



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

Катедра “Електронна техника и микроелектроника”

Анализ, Моделиране и Проектиране на Преобразувателни Устройства

„МАГНИТНИ МАТЕРИАЛИ ЗА СИЛОВАТА ЕЛЕКТРОНИКА”

ас. д-р инж. Георги Тодоров Николов



Състояние на проблема

Основни компоненти на типично силово електронно устройство:

Силов електронно устройство

Електронни ключове

Магнитни компоненти

Управляваща схема

- Тиристори
- Биполярни транзистори
- MOSFET
- IGBT

- Силициева стомана
- Сплави на желязото с никел и алуминий
- Феритни материали
- Аморфни и нанокристални материали

- Транзисторни схеми
- Операционни усилватели
- Специализирани интегрални схеми
- Микроконтролери и микропроцесори



Глава I - Обзор на проблема



- Съпоставка на използваните в силовата електроника магнитомеки материали (МММ);
- Обзор на съществуващите математични модели на магнитните загуби в МММ;
- Анализ и оценка на различните методи и средства за измерване на загубите в силовата електроника и магнитните компоненти.
- Обобщение на техниките за измерване на температурата и описание на методите за топлопренасяне на магнитни компоненти
- Обзор на методиките за проектиране на магнитни компоненти



Глава I - Обзор на проблема

Предимства на нанокристалните МММ



**Нанокристален
Материал
Vitroperm 500F**

**Феритен
Материал
3F3**

➤ По-висока индукция на насищане:

1,2Т

0,4Т

➤ По-висока относителна магнитна проницаемост:

10000

2000

➤ По-ниски магнитни загуби:

37kW/m³

72kW/m³

➤ По-висока работна температура:

150°C


100°C

➤ Разнообразие от форми и размери

ограничено

голямо





Моделиране на параметри и загуби на магнитомеки материали



Моделиране на феритни материали

Уравнение на Стейнмец (Steinmetz)

$$P = k \cdot f^\alpha \cdot B_p^\beta \quad (1)$$

където

P са средните загуби в магнитния материал за единица обем;

k, α, β – коефициент;

f - честотата на синусоидалното напрежение;

B_p - амплитудната стойност на магнитната индукция;



Моделиране на феритни материали

“Естествено разширяване на уравнението на Стейнмец” (ЕРУС) за феритни материали при несинусоидално напрежение

$$P_{NSE} = \left(\frac{B_{pp}}{2} \right)^{\beta-\alpha} \frac{k_N}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^\alpha dt \quad (2) \quad k_N = \frac{k}{(2\pi)^{\alpha-1} \int_0^{2\pi} |\cos\theta|^\alpha d\theta} \quad (3)$$

полумостова схема на свързване

$$P_{NSE} = k_N (2f)^\alpha B_p^\beta (D^{1-\alpha} + (1-D)^{1-\alpha}) \quad (4)$$

мостова схема на свързване

$$P_{NSE} = k_N (2f)^\alpha B_p^\beta (2D^{1-\alpha}) \quad (5)$$

където f е работната честота;

B_p - амплитудната стойност на магнитната индукция;

D - коефициент на запълване на правоъгълният сигнал.



Моделиране на феритни материали

Сравнение на ЕРУС с друг модел

Модифицираното уравнение на Стейнмец (Modified Steinmetz Equation)

$$P_{MSE} = k f_{eq}^{\alpha-1} B_p^\beta f \quad (6)$$

$$f_{eq} = \frac{2}{\left(2\pi \frac{B_{pp}}{2}\right)^2} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt}\right)^2 dt \quad (7)$$

където f_{eq} е 'еквивалентна честота';

f - работната честота;

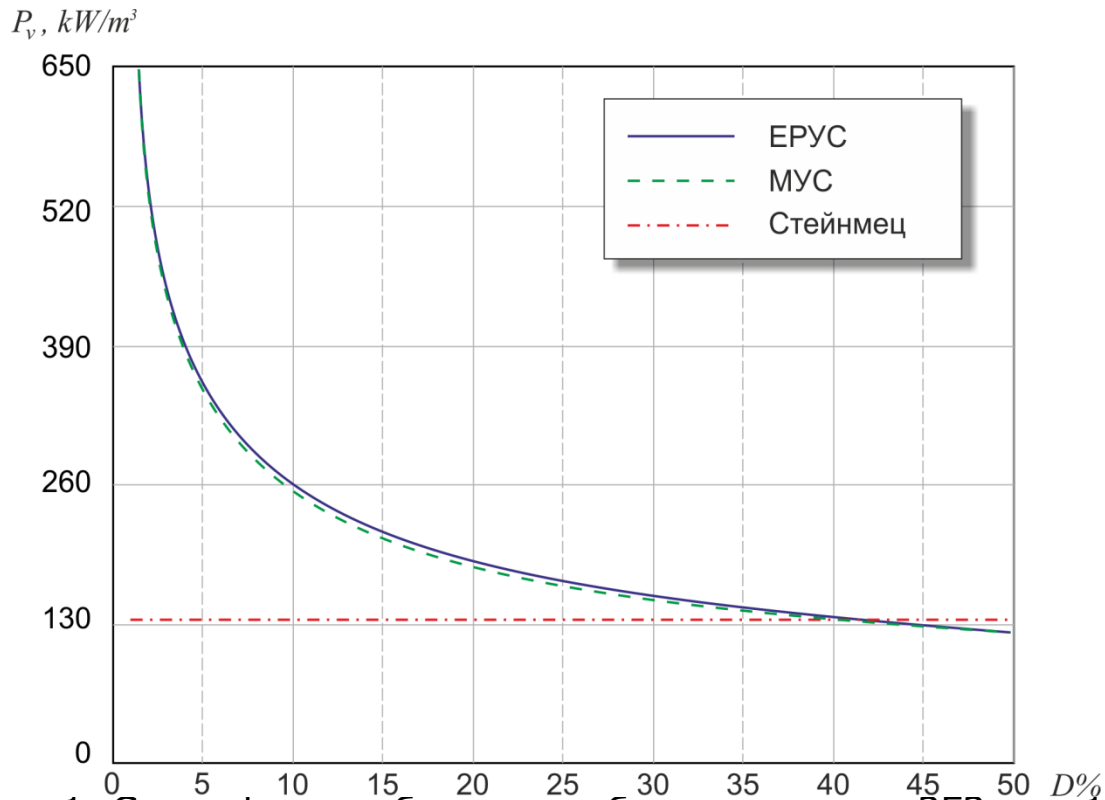
B_p - амплитудната стойност на магнитната индукция;

α, β - параметри на материала определени от синусоидални измервания.



Моделиране на феритни материали

Графично представяне на резултатите от проведеното изследване на предложения и съществуващите модел



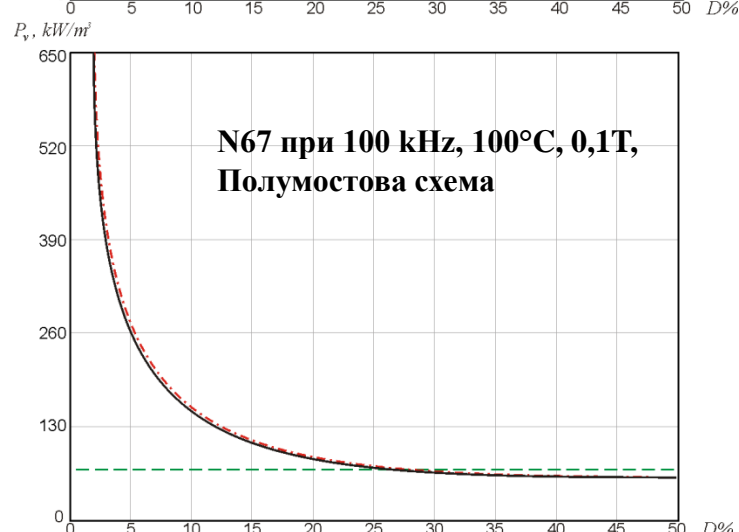
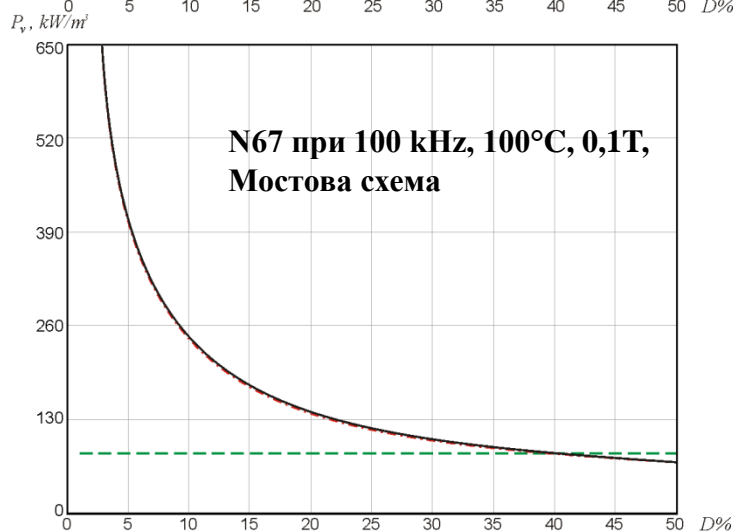
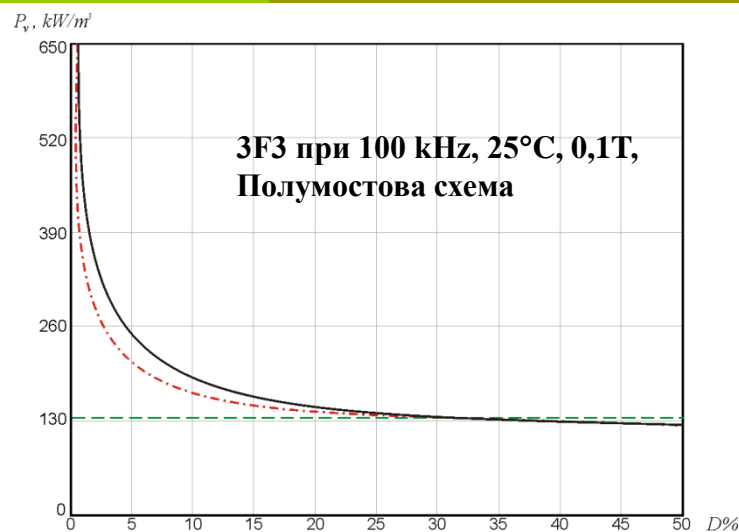
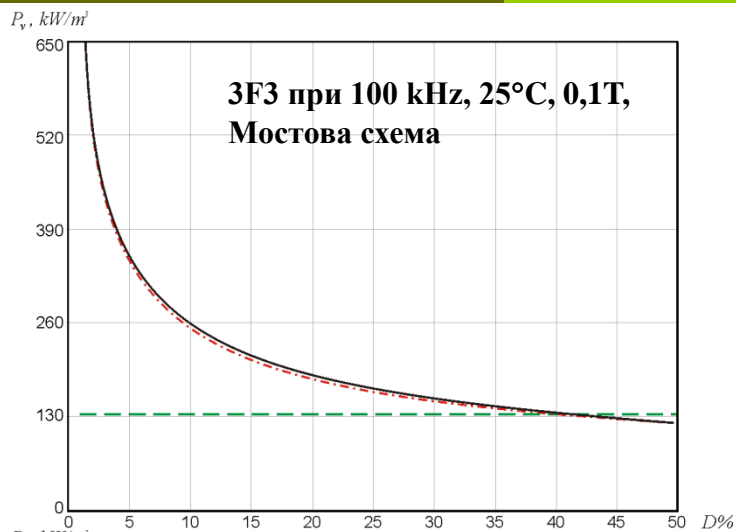
ЕРУС спрямо МУС:
4.4% максимална разлика
2.3% средна разлика

Уравнението на Стейнмец дава сходни резултати само при коефициент на запълване в диапазона 40-50%

Фиг. 1. Специфични обемни загуби за материал 3F3 при 100 kHz, 25°C, 0,1Т във функция от коефициента на запълване D, при мостова схема на свързване; ЕРУС е с плътна крива; класическото уравнение на Стейнмец е с тире точка, MSE е с пунктирана линия.



Моделиране на феритни материали



Фиг. 1. Специфични обемни загуби за материал във функция от коефициента на запълване D , ЕРУС е с пълтна крива; класическото уравнение на Стейнмец е с пунктирна линия, MSE е с тире точка.



Моделиране на нанокристални материали

Широкочестотен модел за ламинирани магнитни материали

Импедансна функция с константен ъгъл на загубите

$$z_h(s) = s \mu_h(s) = \mu_{hr} s^{1-2\delta_h/\pi} \quad (9)$$

където δ_h е ъгълът на загубите (в радиани);
 s - операторът на Лаплас ($s = j\omega$);
 μ_{hr} - хистерезисна референтна магнитна проницаемост.

От теорията за предавателните линии може да се напише следното уравнение

$$z_c(s) = s \mu_c(s) = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{s \mu}{\sigma}} \tanh\left(\sqrt{s \mu \sigma} \frac{d}{2}\right) \quad (10)$$

$$z_c(s) = s \mu_c(s) = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{\mu_{hr} s^{1-2\delta_h/\pi}}{\sigma}} \tanh\left(\sqrt{\sigma \mu_{hr} s^{1-2\delta_h/\pi}} \frac{d}{2}\right) \quad (11)$$



Моделиране на нанокристални материали

Широко честотна функция за комплексна магнитна проницаемост

$$z_g(s) = s\mu_g(s) = \mu_{gr}(s)^{1-2\delta_g/\pi} \quad (12)$$

$$\mu_w(s) = \frac{1}{\frac{1}{\mu_c(s)} + \frac{1}{\mu_g(s)}} \quad (13)$$

Предложената функция има следните характеристики:

- Обяснява поведението на материала при ниски и високи честоти, и комбинира ъгълът на загубите и амплитудата на магнитната проницаемост само в едно уравнение.
- Дава отговор как може да съществува ъгъл на загубите по-голям от $\pi/4$ (45°) при високи честоти, което се наблюдава при аморфните и нанокристални материали.
- Има само четири параметъра (при зададени съпротивление и дебелина на материала): μ_{hr} , δ_h , μ_{gr} и δ_g .

