

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»

(наименование кафедры)

11.04.04 Электроника и нанoeлектроника

(код и наименование направления подготовки)

Электронные приборы и устройства

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Исследование создаваемых импульсным источником питания
электромагнитных помех»

Студент

В. А. Чижов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

В. П. Певчев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы

к.т.н., доцент А. А. Шевцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2019г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент, А. А. Шевцов

(ученая степень, звание, И. О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2019г.

Тольятти 2019

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Допустимые уровни электромагнитных помех.....	6
1.1 Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям	6
1.1.1 ПДУ электромагнитных излучений диапазона частот от 30 кГц до 300 ГГц	6
1.1.2 ПДУ электромагнитного излучения промышленной частоты 50 Гц.....	8
1.2 Электромагнитные поля в производственных условиях	9
1.2.1 ПДУ постоянного магнитного поля	9
1.2.2. ПДУ электромагнитного поля частотой 50 Гц.....	10
1.2.3. ПДУ напряженности периодического (синусоидальных) магнитного поля 50 Гц.....	11
1.2.4. ПДУ напряженности импульсного магнитного поля 50 Гц	12
1.2.6. ПДУ электромагнитных полей диапазона частот от 30 кГц включительно и до 300 ГГц.....	14
1.3 Электромагнитные поля на плавательных средствах и сооружениях.....	16
1.3.1 ПДУ постоянного магнитного поля	16
1.3.2 ПДУ электромагнитного поля частотой 50 Гц.....	16
1.3.3 ПДУ электромагнитного поля диапазона частот 10 - 30 кГц.....	16
1.3.4 ПДУ электромагнитного поля диапазона частот 30 кГц - 300 МГц.....	16
1.3.5 ПДУ электромагнитного поля диапазона частот 300 МГц - 300 ГГц.....	18
1.3.6 ПДУ электромагнитного поля, создаваемые средствами отображения информации на рабочих местах.....	19
1.3.7 ПДУ электромагнитных полей в жилых, общественных помещениях и зонах отдыха	20
1.4 Совместимость электромагнитная электрооборудования автомобиля и автомобильной бытовой радиоэлектронной аппаратуры	20

2. Инструкция по работе с программой Ansys Maxwell.....	22
2.1 Введение в Ansys Maxwell.....	22
2.2 Создание геометрии модели	26
2.3 Подготовка к моделированию и запуск моделирования.....	33
2.4 Получение результатов моделирования	48
3. Исследование магнитного поля катушек цилиндрического типа.....	59
3.1 Исследование магнитного поля катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор.....	62
3.2 Исследование магнитного поля катушки без магнитопровода	70
3.3 Исследование магнитного поля катушки с внутренним сердечником.....	74
3.4 Сопоставление полученных результатов.....	79
4. Исследование магнитного поля тороидальной катушки и катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор	81
4.1 Исследование магнитного поля тороидальной катушки	82
4.2 Исследование магнитного поля катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор.....	87
4.3 Сопоставление полученных результатов.....	92
5. Исследование магнитного поля катушки с прямоугольным магнитопроводом и катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор	94
5.1 Исследование магнитного поля катушки с прямоугольным магнитопроводом	95
5.2 Исследование магнитного поля катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор.....	100
5.3 Сопоставление полученных результатов.....	105
6. Исследование экранов	106
6.1 Исследование стального экрана.....	107
6.2 Исследование медного экрана	112
6.3 Сравнение медного и стального экрана.....	115
6.4 Исследование влияния толщины медного экрана на его экранирующие свойства	116

7. Исследование физической модели компьютерного блока питания.....	118
7.1 Физическая модель.....	118
7.2 Средство измерения магнитного поля	119
7.3 Ход эксперимента.....	121
7.3.1 Исследование зависимости индукции магнитного поля на расстоянии от края трансформатора	121
7.3.2 Сравнение индукции магнитного поля, создаваемого проводами без экрана, с индукцией магнитного поля, создаваемого экранированным проводом	124
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
Список использованных источников	127

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы, связанные с электромагнитной совместимостью появились достаточно давно. Впервые они были замечены в радиосвязи и создавали значительные помехи радиоприему.

В настоящее время необходимо обеспечивать электромагнитную совместимость многих устройств, так как помехи, принимаемые устройством от окружающих его источников или же помехи, излучаемые им в окружающее пространство, могут негативно сказываться на работоспособности приборов и устройств. Со временем в мире появляется все больше различных электронных устройств, создающих электромагнитные помехи. Многие люди в быту пользуются телефоном, телевизором, радиоприемником. В автомобилях появляется все больше электроники, которая достаточно чувствительна к электромагнитным помехам. В медицине используются приборы, влияние помех на которые может привести к сбою в их работе. Электронные устройства проектируются все меньших размеров. Эти и многие другие факторы увеличивают электромагнитный шум в окружающем пространстве, а чувствительность приборов к помехам увеличивается. Одновременно растут требования электромагнитной совместимости к разрабатываемым электрическим приборам. В связи с этим, проблема электромагнитной совместимости ещё долгое время будет актуальной.

Из всех типов источников питания, в последнее время, все чаще используются именно импульсные источники питания (ИИП). Это связано с их высоким КПД и одновременно малым габаритным размером. Импульсные источники имеют множество достоинств, но обладают одним существенным недостатком. Их работа создает большой уровень электромагнитного шума, что негативно сказывается на устройствах, работающих в непосредственной их близости.

Целью диссертационной работы является исследование магнитных полей, создаваемых ИИП.

Задачами диссертационной работы являются измерение и моделирование

магнитных полей, создаваемых элементами ИИП, а также анализ способов уменьшения воздействия магнитного поля ИИП [1].

1. Допустимые уровни электромагнитных помех

Прежде чем приступить к исследованию магнитных полей, создаваемых разными электронными устройствами, необходимо определить предельно допустимые уровни (ПДУ) электромагнитных помех, превышение которых вызовет необходимость принять меры по их уменьшению. Также необходимо выяснить условия проведения измерений.

В этом разделе диссертационной работы рассмотрим ПДУ электромагнитных помех, которые обозначены в некоторых документах (гостах).

1.1 Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям

1.1.1 ПДУ электромагнитных излучений диапазона частот от 30 кГц до 300 ГГц

ПДУ электромагнитных излучений радиочастотного диапазона (от 30 кГц до 300 ГГц) являются значения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 - допустимые уровни электромагнитного излучения радиочастотного диапазона

Объект	Предельно допустимые уровни в диапазонах частот				
	30-300 кГц	0.3-3 МГц	3-30 МГц	30-300 МГц	300 МГц - 300 ГГц
	В/м	В/м	В/м	В/м	мкВт/см ²
Жилые помещения (включая балконы и лоджии)	25	15	10	3	10; 100*

* - При облучении от антенн, которые действуют в режиме кругового

обзора и работают при частоте вращения диаграммы направленности меньше 1Гц. Скажность вращения должна быть меньше 20.

В этой таблице указаны среднеквадратичные значения напряженности электрической составляющей электромагнитного излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ) и среднеквадратичное значение плотности потока энергии.

Каждый записанный в таблице 1 диапазон частот включает нижнюю граничную частоту, одновременно исключая верхнюю.

Для импульсно-модулированного излучения измерение необходимо производить по средней за период следования импульсов интенсивности ЭМИ.

При одновременном излучении нескольких источников ЭМИ РЧ, должны соблюдаться следующие условия (формулы 1 - 3).

1.В случаях, когда для излучения всех источников ЭМИ РЧ установлены одинаковые ПДУ:

$$\left[\sum E_n^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq E_{ПДУ}, \quad (1)$$

$$\sum ППЭ_n \leq ППЭ_{ПДУ}. \quad (2)$$

2.В случаях, когда для излучения всех источников ЭМИ РЧ установлены разные ПДУ:

$$\sum \left[\left(\frac{E_n}{E_{ПДУ}} \right)^2 + \frac{ППЭ_n}{ППЭ_{ПДУ}} \right] \leq 1, \quad (3)$$

где $E_n(ППЭ_n)$ - напряженность электрического поля (плотность потока энергии), создаваемая в и исследуемой точке каждым источником ЭМИ РЧ;

$E_{ПДУ}(ППЭ_{ПДУ})$ - допустимая напряженность электрического поля.

Измерения уровня излучения следует производить при условии работы источника ЭМИ на полной мощности в точках помещения, наиболее приближенных к источнику (на балконах, лоджиях, у окон), а также у металлических изделий, находящихся в помещениях, которые могут являться

пассивными ретрансляторами ЭМИ и при полностью отключенных изделиях бытовой техники, являющихся источниками ЭМИ РЧ. Минимальное расстояние до металлических предметов определяется инструкцией по эксплуатации средства измерения.

1.1.2 ПДУ электромагнитного излучения промышленной частоты 50 Гц

Напряженность электрического поля в жилых зданиях (на расстоянии 0.2 м от стен и на высоте 0.5—1.8 м от пола) должна быть меньше 0.5 кВ/м.

Индукция магнитного поля в жилых сооружениях (на расстоянии от 0.2 м от стен и окон и на высоте 0.5—1.5 м от пола) должна быть меньше 10 мкТл.

Электрическое и магнитное поля в жилых сооружениях измеряются в условиях, когда на измерения не влияет работа бытовой аппаратуры. Электрическое поле измеряется при выключенном общем освещении, магнитное поле наоборот.

Напряженность электрического поля рядом с жилыми зданиями, измеренная от ЛЭП и остальных подобных устройств, должна быть меньше 1 кВ/м при условии измерения на высоте 1.8 м от земли.

Индукция магнитного поля, рядом с жилыми конструкциями, от ЛЭП и подобных предметов должна быть меньше 50 мкТл при высоте 1.8 м от земли.

Бытовая техника проверяется по соответствующей документации. Измерения проводятся рядом с местами, где обычно находятся люди. Если неизвестно расположение людей, то действуют по следующим рекомендациям:

1. Электромагнитные и электростатические поля измеряют на расстоянии 10 см и со всех сторон от исследуемого предмета. (кроме некоторой телеаппаратуры)

2. Для телеаппаратуры с диагональю экрана до 20 дюймов, измерения осуществляются на расстоянии 50 см на высоте центра экрана (если диагональ больше, то условия те же, но расстояние 1 см). Однако, при противоречии этого требования пользовательской инструкции, инструкция имеет приоритет.

3. Переменные электрические и магнитные поля оцениваются по их

среднеквадратичным значениям; электростатические - максимальному значению.

4. До проведения измерений исследуемому прибору необходимо поработать хотя бы 20 минут. Условия измерений: температура 22°C, влажность 50%, напряженность электрического и магнитного полей меньше 2.5 В/м и 2.5 нТл соответственно [2].

1.2 Электромагнитные поля в производственных условиях

1.2.1 ПДУ постоянного магнитного поля

Оценка и нормирование постоянного магнитного поля (ПМП) осуществляется отдельно и зависит от времени воздействия на работника за смену для условий общего и локального воздействия. ПДУ напряженности и индукции ПМП на рабочих местах представлены в таблице 2.

Таблица 2 - ПДУ напряженности и индукции ПМП на рабочих местах

Время воздействия за рабочий день, минуты	Условия воздействия			
	Общее		Локальное	
	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл	ПДУ напряженности, кА/м	ПДУ магнитной индукции, мТл
0 - 10	24	30	40	50
11 - 60	16	20	24	30
61 - 480	8	10	12	15

1.2.2. ПДУ электромагнитного поля частотой 50 Гц

При напряженности в интервале от 5 до 20 кВ/м, допустимое время нахождения в электрическом поле рассчитывается по формуле 4:

$$T = \frac{50}{E} - 2, \quad (4)$$

где E - напряженность электрического поля, кВ/м;

T - время пребывания, ч.

При напряженности свыше 20 и до 25 кВ/м разрешенное время пребывания в ЭП равно 10 мин.

Пребывание в ЭП с напряженностью более 25 кВ/м без защиты не разрешено.

