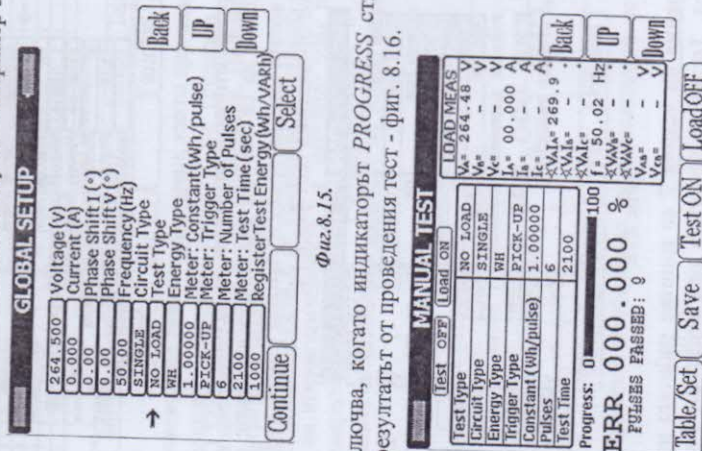


Необходимите настройки на уредбата се въвеждат в менюто GLOBAL SETUP (фиг. 8.15). Тестът се стартира с натискане на бутон TEST ON. За зададеното време на изхода не трябва да се получи повече от един импулс (Meter: Number of Pulses = 1 или 2 и стойността в Register Test Energy трябва да обезпечи енергия съответно на няколко импулса - например 5 импулса).



Фиг. 8.15.

Тестът приключва, когато индикаторът PROGRESS стигне до 100 и на екрана се покаже резултатът от проведеня тест - фиг. 8.16.

Фиг. 8.16.

8.3. Контролни въпроси

1. Откъде се отчитат импулсите на статичния електромер? На какво съответстват тези импулси при механичния електромер?
2. Защо при проверката са отделени веригите на тока и на напрежението?
3. При каква честота се прави проверката на електромера?
4. Кой ток е по-голям I_n или I_0 ?
5. При какви напрежения се прави проверката на електромера?
6. При изпитване работата на електромера без товар, какви са стойностите на тока и напрежението?

9. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФЕРОМАГНИТНИ МАТЕРИАЛИ С ЕЛЕКТРОННОЛЪЧЕВ ОСЦИЛОСКОП

Целта на упражнението е студентите да се запознаят с осцилоскопния метод за изследване на характеристики на феромагнитни материали при променливо намагнитване и да придобият практически опит и умения за експерименталното им определяне с помощта на електроннолъчев осцилоскоп (ЕЛО).

9.1. Задачи за изпълнение

1. Да се определят константите на осцилоскопа за индукция C_B и за интензитет C_H на магнитното поле при експеримента.
2. Да се получат и да се снемат точки от динамичната основна крива на намагнитване $B_m(H_m)$. Да се построят зависимостите $B(H_m)$ и $\mu_{or}(H_m)$.
3. Да се получи и да се сHEME динамичният хистерезисен цикъл $B(H)$ за $B_m = 1T$. Да се определят специфичните феромагнитни загуби на материала.
4. Да се получи и да се сHEME кривата на магнитовъзбудителния ток i_1 . Да се построи зависимостта $i_1(t)$.

9.2. Теоретични постановки и методически указания

9.2.1. Теоретични постановки

Изследването на феромагнитните материали при променливо магнитно поле с ЕЛО (осцилоскопен метод) се основава на възможността да се получи върху екрана на осцилоскопа динамичният хистерезисен цикъл на материалите. Основен хистерезисен цикъл чрез този метод могат да се получат също динамичната основна крива на намагнитване, амплитудната магнитна проникваемост, специфичните загуби в материала, остатъчната индукция и коерцитивния интензитет.