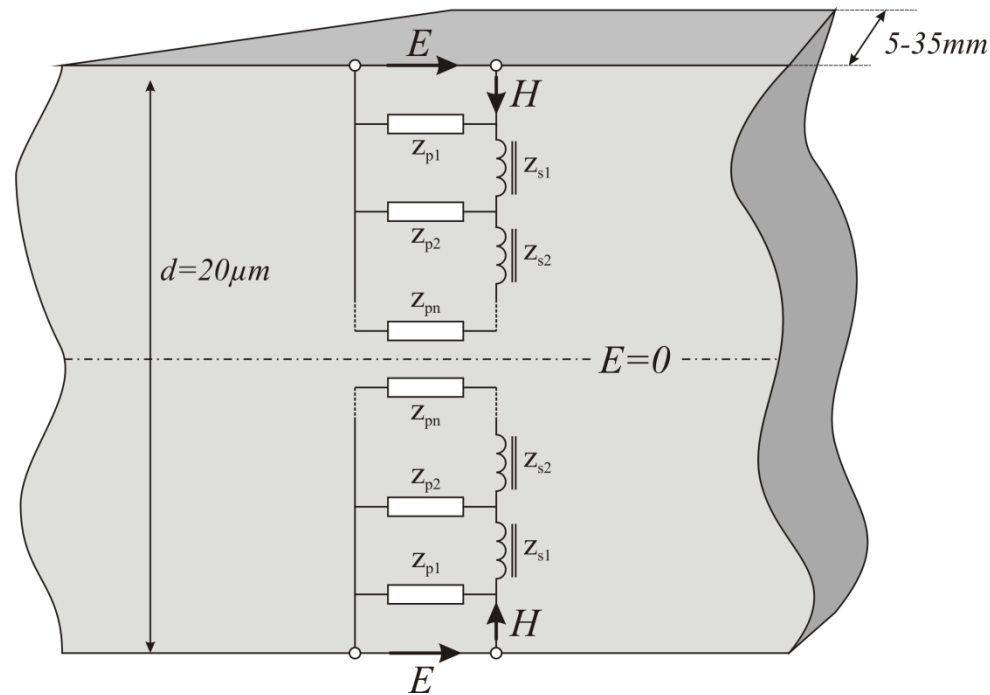
Моделът има и следните недостатъци:

- Използва други параметри от тези използвани в уравнението на Стейнмец
- Моделът се базира на линейна теория, което го прави валиден при дадено ниво на магнитната индукция и когато магнитната индукция не се променя много през дебелината на ламелата.
- Съпротивлението на материала може да се променя в зависимост от дълбочината на проникване на токовата плътност.



Моделиране на нанокристални материали

Практическа реализация на предложения модел



$$z_p = 1/(\sigma + j\omega\epsilon) \approx 1/\sigma \quad (14)$$

$$z_s(j\omega) = j\omega\mu_h(j\omega) = \mu_{hr} \cdot [j\omega]^{1-2\delta_h/\pi} \quad (15)$$



Моделиране на нанокристални материали

$$S(j\omega) = -H_{rms}^2 j\omega \mu_w(j\omega) \quad P(D) = \left[A_e L_e \sum_{n=1}^{100} \left(\frac{V_{np}(D, n)}{2\pi f n A_e N} \right)^2 \operatorname{Re} \left(\frac{\pi f n}{z_c(j\omega)} \right) \right] \quad (16)$$

(17)

където A_e е ефективното сечение на магнитният материал;

L_e – средната дължина на магнитната линия;

V_{np} – напрежението върху тествания образец;

D – коефициент на запълване;

N – брой навивки;

n – номер на хармоника;

f – работна честота

z_c – импедансна функция за комплексната магнитна проницаемост.

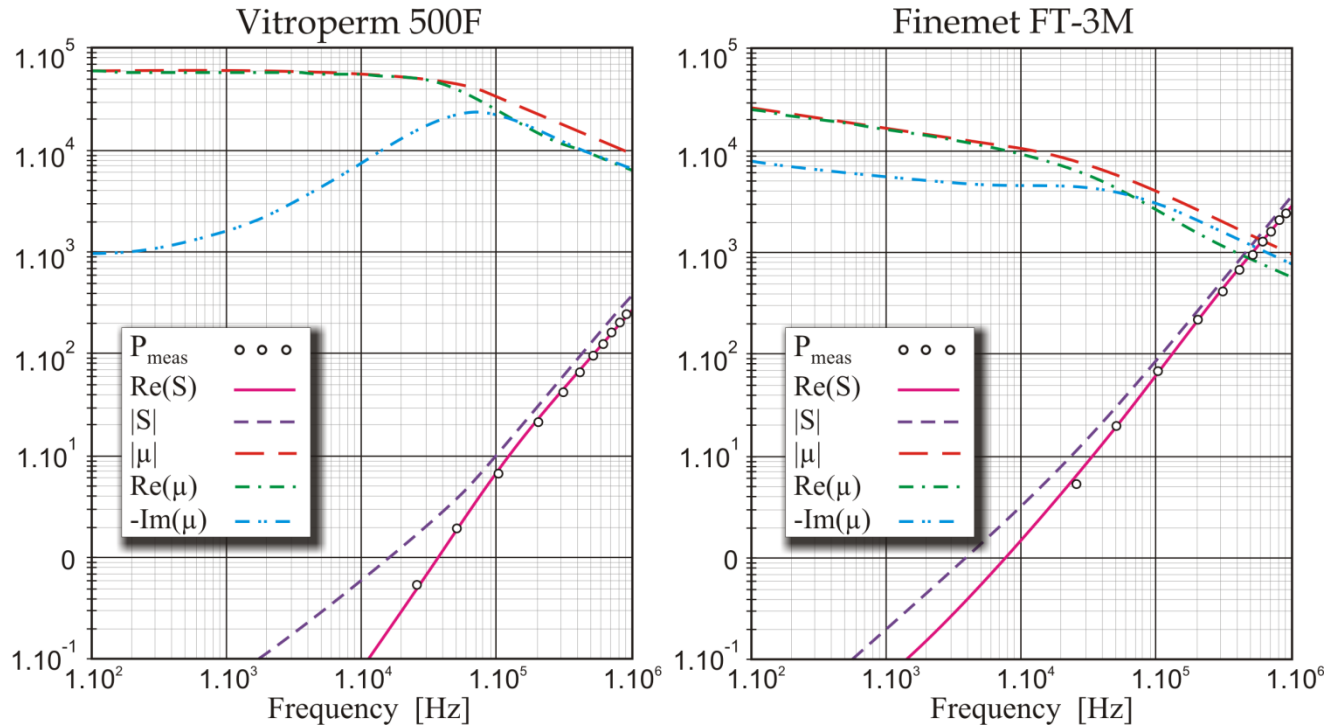
полумостова схема
$$V_{np}(D, n) = \frac{2}{\pi n} V_{dc}(D) \left[\sin(D\pi n) \right] \quad (18)$$

мостова схема
$$V_{np}(D, n) = \frac{2}{\pi n} V_{dc}(D) \left[2 \sin\left(\frac{\pi}{2} n\right) \cos\left[(0.5 - D)\pi n\right] \right] \quad (19)$$



Моделиране на нанокристални материали

Резултати при синусоидално напрежение

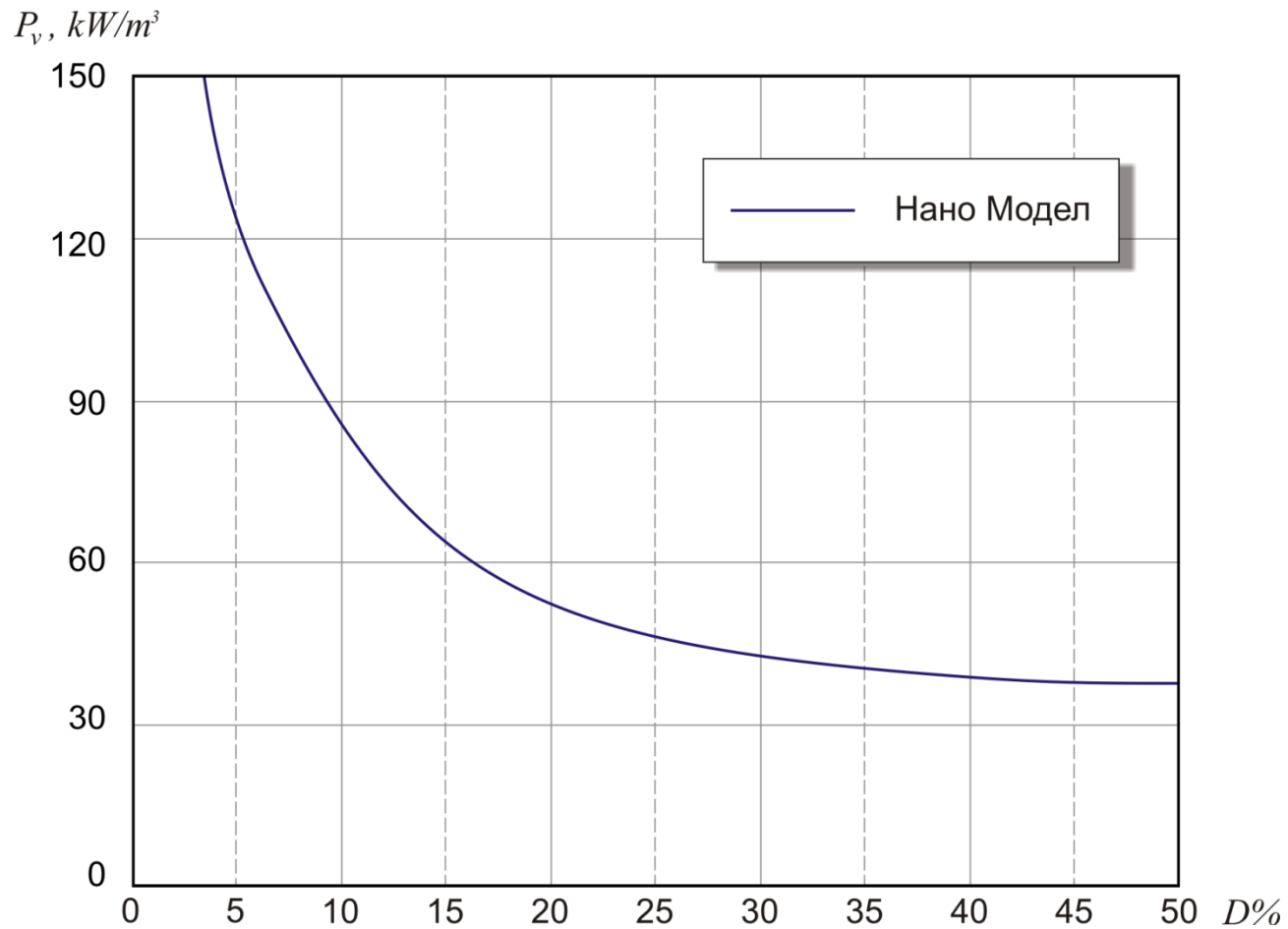


Фиг. 2.3 Измерени и изчислени данни за материал *Vitroperm 500F* и *Finemet FT-3M* при синусоидално напрежение. P_{meas} са експериментални данни, $Re(S)$ – специфични загуби в магнитопровода за единица обем (реалната част на пълната мощност) във [W/kg], $|S|$ пълната мощност за единица обем във [VA/kg], $|\mu|$ комплексната, $Re(\mu)$ реалната и $Im(\mu)$ имагинерната стойност на магнитна проницаемост.

