

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФЕРОМАГНИТНИ МАТЕРИАЛИ**

***дисциплина „Електрически измервания”***

***ОКС „Бакалавър” от Учебен план за студентите на специалност***

***АИУТ, професионално направление***

***5.2. Електротехника, електроника и автоматика***



Европейски съюз

**ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042**

***„Организационна и технологична инфраструктура за учене през  
целия живот и развитие на компетенции”***

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
***Инвестира във вашето бъдеще!***



Европейски социален фонд

# СЪДЪРЖАНИЕ

- ❑ Основни характеристики на феромагнитните материали;
  - Статични характеристики;
  - Динамични характеристики
- ❑ Образци за изследване и устройства за намагнитване;
- ❑ Изследване на феромагнитни материали при постоянно намагнитване – индукционно-импулсен метод;
- ❑ Изследване на феромагнитни материали при променливо намагнитване
  - Метод с електроннолъчев осцилоскоп;
  - Метод с апарат на Епщайн
- ❑ Литература



Европейски съюз

**ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042**

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Както вече бе споменато (виж Лекция 10), за целите на учебния курс, магнитните измервания условно се разделят на два основни типа:

1. Измерване на основни параметри на магнитното поле

2. Измерване на основни характеристики и параметри на феромагнитни материали

!

В тази лекция вниманието е съсредоточено върху задачи от точка 2 - Измерване на основни характеристики и параметри на феромагнитни материали



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Магнитната индукция  $B$  в проба поставена във външно поле с интензитет  $H$  зависи както от  $H$  така и от магнитните свойства (магнитният момент  $J$ ) на материала на пробата.

Количествено тази зависимост е прието да се характеризира посредством безразмерен параметър - относителна магнитна проницаемост  $\mu_r = B/\mu_0 H = \mu/\mu_0$ . (където  $\mu$  [ $H/m$ ] е магнитната проницаемост на материала ( $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ ),  $\mu_0$  – магнитната проницаемост на вакуума (магнитна константа  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$   $H/m$ )  
Магнитният момент  $J$  се предопределя от атомната структура на всеки материал и от съотношението на орбиталната и спинова електронни магнитни съставки.



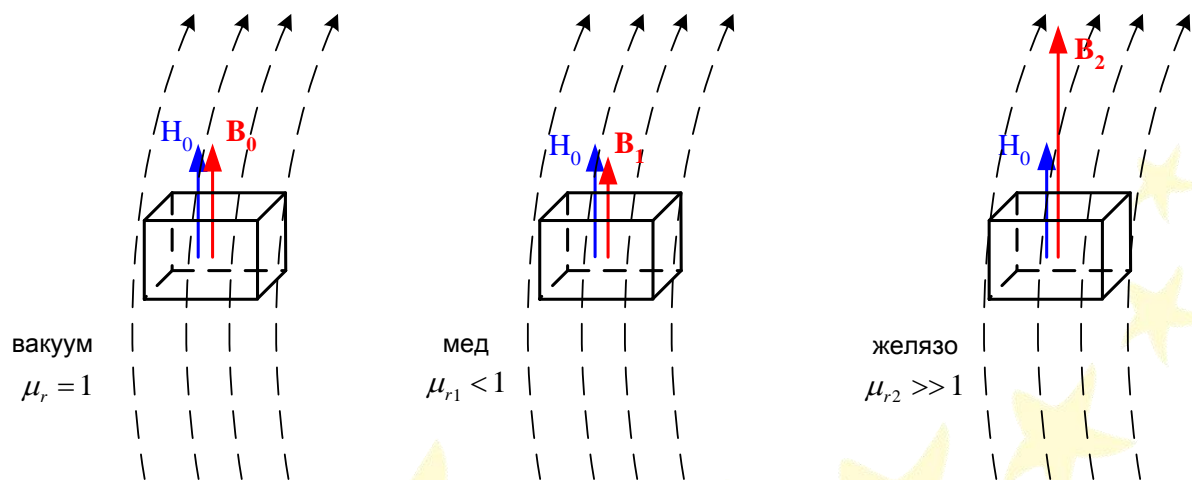
Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*





Фиг.11.1

В зависимост от стойността на  $\mu_r$  от техническа гледна точка материалите (Фиг.11.1) се подразделят на 2 големи групи:

1. **Немагнитни** – при тях  $\mu_r$  се различава слабо от 1, което е равнозначно на това, че собственият им магнитен момент  $J$  практически не зависи от външното поле  $H$  и представлява константна величина. Материалите от тази група се подразделят допълнително на две подгрупи:



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

Диамагнитни ( $\mu_r < 1$ ) – напр. мед, с  $\mu_r = 0,999991$ ; сребро с  $\mu_r = 0,99998$ . Характерно е, че магнитният момент се ориентира в посока обратна на външното поле  $H$ , в резултат на което проба поставена в непосредствена близост до постоянен магнит се отблъсква от него.

Парамагнитни ( $\mu_r > 1$ ) – напр. алуминий, с  $\mu_r = 1,00002$ ; При тях магнитният момент се ориентира по посока на външното поле  $H$ . Проба поставена в близост до постоянен магнит се привлича от него.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042  
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през  
целия живот и развитие на компетенции”  
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



2. **Магнитни** - Основен представител са ферромагнитните материали, при които  $\mu_r \gg 1$ . Достигат се стойности от порядъка на 10000 и повече, но тази стойност е зависима както от външното поле  $H$ , така и от предисторията на намагнитване. Типични представители са желязо, никел и кобалт, както и някои техни сплави.