Предимства на осцилоскопния метод са непосредственото наблюдение на формата на хистерезисния цикъл и магнитовъзбудителния ток, високата чувствителност на измерванията, приложимост при промишлени и високи честоти до 100 KHz, както и при много малки по размери образци. Основен недостатък е сравнително голямата грешка - 5-10%, която се определя от невисоките метрологични характеристики на ЕЛО.

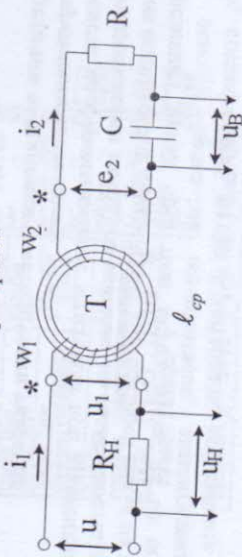
За да се получи хистерезисният цикъл на екрана на осцилоскопа, е необходимо да се подадат на входовете за вертикално (канал Y) и хоризонтално (канал X) отклонение на лъча напрежителни сигнали u_B и u_H , пропорционални и във фаза с моментните стойности на индукцията B_i и на интензитета H_i на магнитното поле в материала. Осцилоскопът се използва в режим X-Y, при който е изключен генераторът на развивка.

Схемата за получаване на двата сигнала u_B и u_H е показана на фиг. 9.1. Изследваният образец е листов феромагнитен материал във вид на тороид T със сечение s . Върху тороида са навити две намотки - намагнитваща с навивки w_1 и измервателна с навивки w_2 . Параметрите на намагнитващата намотка осигуряват синусоидна индукция (поток) в магнитопровода при синусоидно входно напрежение u_1 . Последователно на намагнитващата намотка е включен резисторът R_H . Той е еталонен и с малко съпротивление, за да не деформира кривата на намагнитовъзбудителя ток i_1 (напрежението u_1), а оттам и синусоидната форма на магнитната индукция. Сигналят от измервателната намотка се подава към пасивен интегратор - високоомната интегрираща верига RC , за която е изпълнено условието $R \gg X_C$ за най-ниската честота от спектъра на сигнала. Степента на изпълнение на това условие определя фазовата грешка на интегратора.

Напрежението u_B на изхода на интегратора се намира от израза

$$(9.1) \quad u_B = \frac{1}{C} \int i_2 dt \approx \frac{1}{C} \int \frac{e_2}{R} dt,$$

където i_2 е токът в интегриращата верига. Неговата стойност се определя от активното съпротивление на интегратора R .



Фиг. 9.1.

Индуктираното е.д.и e_2 в измервателната намотка се записва съгласно закона за електромагнитната индукция с формулата

$$(9.2) \quad e_2 = -w_2 s \frac{dB}{dt},$$

След като (9.2) се замести в (9.1) и при подходящо избрана посока на e_2 (за получаване на нормален, непрекъснат хистерезисен цикъл), за напрежението u_B се получава изразът

$$(9.3) \quad u_B = \frac{w_2 s}{RC} B_1,$$

откъдето следва, че u_B е пропорционално и във фаза с моментната стойност на индукцията B_1 .

Напрежението u_H се определя като напрежителен пад върху резистора R_H при протичане на магнитовъзбудителя ток i_1 . Връзката между тока i_1 в намотката и интензитетата H_1 при тороидален магнитопровод със средна дължина на магнитните линии l_{cp} се дава от закона за пълния ток съгласно израза

$$(9.4) \quad \oint \vec{H}_1 d\vec{l} = H_1 l_{cp} = w_1 i_1,$$

Тогава за напрежението u_H , като се има предвид (9.4), се получава

$$(9.5) \quad u_H = R_H i_1 = \frac{R_H l_{cp}}{w_1} H_1,$$

откъдето е очевидно, че напрежението u_H е пропорционално и във фаза с моментната стойност на интензитетата H_1 .