В ляво - Vitroperm 500F, в дясно – FT-3M



Моделиране на нанокристални материали

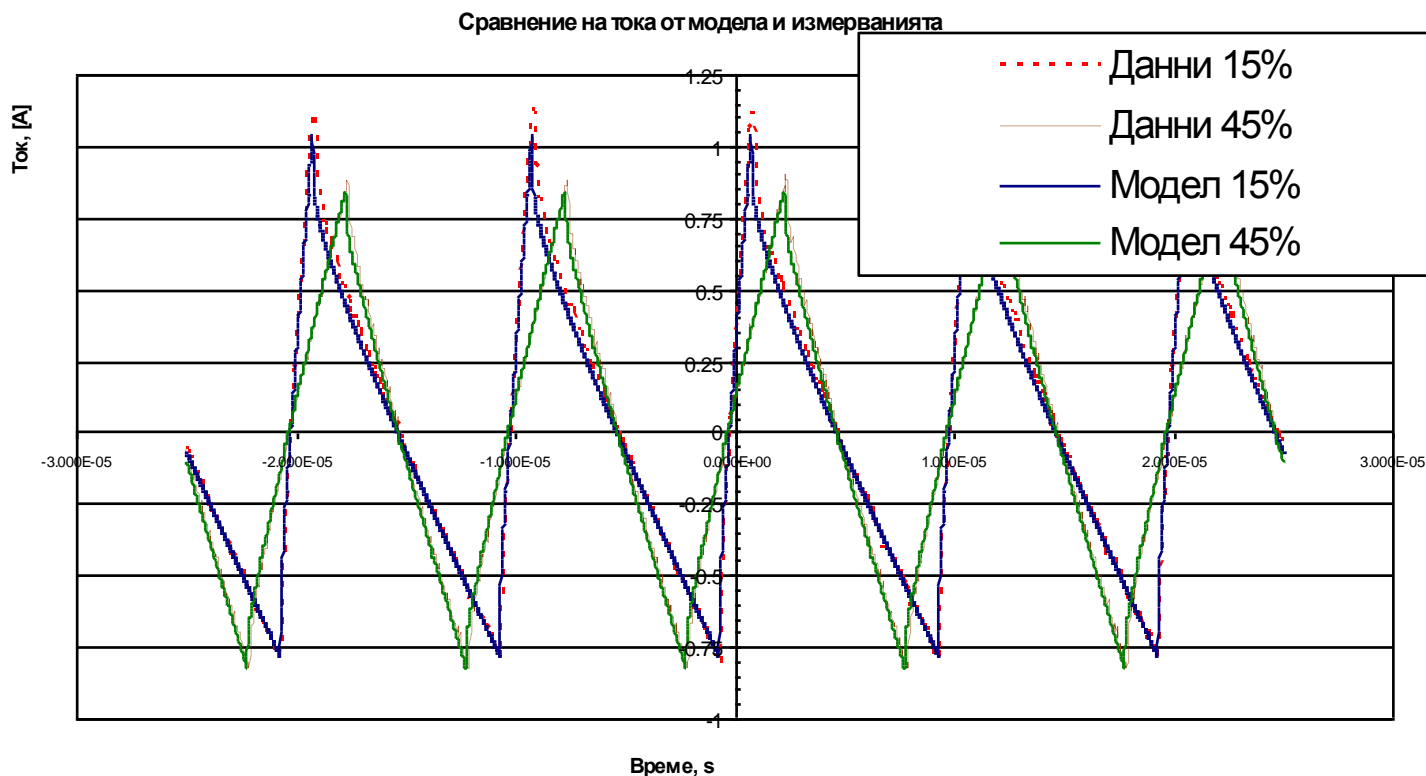


Фиг. 2.7 Специфични загуби в материал Vitroperm 500F получени при използване на предложения модел, 100°C , 100kHz , 100mT , мостова схема



Моделиране на нанокристални материали

$$i(D,t) = \frac{1}{N} \operatorname{Re} \left[\sum_{n=1}^{100} \left(\frac{V_{np}(D,n)}{A_e N} \right) e^{(j2\pi f nt)} \left(\frac{1}{z_c(j\omega)} \right) \right] \quad (20)$$

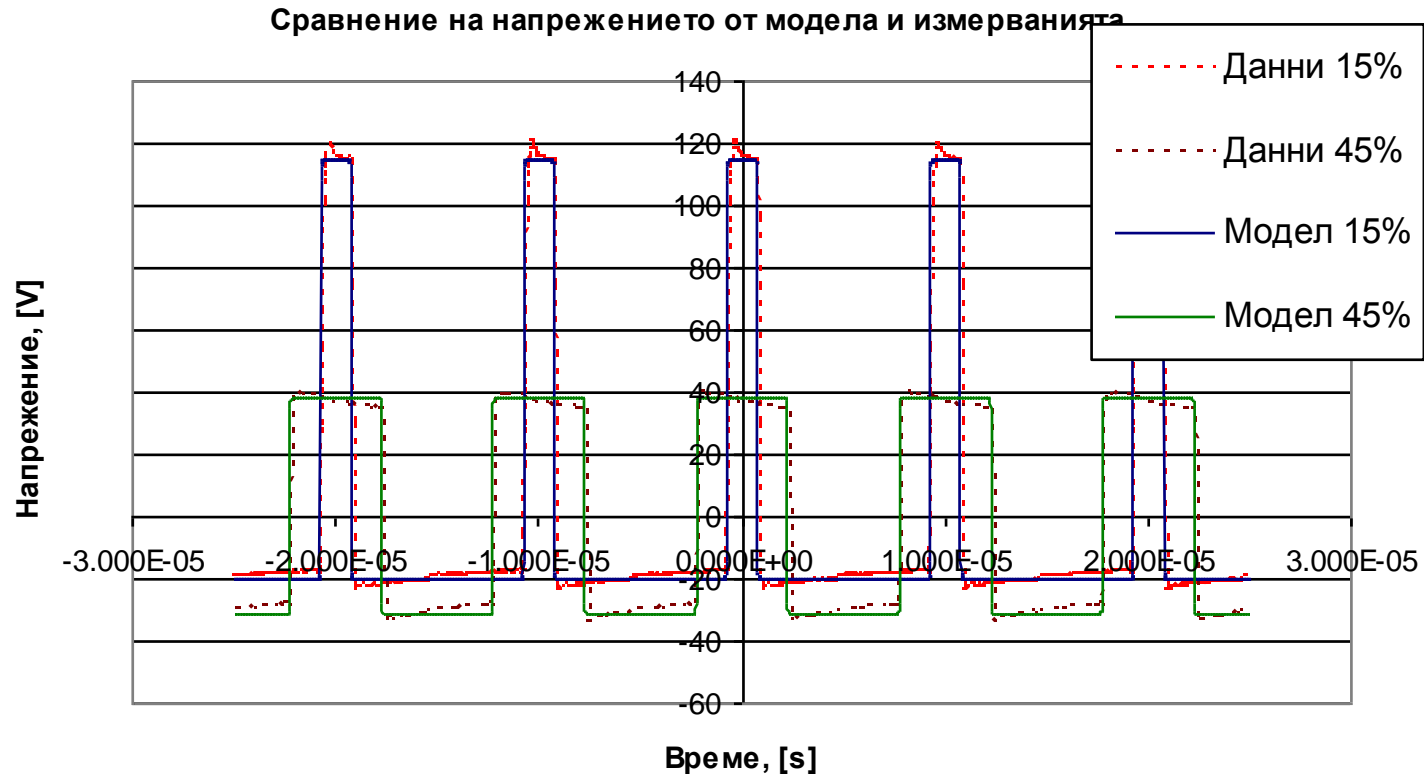


Фиг. 2.4 Данни от проведените измервания (пунктирна линия) и резултатът от модела за тока през тестваният компонент (плътна линия). Finemet FT-3M, 25°C, 100kHz, 0.1T, полумостова схема



Моделиране на нанокристални материали

$$V_{np}(D, n) = \frac{2}{\pi n} V_{dc}(D) \left[\sin(D \pi n) \right] \quad (21)$$



Фиг. 2.5 Данни от проведените измервания (пунктирна линия) и резултатът от модела за напрежението върху тестваният компонент (плътна линия). Finemet FT-3М, 25°C, 100kHz, 0.1Т, полумостова схема





**Получаване и обработка на
експериментални
данни за загубите в МММ**



Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

Основни блокове на тестовата система

- **Платформа** – осигуряваща необходимите форма и стойност на напрежението и тока;
- **Цифров запомнящ осцилоскоп със специализирани сонди** – осигурява измерването на напрежение, ток и магнитен поток;
- **Захранващ блок** – осигурява необходимото напрежение и ток за захранване на платформата
- **Калориметър** – потвърждава резултатите от цифровият осцилоскоп
- **Нагревател** – загрява МММ до необходимата температура;
- **Живачен и Безконтактен инфрачервен термометър** – измерват и следят температурата на МММ;



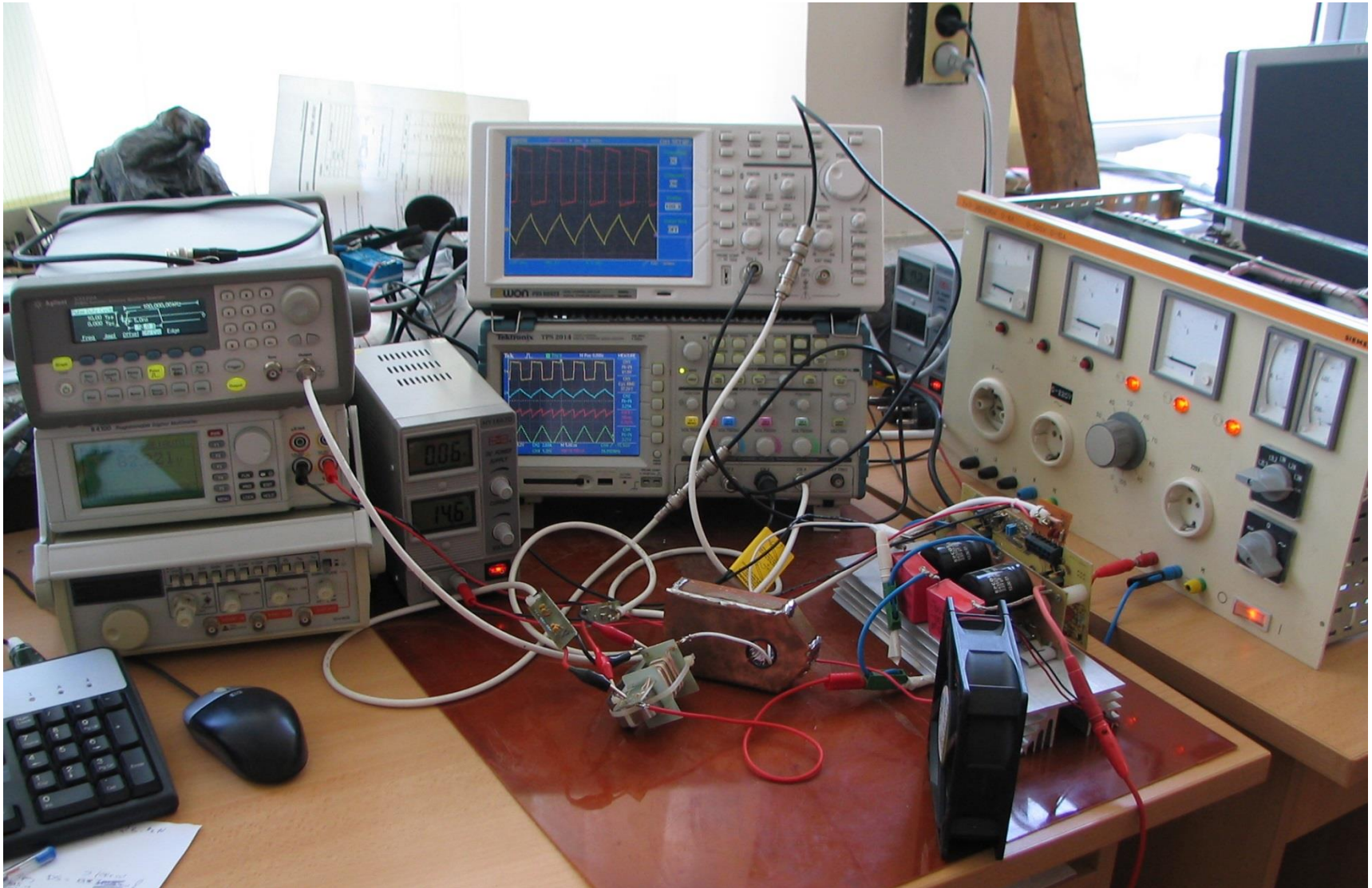
Предимства на системата

- Позволява измерването на:
 - Ток;
 - Напрежение;
 - Загуби;
 - Честота;
 - Температура.
- Много по-кратко време за провеждането на измерванията в сравнение с калориметричните измервания.
- Грешка на измерванията по-малка от 5%.



Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

Основни блокове на тестовата система





Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

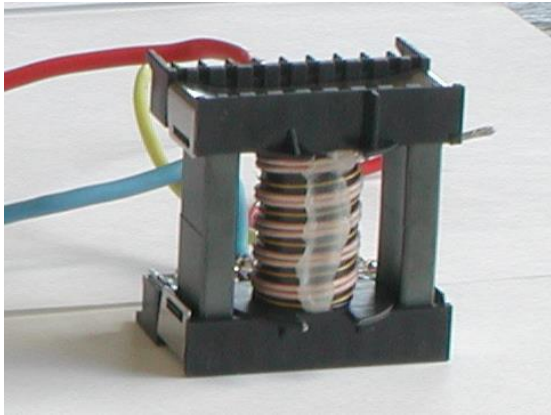
Опитни образци на магнитни материали

	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Материал	<i>3F3</i>	<i>N67</i>	<i>FT-3M</i>	<i>Vitroperm 500F</i>
Магнитопровод	<i>ETD44</i>	<i>E42/21/15</i>	<i>F3CC0010</i>	<i>W516-02</i>
Производител	<i>Ferroxcube</i>	<i>Epcos</i>	<i>Hitachi Metals</i>	<i>Vacuum-schmelze</i>
Брой навивки (основна и измервателна намотки)	5	5	5	5
Проводници в паралел	2	2	2	3
Омично съпротивление на основната намотка, mΩ	<i>15.3</i>	<i>17.6</i>	<i>14.2</i>	<i>6.9</i>
Индуктивност, μH	<i>82.0</i>	<i>90.1</i>	<i>126.8</i>	<i>1316</i>
Ефективно сечение на магнитопровода, mm ²	<i>173</i>	<i>178</i>	<i>172</i>	<i>76</i>
Тегло на магнитопровода, гр	94	88	197	79
Обем на магнитопровода, mm ³	17800	17300	27000	10700