Характерно е, че структурата им е кристална, формирана от спонтанно намагнитени области - т.н. домени. Всяка такава област съдържа голям брой атоми, но те всички в резултат на квантово механични ефекти формират общ магнитен момент, който под действие на полето  $H$  може да се преориентира (завърта). По този начин при промяна на полето се променя (нараства или намалява спрямо индукцията на външното поле) и магнитната индукция в обема на материала включително до състояние на насищане, при което посоката на доменните магнитни моменти съвпада с посоката на външното поле.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



**Феромагнитните материали** играят изключителна роля в приложната електротехника. Високата стойност на  $\mu_r$  е предпоставка за създаването на изключително икономични и ефективни енергийни съоръжения – генератори, трансформатори, електродвигатели и др. Използват се при сравнително ниски честоти (50-400 Hz), по причина на възникващите вихрови токове в структурата при пренамагнитване и свързаните с това топлинни загуби.

**Феритите и аморфните магнитни материали** се получават по специални технологии за работа при високи честоти (десетки и стотици kHz). Те притежават достатъчно висока магнитна проницаемост, без структурата им да е кристална.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!





# Основни характеристики на феромагнитните материали

## 1. Статични характеристики – характеристики при постоянно магнитно поле.

**1.1. Крива на първоначалното намагнитване** – зависимостта  $B=f(H)$  за предварително размагнитена проба (т.е.  $B=0$  и  $H=0$  едновременно), поставена в магнитно поле, което нараства плавно от нула до определена стойност.

Кривата на първоначалното намагнитване се влияе в голяма степен от случайни явления (механически сътресения, колебания на температурата, характера на изменение на магнитното поле), поради което няма добра възпроизводимост и не може да се използва за сравнителна оценка на свойствата на различните материали. Поради това тя представлява интерес главно от физична гледна точка и не се използва в инженерната практика.

!



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

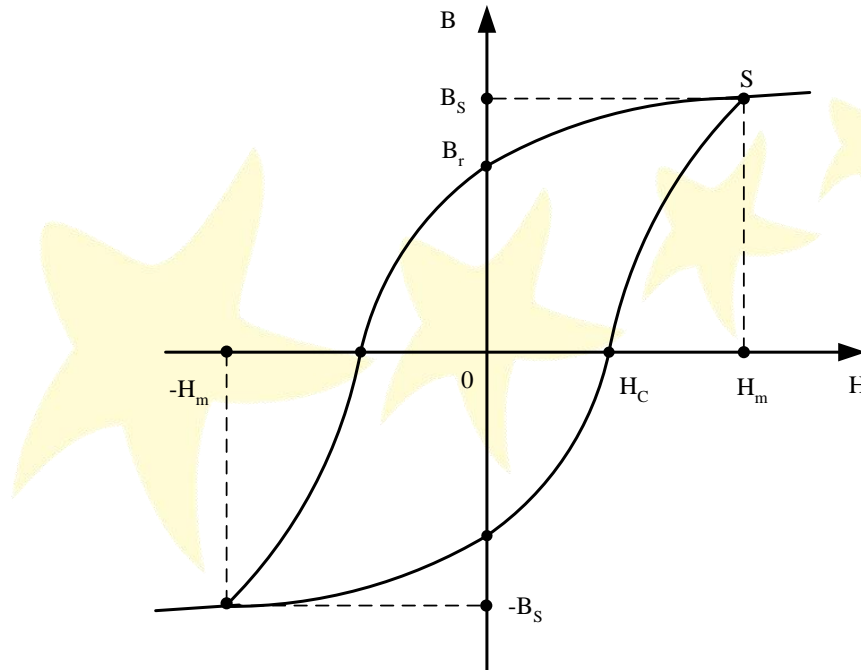
*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

**1.2. Хистерезисен цикъл** – зависимостта  $B=f(H)$  при циклично изменение на интензитета на магнитното поле  $H$  между две избрани стойности ( $-H_m$  до  $+H_m$ ) - Фиг.11.2



Фиг.11.2



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

## Основни характеристики на феромагнитните материали

Установено е, че с нарастване на интензитета  $H_m$  площта на хистерезисният цикъл също нараства, но до достигане на определена гранична стойност ( $H_m = H_S$ ) наречена **интензитет на насищане**.  $B_S$  се нарича **индукция на насищане**.

Точките  $B_r$  и  $H_c$  се наричат съответно **остатъчна индукция** и **коерцитивен интензитет**.

Всички тези стойности са важни показатели за качествата на феромагнитните материали.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

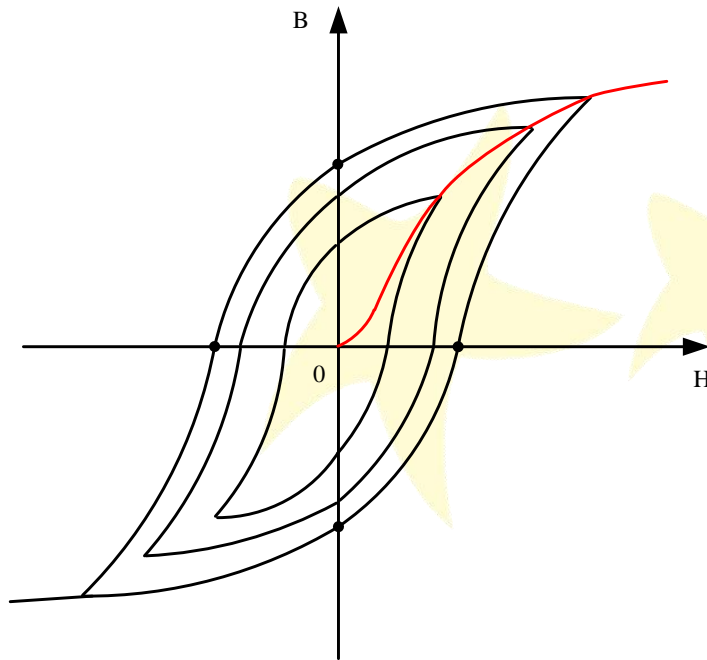
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!