Стойностите на индукцията и на интензитета за всяка точка от хистерезисния цикъл (фиг.9.2), наблюдаван на екрана на ЕЛО, могат да се изчислят чрез зависимостите:

$$(9.6) \quad B_1 = C_B u_H,$$

$$(9.7) \quad H_1 = C_H x,$$

където: C_B и C_H са константите на осцилоскопа за индукция и за интензитет, u и x - ординатата и абсцисата на точката от цикъла, отчетени от екрана.

Константата за индукция C_B и константата за интензитет C_H се определят на основата на изразите (9.3) и (9.5) от следните формули:

$$(9.8) \quad C_B = \frac{B_m}{y_{Bm}} = \frac{RC U_{Bm}}{y_{Bm} w_2 s} = \frac{RC}{w_2 s} C_y,$$

$$(9.9) \quad C_H = \frac{H_m}{x_{Hm}} = \frac{w_1}{R_H l_{cp}} \frac{U_{Hm}}{x_{Hm}} = \frac{w_1}{R_H l_{cp}} C_x,$$

където: B_m и H_m са индукцията и интензитетът на върха на хистерезисния цикъл; y_{Bm} и x_{Hm} - ординатата и абсцисата на върха, отчетени от екрана; U_{Bm} и U_{Hm} - максималните стойности на напреженията u_B и u_H ; C_y и C_x - коефициентите на отклонение на канал Y и на канал X на осцилоскопа.

Константата C_B може да се определи и чрез синусоидалното напрежение $u_2 \approx e_2$ на изхода на измервателната намотка w_2 . Зависимостта между ефективната стойност U_2 на синусоидното напрежение u_2 и амплитудата на

индукцията B_m се определя съгласно закона за електромагнитната индукция от израза

$$(9.10) \quad U_2 = 4,44 f W_2 S B_m,$$

Тогава в съответствие с (9.8) се намира

$$(9.11) \quad C_B = \frac{B_m}{Y_{Bm}} = \frac{U_2}{4,44 f W_2 S Y_{Bm}}.$$

Динамичната основна крива на намагнитване се определя от зависимостта $B_m(H_m)$ като геометрично място на върховете на последователно нарастващи симетрични хистерезисни цикли. Тя може да се построи, като се отчитат от екрана на ЕЛО координатите Y_{Bm} и X_{Hm} за върховете на нарастващи хистерезисни цикли.

Амплитудната магнитна проницаемост и нейната относителна стойност се намират от изразите

$$(9.12) \quad \mu_a = \frac{B_m}{H_m}, \quad \mu_{ar} = \frac{\mu_a}{\mu_0},$$

където $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/т}$ е магнитната константа.

Хистерезисният цикъл, наблюдаван на екрана на осцилоскопа, представлява зависимостта $B(H)$ при циклично изменение на интензитета на магнитното поле. Той може да се снеме и построи чрез отчитане от екрана на координатите на достатъчен брой точки от цикъла, включително върха на цикъла (B_m, H_m), остатъчната индукция B_r и коерцитивния интензитет H_c . Площта на хистерезисния цикъл $S_{хл}$ е пропорционална на активните загуби от хистерезис и вихрови токове в материала.

Специфичните феромагнитни загуби в единица маса на материала се определят от формулата

$$(9.13) \quad P_{XB} = \frac{m_B m_H f S_{хл}}{\gamma},$$

където: m_B и m_H са мащабите за индукцията и за интензитета при начертаване на хистерезисния цикъл, f - честотата на пренамагнитване, γ - плътността на феромагнитния материал.