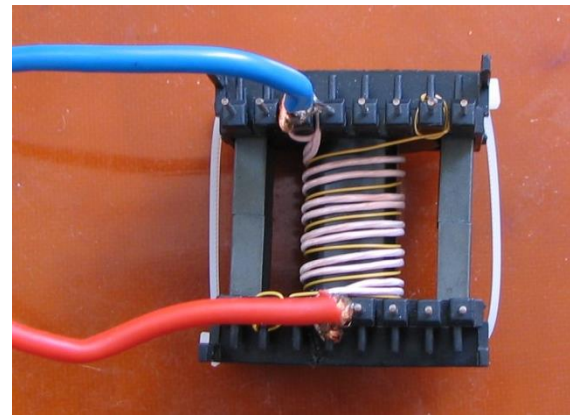


Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

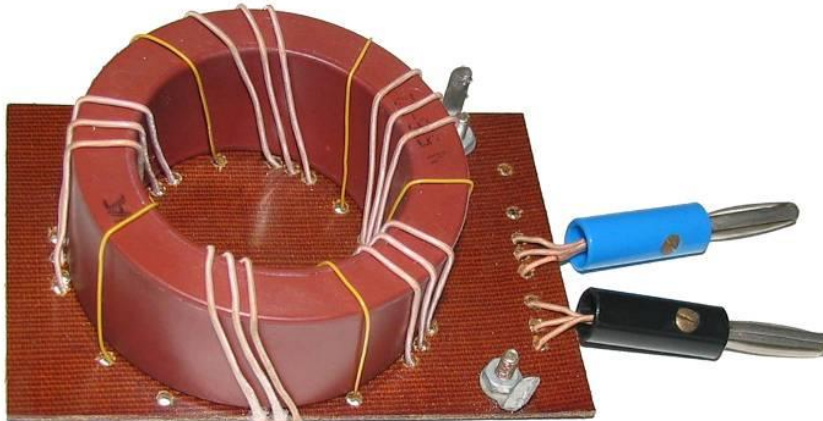
Опитни образци на магнитни материали



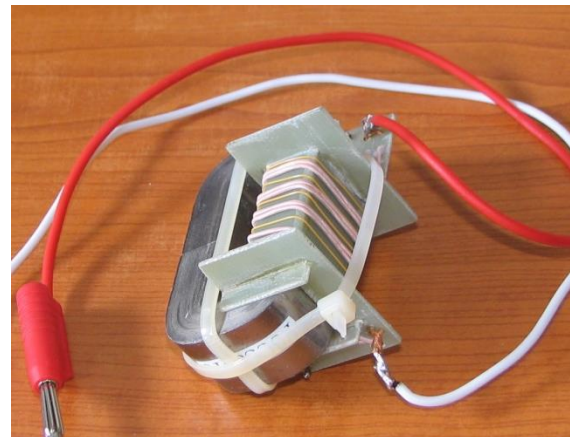
3F3, ETD44



N67, E42/21/15



Vitroperm 500F, W516-02



Finemet FT-3M, F3CC0010



Основни измервания

Измервания при правоъгълно напрежение

Мостова схема

25°C

100°C

Полумостова схема

25°C

100°C

Измервания при синусоидално напрежение

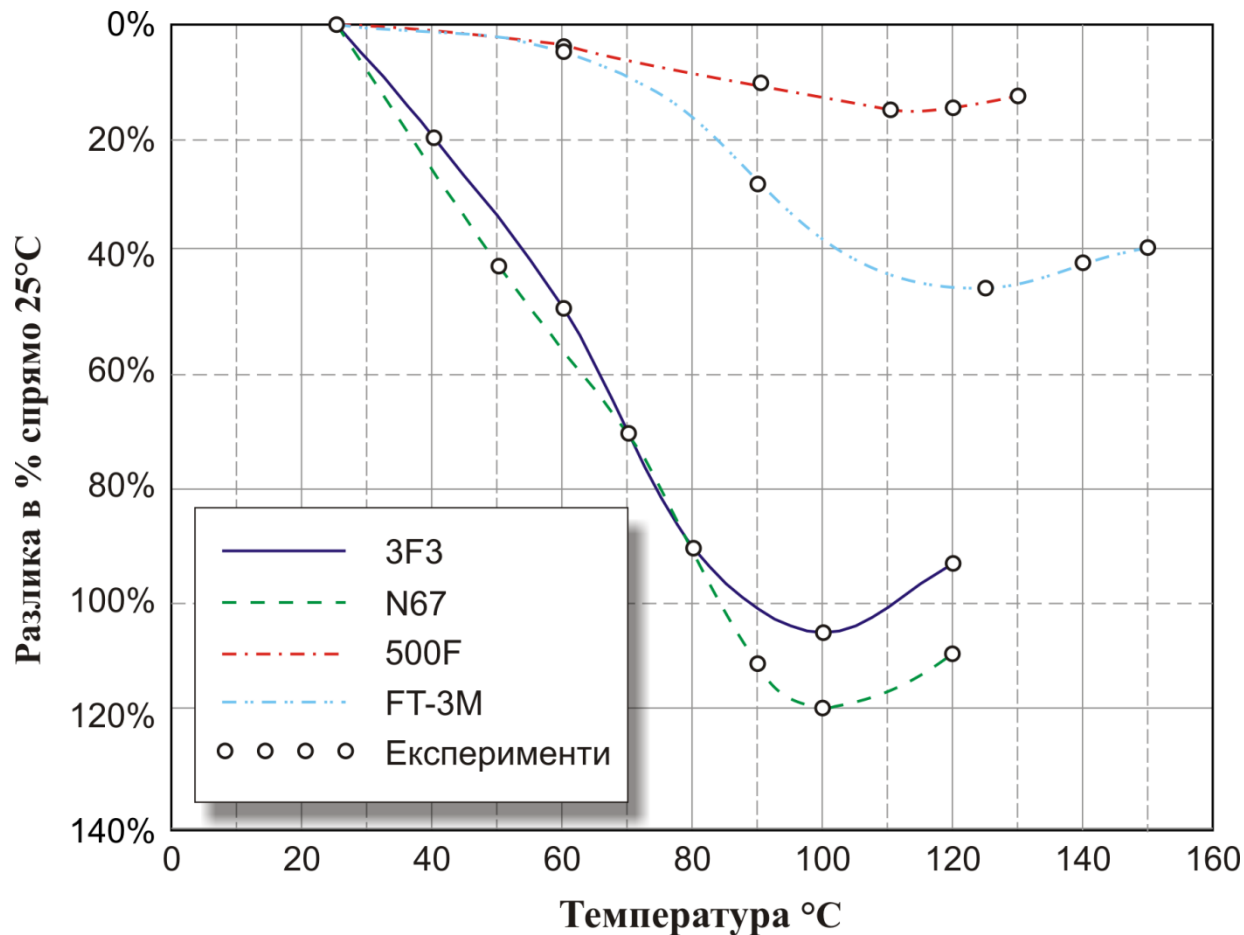
25°C

100°C



Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

Температурни измервания

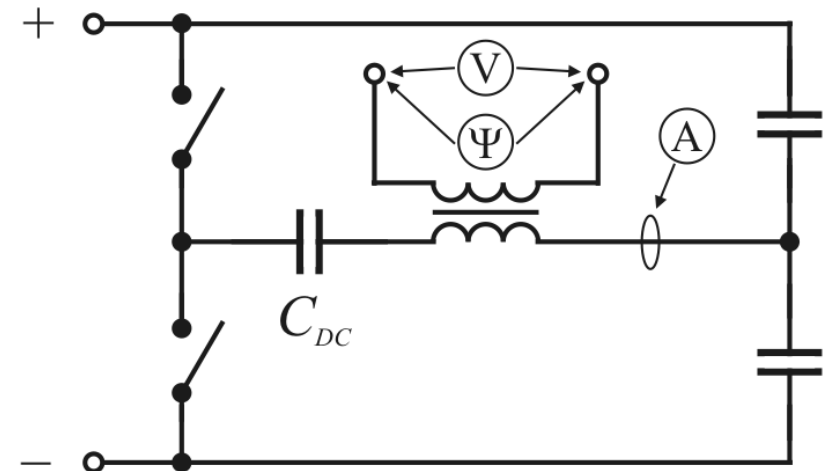
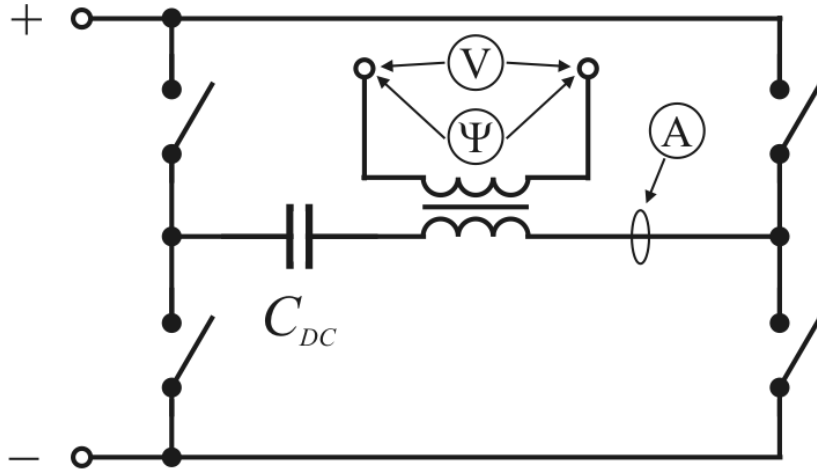


Фиг. 3.1 Зависимост на загубите на измерваните материали от температурата

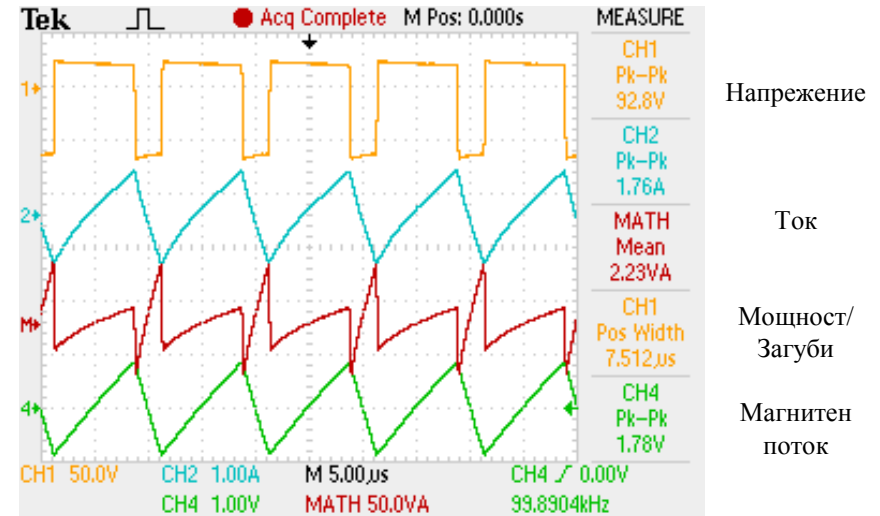
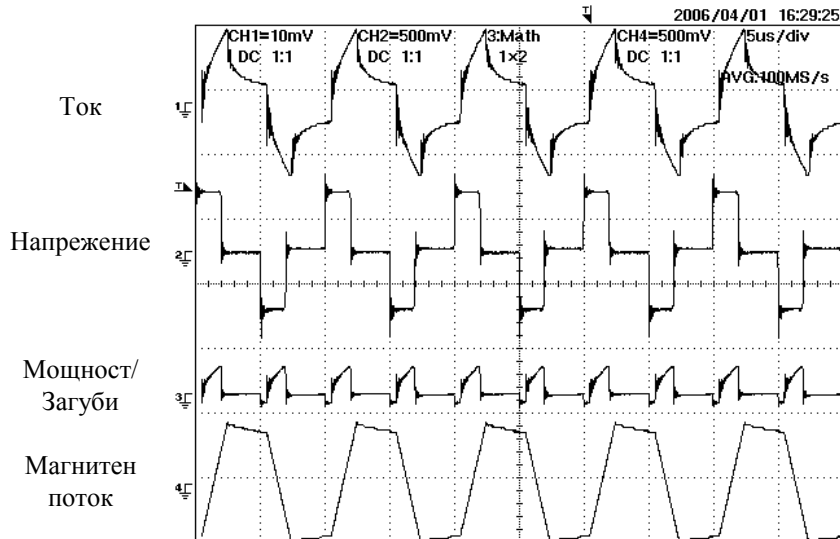


Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

Схеми на свързване при правоъгълно напрежение



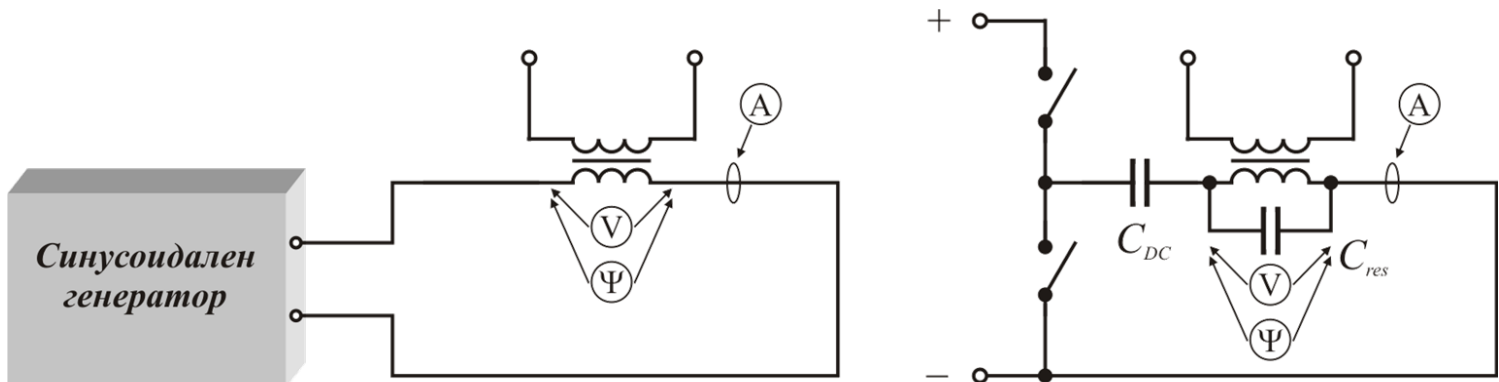
Фиг. 3.5 Опитна постановка и осцилограми при мостово и полумостово включване





Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

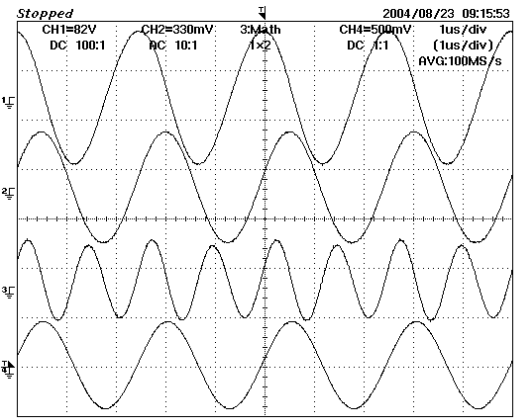
Схеми на свързване при синусоидално напрежение



Фиг. 3.5 Опитна постановка за ^{a)} провеждане на синусоидални измервания – чрез синусоидален генератор и резонанс с кондензатор.