Время нахождения людей в течение дня, в зонах с различной напряженностью электрического поля, находится по формуле 5:

$$T_{np} = 8 \cdot \sum \frac{tEn}{TE_n}, \quad (5)$$

где T_{np} - приведенное время, аналогичное пребыванию в электрическом поле нижней границы напряженности;

tEn - время нахождения в контролируемых зонах с напряженностью En , ч.;

TE_n - допустимое время пребывания для контролируемых зон, ч. Время T_{np} не должно превышать 8 ч.

1.2.3. ПДУ напряженности периодического (синусоидальных) магнитного поля 50 Гц

ПДУ напряженности магнитных полей устанавливаются для условий общего и локального воздействия (таблица 3).

Таблица 3 - ПДУ напряженности периодических магнитных полей

Время пребывания (час)	ПДУ магнитного поля, Н [А/м] / В [мкТл] при воздействии	
	общем	локальном
≤ 1	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Допустимая напряженность магнитного поля внутри временных интервалов определяется в соответствии с кривой интерполяции (рисунок 1).

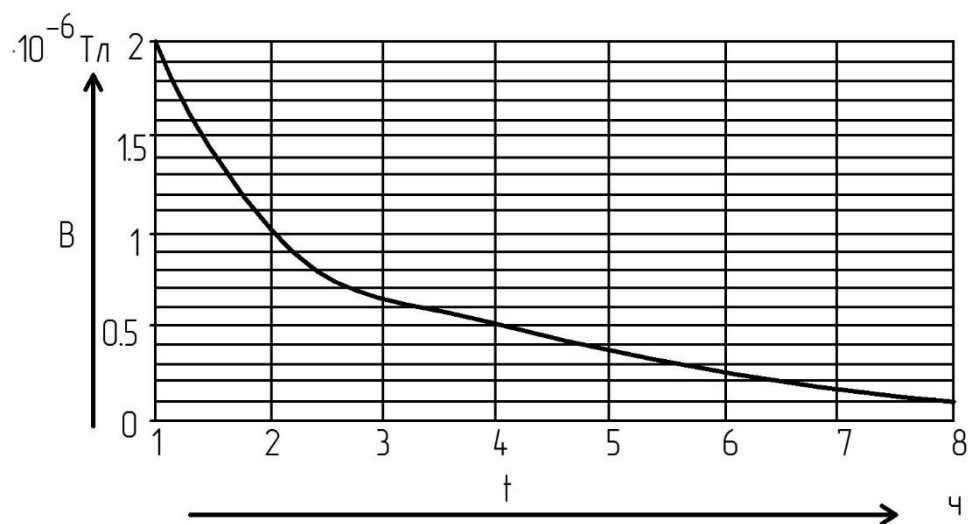


Рисунок 1 – ПДУ магнитных полей частотой 50 Гц

Если человек находится в течении рабочего времени при различных уровнях индукции и напряженности магнитного поля, то учитывается наибольшее из них. Пребывание сотрудника в рассматриваемой зоне может

быть разнесено во времени при соблюдении всех требований.

1.2.4. ПДУ напряженности импульсного магнитного поля 50 Гц

Для условий воздействия импульсных магнитных полей 50 Гц (таблица 4) ПДУ амплитудного значения напряженности поля ($H_{пду}$) дифференцированы в зависимости от общей продолжительности воздействия за рабочую смену (T) и характеристики импульсных режимов генерации:

Режим I - импульсное с $t_{и} \geq 0.02$ с, $t_{п} \leq 2$ с;

Режим II - импульсное с 60 с $\geq t_{и} \geq 1$ с, $t_{п} > 2$ с;

Режим III – импульсное с 0.02 с $\leq t_{и} < 1$ с, $t_{п} > 2$ с,

где $t_{и}$ - длительность импульса, сек.,

$t_{п}$ - длительность паузы между импульсами, сек.

Таблица 4 - ПДУ воздействия импульсных магнитных полей частотой 50 Гц в зависимости от режима генерации

Т, ч	Нпду [А/м]		
	Режим I	Режим II	Режим III
≤ 1.0	6000	8000	10000
≤ 1.5	5000	7500	9500
≤ 2.0	4900	6900	8900
≤ 2.5	4500	6500	8500
≤ 3.0	4000	6000	8000
≤ 3.5	3600	5600	7600
≤ 4.0	3200	5200	7200
≤ 4.5	2900	4900	6900
≤ 5.0	2500	4500	6500
≤ 5.5	2300	4300	6300
≤ 6.0	2000	4000	6000
≤ 6.5	1800	3800	5800
≤ 7.0	1600	3600	5600
≤ 7.5	1500	3500	5500
≤ 8.0	1400	3400	5400

1.2.5. ПДУ электромагнитных полей диапазона частот от 10кГц включительно и до 30 кГц

ПДУ напряженности электрического и магнитного поля при воздействии в течение дня равны 500 В/м и 50 А/м.

ПДУ напряженности электрического и магнитного поля при продолжительности воздействия равен 1000 В/м и 100 А/м.

1.2.6. ПДУ электромагнитных полей диапазона частот от 30 кГц включительно и до 300 ГГц

Оценка ЭМП осуществляется по энергетической экспозиции (ЭЭ). ЭЭ рассчитывается по формулам 6, 7:

$$\text{ЭЭ}_E = E^2 \cdot T, \quad (6)$$

$$\text{ЭЭ}_H = H^2 \cdot T, \quad (7)$$

где E - напряженность электрического поля (В/м);

H - напряженность магнитного поля (А/м);

T - время воздействия за смену.

ЭЭ в диапазоне частот от 300 МГц до 300 ГГц, рассчитывается по формуле 8:

$$\text{ЭЭ}_{\text{ППЭ}} = \text{ППЭ} \cdot T, \quad (8)$$

где ППЭ - плотность потока энергии (Вт/м², мкВт/см²);

T - время воздействия за смену (час.).

ПДУ энергетических экспозиций (ЭЭпду) на рабочих местах за смену представлены в таблице 5.

Таблица 5 - ПДУ энергетических экспозиций ЭМП диапазона частот от 30 кГц включительно и до 300 ГГц

Параметр	ЭЭпду в диапазонах частот (МГц)				
	$\geq 0.03 - 3$	$\geq 3 - 30$	$\geq 30 - 50$	$\geq 50 - 300$	$\geq 300 - 300000$
ЭЭе, (В/м ²) · ч	20000	7000	800	800	
ЭЭн, (А/м ²) · ч	200	-	0.72	-	-
ЭЭппэ (мкВт/ см ²) · ч	-	-	-	-	200

Максимальные ПДУ напряженности и плотности потока энергии электромагнитного поля диапазона частот от 30 кГц включительно и до 300 ГГц показаны в таблице 6.

Таблица 6 - Максимальные ПДУ напряженности и плотности потока энергии электромагнитного поля диапазона частот от 30 кГц включительно и до 300 ГГц

Параметр	Максимально допустимые уровни в диапазонах частот (МГц)				
	$\geq 0.03 - 3$	$\geq 3 - 30$	$\geq 30 - 50$	$\geq 50 - 300$	$\geq 300 - 300000$
Е, В/м	500	300	80	80	-
Н, А/м	50	-	3	-	-
ППЭ, мкВт/см ²	-	-	-	-	1000 5000*

* - при облучения только кистей рук.

При облучении от приборов с диаграммой излучения перемещающегося типа, при локальном облучении рук, ПДУ плотности потока энергии для соответствующего времени облучения (ППЭпду) рассчитывается по формуле 9:

$$ППЭ_{ПДУ} = k \cdot \frac{ЭЭ_{ПДУ}}{T}, \quad (9)$$

где К - коэффициент снижения биологической активности воздействий,

К = 10 - для вращающихся и сканирующих антенн,

К = 12.5 - для облучения кистей рук;

$ЭЭ_{ПДУ}$ - ПДУ энергетической экспозиции [3].

1.3 Электромагнитные поля на плавательных средствах и сооружениях

1.3.1 ПДУ постоянного магнитного поля

Напряженность и индукция магнитного поля на рабочих местах, должны быть меньше 8 кА/м и 10 мТл.

1.3.2 ПДУ электромагнитного поля частотой 50 Гц

Допустимый уровень напряженности электрического поля на рабочем месте должен быть меньше 5 кВ/м.

Допустимые уровни напряженности и индукции магнитного поля должны быть меньше 80 А/м и 100 мкТл.

1.3.3 ПДУ электромагнитного поля диапазона частот 10 - 30 кГц.

Напряженность электрического поля должна быть меньше 500 В/м.

Напряженность магнитного поля должна быть меньше 50 А/м.

1.3.4 ПДУ электромагнитного поля диапазона частот 30 кГц - 300 МГц

В таблице 7 показаны ПДУ напряженности магнитного и электрического полей в рассматриваемом диапазоне.

Таблица 7 - ПДУ напряженности магнитного и электрического полей для частот от 30 кГц до 300 МГц

Параметр	Частота, МГц			
	0.03 - 3	3 - 30	30 - 50	50 - 300
Е, В/м	42	25	8.5	8.5
Н, А/м	4	-	0.25	-

Если условия, представленные в таблице 7 не могут быть выполнены, то время нахождения рассчитывается исходя из предельно допустимой энергетической экспозиции по формулам 10,11:

$$T = \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{ПДУ}}}{E^2}, \quad (10)$$

$$T = \frac{\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{МПДУ}}}{H^2}, \quad (11)$$

где Т - время нахождения в рабочей зоне, ч,

$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{ПДУ}}$ и $\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{МПДУ}}$ - ПДУ энергетической экспозиции за рабочее время, даны в таблице 8.

Таблица 8 - ПДУ энергетической экспозиции

Параметр	Частота, МГц			
	0.03 - 3	3 - 30	30 - 50	50 - 300
$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{ПДУ}}, (\text{В/м}^2) \cdot \text{ч}$	20 000	7 000	800	800
$\mathcal{E}\mathcal{E}_{\text{МПДУ}}, (\text{А/м}^2) \cdot \text{ч}$	200	-	0.72	-

Напряженность магнитного и электрического полей должны быть меньше значений, приведенных в таблице 9.

Таблица 9 – Максимальные значения напряженности электрического и магнитного полей

Параметр	Частота, МГц			
	0.03 - 3	3 - 30	30 - 50	50 - 300
Е, В/м	500	300	80	80
Н, А/м	50	-	3	-

1.3.5 ПДУ электромагнитного поля диапазона частот 300 МГц - 300 ГГц

Плотность потока энергии должна быть меньше 0.18 Вт/м². Если это условие не может быть выполнено, то время нахождения в рабочей зоне рассчитывается, исходя из допустимой энергетической экспозиции (ЭЭ_{ППЭ}) по формуле 12:

$$T = \frac{ЭЭ_{ППЭ}}{ППЭ_{ПДУ}}, \quad (12)$$

где ЭЭ_{ППЭ} = 200 (мкВт/см²)·ч;

Т - время нахождения в рабочей зоне, ч.

При нахождении людей в рабочей зоне без индивидуальной защиты ППЭ_{ПДУ} должен быть меньше 10 Вт/м².

1.3.6 ПДУ электромагнитного поля, создаваемые средствами отображения информации на рабочих местах

В таблице 10 приведены значения ПДУ для средств отображения информации.

Таблица 10 - ПДУ ЭМП, создаваемые видеотерминалами в рабочих зонах

Нормируемые параметры		ВДУ
Напряженность электрического поля	диапазон частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	диапазон частот 2 - 400 кГц	2.5 В/м
Магнитная индукция	диапазон частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	диапазон частот 2 - 400 кГц	25 нТл
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500 В

Значение магнитного поля должно соответствовать требованиям к визуальным параметрам видеотерминалов (таблица 11)

Таблица 11 – Требования к визуальным параметрам видеотерминалов

№	Параметры	Допустимые значения
1	Яркость белого поля	Не менее 35 кд/м ²
2	Неравномерность яркости рабочего поля	Не более $\pm 20\%$
3	Контрастность (для монохроматического режима)	Не менее 3:1
4	Временная нестабильность изображения (мелькание)	Не должна фиксироваться
5	Пространственная нестабильность изображения (дрожание)	Не более $2 \cdot 10^{-4}L$, где L - проектное расстояние наблюдения, мм

1.3.7 ПДУ электромагнитных полей в жилых, общественных помещениях и зонах отдыха

ПДУ напряженности электрического поля частотой 50 Гц должен быть меньше 0.5 кВ/м.