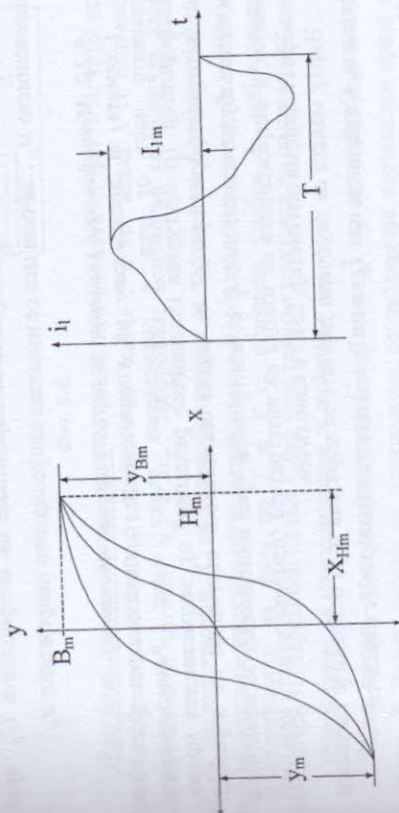
За да се получи кривата на магнитовъзбудителния ток $i_1(t)$ на екрана на ЕЛО, е необходимо да се включи генераторът на развивка и да се подаде на входа на канал Y напрежителен сигнал, пропорционален и във фаза с моментната стойност на тока i_1 в намагнитващата намотка. За тази цел може да

се използва напрежението u_H , тъй като резисторът R_H е активно съпротивление с малка стойност.

Магнитовъзбудителният ток i_1 се намира от израза

$$(9.14) \quad i_1 = i_{10} + \left(-\frac{W_2}{W_1} i_2 \right) = i_{10} + (-i_2') \approx i_{10},$$

където: i_{10} е намагнитващият ток, а i_2' - приведената стойност на i_2 към намагнитващата намотка. Токът в измервателната намотка $i_2 \approx 0$ се определя от високоомния товар (интегриращата верига RC), включен към нея. Магнитовъзбудителният ток i_1 в режим на синусоидална индукция има несинусоидална форма (фиг. 9.3).



Фиг. 9.2.

Фиг. 9.3.

Моментните стойности на магнитовъзбудителния ток i_1 и времето t могат да се изчислят аналогично на (9.6) и (9.7) чрез формулите:

$$(9.15) \quad i_1 = C_i Y,$$

$$(9.16) \quad t = C_t X,$$

където: C_i и C_t са константите на осцилоскопа за магнитовъзбудителен ток и за време; Y и X - ординатата и абсцисата на точка от кривата на i_1 , отчитени от екрана.

Константата за магнитовъзбудителен ток C_i и константата за време (коэффициентът на развивка) C_t се определят от изразите:

$$(9.17) \quad C_1 = \frac{C_Y}{R_H},$$

$$(9.18) \quad C_1 = \frac{T}{x_T} = \frac{1}{f x_T},$$

където: C_Y е коефициентът на отклонение (константата по напрежение) на канал Y ; T и f - периодът и честотата на магнитовъзбудителния ток i_1 ; x_T - дължината на отсечката, съответстваща на един период на i_1 , отчетена от екрана на осцилоскопа.

Константата C_1 не се определя чрез несинусоидния магнитовъзбудителен ток i_1 , тъй като $I_{Im} \neq \sqrt{2}I_1$, а се изисква измерване на максималната стойност. Същите съображения се отнасят и за определяне на коефициента C_X чрез напрежението u_H . За тази цел се използва синусоидното напрежение u_B .

9.2.2. Методически указания за изпълнение на задачите

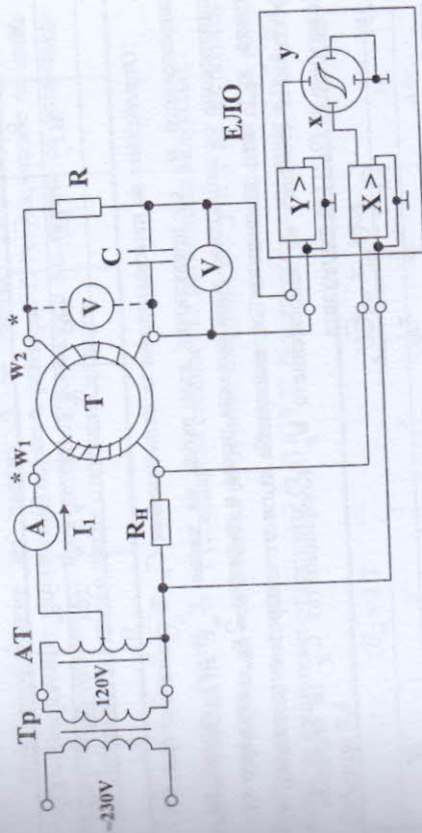
Схемата за провеждане на упражнението е показана на фиг. 9.4. Основната част от нея е реализирана върху макет. Разделителният трансформатор Tr осигурява галванично разделяне от захранващата мрежа. Чрез автотрансформатора AT се задава магнитното състояние на образеца. Магнитовъзбудителният ток i_1 се контролира чрез амперметър за ефективна стойност, а напрежението на изхода на интегратора (измервателната намотка) се измерва с цифров волтметър. ЕЛО е еднолъчев.