Температура: 25°C,
 $B=0.1T$, $f = 400kHz$
 $U_{p-p} = 221.3V$
 $U_{rms} = 78.60V$
 $I_{p-p} = 758mA$
 $I_{rms} = 268.1mA$
 $P_{общи} = 3.593W$

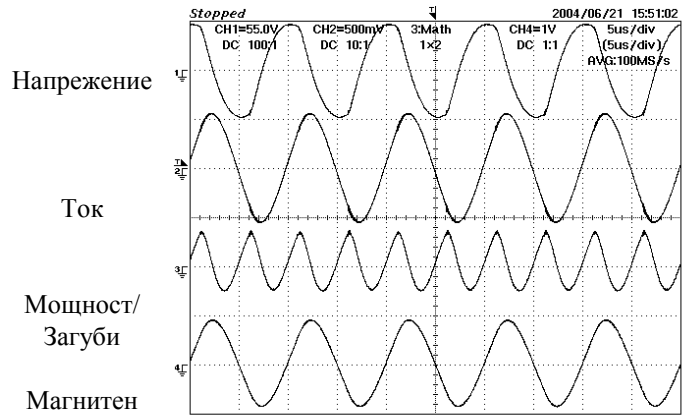
Разлика спрямо теоретичната стойност на ефективното напрежение
-0,46%



=Filter= Smoothing : OFF
 BW : FULL
 =Offset= CH1 : 0V
 CH2 : 0.000V
 CH3 : 0.000V
 CH4 : 0.000V
 =Record Length= Main : 1K
 Zoom : 100
 =Trigger= Mode : AUTO
 Type : EDGE CH4
 Delay : 0.0ns
 Hold Off : MINIMUM

Температура: 100°C,
 $B=0.2T$, $f = 100kHz$
 $U_{p-p} = 105.5V$
 $U_{rms} = 39.51V$
 $I_{p-p} = 1.106A$
 $I_{rms} = 0.381A$
 $P_{общи} = 1.549W$

Разлика спрямо теоретичната стойност на ефективното напрежение
-5,90%



=Filter= Smoothing : OFF
 BW : FULL
 =Offset= CH1 : 0.0V
 CH2 : 0.000V
 CH3 : 0.00V
 CH4 : 0.0V
 =Record Length= Main : 5K
 Zoom : 5K
 =Trigger= Mode : AUTO
 Type : EDGE CH2
 Delay : 0.0ns
 Hold Off : MINIMUM



Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

Подобряване на точността на измерванията по метода с осцилоскопа, чрез компютърен софтуер

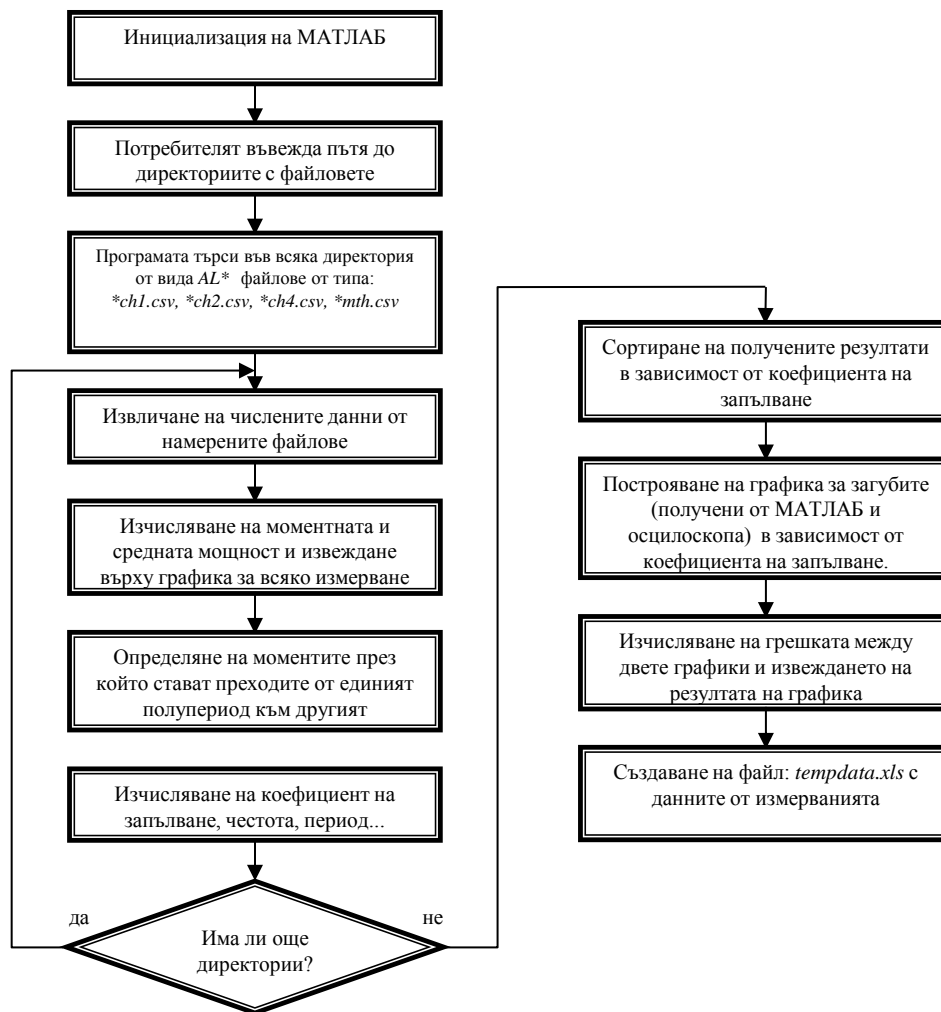
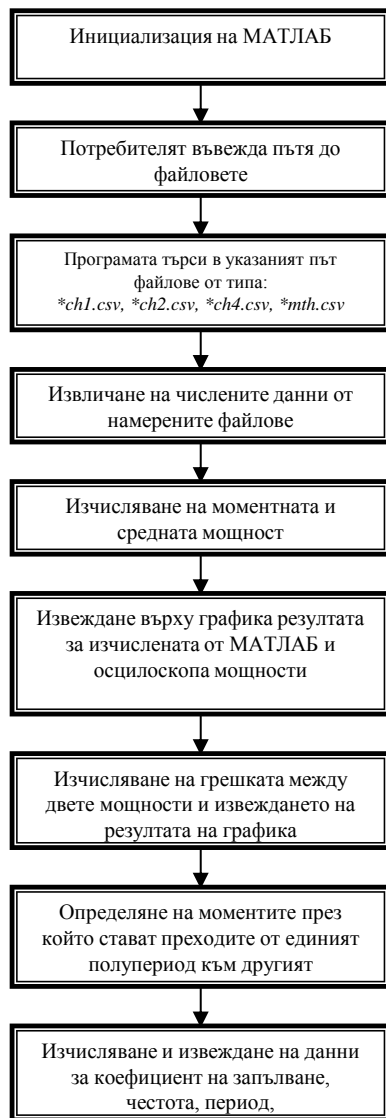
Таблица 3.2. Грешка на различните осцилоскопи при измерване на загубите за материал FT-3М, 100kHz, 25°C, 50%

Начин на измерване	Загуби	Абсолютна грешка	Относителна грешка	Необходимо време				
				установяване	измерване	прехвърляне	обработка	Общо
	W	W	%	min				
Калориметър	4,50	0,00	0,0%	30	<1	2	2	35
DL1540	4,57	0,07	1,6%	0	2	2	2	6
TPS2014 + МАТЛАБ	4,41	-0,09	-2,0%	0	2	<1	<1	3
PDS5022 + МАТЛАБ	4,36	-0,14	-3,2%	0	4	3	2	9
TPS2014	4,19	-0,31	-6,9%	0	2	2	2	6



Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

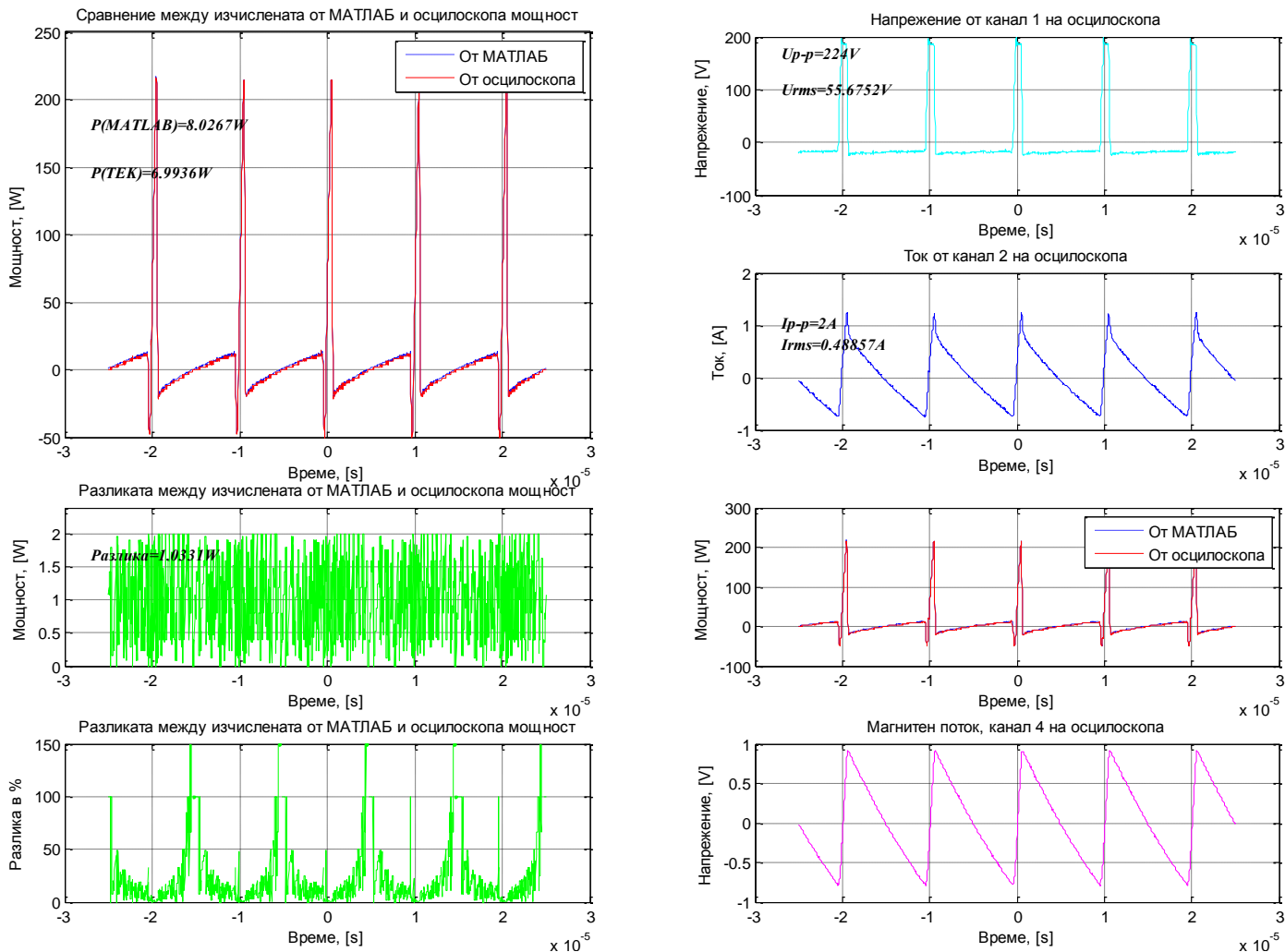
Подобряване на точността на измерванията по метода с осцилоскопа, чрез компютърен софтуер





Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

Подобряване на точността на измерванията по метода с осцилоскопа, чрез компютърен софтуер



Фиг. 3.5 Графики генерирани от МАТЛАБ и „get_power” за образец 3 с материал FT-3М, полумостова схема, коефициент на запълване 9%, при 100°C



Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

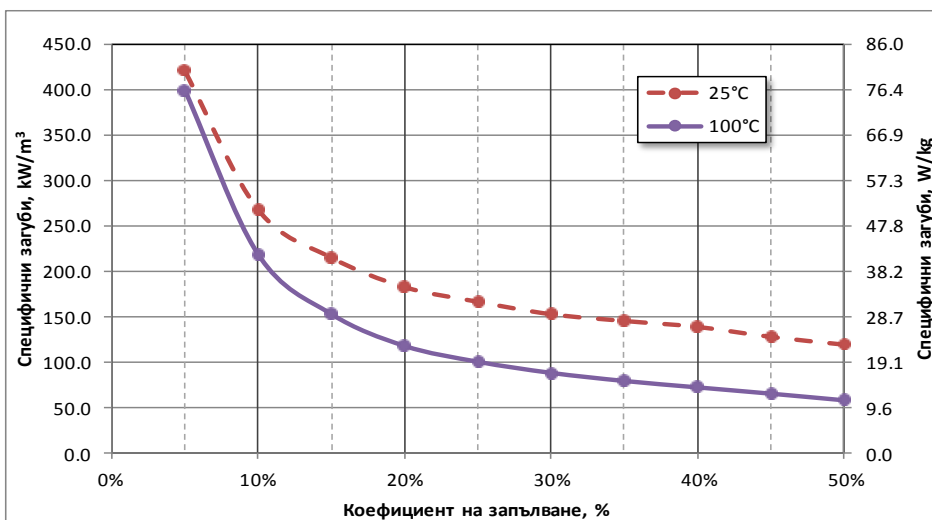
Получени резултати

D	U_{rms}	I_{rms}	I_{p-p}	$P_{общи}$	$P_{пров}$	$P_{мат}$	$P_{specific}$	$P_{specific}$
%	V	A	A	W	mW	W	kW/m ³	W/kg
50%	35.0	0.41	1.44	2.16	3.29	2.15	120.9	22.9
45%	36.2	0.43	1.42	2.31	3.41	2.31	129.5	24.5
40%	38.1	0.46	1.42	2.51	3.54	2.50	140.5	26.6
35%	40.3	0.48	1.42	2.62	3.69	2.62	147.2	27.9
30%	43.0	0.50	1.40	2.76	3.88	2.75	154.6	29.3
25%	46.7	0.52	1.42	3.00	4.12	3.00	168.5	31.9
20%	51.0	0.54	1.43	3.29	4.43	3.29	184.8	35.0
15%	59.1	0.55	1.42	3.88	4.86	3.87	217.5	41.2
10%	69.9	0.55	1.43	4.83	5.53	4.82	270.9	51.3
5%	96.0	0.55	1.45	7.57	6.92	7.56	424.8	80.4

Данни за материал 3F3, 0.1T, 100kHz, 25°C, мостова схема

D	U_{rms}	I_{rms}	I_{p-p}	$P_{общи}$	$P_{пров}$	$P_{мат}$	$P_{specific}$	$P_{specific}$
%	V	A	A	W	mW	W	kW/m ³	W/kg
50%	34.9	0.35	1.25	1.05	3.21	1.05	58.8	11.1
45%	36.4	0.39	1.24	1.18	3.32	1.18	66.2	12.5
40%	37.9	0.40	1.24	1.31	3.45	1.30	73.1	13.8
35%	40.2	0.42	1.23	1.43	3.60	1.43	80.2	15.2
30%	42.7	0.44	1.23	1.59	3.78	1.59	89.2	16.9
25%	46.1	0.45	1.23	1.81	4.00	1.81	101.6	19.2
20%	50.9	0.47	1.24	2.13	4.30	2.12	119.1	22.6
15%	56.5	0.49	1.26	2.76	4.71	2.75	154.5	29.3
10%	70.7	0.50	1.30	3.94	5.35	3.93	221.0	41.9
5%	95.6	0.54	1.40	7.18	6.68	7.18	403.2	76.3

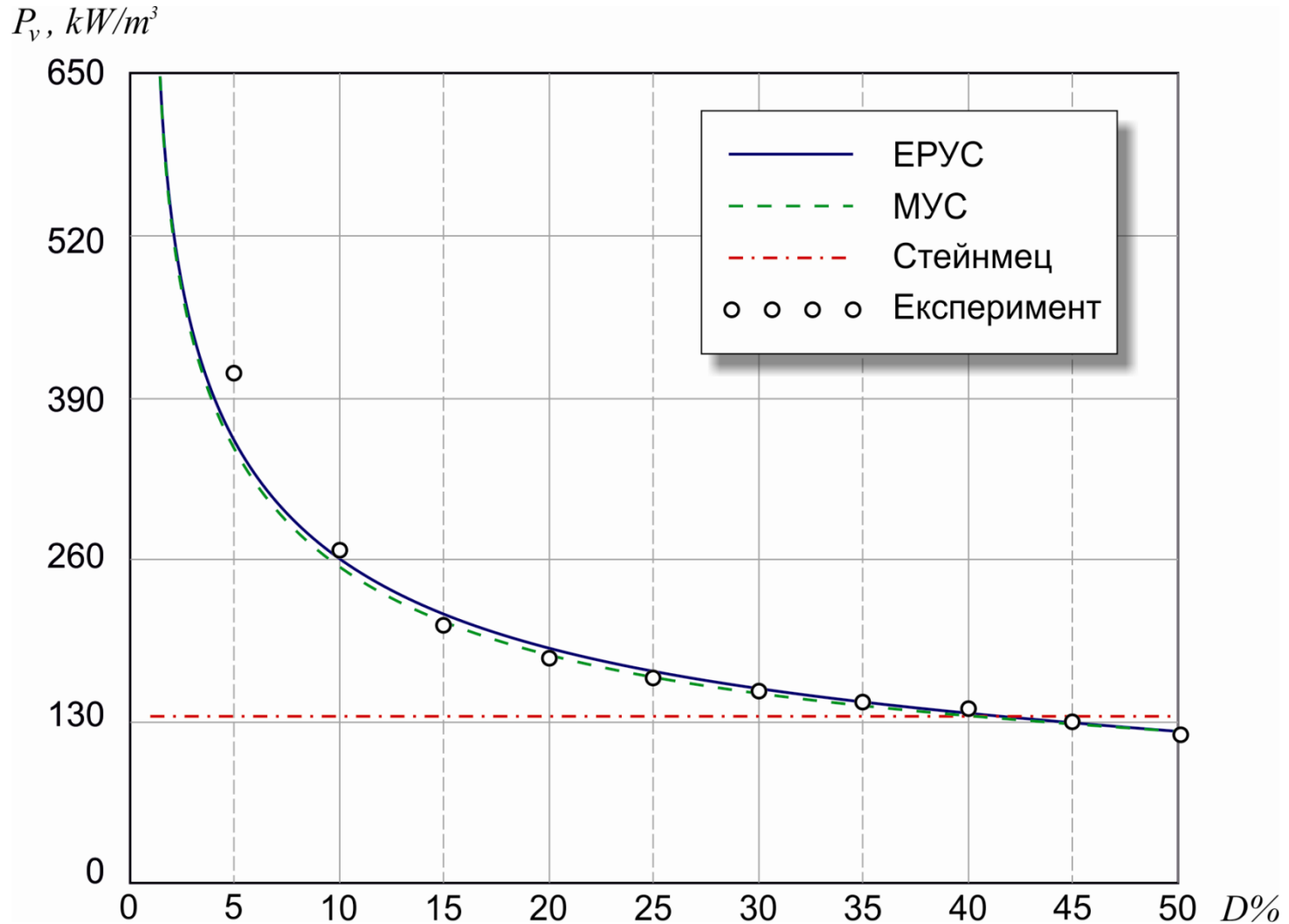
Данни за материал 3F3, 0.1T, 100kHz, 100°C, мостова схема





Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

Получени резултати

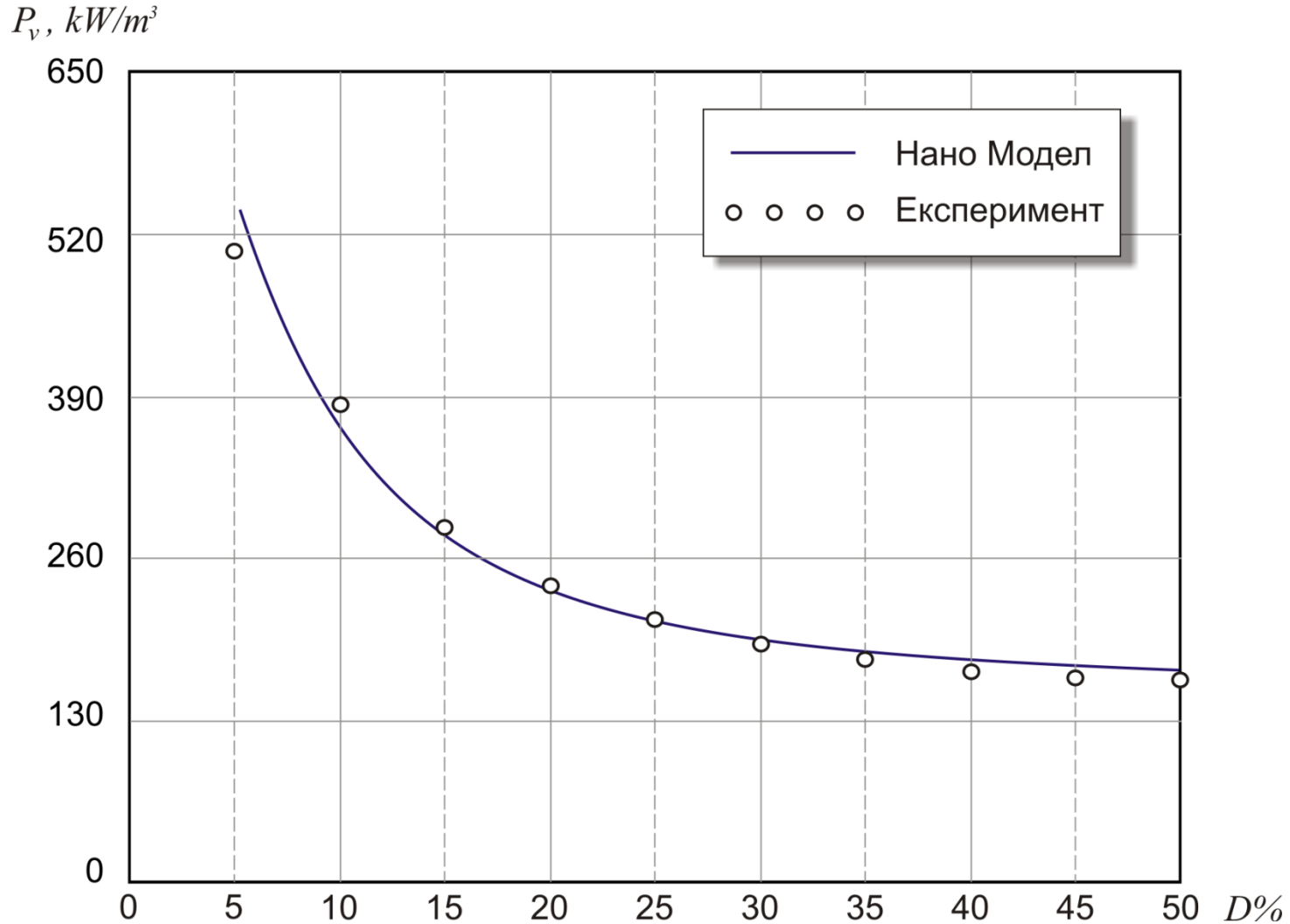


Данни за материал 3F3, 0,1Т, 100kHz, 25°C, мостова схема



Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

Получени резултати

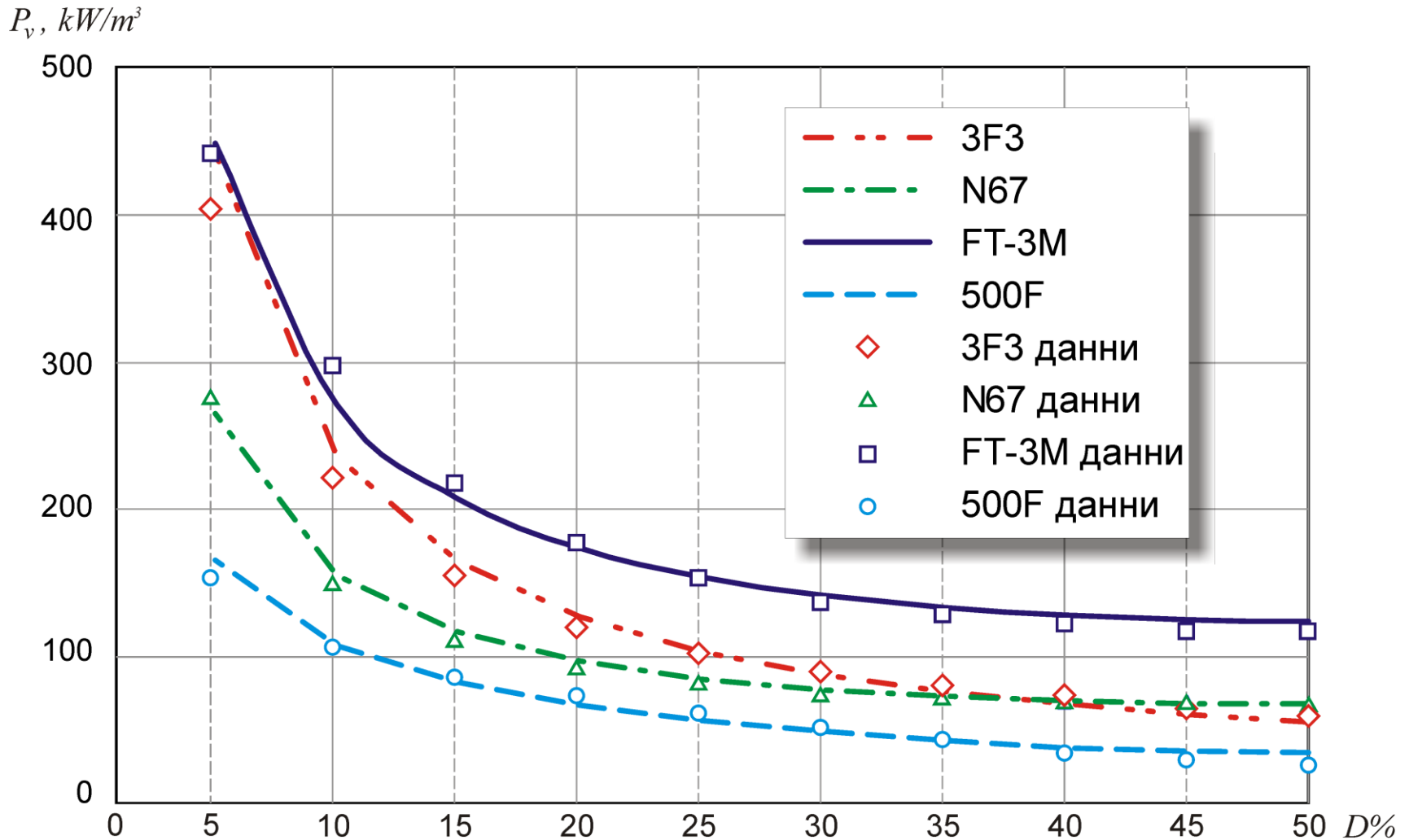


Данни за материал FT-3M, 0.1T, 100kHz, 25°C, полумостова схема




Глава III - Получаване и обработка на експериментални данни за загубите в МММ

Получени резултати



Сравнение на специфичните загуби за четирите изследвани образца, 100mT, 100kHz, 100°C, при променлив коефициент на запълване