Магнитная индукция поля с частотой 50 Гц должна быть меньше 10 мкТл.

Интенсивность ЭМП радиочастотного диапазона в зонах пребывания людей не должна превышать значения, приведенные в таблице 12 [4].

Таблица 12 – ПДУ ЭМП в диапазоне 30 кГц - 300 ГГц в жилых и общественных помещениях и зонах отдыха

Диапазон частот				
30 - 300 кГц	0.3 - 3 МГц	3 - 30 МГц	30 - 300 МГц	300 МГц - 300 ГГц
Предельно допустимые уровни				
В/м	В/м	В/м	В/м	мкВт/см ²
25	15	10	3	10

1.4 Совместимость электромагнитная электрооборудования автомобиля и автомобильной бытовой радиоэлектронной аппаратуры

Рассмотрим некоторые нормы, представленные в документе.

Нормы на напряжение радиопомех в сети электрооборудования автомобиля (L_U) в децибелах относительно 1 мкВ приведены на рисунке 2 (кривая 1).

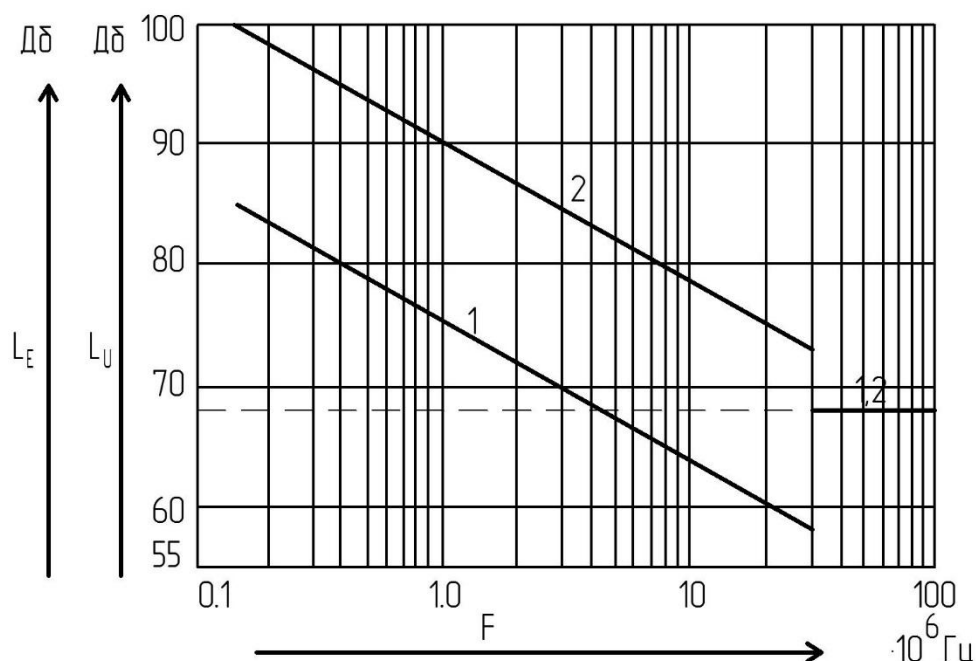


Рисунок 2 - ПДУ напряжения радиопомех в сети электрооборудования автомобиля (L_U , 1) и ПДУ напряженности поля радиопомех, создаваемых электрооборудованием автомобиля внутри салона (L_E , 2)

В полосе частот от 0.15 до 30 МГц нормы (L_U) на частоте F рассчитывают по формуле 13:

$$L_U = 85 - 11.5 \lg \frac{F}{0.15}, \quad (13)$$

где F — частота измерений, МГц;

L_U - ПДУ напряжения радиопомех в сети электрооборудования автомобиля, дБ.

Нормы на напряженность поля радиопомех, создаваемых электрооборудованием автомобиля внутри автомобиля (L_E), в децибелах относительно 1 мкВ/м, также представлены на рисунке 2 (кривая 2).

В полосе частот от 0.15 до 30 МГц нормы (L_E) на частоте F рассчитывают по формуле 14:

$$L_E = 100 - 11.5 \lg \frac{F}{0.15}, \quad (14)$$

где F - частота измерений, МГц;

L_E - ПДУ напряженности поля радиопомех, дБ.

В полосе частот от 30 до 110 МГц норма равна 68 дБ [5].

2. Инструкция по работе с программой Ansys Maxwell

ANSYS Maxwell — это современное, высокопроизводительное программное обеспечение для моделирования двумерных и трехмерных электромагнитных полей, используемое для анализа моделей двигателей, датчиков, трансформаторов и многих других электрических и электромеханических устройств различного применения. Применим программу для создания моделей катушек индуктивности и исследования магнитных полей, которые они создают при подключении к источнику питания.

На примере исследования магнитных полей катушки с замкнутым магнитопроводом имеющим зазор подробно разберем некоторые аспекты работы с программой [6].

2.1 Введение в Ansys Maxwell

Начальное окно, после запуска программы и выбора типа моделирования (2D), выглядит так, как показано на рисунке 3.

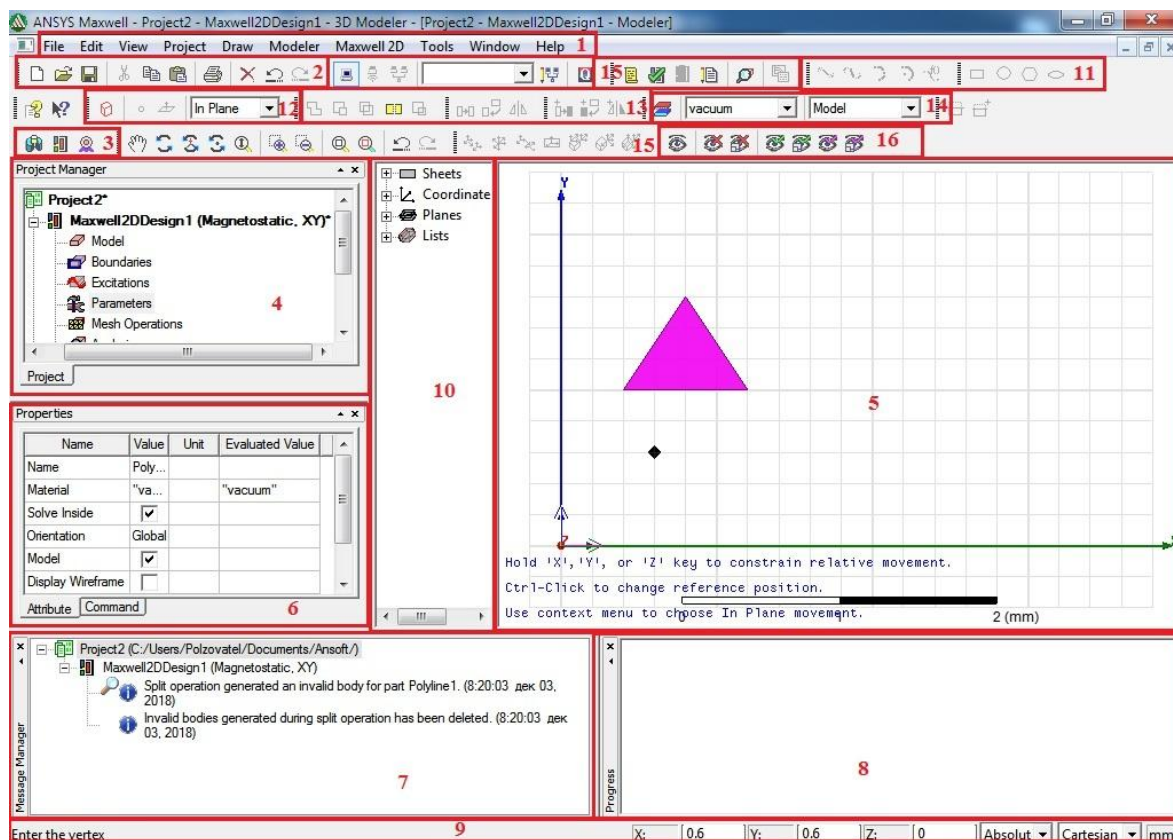


Рисунок 3 – Начальное окно программы Maxwell

При наведении курсора мыши на какую-либо кнопку программы, рядом с курсором высвечивается подсказка, поясняющая функцию этой клавиши.

Опишем каждую выделенную область рисунка 3.

1 - основное меню программы.

2 - кнопки, позволяющие создавать и сохранять проект, открывать уже имеющийся проекты, клавиша возврата на одно действие назад Undo и перемещения на одно действие вперед Redo и т.п.

3 - панель, на которой расположены клавиши выбора между созданием двумерной модели Insert Maxwell 2D Design и трехмерной модели Insert Maxwell 3D Design.

4 - панель Project Manager. В этой области задаются граничные условия, токи и напряжения, порождающие магнитные поля, задаются параметры анализа и т.п.

5 – область для построения геометрии исследуемой модели.

6 - здесь отображаются свойства выделенных объектов. В этом же окне можно их изменять.

7 - в окне Message Manager выводятся сообщения об ошибках, если какие-либо из условий, необходимых для проведения анализа, не соблюдены. Здесь отображается краткое описание выводимых ошибок, а также показываются некоторые служебные сообщения программы.

8 – в панели Progress выводится информация о ходе выполнения моделирования.

9 – строка состояния. Отображается выполняемая операция и её опции.

10 – дерево модели. В этой области расположена вся информация о действиях, которые производились во время создания проекта. В этом же окне можно отменить какие-либо действия, если это необходимо.

11 - инструменты для построения геометрии модели.

12 – построение точки - Draw point, плоскости - Draw plane или же границы - Create Region, отстоящей от всех объектов геометрии на определенное расстояние. В выпадающем меню этой области можно выбрать, где строить выбранный объект – на плоскости или вдоль оси (x или y).

13 – операции, позволяющие объединять объекты, вычитать один из другого, перемещать, копировать, поворачивать и т.п.

14 – Область для выбора материала выделенного объекта. В выпадающем меню можно выбрать учитывать ли выделенный объект при моделировании или же не принимать его в расчет.

15 – перемещение по области построения геометрии 5, вращение вокруг объектов, функции масштабирования. Здесь также находятся функции всевозможного перемещения основной системы координат, создание дополнительной и т.п.

16 – Функции, позволяющие скрывать выделенные объекты. Например, объекты, которые мешают при построении модели. Скрытый объект учитывается системой при моделировании. Чтобы выделенный объект не учитывался, необходимо активировать функцию Non Model в выпадающем меню области 14.

Рассмотрим некоторые комбинации клавиш, значительно облегчающих

работу с программой.

Shift + ЛКМ (левая клавиша мыши) – перемещение, с помощью мыши, по области построения.

Нажатое колесико мыши - изменение угла обзора при перемещении мыши.

Alt + двойной щелчок ЛКМ – в зависимости на какой области экрана будет произведен двойной щелчок мыши, будет показан вид сверху, слева, справа и т.п.

Gtrl + D – программа подстраивает оптимальный масштаб так, чтобы на экране уместились все объекты проекта.

Gtrl + A – выделение всех объектов.

Gtrl + Shift + A – снять выделение со всех объектов.

Gtrl + ЛКМ – выделение нескольких объектов. Каждый следующий щелчок выделяет следующий объект.

F3/ F4 – при построении объекта меняет способ ввода параметров объекта.

F6/ F7 – меняет способ отображения объектов – объекты закрашены или же прозрачны.

Tab – при построении объекта удобно переключаться между полями ввода координаты точки или же между другими параметрами создаваемого объекта.