Върху макета са посочени данните за образеца и за основните елементи от схемата. Стойността на I_{cp} и на сечението s се намират от изразите

$$(9.19) \quad I_{cp} = \pi \left(\frac{D_1 + D_2}{2} \right),$$

$$(9.20) \quad s = \frac{m}{\gamma} I_{cp},$$

където D_1 и D_2 са външният и вътрешният диаметър на образеца, а m и γ са масата и плътността на материала.



Фиг. 9.4.

При изпълнение на задача 1 се реализира схемата от фиг. 9.4. ЕЛО се включва в режим $X-Y$. Към входовете на канал Y и на канал X се подават напрежителните сигнали u_B и u_H . Цифровият волтметър се включва към изхода на интегратора. С автотрансформатора се задава ток $I_1 = 0,8 \div 1,0$ А. Чрез регулиране на усилването, включително и междинните константи на ЕЛО, и преместването на лъча по Y и X се получава удобен за наблюдение и симетричен хистерезисен цикъл. След това тези регулировки не се променят.

Определяне на константата за индукция C_B

Първи начин - чрез коефициента C_Y . Сигналят u_B се подава към входа на канал Y . Върху екрана на осцилоскопа се наблюдава вертикална права с дължина $2y_{Bm}$, откъдето се отчита y_{Bm} като половината от дължината y , а от цифровия волтметър - ефективната стойност на напрежението u_B .

Коефициентът C_Y се намира от формулата

$$(9.21) \quad C_Y = \frac{U_{Bm}}{y_{Bm}} = \frac{\sqrt{2}U_B}{y_{Bm}}$$

Константата C_B се изчислява от (9.8) или от израза

$$(9.22) \quad C_B = \frac{RC \sqrt{2}U_B}{w_2 S y_{Bm}}$$

Втори начин - чрез напрежението u_2 . Цифровият волтметър се включва към изхода на измервателната намотка. Измерванията се извършват както при първия начин. Константата C_B се изчислява от (9.11).

Данните и резултатите се записват в табл. 9.1.

Таблица 9.1

№	R	C	W ₂	s	U _B	Y _{Bm}	C _Y	C _B
—	kΩ	μF	нав	m ²	V	дел	V/дел	T/дел

Определяне на константата за интензитет C_H. В схемата от фиг. 9.4

напрежението u_B се превключва към входа на канал X. Върху екрана на осцилоскопа се наблюдава хоризонтална права с дължина $2x_{Bm}$, откъдето се отчита x_{Bm} като половината от дължината й, а от цифровия волтметър - ефективната стойност на напрежението u_B . Коэффициентът C_X се определя аналогично на (9.21) от формулата

$$(9.23) \quad C_X = \frac{U_{Bm}}{x_{Bm}} = \frac{\sqrt{2}U_B}{x_{Bm}}$$

Константата C_H се изчислява от (9.9) или от израза

$$(9.24) \quad C_H = \frac{w_1}{R_H I_{cp}} x_{Bm}$$

Данните и резултатите се записват в табл. 9.2.