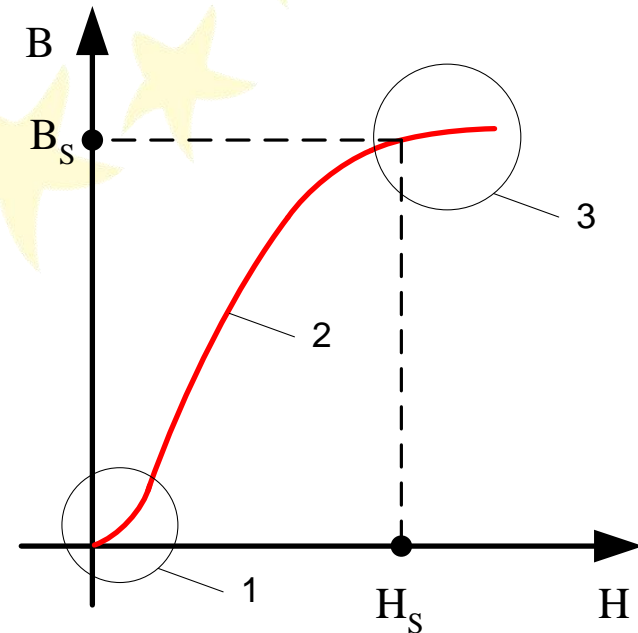


Европейски социален фонд

**1.3. Основна крива на намагнитване** – геометричното място на върховете на последователно нарастващи симетрични хистерезисни цикли (Фиг.11.3а)



Фиг.11.3а



Фиг.11.3б



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

## Основни характеристики на феромагнитните материали

Основната крива на намагнитване е една от най-важните характеристики на феромагнитните материали. Нейно предимство е сравнително удобното построяване и добрата ѝ повторяемост. Върху кривата се различават три характерни участъка (Фиг.11.3б):

- 1 – начален, съответен на долното коляно на кривата;
- 2 – участък на бързо (практически линейно) нарастване на индукцията;
- 3 – участък на насищането (над горното коляно на кривата).



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!

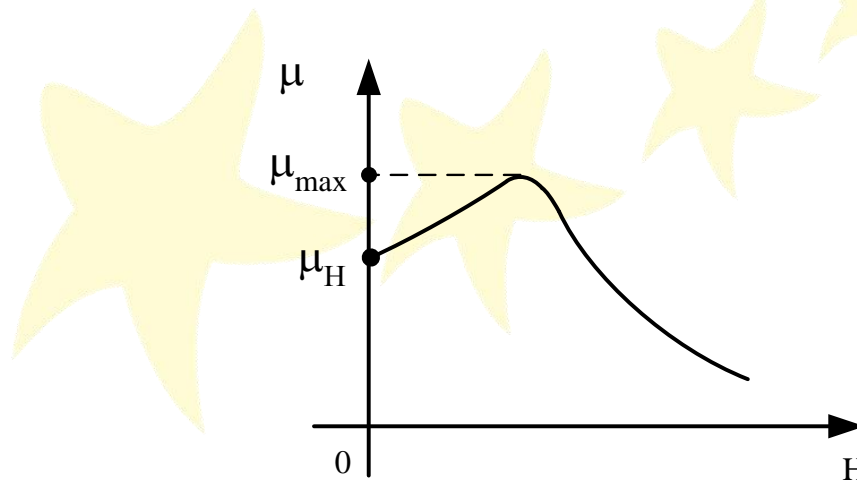


Европейски социален фонд

## Основни характеристики на феромагнитните материали

**1.4. Крива  $\mu = f(H)$**  - построява се от данните от основната крива на намагнитване (Фиг.11.4)

Особено важни са два стойности:  $\mu_H$  – начална магнитна проницаемост;  $\mu_{max}$  – максимална магнитна проницаемост



Фиг.11.4



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

**1.5. Хистерезисни загуби** – това са енергийните загуби  $W_x$ , които се появяват при циклично пренамагнитване на феромагнитните материали. Тези загуби са пропорционални на площта на хистерезисният цикъл.

## **2. Динамични характеристики на феромагнитните материали** – характеристики при променливо магнитно поле.

Те зависят не само от качеството на материали, но и от формата и размерите на образеца и честотата на намагнитващото поле.

Поради нелинейната зависимост  $B=f(H)$ , индукцията и интензитета на магнитното поле в материала не могат да бъдат едновременно синусоидални. Ако се използва режим на синусоидална индукция, то кривата на интензитета (респ. кривата на намагнитващият ток) ще бъдат несинусоидални.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

**2.1. Динамичен хистерезисен цикъл** – площта му е по-голяма в сравнение с площта на статичния хистерезисен цикъл, тъй като е пропорционална не само на загубите от хистерезис, но и на загубите от вихрови токове. Формата му зависи от дебелината на материала и честотата на променливото магнитно поле.

**2.2. Динамична основна крива на намагнитване** – геометричното място на върховете на постоянно нарастващи динамични хистерезисни цикли.