Для исследования магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности, создадим 2D модель. Чтобы приступить к построению модели, нажимаем кнопку Insert Maxwell 2D Design в области номер 3. После чего программа примет вид как на рисунке 3, но без геометрических построений.

Создание модели начнем с геометрических построений [7].

2.2 Создание геометрии модели

Переходим во вкладку Maxwell2D – Solution type (рисунок 4).

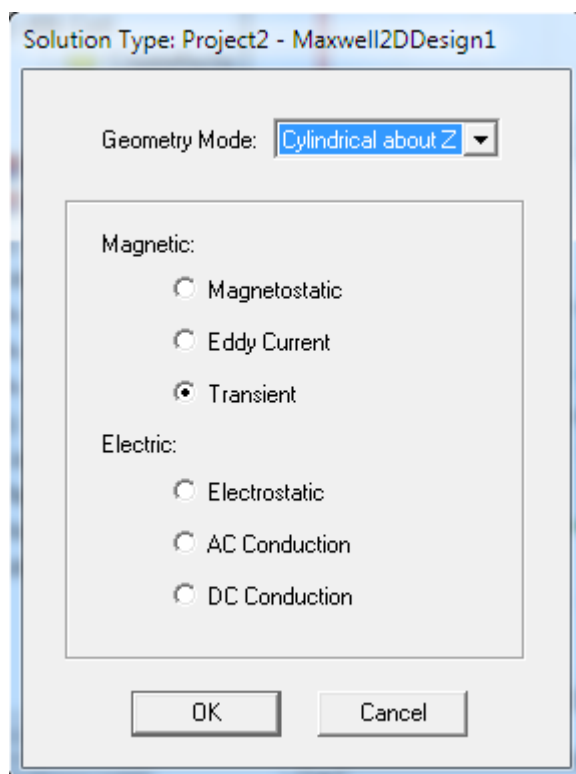


Рисунок 4 – Окно Solution type

Будем моделировать процессы, происходящие во времени, поэтому выбираем тип анализа – Transient. В выпадающем меню Geometry Mode нам предложено два варианта выбора: Cartesian XY – плоская задача и Cylindrical about Z – цилиндрический тип задачи. Выбираем цилиндрический тип.

Переходим во вкладку Modeler – Units (рисунок 5) и выбираем необходимые единицы измерения, в которых будем строить модель. В нашем случае удобнее всего строить в миллиметрах, поэтому здесь все оставляем без изменений. Функция Rescale to new units необходима в том случае, если вы, например, начали построения в миллиметрах, а потом вдруг поняли, что размеры необходимо было вводить все же в сантиметрах. Активировав данную опцию, квадрат размером 10x10 мм будет преобразован в квадрат 10x10 см. Если же галочку оставить нетронутой, то размеры квадрата останутся 10x10мм (т.е. 1x1см), в то время, как все объекты будут вводиться в сантиметрах.

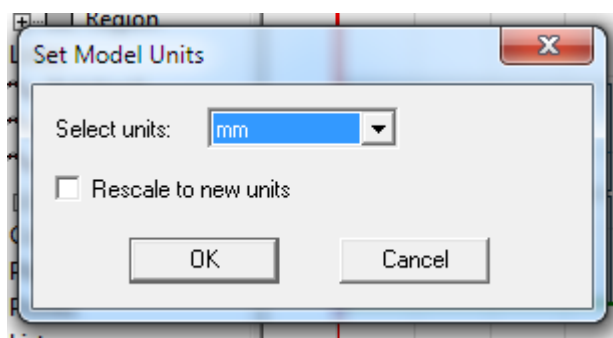


Рисунок 5 – Окно Set Modeler Units

Выбираем инструмент Draw line в области 11 (рисунок 3) и рисуем нижнюю чашку катушки индуктивности. Как только замкнутая линия построена, то нажимаем правую клавишу мыши (ПКМ) и выбираем пункт Done. Если в результате проделанных действий программа создала линию, а не объект, то проделываем следующую последовательность действий. В области 10 (рисунок 3) переходим на вкладку Lines, выбираем созданную нами линию. Нажимаем на выбранном объекте (на линии в дереве модели) ПКМ и переходим по ссылке Edit – Surface – Uncover Faces. В результате проделанных действий линия из раздела Lines перейдет в раздел Sheets, а сама преобразуется в плоский объект. Чтобы каждый раз так не делать, необходимо перейти в Tools – Options – Modeler Options (рисунок 6) и установить галочку напротив пункта Automatically cover closed polylines [8].

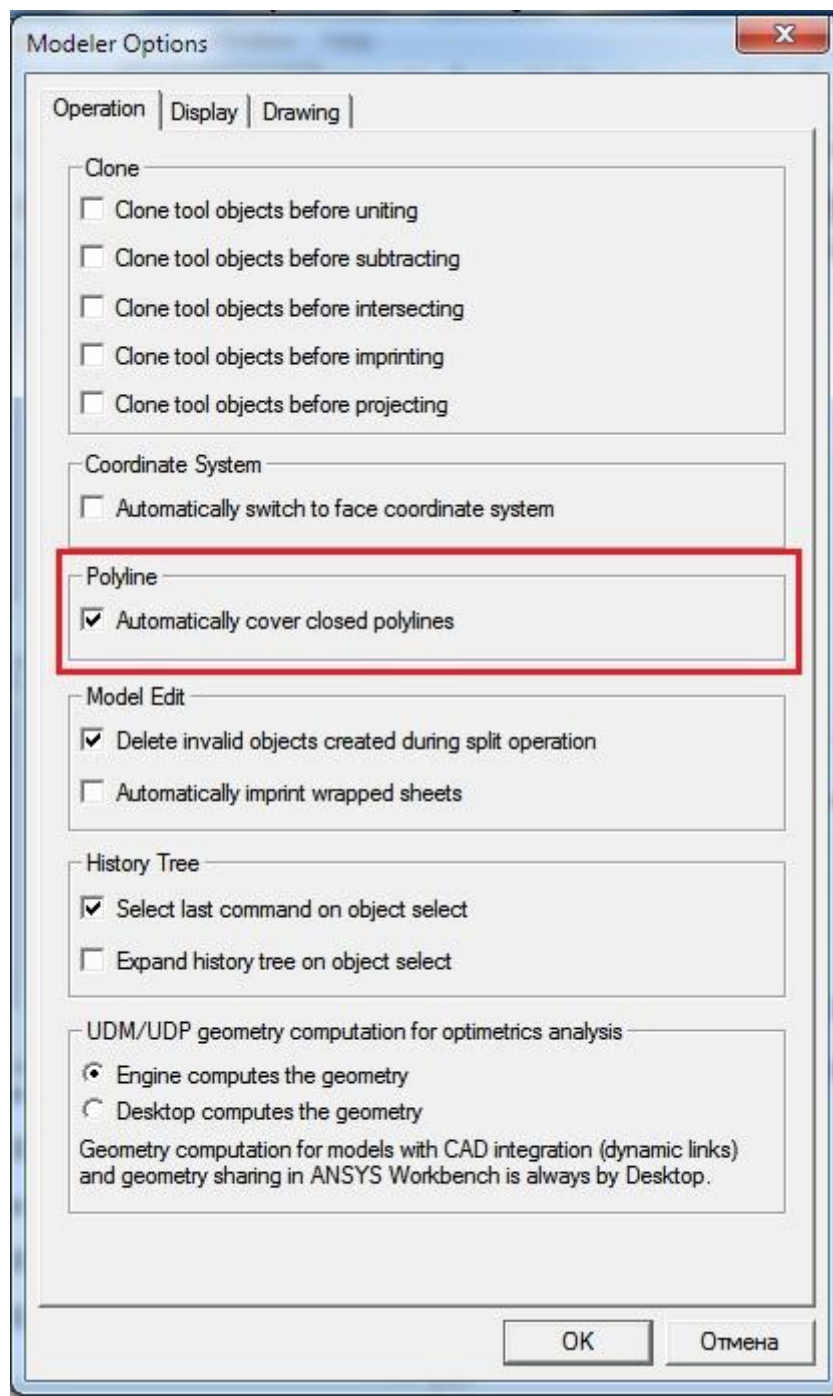


Рисунок 6 – Окно Modeler Options

В результате должно получиться так, как показано на рисунке 7.

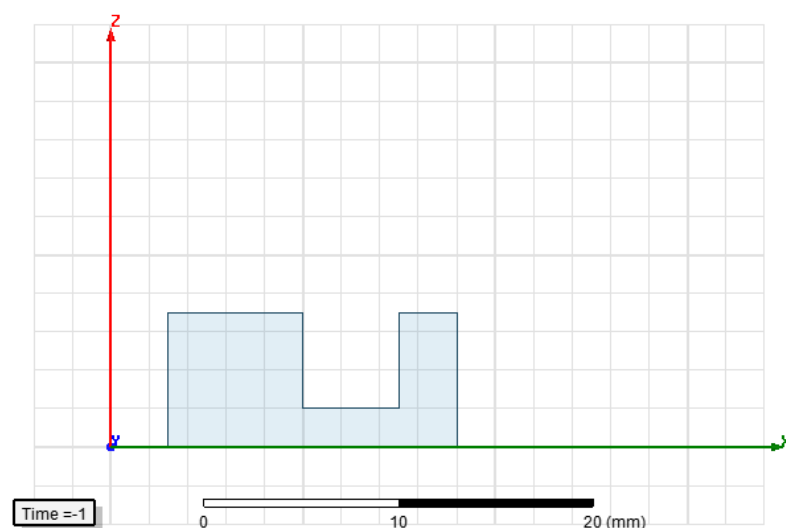


Рисунок 7 – Построение геометрии

Строим только правую часть катушки, так как модель получается путем вращения вокруг оси Z (это мы выбрали, когда указали тип моделирования – цилиндрическая задача (Cylindrical about Z)).

Выделяем построенный объект, выбираем Mirror Duplicate в области 13 (рисунок 3), нажимаем на верхний левый угол объекта и при помощи мыши создаем аналогичный объект, соответствующий верхней чашке сердечника катушки (рисунок 8).

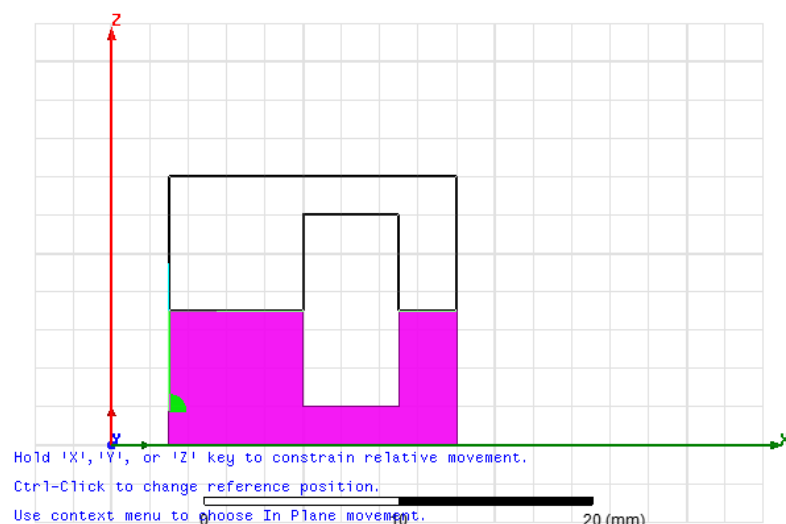


Рисунок 8 – Применение опции Mirror Duplicate

Выделяем верхнюю чашку катушки и выбираем инструмент Move в области 13 (рисунок 3). Нажимаем на нижнюю грань верхней чашки магнитопровода. При помощи клавиши Tab устанавливаем $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$. После чего появляется окно Properties (рисунок 9).