Таблица 9.2

№	W ₁	R _H	I _{cp}	I ₁	U _B	x _{Bm}	C _X	C _H
—	нав	Ω	m	A	V	дел	V/дел	A/m-дел

При изпълнение на задача 2 се възстановява схемата от фиг. 9.4. Електроннолъчевият осцилоскоп остава в режим X-Y. Регулировките на двата канала се запазват. Автотрансформаторът се поставя в нулево положение. Задават се нарастващи стойности на тока I_1 и се получават нарастващи хистерезисни цикли, включващи и областта на насищане. От екрана на осцилоскопа се отчитат координатите Y_{Bm} и x_{Hm} за върховете на хистерезисните цикли. Стойностите на индукцията B_m и на интензитета H_m се изчисляват от (9.6) и от (9.7). Амплитудната магнитна проникваемост μ_{cr} се намира от (9.12). Данните и резултатите се записват в табл. 9.3. Построяват се зависимости $B_m(H_m)$ и $\mu_{cr}(H_m)$.

Таблица 9.3

№	I ₁	Y _{Bm}	x _{Hm}	B _m	H _m	μ _{cr}
—	A	дел	дел	T	A/m	—

При изпълнение на задача 3 се запазва схемата от фиг. 9.4. Електроннолъчевият осцилоскоп остава в режим X-Y. Регулировките на двата канала не се променят. Чрез автотрансформатора на екрана се установява симетричен хистерезисен цикъл с ордината на върха

$$(9.25) \quad Y_{Bm} = \frac{B_m}{C_B},$$

съответстваща на $B_m = 1$ T (стандартна стойност на магнитната индукция).

От екрана на осцилоскопа се отчитат координатите y и x на достатъчен брой характерни точки от цикъла. Индукцията B и интензитетът H за всяка точка се изчисляват от изразите (9.6) и (9.7). Резултатите се записват в табл. 9.4.

Таблица 9.4

$B_m = 1$ T				$Y_{Bm} = \dots$ дел	
№	y	x	B	H	
—	дел	дел	T	A/m	

По сметите точки и в избрани мащаби m_B и m_H хистерезисният цикъл се построява върху милиметрова хартия. Площта на цикъла $S_{ци}$ се намира чрез планиметриране. Честотата на пренамагнитване f е честотата на захранващото напрежение. Специфичните феромагнитни загуби P_{XB} се изчисляват от (9.13). Резултатите се записват в табл. 9.5.

Таблица 9.5

№	m _B	m _H	f	γ	S _{ци}	P _{XB}
—	T/mm	A/m mm	Hz	kg/m ³	mm ²	W/kg

При изпълнение на задача 4 се задава индукцията B_m , за която по описания начин в задача 3 се установява на екрана на ЕЛО съответният хистерезисен цикъл. Изключва се режим X-Y, с което автоматично се включва генераторът на развикката на осцилоскопа. Напрежението u_H се превключва към входа на канал Y. Чрез регулиране на усиляването на канала и на честотата на развикката се получава един период от кривата на магнитовъзбудителния ток $i_1(t)$.

Определяне на константата за време C_t. От екрана на осцилоскопа се отчита отсечката x_T , съответстваща на един период T на магнитовъзбудителния ток i_1 . Константата C_t се изчислява от (9.18).

Определяне на константата за ток C_i. Към входа на канал Y се подава напрежението u_B . Регулировката на канал Y не се променя. Върху екрана на

10. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФЕРОМАГНИТНИ МАТЕРИАЛИ ПРИ ПРОМЕНЛИВО МАГНИТНО ПОЛЕ ЧРЕЗ АПАРАТ НА ЕПШЦАЙН

Целта на упражнението е да се запознаят студентите с апарата на Епшцайн, да придобият практически умения за работа с него, както и да усвоят умения за експериментално построяване на динамичната основна крива на намагнитване на феромагнитен материал и определяне на енергийните му загуби при променливо магнитно поле.