Усъвършенствана методика за проектиране на трансформатори



Проектирането на силовите магнитни компоненти трябва да е съобразено с два важни аспекта:

- **как се отвеждат генерираните загуби в компонента**
- **как се оценяват и колко са вихровите токове в намотките и магнитопровода.**

Представен е подход за адаптиране на две стъпки от методиката „Fast Design Approach“ – на Van den Bossche и Вълчев



Изчисляване на допустимата разсейвана мощност на магнитопровода P_h

$$P_h = k_A ab \quad (24)$$

k_A е избран 2500 W/m^2 , като авторите указват, че тази стойност е валидна за феритни магнитопроводи с максимална работна температура около $80\text{-}90^\circ\text{C}$ и температура на околното пространство от 60°C , без принудително охлаждане!

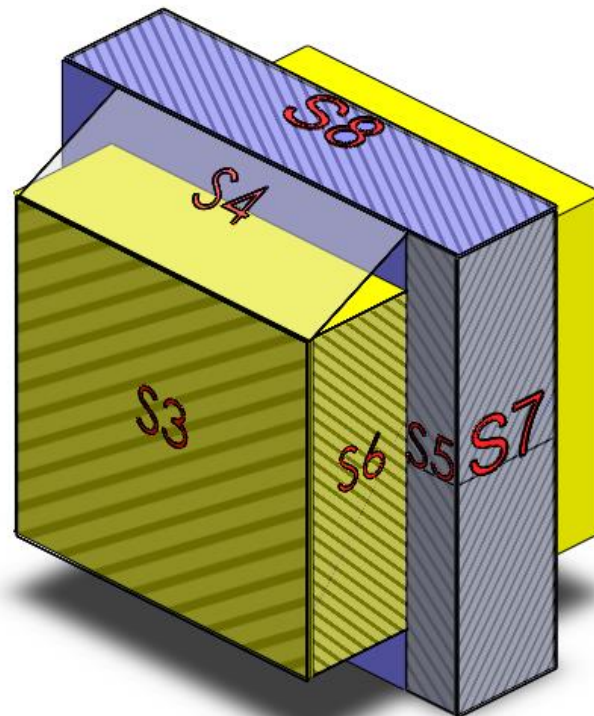
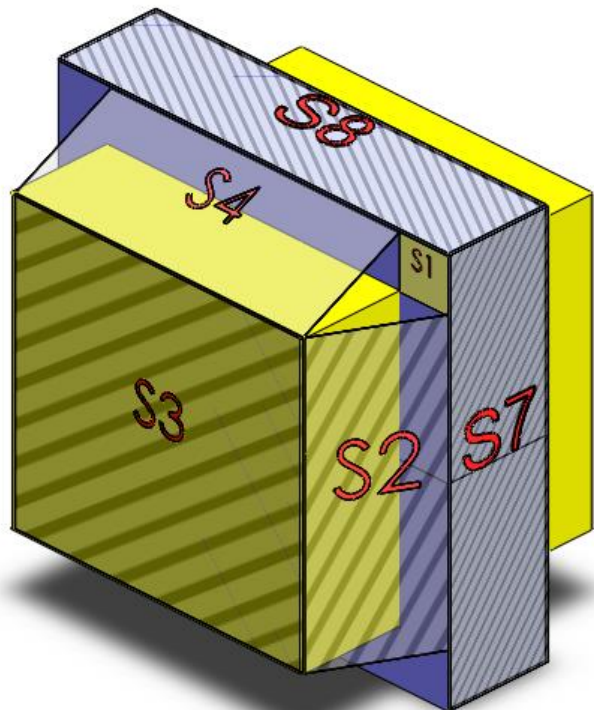
При различни от горните условия k_A има други стойност!

Стъпките за определянето на k_A са следните:

- Определят се площите на МК, чрез които става топлообменна;
- Изчислява се дължината на граничния слой флуид, чрез който става кондуктивният топлообмен – L ;
- Избира се скорост на въздуха, обдухващ компонента – v .
- Намира се коефициентът на чернота – ε_T ;
- Получава се топлообменна;
- Изчислява се коефициентът k_A .



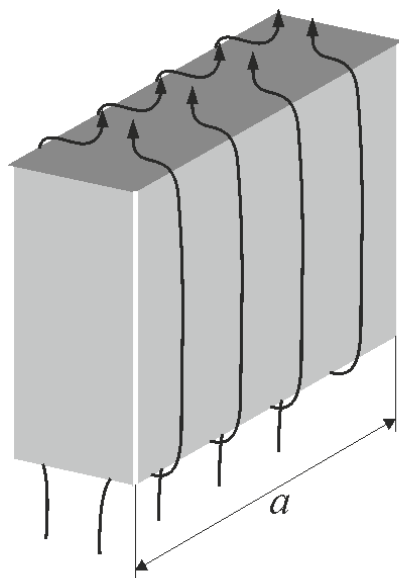
Еквивалентни площи на трансформатор



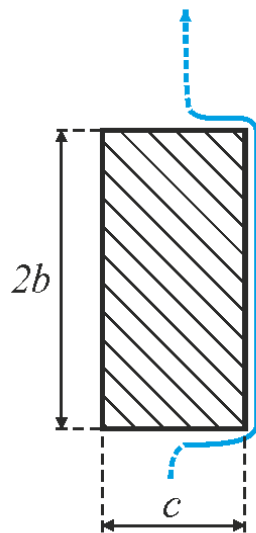
$$S_{rad} = 2(4S_1 + 2S_2 + S_3 + 2S_4 + 2S_7 + 2S_8) \quad S_{conv} = 2(2S_5 + 2S_6 + S_3 + 2S_4 + 2S_7 + 2S_8)$$



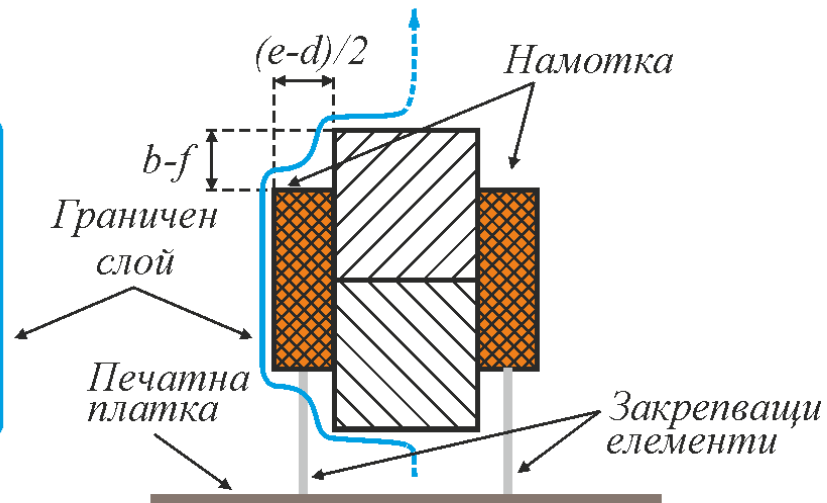
Пълна дължината на граничния слой



a)



б)

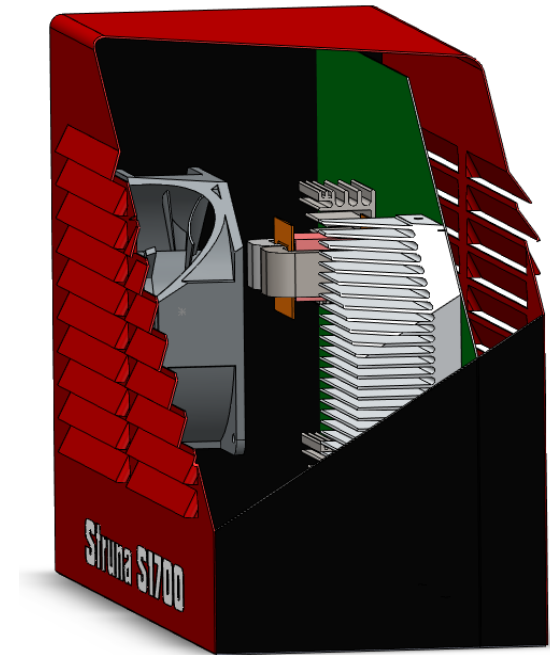
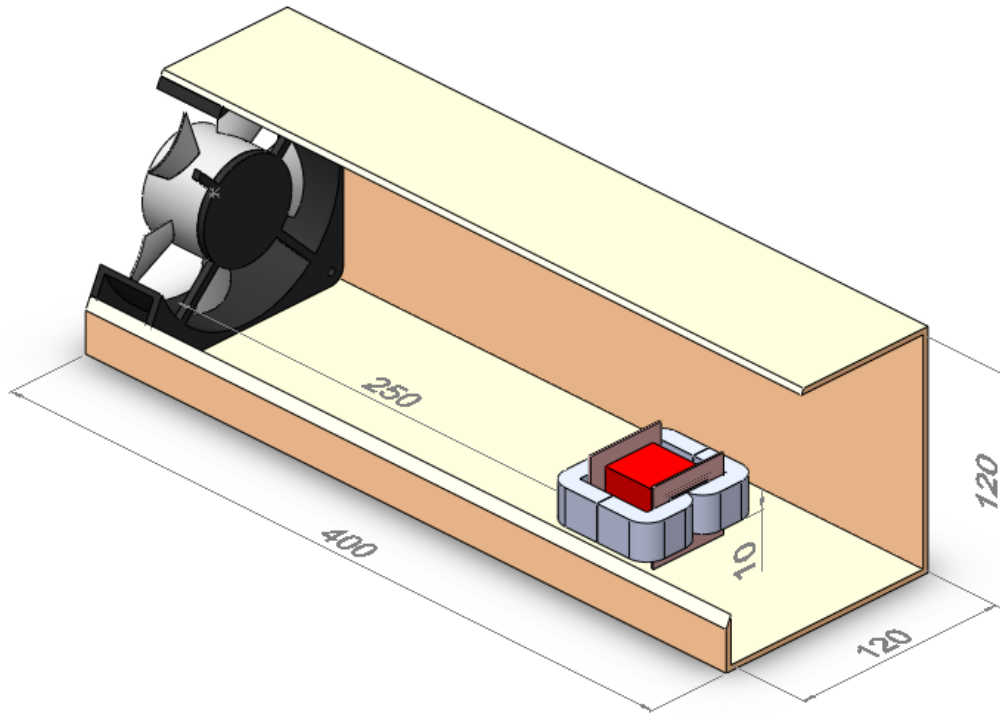


в)

Дължината на граничния слой между компонента и охлаждащият флуид



Скорост на въздуха обдухващ компонента



Опитни схеми на двата експеримента

Скоростта на въздуха е измерена на разстояние 1cm пред магнитния компонент с анемометър EA3000 с точност $\pm 5\%$.



Топлопренос на магнитни компоненти при принудително охлаждане

$$q = q_{rad} + q_{conv} = \varepsilon_T \sigma S_{env} (T_{раб}^4 - T_{ок.ср}^4) + \alpha_c S_{conv} (T_{раб} - T_{ок.ср})$$

където:

q_{rad} , q_{conv} са топлинният поток при топлопренасяне чрез лъчение и чрез конвекция;

ε_T – сумарен коефициент на чернота;

σ – константата на Стефан–Болцман – $5,6704 \cdot 10^{-8}$ [W.m⁻².K⁻⁴];

S_{rad} – ефективна площ при лъчист топлообмен [m²];

S_{conv} – ефективна площ при конвективен топлообмен [m²];

$T_{раб}$ – работна температура [K];

$T_{ок.ср}$ – температура на околната среда [K];

α_c – коефициент на конвективен топлообмен;

$$\alpha_c = (3,33 + 4,8v^{0,8})L^{-0,288}$$

където:

L е дължината на граничния слой между компонента и охлаждащият го флуид;

v – скоростта на флуида.