**2.3. Динамична магнитна проницаемост** – от голямо значение е амплитудната магнитна проницаемост, която се определя с отношението:

$$\mu_a = \frac{B_m}{H_m}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*

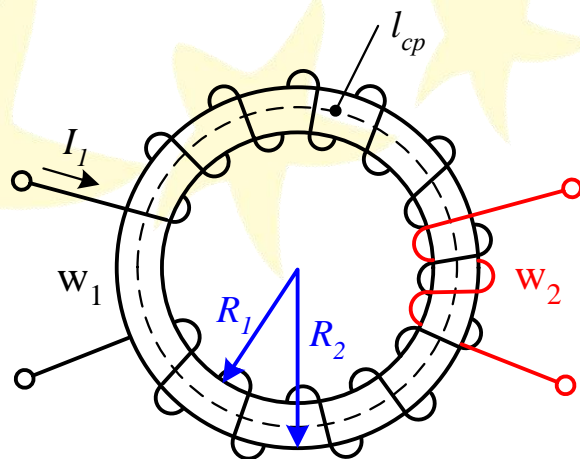




## Образци за изследване и устройства за намагнитване

При магнитни измервания се работи с два вида образци: тороидни и лентови образци.

**Тороид** – счита се за най-подходящ от измервателна гледна точка, поради пълната си магнитна и геометрична симетрия (Фиг.11.5)



Фиг.11.5

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски съюз



Европейски социален фонд

Образци за изследване и устройства за намагнитване

Върху тороида изработен от изследвания феромагнитен материал се навиват: намагнитваща намотка  $w_1$  (равномерно по цялата дължина) през която протича намагнитващия ток  $I_1$  и измервателна намотка  $w_2$  (за измерване на индукцията  $B$ ).

$l_{cp.}$  – средна магнитна линия на тороида

$$l_{cp.} = 2 \cdot \pi \cdot R_{cp.} \quad \text{където:} \quad R_{cp.} = \frac{R_1 + R_2}{2}$$

От закона за пълния ток следва, че:

$$H = \frac{w_1 \cdot I_1}{l_{cp.}} = \frac{w_1 \cdot I_1}{2 \cdot \pi \cdot R_{cp.}}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Образци за изследване и устройства за намагнитване

Тороидните образци осигуряват висока точност на измерването, но се изработват сравнително трудно. При по-ниски изисквания за точността се използват лентови образци, които се поставят в специално конструирани за целта устройства за намагнитване. Пример за такова устройство е апаратът на Епщайн.

**Апарат на Епщайн** – състои се от четири макари, разположени по осите на квадрат. Във вътрешността на макарите се поставят лентите от изследваният феромагнитен материал (ленти), които се припокриват и притягат в ъглите и образуват затворена квадратна рамка (затворена магнитна верига) – Фиг.11.6

Върху всяка макара се навива по една секция на намагнитващата намотка  $w_1$  и на измервателната намотка  $w_2$ . Секциите се свързват последователно, като измервателната намотка остава отдолу.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

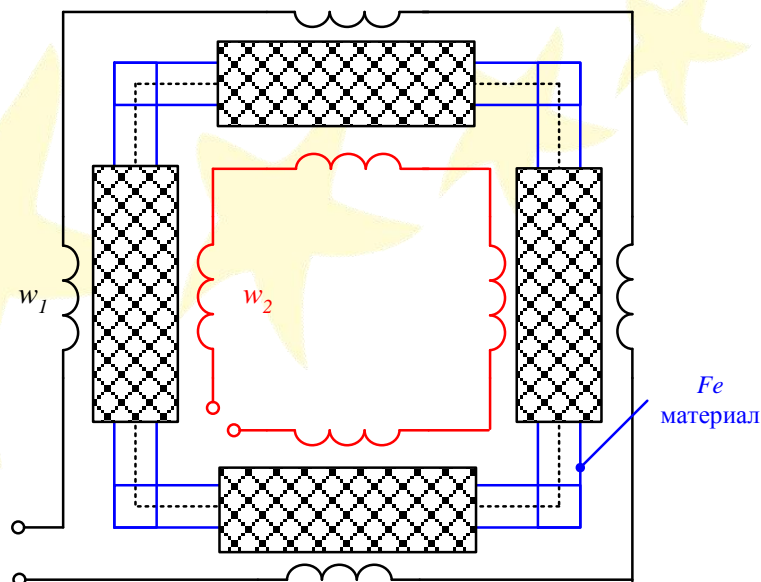
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



## Образци за изследване и устройства за намагнитване

В ъглите на образца (там където контактуват лентите) неизбежно остават въздушни междини. Това води до появата на разсеяни магнитни потоци, следователно до нехомогенност на полето в образца и по-ниска точност на измерванията.



Фиг.11.6



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

Изследване на феромагнитни материали при постоянно намагнитване – индукционно-импулсен метод

## Изследване на феромагнитни материали при постоянно намагнитване – индукционно-импулсен метод

Схемата по която се провежда измерването е показана на Фиг.11.7. Образецът от изследвания материал е във вид на тороид.

Резисторите  $R_1$  и  $R_2$  служат за регулиране на тока  $I_1$  в намагнитващата намотка  $w_1$ . С превключвателя П се променя посоката на тока  $I_1$  през намагнитващата намотка.

Измерването включва следните по-важни етапи:

1. Определяне на магнитната константа на веберметъра. – веберметърът трябва задължително да се калибрира заедно с измервателната бобина, след което да се използва при същите условия, което е гаранция за запазване на константата му  $C_M$ .