10.1. Задачи за изпълнение

1. Да се разучи конструкцията и функционирането на апарата на Епшцайн;
2. Да се съберат данните, необходими за построяването на динамичната основна крива на намагнитване на изследвания образец от феромагнитен материал;
3. Да се построи динамичната основна крива на намагнитване на изследвания материал;
4. Да се построи зависимостта на феромагнитните загуби от амплитудата на магнитната индукция при постоянна честота $f = 50\text{Hz}$;
5. Да се построи зависимостта на феромагнитните загуби от честотата при постоянна амплитуда на магнитната индукция $B_m = 1\text{T}$;
6. Да се разделият феромагнитните загуби на загуби от хистерезис и загуби от вихрови токове.

10.2. Теоретични постановки и методически указания

10.2.1. Теоретични постановки

За да се изследва феромагнитен материал в магнитно поле и да се получат за него точни осреднени характеристики, той трябва да оформи хомогенна затворена магнитна верига. Най-често формата, която удовлетворява това изискване и се използва при изследване на феромагнитни материали, е тороидната. Направата на образци с такава форма и навиването на бобини в тяхното изследване обаче често е много трудна и невинаги възможна задача. В такива случаи се използва апаратът на Епшцайн. Изследваният листов материал се нарязва на ленти, които са с еднаква ширина и дължина помежду си и се поставят на пакети в апарата на Епшцайн. Така те образуват затворена магнитна верига и се постига достатъчна хомогенност на магнитното поле за провеждане на експеримент. Получените по този начин образци могат да се изследват както в постоянно, така и в променливо магнитно поле. Типично за апарата на Епшцайн е измерването на загубите в материала при променливо магнитно поле, известно като "вагметричен метод за изследване на феромагнитни материали".

В упражнението студентите се запознават с приложението на апарата на Епшцайн както за измерване на загубите на феромагнитен материал при променливо магнитно поле, така и за построяване на динамичната основна крива на намагнитване на изследвания материал, която представя зависимостта

електроннолъчевия осцилоскоп се наблюдава синусоидната форма на магнитната индукция, откъдето се отчита ординатата U_{Bm} на амплитудната стойност, а от цифровия волтметър – ефективната стойност на напрежението U_B . Коefициентът C_U се определя от (9.21). Константата C_i се изчислява от (9.17) или от израза

$$(9.25) \quad C_i = \frac{\sqrt{2}U_B}{R_H \cdot U_{Bm}}$$

Данните и резултатите се записват в табл. 9.6.

Таблица 9.6

$B_m = \dots \text{T}$		$U_{Bm} = \dots \text{дел}$					
№	f	x_T	C_i	R_H	U_B	C_U	C_i
-	Hz	дел	ms/дел	Ω	V	V/дел	A/дел

Снемане на кривата на намагнитване на мазнитовъзбудителния ток $i_1(t)$. Към входа на канал Y се подава отново напрежението u_H . От екрана на електроннолъчевия осцилоскоп се отчитат координатите y и x на достатъчен брой точки за един период от кривата на $i_1(t)$. Моментните стойности на тока i_1 и времето t се изчисляват от изразите (9.15) и (9.16). Данните и резултатите се записват в табл. 9.7. Построява се зависимостта $i_1(t)$. Проследява се изменението на формата на тока при малки стойности на индукцията.

Таблица 9.7

№	y	x	i_1	t
-	дел	дел	A	ms

9.3. Контролни въпроси

1. Какво е предназначението на образцовия резистор R_H , включен последователно с намагнитващата намотка?
2. Защо към измервателната намотка не трябва да се включват нискоомни уреди?
3. Как се определят константите за индукция C_B , за интензитет C_H , за магнитовъзбудителен ток C_i и за време C_t ?
4. Защо константите C_B и C_H се определят като константи на осцилоскопа за образаца при експеримента?
5. Защо константата C_H се определя чрез напрежението u_H ?
6. Как се получава динамичната основна крива на намагнитване?
7. Защо напрежението u_B се измерва с цифров волтметър?