и каждой гармонической составляющей: $P=P_0+P_1+P_2+\ldots$

4. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

Объектом исследования и основным элементом рабочей цепи на лабораторном стенде является катушка со стальным сердечником, обозначенная на стенде символом *L*2. Сердечник образует замкнутый магнитопровод, который переходит в состояние магнитного насыщения при напряжении на зажимах катушки около 40 В. Максимально допустимое напряжение $U_{доп}$= 80 В.

Последовательно с катушкой включают измерительный резистор *R*, который имеет сопротивление 5 Ом.

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.

Используемые измерительные приборы: вольтметр электромагнитной системы на 75 и 150 В, осциллограф типа С1-64.

Особенностью осциллографа является наличие только ступенчатых регулировок масштабов по вертикальной и горизонтальной осям на экране, причём значения масштабов (в вольтах и миллисекундах, отнесенных к большому делению) можно прочесть на шкалах ручек регулировок.

5. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

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

5.2. Для экспериментального определения магнитной характеристики катушки $i(\psi)$ собрать рабочую цепь по схеме на рисунке 5.

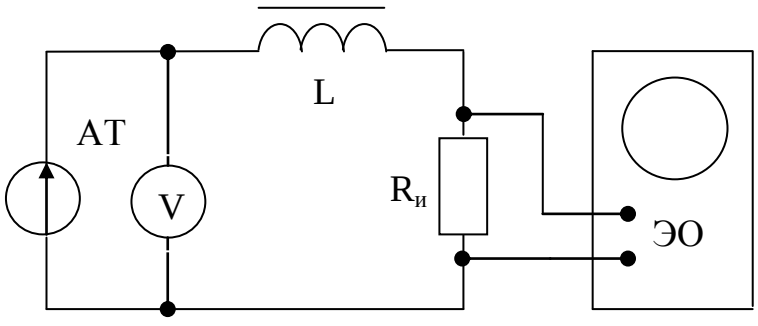


Рисунок 5. Схема рабочей цепи

5.3. Плавно увеличивая напряжение цепи до уровня $U_{доп}$= 80 В, записать 8-10 пар значений напряжения и величины 2А размаха двойного колебания на экране осциллографа (ЭО на рисунке 5).

Результаты измерений, а также значения установленного масштаба m_u вертикального отклонения электронного луча на экране осциллографа записать в таблицу 1.

Таблица 1. Данные исследований искажений формы тока

N п/п	Из опытов			Вычислено		
	U, В	2А делений	m_u В/дел	из опытов		i по формуле $i = a\psi + b\psi^3$
				ψ, Вб	i, А	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

5.4. При одном из значений напряжения в пределах от 0,8 $U_{доп}$ до $U_{доп}$ зарисовать с экрана осциллографа половину периода кривой изменения напряжения на измерительном резисторе R_u, растянув ее по оси x (по горизонтали) на 6 делений.

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

6. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

6.1. Рассчитать значения тока i и потокосцепления ψ для каждого пункта опытов. Расчет выполняется по формулам (3.3) и (3.4), где амплитуда $U_m = \sqrt{2}U$, напряжение измерительного резистора $U_{Rи}$=0,5•2А•m_u при R_u=5 Ом.

6.2. Построить экспериментальную магнитную характеристику $i(\psi)$. Выполнить ее аппроксимацию по способу, указанному выше,

определив аналитические выражения в виде $i(\psi)$. Следует учесть, что аппроксимация по (3.5) получается удовлетворительно при выборе точек i и ψ из третьего и последнего пункта опытов в таблице 1.

6.3. Рассчитать 8-10 точек кривой, описываемой найденным выражением аппроксимации (3.5). Построить кривую аппроксимации для сравнения на графике экспериментальной магнитной характеристики $i(\psi)$.

6.4. По формуле (3.6) определить амплитудные значения первой и третьей гармоники тока для того входного напряжения, при котором зарисовывалась кривая напряжения на измерительном сопротивлении R_u . Записать полученный для тока ряд Фурье.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем выражается нелинейность катушки с ферромагнитным сердечником? Почему нелинейность представляет причину искажений синусоидальной формы периодических кривых?

2. Поясните условия реактивной катушки, при которых:

1) периодические ток и напряжение имеют одинаковую форму;

2) несинусоидальным является только ток или только напряжение;

3) при синусоидальном приложенном напряжении одновременно несинусоидальными будут ток и ЭДС самоиндукции.

3. Что представляет собой магнитная характеристика катушки с насыщающимся ферромагнитным сердечником? Приведите обоснование методики ее экспериментального определения.

4. С какой целью и как выполняется аппроксимация магнитной характеристики?

5. Изобразите кривую магнитной характеристики в виде зависимости $i(\psi)$. Используя совместно графики $i(\psi)$ и $i=I_m \sin\omega t$, постройте аналогично рисунку 3 кривую изменения потокосцепления $\psi(t)$.

6. С помощью используемых для аппроксимации аналитических выражений $i(\psi)$ и $\psi(i)$ покажите, что нелинейная катушка представляет собой генератор нечётных гармоник, появляющихся в кривой напряжения при синусоидальном токе.

7. Расскажите о графическом методе определения гармонических составляющих ряда Фурье, используемого для представления периодических несинусоидальных электрических величин.

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.