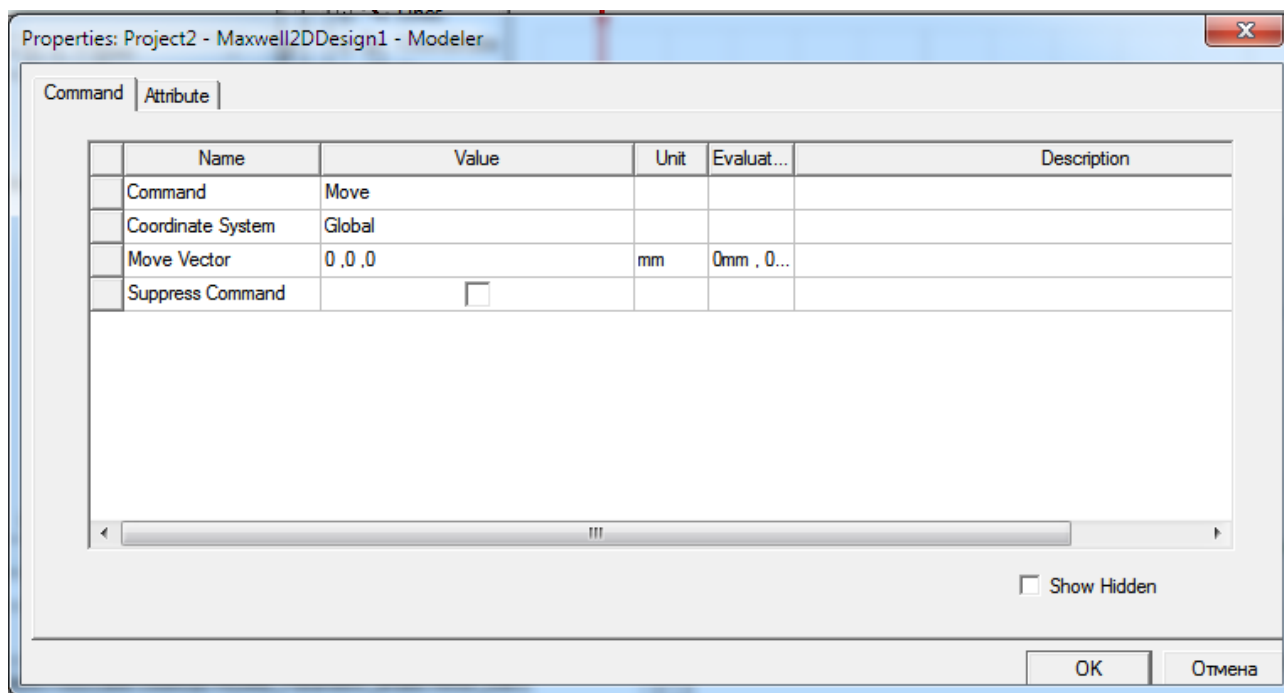


Рисунок 9 – Окно Properties

В пункте Move Vector указываем: 0, 0, delta.

Maxwell предлагает окно для создания переменной Add Variable (рисунок 10).

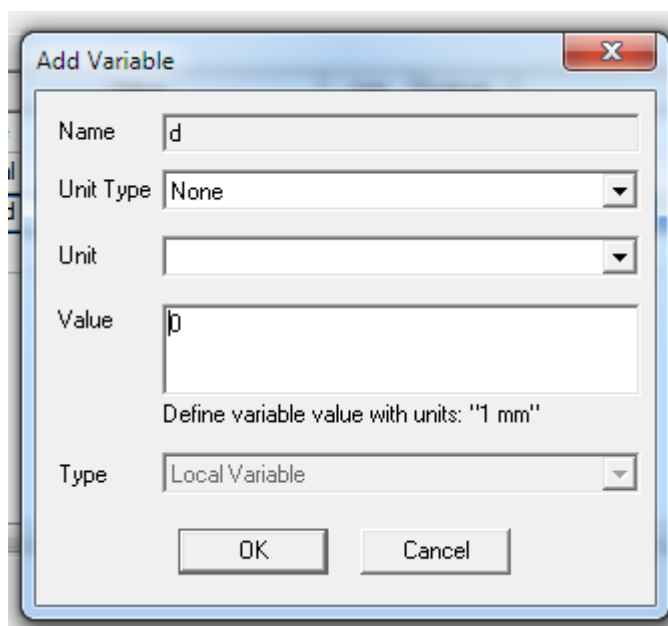


Рисунок 10 – Окно Add Variable

Выбираем тип переменной Unit Type: Length, единицы измерения Unit: mm и нажимаем Ok. Таким образом мы создали переменную, которая определяет зазор в сердечнике. Если вдруг нам понадобится изменить зазор, то будет достаточно один раз нажать на название проекта в области Project

Manager и в области Properties изменить значение переменной delta (рисунок 11).

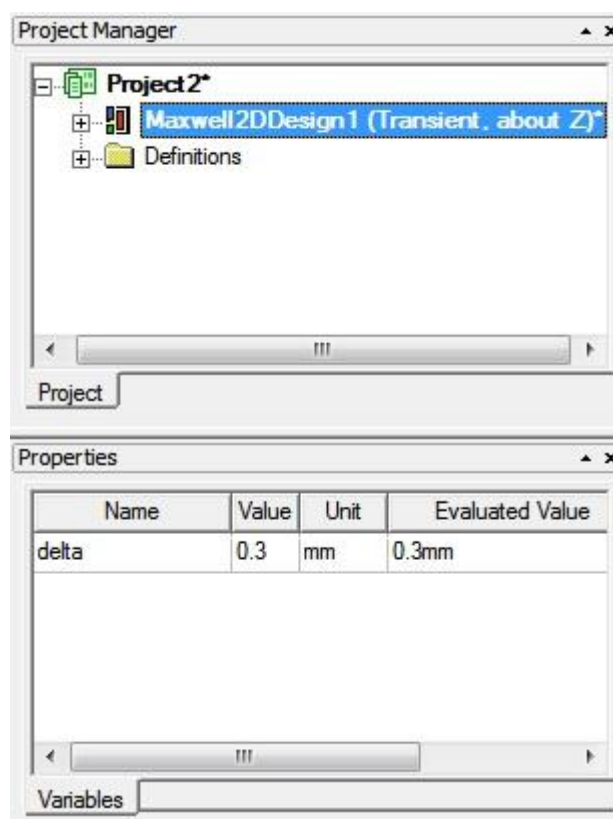


Рисунок 11 – Изменение значения переменных

Рисуем обмотку также как рисовали нижнюю чашку катушки (рисунок 12).

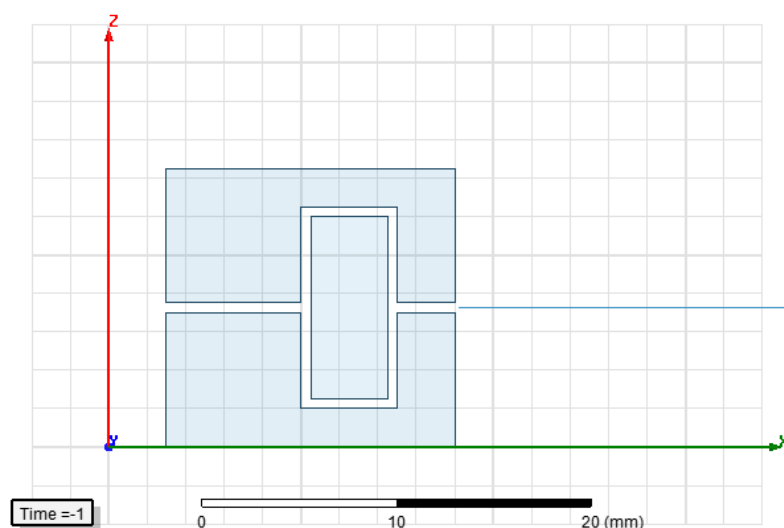


Рисунок 12 - Построение геометрии

С изменением зазора должно оставаться постоянным расстояние от верхней границы обмотки до нижней границы верхней чашки катушки. С этой

целью в дереве проекта (область 10, рисунок 3) выбираем верхнюю грань этой катушки. Далее, для координат по оси z левой и правой точки отрезка, делаем следующее: отнимаем от этих координат величину зазора и добавляем переменную delta. В результате мы добьемся постоянного зазора между верхней гранью катушки и нижней границей верхней чашки магнитопровода при изменении зазора между чашками магнитопровода.

Теперь выбираем инструмент Create Region в области 12 (рисунок 3). В результате появляется окно Region (рисунок 13).

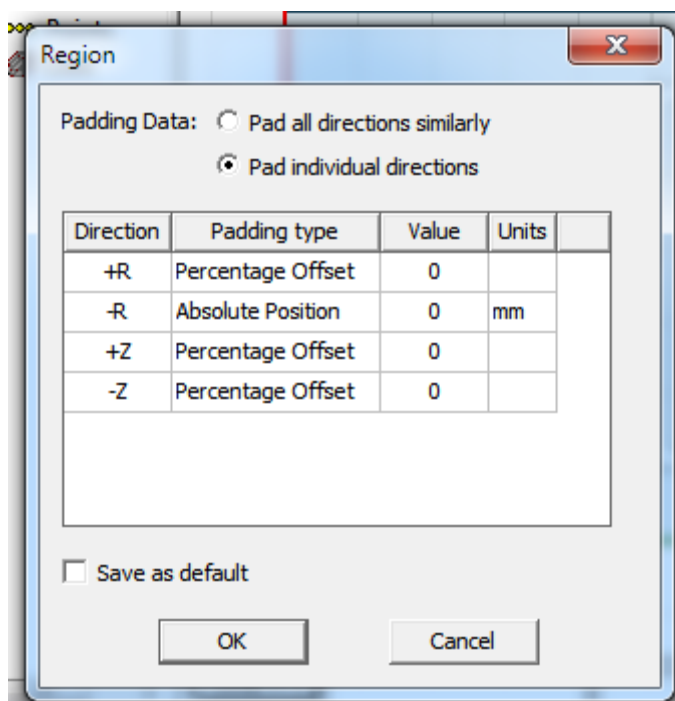


Рисунок 13 – Окно Region

В выпадающем меню Padding type можно выбрать расстояние от граничных объектов в процентах или же в абсолютном значении (в нашем случае в абсолютном значении). В верхнем меню выбираем Pad individual directions и указываем верхнюю и нижнюю границы области, а также её радиус. Если необходимо установить размер в миллиметрах, то не забываем в колонки Units выставить соответствующую размерность[9].

Для упрощения последующей подборки размеров катушки сделаем следующее. Выделяем все объекты сочетанием клавиш Gtrl + A. Нажимаем ПКМ на выделенных объектах – Edit – Scale. Появляется окно Scale (рисунок 14).

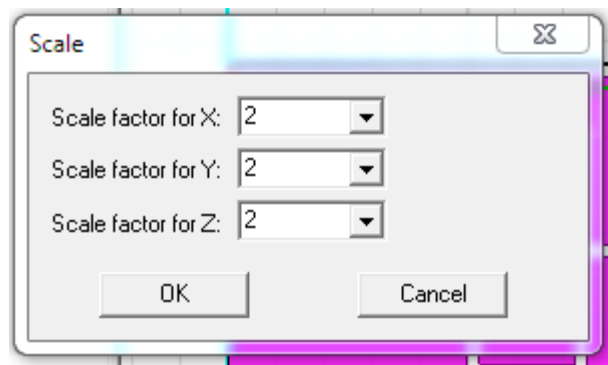


Рисунок 14 –Окно Scale

Во все ячейки заносим переменную S. Теперь, изменяя эту переменную, мы можем менять масштаб всей геометрии, не производя все построения заново.

На этом построение геометрии завершено [10].

2.3 Подготовка к моделированию и запуск моделирования

Для начала зададим материалы всем объектам. Нажимаем на катушке ПКМ и выбираем пункт Assign Material. Появляется окно, показанное на рисунке 15.