Европейски съюз

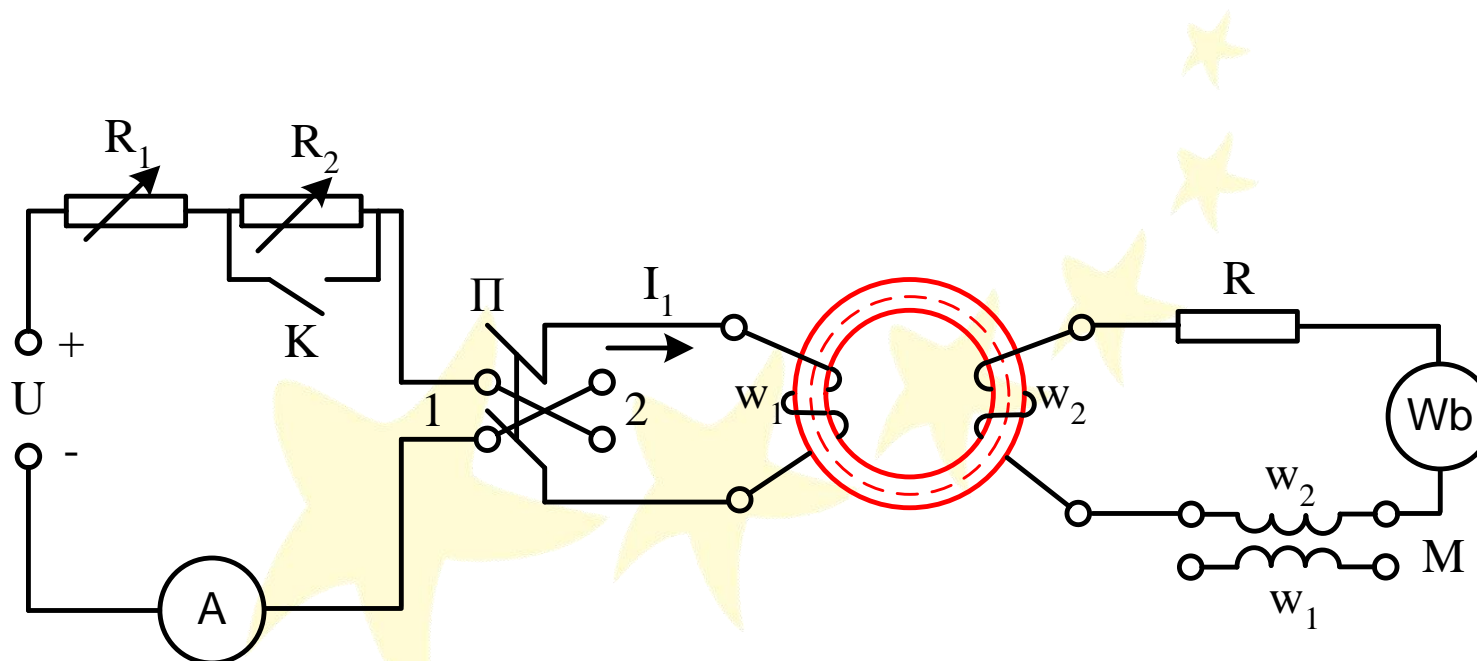
ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



# Изследване на ферромагнитни материали при постоянно намагнитване – индукционно-импулсен метод



Фиг.11.7



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през  
целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

Изследване на феромагнитни материали при постоянно намагнитване – индукционно-импулсен метод

2. Размагнитване на образеца.

3. Построяване на основната крива на намагнитване – съгласно определението измерването се свежда до намирането на върховете на няколко последователно нарастващи хистерезисни цикли. Задават се последователно поредица максимални стойности  $H_{m1}$ ,  $H_{m2}$ ... на интензитета на циклите. Изчисляват се токовете  $I_{m1}$ ,  $I_{m2}$  ... по формулата:

$$I_{m1} = \frac{H_{m1} \cdot l_{cp}}{W_1}$$

Токът се комутира и се отчита показанието  $\theta$  на веберметъра. Магнитната индукция се определя от формулата:



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*



Европейски социален фонд

Изследване на феромагнитни материали при постоянно намагнитване – индукционно-импулсен метод

$$B_m = \frac{C_M \cdot \theta}{2 \cdot S_M \cdot w_2}$$

където:  $C_M$  е константата на веберметъра, а  $S_M$  е сечението на тороида

Съответната статична магнитна проницаемост се определя по формулата:

$$\mu_r = \frac{B_m}{H_m} \cdot \frac{1}{\mu_0}$$

4. Построяване на хистерезисния цикъл – прави се за предварително зададена максимална стойност на индукцията  $B_m$  (например  $B_m = 1 \text{ T}$ ). Процедурата проследява непрекъснатото изменение на  $B$  и  $H$  по контура на хистерезисния цикъл. Комутацията на превключвателите К и П се извършва в такъв ред, че промяната на магнитното състояние на образеца да следва показаните посоки. (Фиг.11.8)