Топлопренос на магнитни компоненти при принудително охлаждане

Магнитен компонент	ε_T	L	v	α_c	q_{rad}	q_{conv}	q_{tot}
	-	mm	m/s	W/(m ² .K)	W	W	W
E80/38/20, 3F3	0,96	120	0	6,1	11,6	9,4	21,1
			2,5	24,5	11,6	37,8	49,4
			5,0	38,1	11,6	58,8	70,4
F3CC0010, Finemet FT-3M	0,82	94	0	6,6	6,7	6,8	13,5
			2,5	26,3	6,7	27,2	33,8
			5,0	40,9	6,7	42,2	48,9

Разсейваща способност на един феритен и един нанокристален трансформатор q_{tot} за различна скорост на охлаждащият флуид



Нанокристални материали

Максимална работна температура, $T_{\text{макс}} [^{\circ}\text{C}]$ \ / \ Скорост на въздуха обдуващ компонентът, $v [\text{m/s}]$	0	1	2	3	4	5
70	2080	3680	4860	5930	6930	7880
80	2660	4660	6140	7480	8720	9910
90	3260	5670	7450	9050	10540	11970
100	3900	6700	8780	10650	12390	14050
110	4560	7770	10140	12280	14270	16170
120	5270	8860	11530	13940	16180	18320
130	5990	9990	12960	15630	18130	20500

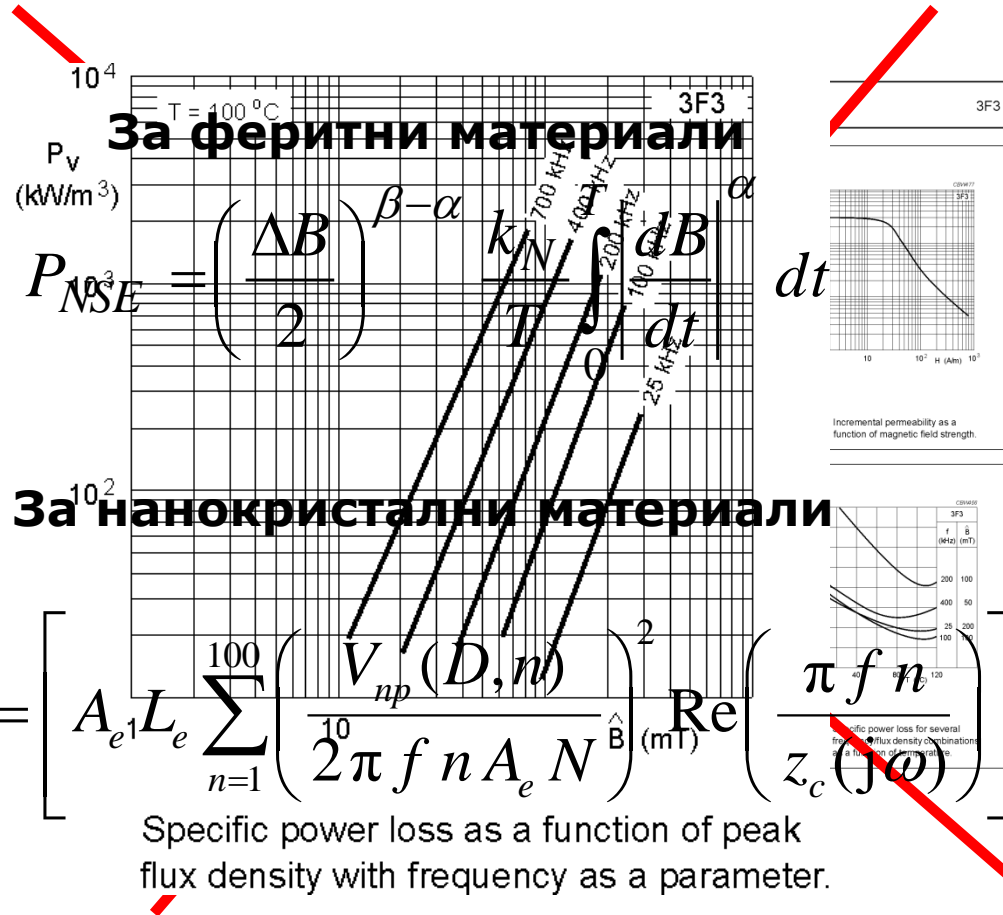


Феритни материали						
Скорост на въздуха обдухващ компонентът, v [m/s]	0	1	2	3	4	5
Максимална работна температура, $T_{\text{макс}}$ [°C]						
70	2430	4390	5850	7160	8380	9550
80	3110	5560	7380	9020	10550	12000
90	3810	6760	8940	10900	12740	14480
100	4550	7980	10530	12820	14960	17000
110	5320	9240	12150	14770	17220	19550
120	6120	10540	13810	16760	19510	22130
130	6960	11870	15510	18780	21840	24750



Намиране на стойността на магнитната индукция от каталожните данни

При напрежение U и радиално напречно сечение S





Входни данни за проектирания трансформатор

<i>Напрежение на първичната намотка</i>	300V
<i>Изходно напрежение (без товар)</i>	60V
<i>Изходно напрежение (максимален товар)</i>	26V
<i>Максимален изходен ток</i>	150A
<i>Работна честота</i>	80kHz
<i>Скорост на въздуха, обдухващ трансформатора</i>	2,5m/s
<i>Максимална работна температура</i>	90°C
<i>Коефициент на запълване</i>	5-45%
<i>Максимална работна температура за феритния трансформатор</i>	90°C
<i>Максимална работна температура за нанокристалния трансформатор</i>	110°C



Резултати от проектирането на трансформатора

Параметър	Намотка	Означение		Феритен трансформатор					Нанокристален трансформатор
				Случай 0	Случай 1	Случай 2	Случай 3	Случай 4	
Брой навивки	първична	N_{1p}	-	14			10		11
	вторична	N_{2p}	-	3			2		2
Магнитна индукция		B	T	0,17			0,13		0,26
Диаметър на проводника	първична	d_1	mm	1,30 (1,41)	3,55 (3,68)	0,20 (2,65)	1,0	2,0	1,50
(заедно с изолацията)	вторична	d_2	mm	5,00 (5,14)	4,00 (4,13)	0,20 (4,97)	4,5	3x7,5	0,7x32
Брой проводници в паралел	първична	p_1	-	1	1	100	1	1	2
	вторична	p_2	-	1	4	2 x 350	1	1	1
Брой еквивалентни слоеве	първична	m_{E1}	-	1	1	10	1	1	1
	вторична	m_{E2}	-	1	1	26,5	1	1	2
Брой еквивалентни навивки	първична	n_{E1}	-	14	14	140	10	10	22
	вторична	n_{E2}	-	3	12	79,4	2	4,43	46

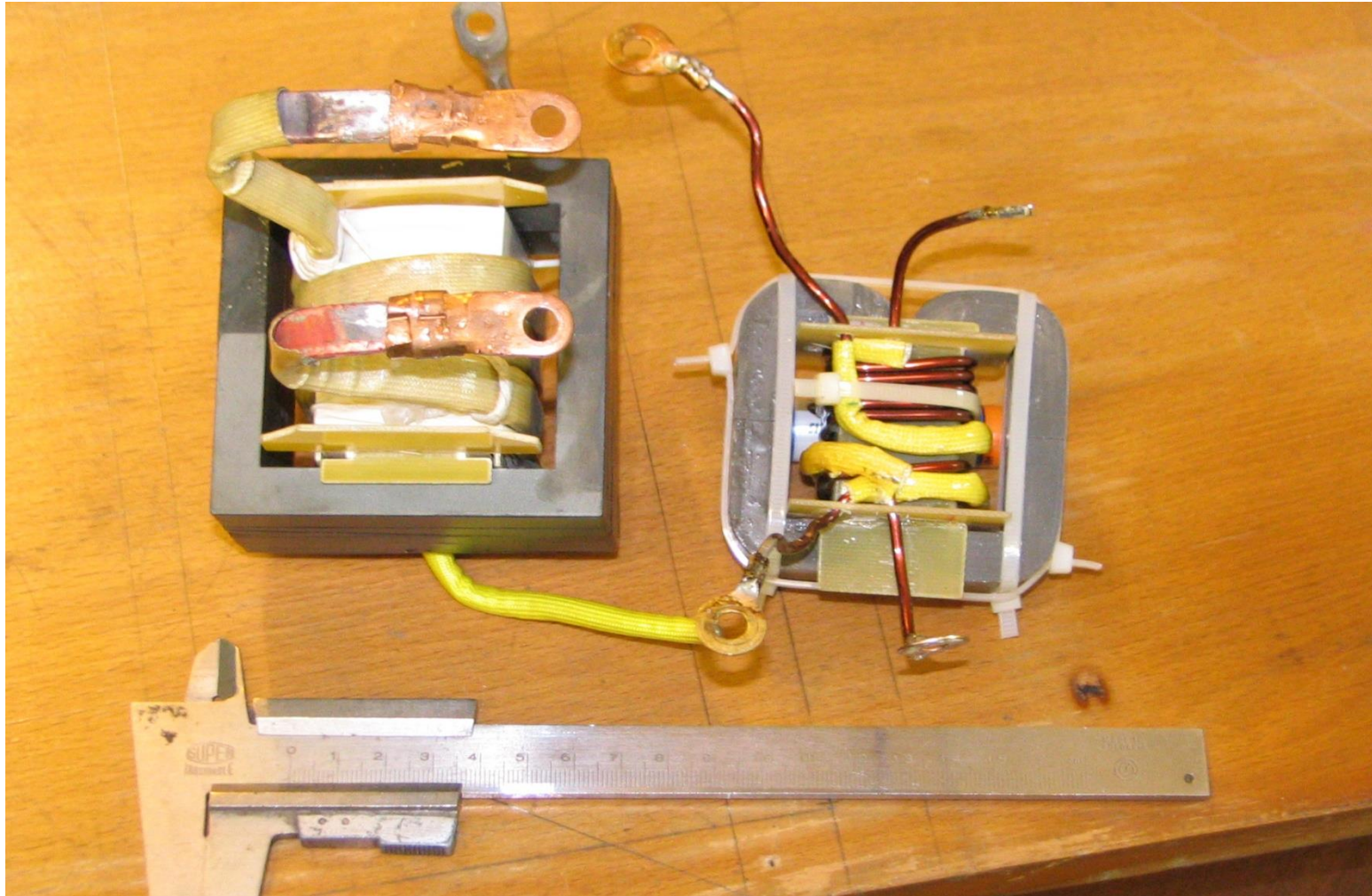


Резултати от проектирането на трансформатора

Коефициентите на загъляване по посока на навивките	първична	η_1	-	0,34	0,93	0,53	0,19	0,38	0,89
	вторична	η_2	-	0,28	0,93	0,3	0,17	0,28	0,98
Коефициентите на загъляване по посока перпендикулярна на навивките	първична	λ_1	-	0,07	0,18	0,1	0,05	0,10	0,12
	вторична	λ_2	-	0,26	0,21	0,27	0,23	0,17	0,12
Коефициент показващ, колко пъти загубите от вихрови токове са по-големи от омичните	първична	k_{c1}	-	0,98	9,4	0,43	0,36	2,30	3,37
	вторична	k_{c2}	-	5,51	10,62	0,98	4,19	3,68	1,39
Постоянно токово съпротивление	първична	$R_{0,1}$	m Ω	33,96	4,69	15,07	23,16	5,92	10,04
	вторична	$R_{0,2}$	m Ω	0,49	0,19	0,46	0,26	0,21	0,29
Еквивалента честота	първична	$f_{eq,1}$	kHz	540	3920	12,8	320	1280	719
	вторична	$f_{eq,2}$	kHz	8000	5120	12,8	6480	3670	199
Омични загуби	първична	$P_{ohm,1}$	W	5,74	0,79	2,55	3,91	1,00	1,54
	вторична	$P_{ohm,2}$	W	11,07	4,32	10,38	5,80	2,30	6,48
Загуби от вихрови токове	първична	$P_{eddy,1}$	W	5,61	7,44	1,10	1,42	4,72	5,19
	вторична	$P_{eddy,2}$	W	60,96	45,91	10,14	24,32	17,36	8,98
Общи загуби във двете намотки	заедно	P_{total}	W	83,38	58,47	24,17	35,45	25,38	22,19
Допустими загуби	заедно	P_h	W	27,05				25,91	



Резултати от проектирането на трансформатора





Резултати от проектирането на трансформатора

Таблица 4.11. Изчислени и измерени загуби в двата трансформатора

	Загуби в намотките (опит на късо съединение)				Загуби в магнитопровода (опит на празен ход)			
	Изчислени	Измерени	Разлика		Изчислени	Измерени	Разлика	
	W	W	W	%	W	W	W	%
Феритен	25,38	24,71	-0,67	-2,7%	29,80	28,64	-1,16	-4,1%
Нано	22,19	21,04	-1,15	-5,5%	25,91	25,8	-0,11	-0,4%

Таблица 4.12. Сравнение на двата реализирани трансформатора и подобрение от използването на нанокристален МММ

		Случай 4 (2 x E80/38/20)	Случай 5 (2 x F3CC0010)	Разлика	Подобрение
Маса	kg	1,176	0,572	0,604	51,4%
Площ	mm ²	6080	4608	1472	24,2%
Обем	mm ³	340480	211968	128512	37,7%
Цена (магнитопровод)	лв.	2x(12,00÷15,00)	2x(15÷60)		0 ÷ -400%



Има и такива трансформатори! ☺





Благодаря Ви за вниманието!