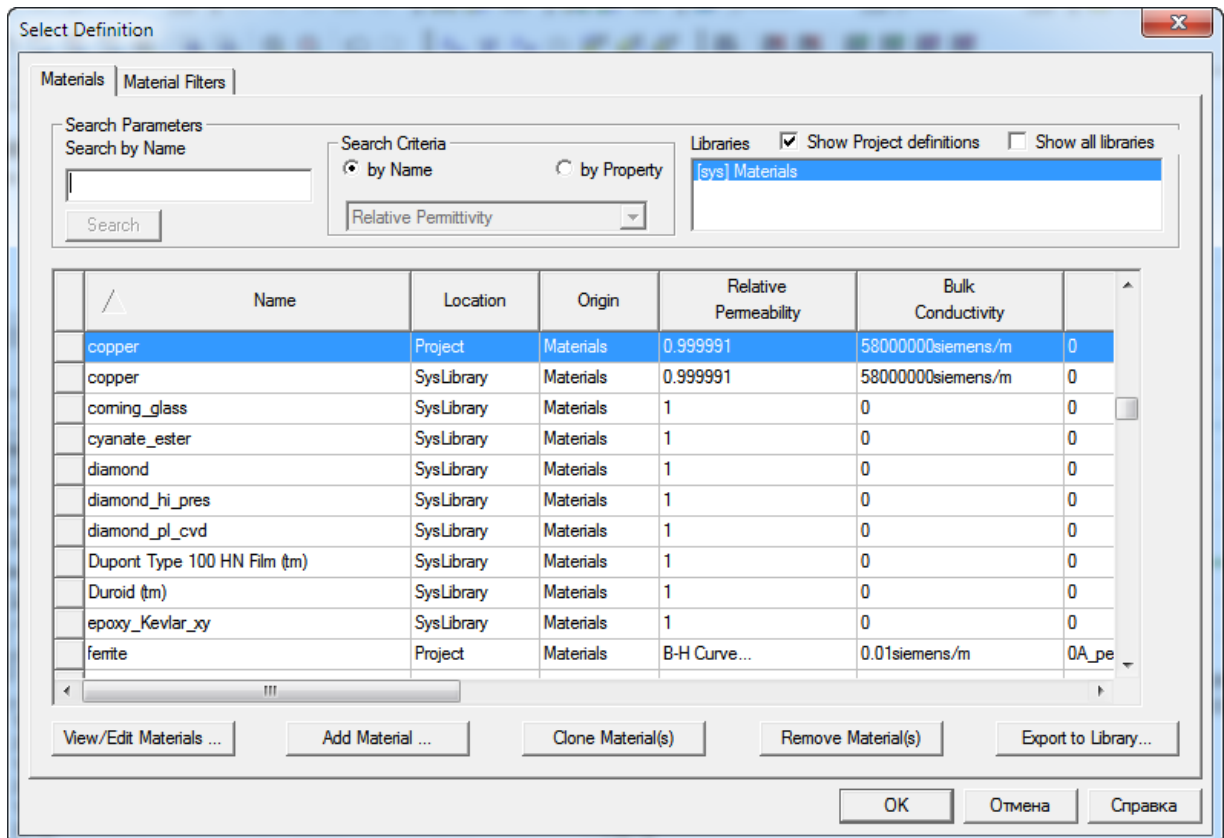


Рисунок 15 – Окно Select Definition

В область поиска Search Parameters вводим copper (медь) и нажимаем Ok. Таким же образом задаем материал вакуум для окружающего пространства, ограниченного объектом Region. Для задания материала магнитопроводу проделываем те же действия. Однако, если материал имеет кривую намагничивания, необходимо её задать. Для этого после поиска и выбора необходимого материала, например феррита, нажимаем на кнопку View/Edit Material (рисунок 15), после чего открывается одноименное окно (рисунок 16).

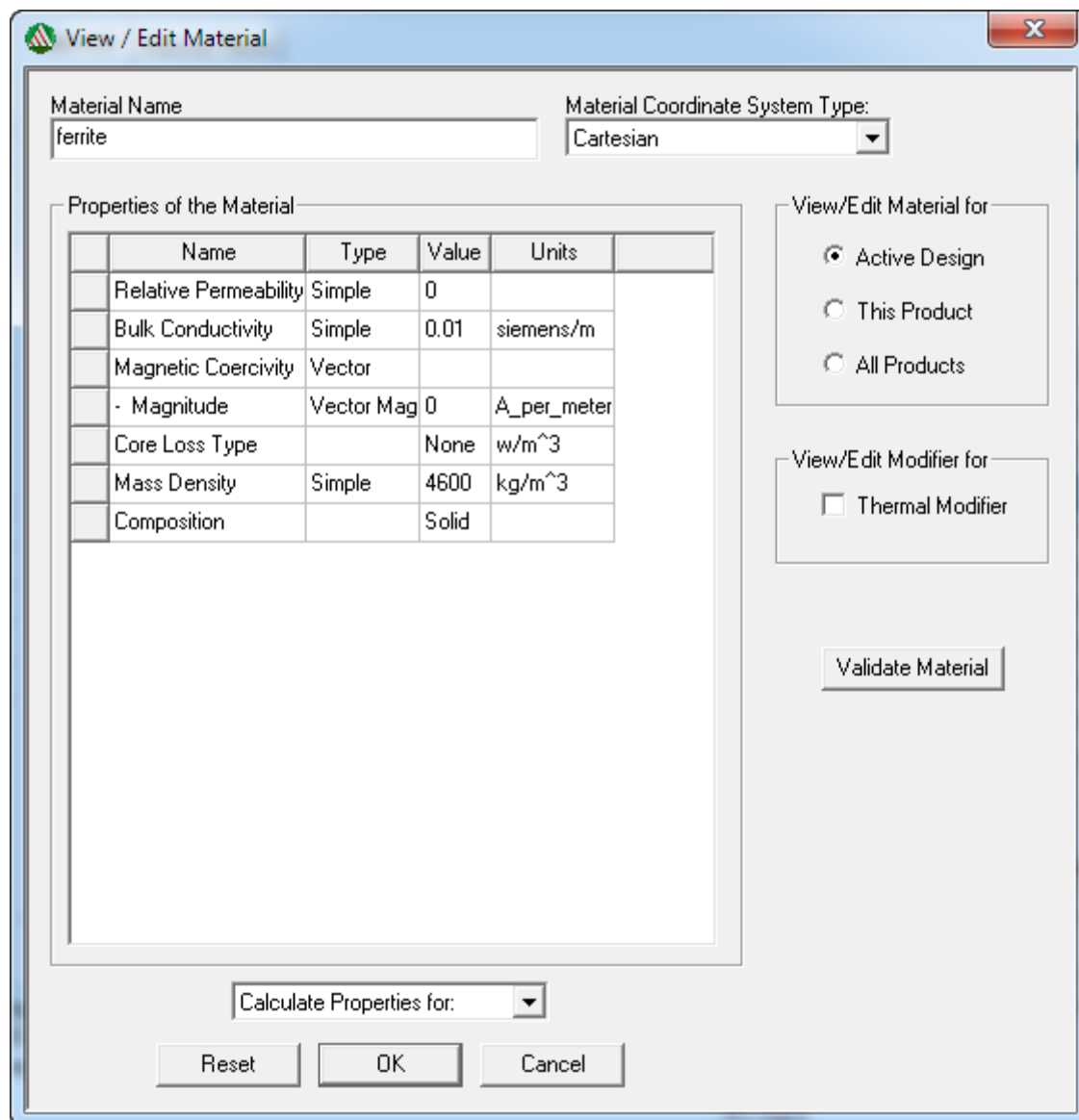


Рисунок 16 – Окно View/Edit Material

Для задания кривой намагничивания в первом столбце ищем значение Relative Permeability (магнитная проницаемость) и в выпадающем меню колонки Type выбираем опцию Nonlinear. После чего ждем на появившуюся кнопку B-H Curve в столбце Value, открывается окно, показанное на рисунке

17.

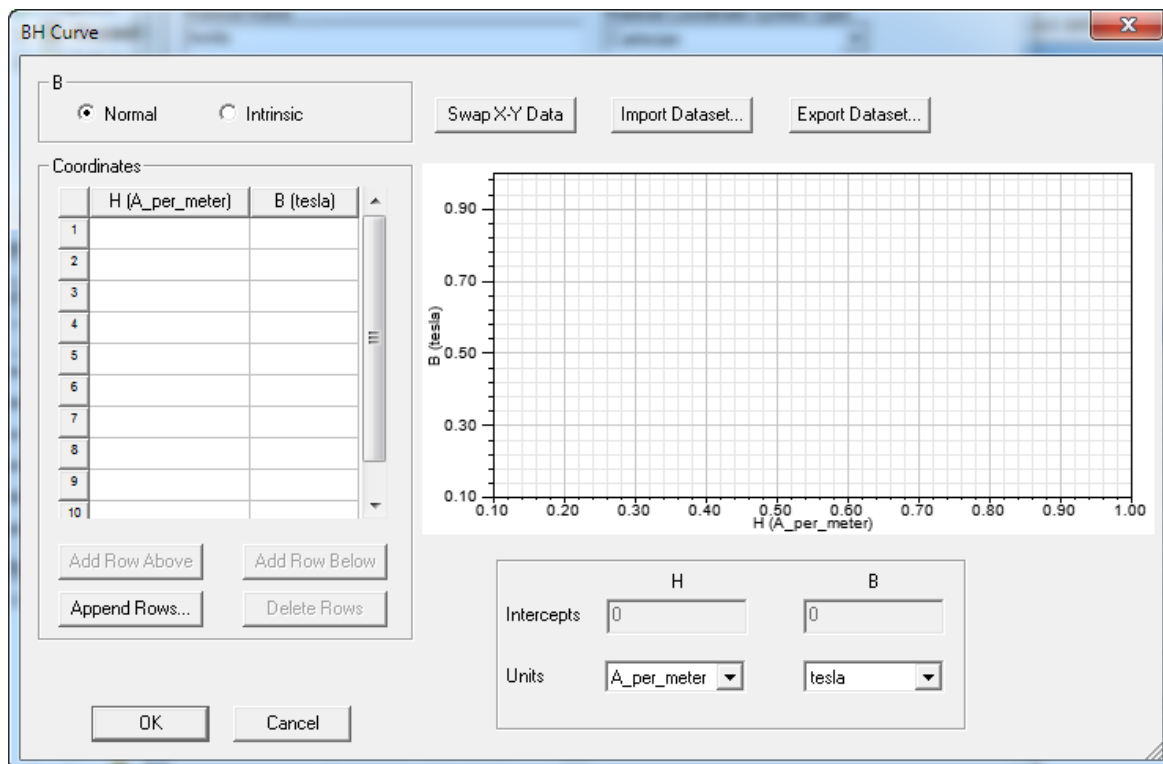


Рисунок 17 - Окно - B-H Curve

В области Coordinates вводим координаты кривой намагничивания необходимого нам материала и нажимаем Ok. После чего выходим из всех открытых до этого окон нажатием клавиши Ok. На этом задание свойств материалам завершено[11].

Зададим граничное условие. В пустом месте области 5 (рисунок 3) жмем ПКМ и выбираем Select Edges. Применяя комбинацию клавиш Ctrl+ЛКМ, выделяем все ребра граничной области Region, после чего нажимаем ПКМ – Assign Boundary – Vector Potential (рисунок 18).