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

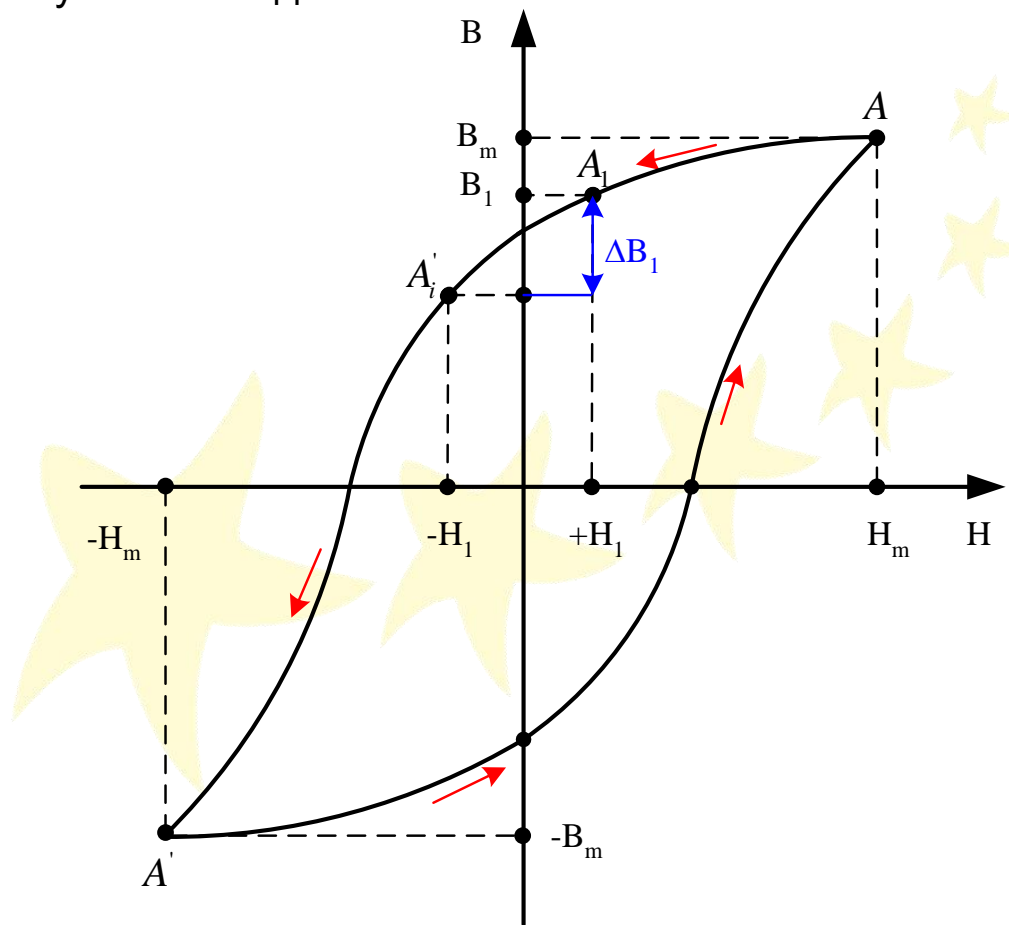
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд



Изследване на ферромагнитни материали при постоянно намагнитване –  
индукционно-импулсен метод



Фиг.11.8



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през  
целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

## Изследване на феромагнитни материали при променливо намагнитване

При измерванията трябва да се обърне внимание на някои специфични особености:

1. Величините  $B$  и  $H$  се характеризират с амплитудна, ефективна, средна или моментна стойност.
2. Резултатите се зависят от формата на  $B$  и  $H$ , които както бе посочено в т. 2. *Динамични характеристики на феромагнитните материали*, не могат да бъдат едновременно синусоидални. Най-често се работи със синусоидална индукция и несинусоидален интензитет и по-рядко с обратното.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



## Изследване на феромагнитни материали при променливо намагнитване

Първият режим се постига като намагнитващата намотка  $w_1$  се захранва от генератор със строго синусоидална форма на напрежението  $U(t)$  и практическа липса на активни съпротивления във веригата. Допуска се единствено образцов и с много малко съпротивление измервателен резистор. Оттук, според закона за електромагнитната индукция, следва, че индукцията  $B$  също ще е синусоидална.

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -w_1 \cdot S_M \cdot \frac{dB}{dt} \Rightarrow B(t) = -\frac{1}{w_1 \cdot S_M} \cdot \int e \cdot dt$$

Такъв режим се използва при прилагане на следващите два метода за изследване на феромагнитни материали:



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

## Метод с електроннолъчев осцилоскоп (ЕЛО)

Методът се основава на възможността да се получи върху екрана на ЕЛО динамичният хистерезисен цикъл на изследваният феромагнитен материал. Оттам могат да се получат също така и динамичната основна крива на намагнитване, амплитудната магнитна проницаемост  $\mu_a$ , остатъчната индукция  $B_r$  и коерцитивния интензитет  $H_C$ .

Предимства на метода са възможността за непосредствено наблюдение на хистерезисния цикъл и формата на несинусоидалния намагнитващ ток, високата чувствителност и възможност за приложение при промишлена и висока честота (до 100kHz). Образците са във формата на тороид, като метода може да се прилага включително и при много малки размери на пробата.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

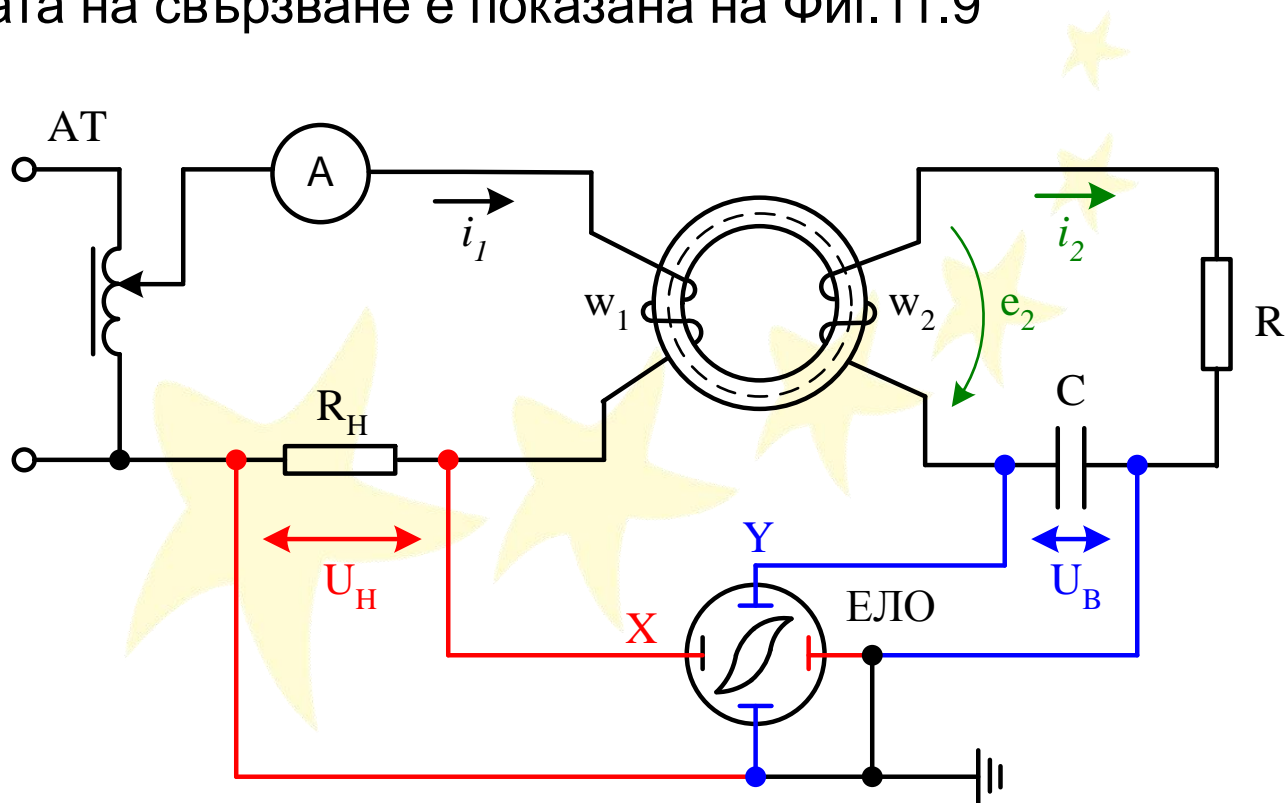
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



# Изследване на феромагнитни материали при променливо намагнитване

Схемата на свързване е показана на Фиг.11.9



Фиг.11.9



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

За да се получи хистерезисният цикъл на екрана на ЕЛО е необходимо на входовете на канал Y (вертикално отклонение) и канал X (хоризонтално отклонение) да се подадат напрежения  $U_B$  и  $U_H$ , пропорционални и във фаза съответно на моментните стойности на индукцията  $B_t$  и интензитета  $H_t$ .

Напрежението  $U_H$  се определя като напрежителен пад върху резистора  $R_H$  при протичане на намагнитващият ток  $i_1$ . Прилагайки закона за пълният ток може да се запише, че:

$$H_t \cdot l_{cp} = w_1 \cdot i_1 \quad \Rightarrow \quad U_H = R_H \cdot i_1 = \frac{R_H \cdot l_{cp}}{w_1} \cdot H_t$$

т.е. напрежението  $U_H$  е пропорционално и във фаза със моментната стойност на интензитета  $H_t$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Изследване на феромагнитни материали при променливо намагнитване

Сигналът от измервателната намотка  $w_2$  се подава към пасивен интегратор  $R$ - $C$  верига, за която е изпълнено условието  $R \gg X_C$ .

Напрежението  $U_B$  на изхода на интегратора е:

$$U_B = \frac{1}{C} \int i_2 \cdot dt \approx \frac{1}{C} \int \frac{e_2}{R} \cdot dt$$

Прилагайки закона за електромагнитната индукция може да се запише, че:

$$e_2 = -w_2 \cdot S_M \cdot \frac{dB_t}{dt} \quad \Rightarrow \quad U_B = \frac{w_2 \cdot S_M}{R \cdot C} \cdot B_t$$

т.е. напрежението  $U_B$  е пропорционално и във фаза със моментната стойност на индукцията  $B_t$ .



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

## Метод с апарат на Епщайн

При използването на този метод освен динамичната основна крива на намагнитване и амплитудната магнитна проницаемост могат да се определят и феромагнитните загуби в образеца (лентов материал). Принципната схема на метода е показана на Фиг.11.10.

Магнитното поле в апарата на Епщайн се създава от тока  $i_1$  протичащ през намагнитващата намотка  $w_1$ . Работи се в режим на синусоидална индукция, следователно зависимостта  $H(t)$  (респ.  $i_1(t)$ ) е несинусоидална.  $S_M$  е сечението на пакетите от феромагнитните ленти, а  $l_{cp}$  е дължината на средната магнитна линия на образеца.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