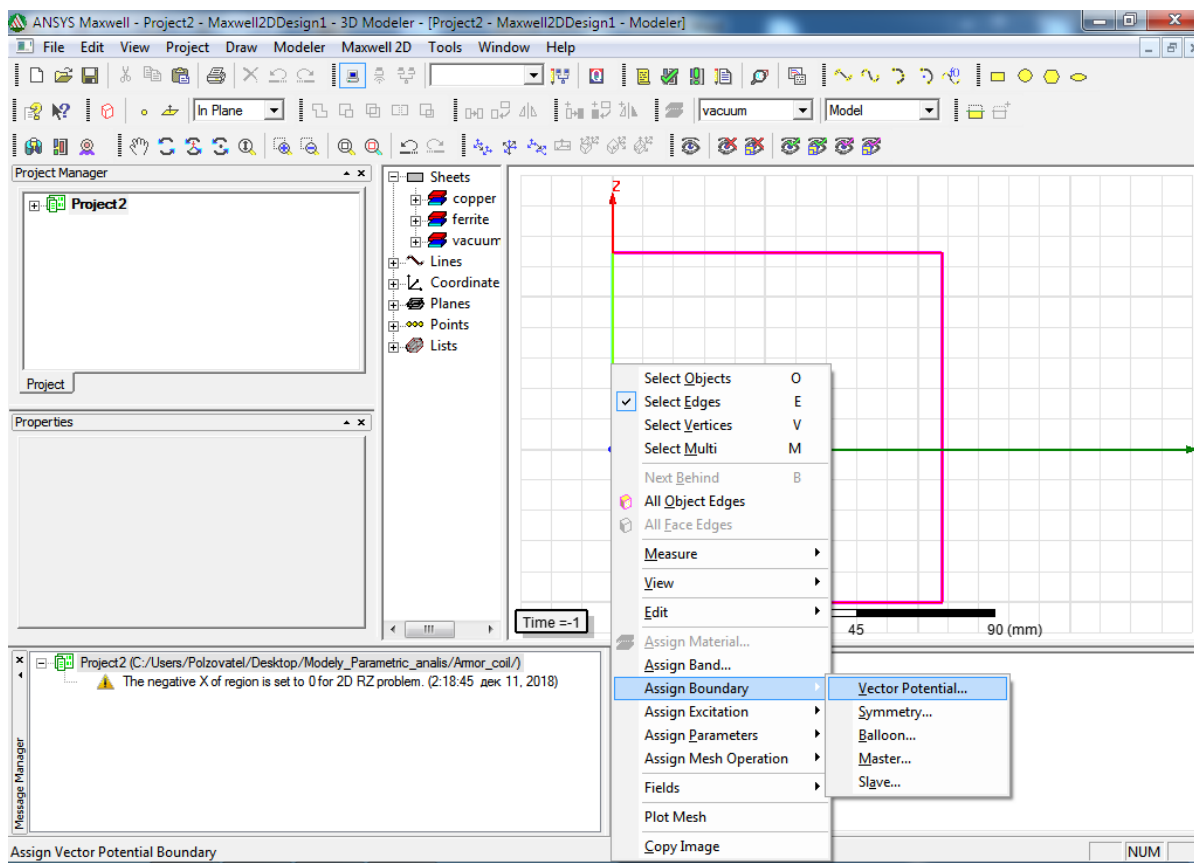


Рисунок 18 – Установка граничных условий

Открывается окно Vector Potential Boundary в котором потенциал оставляем равным нулю и подтверждаем свой выбор нажатием клавиши Ok. В области 4 (рисунок 3) в подразделе Boundary, отвечающем за граничную область, появилось граничное условие, которое задает нулевой потенциал выделенной границе объекта Region.

Зададим количество витков, обозначим обмотку, подключим катушку к схеме. Для этого нажимаем на пустом месте окна 5 (рисунок 3) ПКМ – Select Objects или просто нажимаем на клавиатуре клавишу O. Выбираем обмотку, нажимаем на обмотке ПКМ – Assign Excitation – Coil. В результате появляется окно Coil Excitation (рисунок 19).

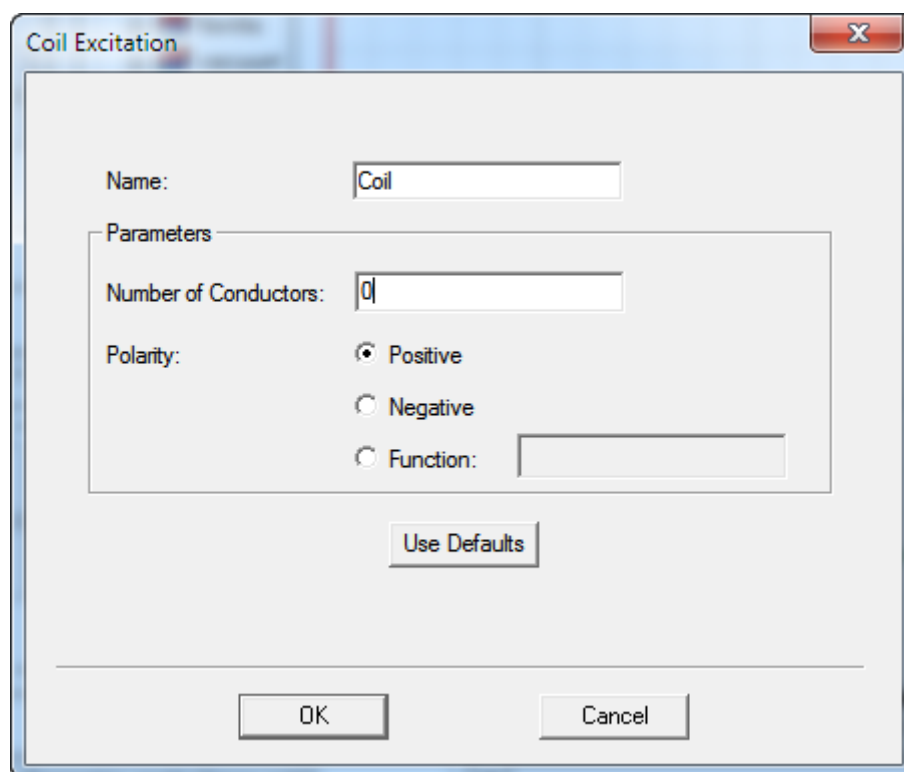


Рисунок 19 – Окно Coil Excitation

В графе Number of Conductors, указываем количество витков обмотки и нажимаем Ok. В области 4 (рисунок 3) нажимаем на параметре Excitations ПКМ – Add Winding, в результате чего открывается окно Winding (рисунок 20).

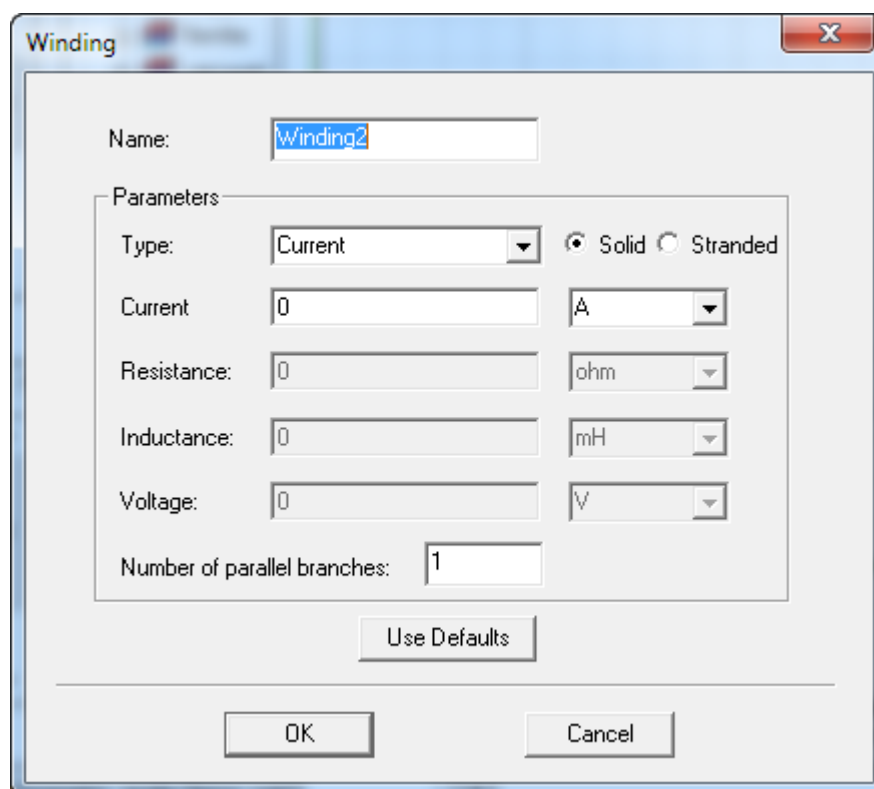


Рисунок 20 – Окно Winding

В области Parameters, в строке Type, в выпадающем меню выбираем значение External (что значит, что к катушке будет подключена внешняя схема). В области Parameters выбираем Stranded, что значит, что катушка многовитковая и не представляет собой один монолитный большой провод (как было бы в случае выбора пункта Solid). В области 4 (рисунок 3) открываем выпадающий список Excitations, нажимаем на обмотке (если её не переименовывать, то она обозначена, как Winding n, где n – порядковый номер) winding1 ПКМ – Add Coils. Появляется окно Add Terminals. Выбираем нашу катушку и жмем Ok. Теперь обмотка создана (рисунок 21) [12].

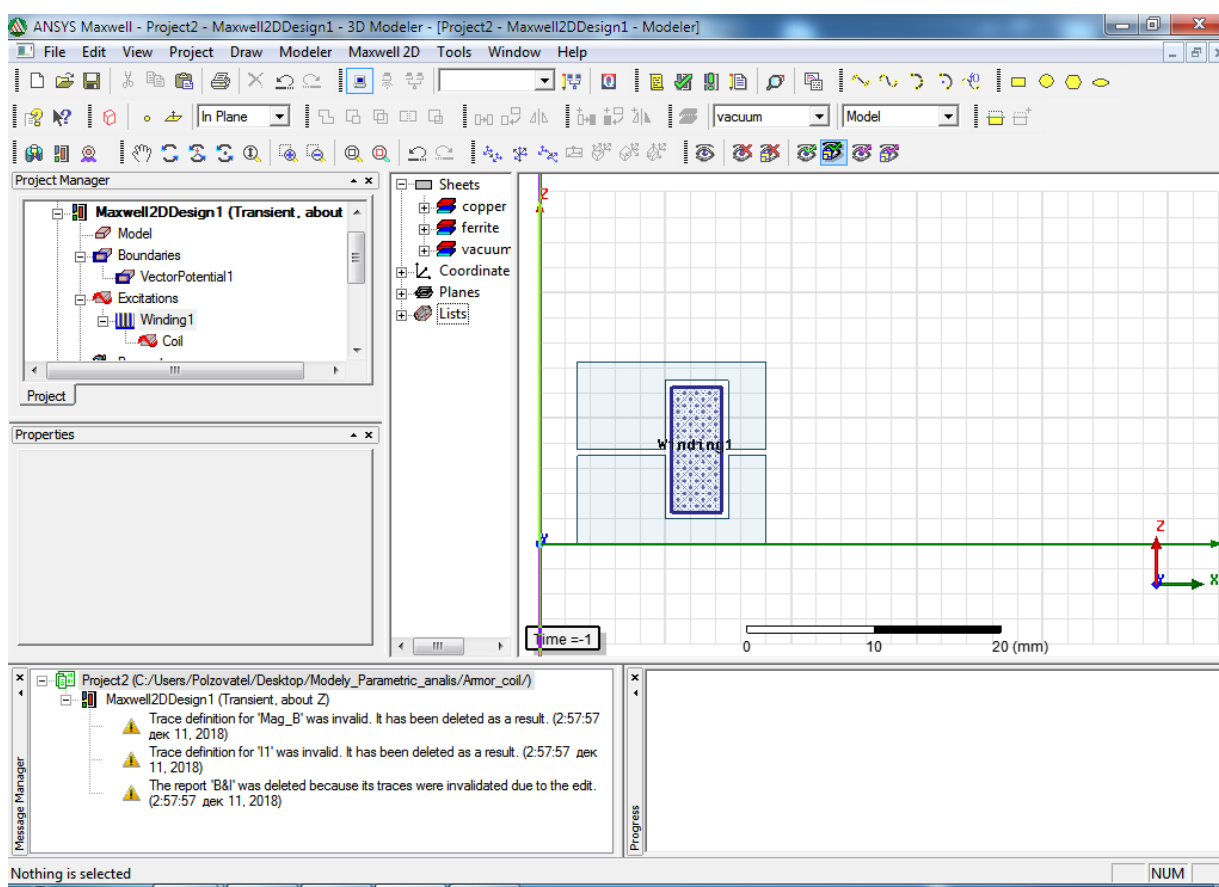


Рисунок 21 – Обмотка создана

Перейдем к подключению схемы к катушке. Для этого в области 4 (рисунок 3) нажимаем на Excitations ПКМ – External Circuit – Edit External Circuit. В появившемся окне жмем кнопку Edit Circuit в результате чего попадаем во внутренний редактор схем Maxwell (рисунок 22).