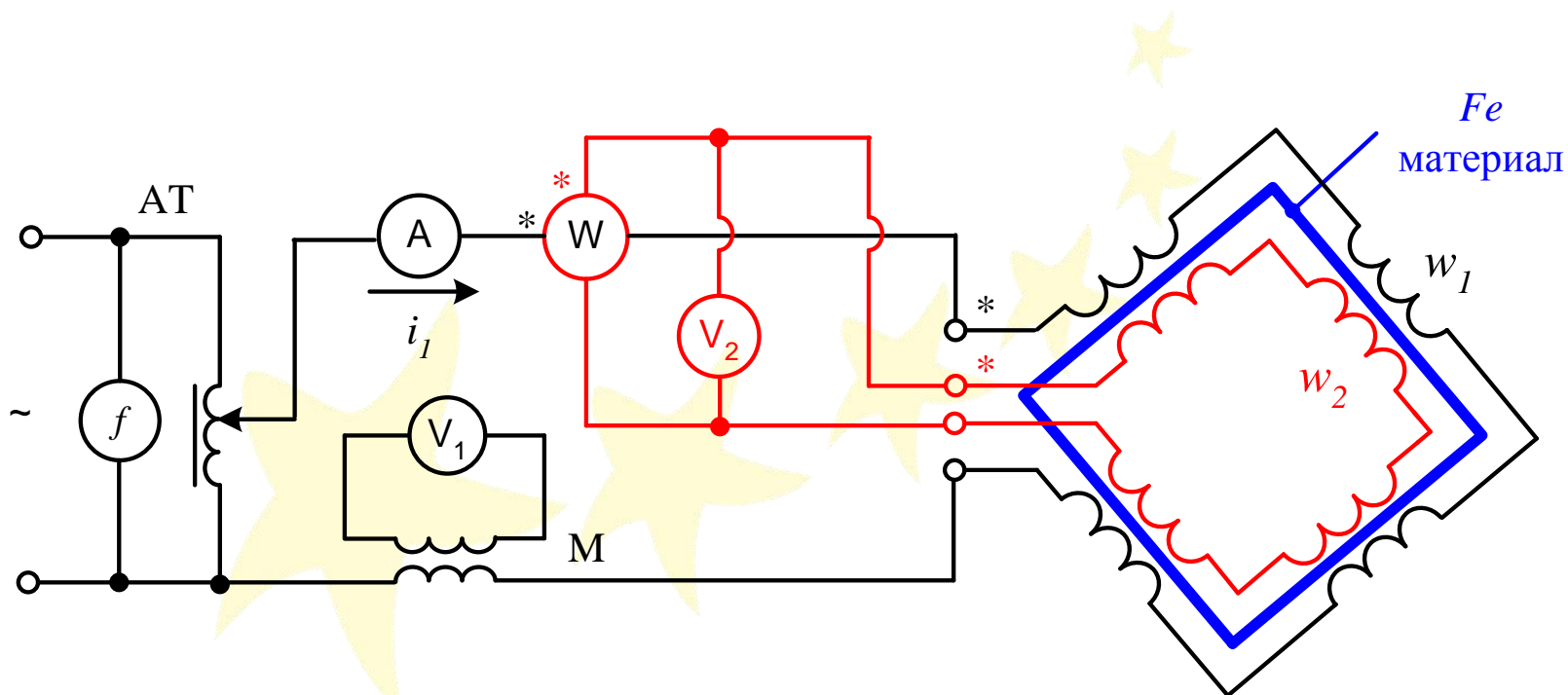
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!





# Изследване на феромагнитни материали при променливо намагнитване



Фиг.11.10



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO01--4.3.04-0042  
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през  
целия живот и развитие на компетенции”  
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

За построяването на динамичната основна крива на намагнитване е необходимо да се получат амплитудните стойности  $H_m$  и  $B_m$  при зададена честота на захранващото напрежение  $f$ .

### 1. Амплитудна стойност на интензитета на магнитното поле $H_m$

От закона за пълния ток следва, че амплитудата на тока в намагнитващата намотка е:

$$I_{1m} = \frac{H_m \cdot l_{cp}}{w_1}$$

Амплитудата на несинусоидалния ток  $I_{1m}$  се намира чрез използването на взаимната индуктивност  $M$  на двойка бобини и цифровият волтметър  $V_I$  за определяне на ефективната стойност на напрежението  $U_H \approx E_H_{ef}$  във втората ѝ бобина (Фиг.11.10).



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

Изследване на феромагнитни материали при променливо намагнитване

$$E_{H\text{ef}} = 4,44 \cdot f \cdot I_{1m} \cdot M = 4,44 \cdot f \cdot M \cdot \frac{l_{cp}}{w_1} \cdot H_m$$
$$\Rightarrow H_m \approx \frac{U_H \cdot w_1}{4,44 \cdot f \cdot M \cdot l_{cp}}$$

2. Амплитудна стойност на индукцията на магнитното поле  $B_m$

Индуктираното напрежение в измервателната намотка  $w_2$  е:

$$E_{B\text{ef}} = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot S_M \cdot B_m$$

Напрежението  $U_B \approx E_{B\text{ef}}$  се измерва с цифровия волтметър за ефективна стойност  $V_2$ , откъдето следва, че:

$$B_m \approx \frac{U_B}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot S_M}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042  
„Организационна и технологична инфраструктура за учене през  
целия живот и развитие на компетенции”  
Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

### 3. Измерване на феромагнитните загуби.

Волтметърът  $V_2$  и напрежителната верига на ватметъра  $W$  са свързани към измервателната намотка  $w_2$ , която практически работи в режим близък до празен ход, поради големите входни съпротивления на уредите (цифрови волтметър и ватметър, чиито загуби практически могат да се пренебрегнат)

При тази постановка отчетената от ватметъра мощност  $P_W$  практически се определя от феромагнитните загуби  $P_{XB}$  в образеца:

$$P_{XB} \approx \frac{w_1}{w_2} \cdot P_W$$

Специфични феромагнитни загуби за единица маса  $p_{XB}$  са равни на:

$$p_{XB} = \frac{P_{XB}}{m} \quad \text{където } m \text{ е масата на образеца.}$$



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”, съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
Инвестира във вашето бъдеще!



Европейски социален фонд

# ЛИТЕРАТУРА

---

- *Електрически измервания* – под общата редакция на проф. Борис Матраков, София, ИПК при ТУ, 1999
- *Електрически измервания* – под общата редакция на проф. Ал. Балтаджиев, София, ДИ Техника, 1977
- Иванов Ив., Ив. Калчев, Ив. Коджабашев и др. *Ръководство за лабораторни упражнения по Електрически Измервания*, София, 2000г.



Европейски съюз

ПРОЕКТ BG051PO001--4.3.04-0042

*„Организационна и технологична инфраструктура за учене през целия живот и развитие на компетенции”*

Проектът се осъществява с финансовата подкрепа на  
Оперативна програма „Развитие на човешките ресурси”,  
съфинансирана от Европейския социален фонд на Европейския съюз  
*Инвестира във вашето бъдеще!*