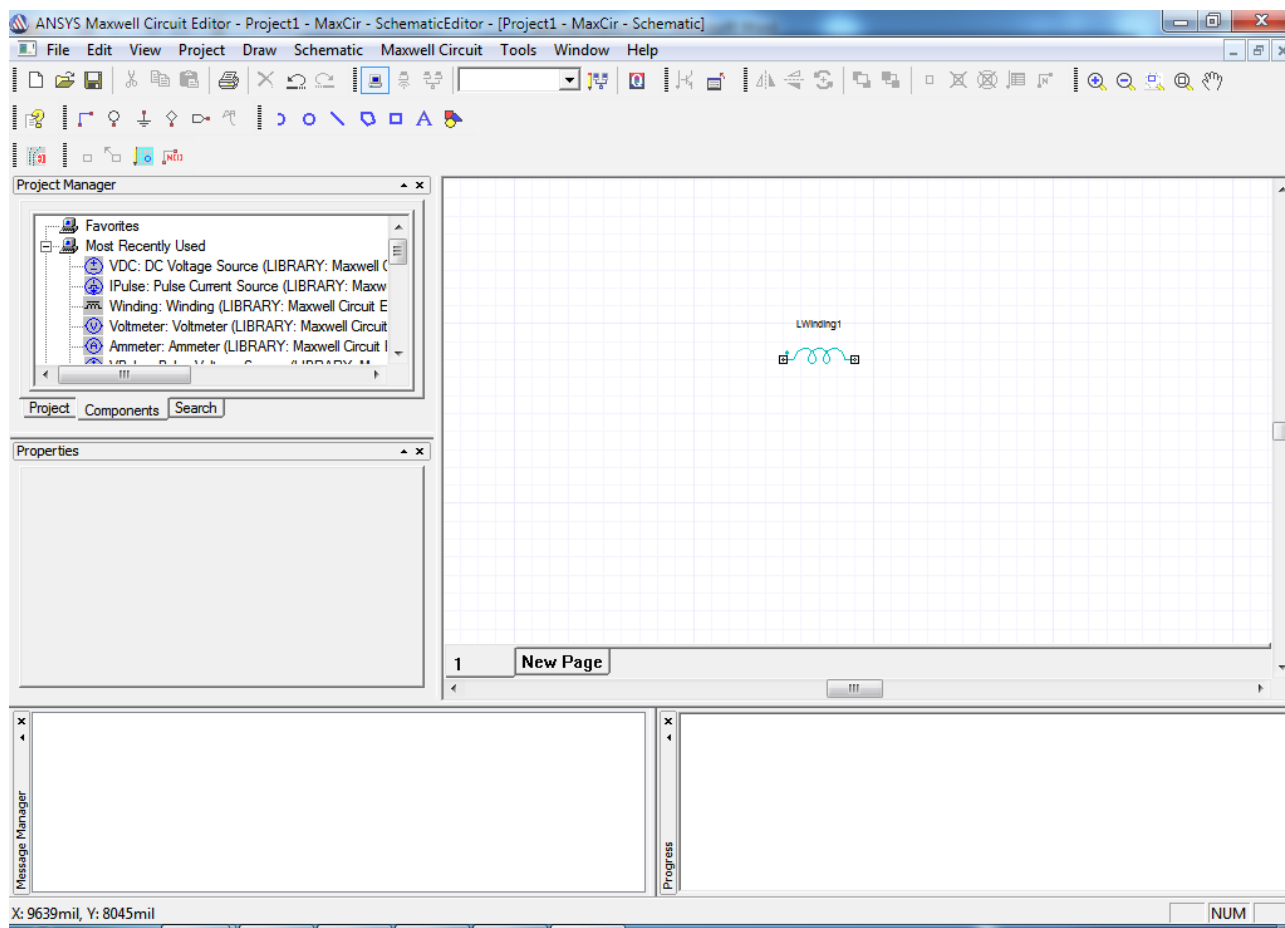


Рисунок 22 – Внутренний редактор схем Maxwell

Внутренний редактор схем имеет схожий интерфейс с Maxwell. Кто хорошо разобрался с Maxwell, тому не составит труда понять и его внутренний редактор; многие функциональные области схожи. Для составления схемы перейдем во вкладку components области Project Manager. С помощью имеющихся компонентов достраиваем схему к катушке (рисунок 23).

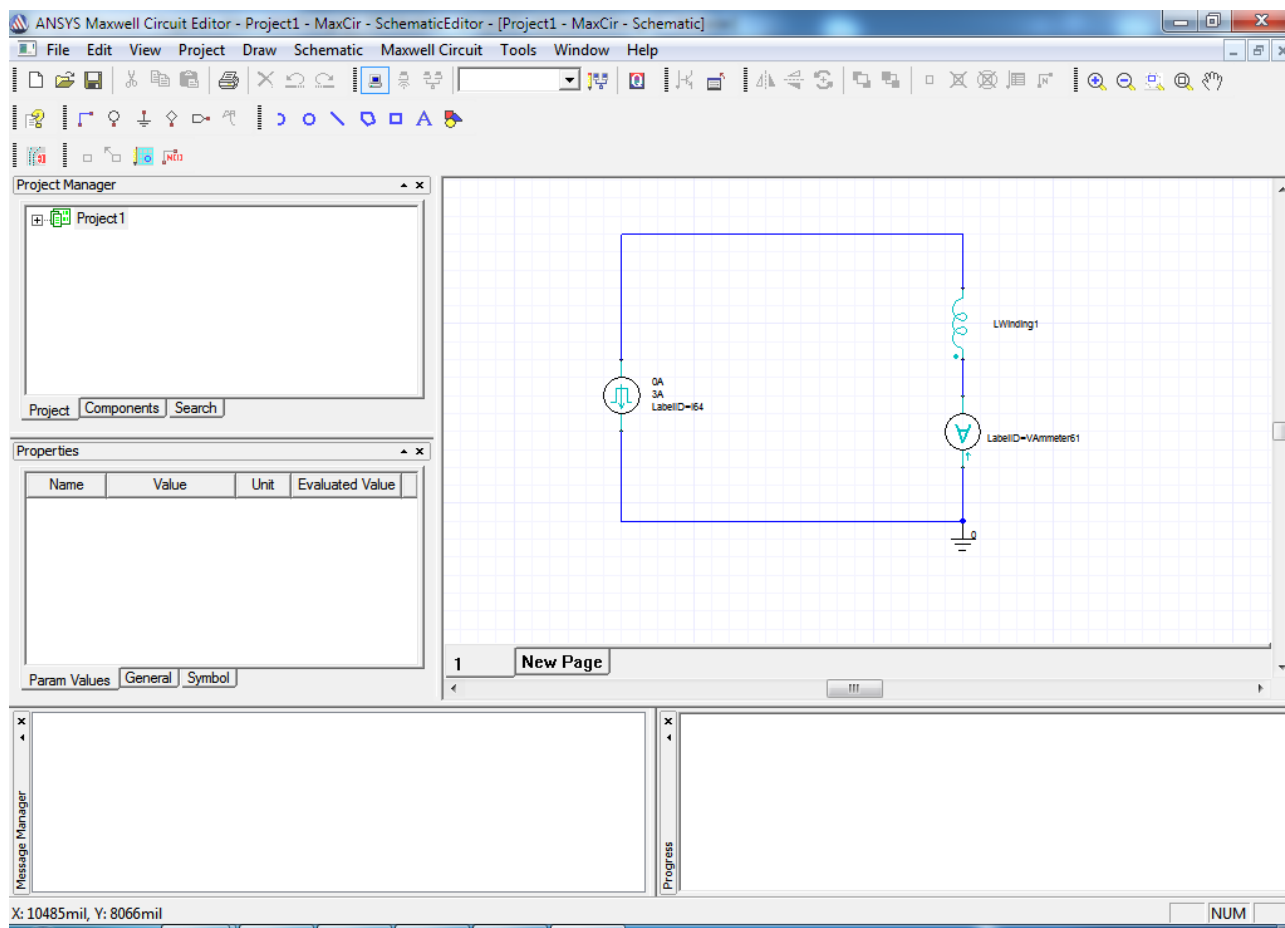


Рисунок 23 – Схема, подключенная к катушке индуктивности

Для изменения параметров элементов нажимаем на них двойным щелчком мыши, после чего откроется окно с соответствующими параметрами выбранных элементов. Например, для изменения параметров источника тока, нажимаем двойным щелчком мыши на нем, в результате появляется окно с его параметрами (рисунок 24).

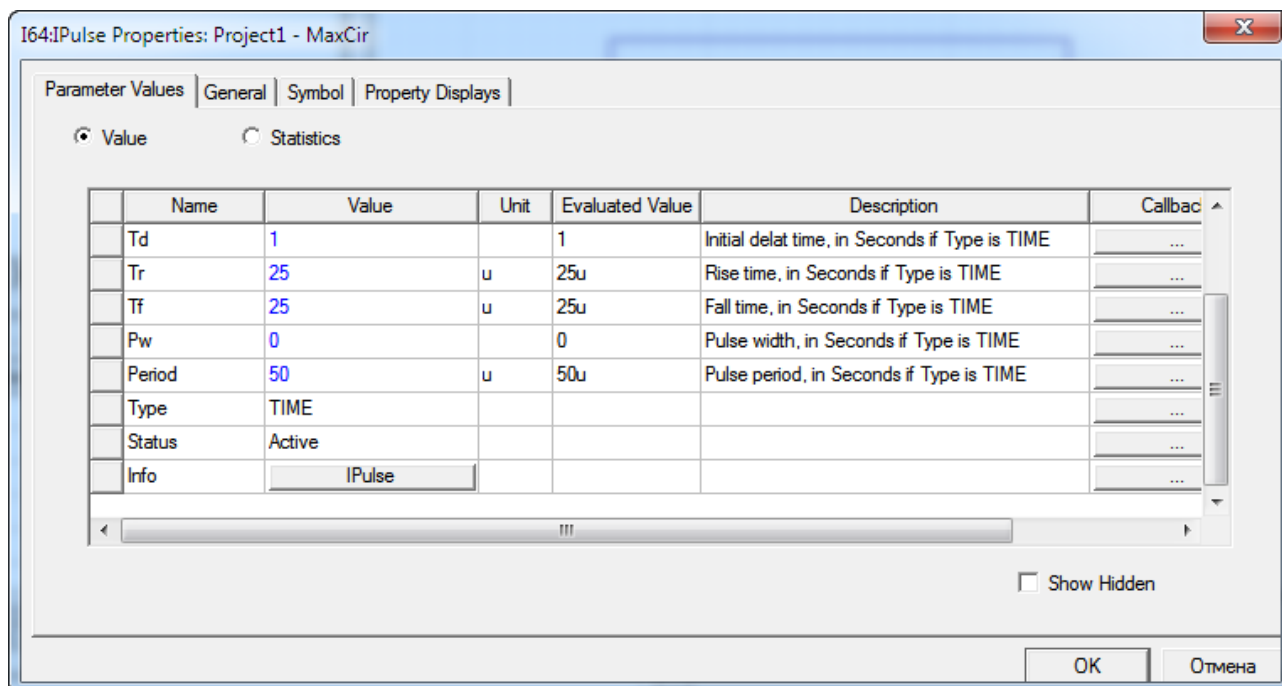


Рисунок 24 – Окно параметров источника тока

Все параметры элементов должны быть вам интуитивно понятны, если вы имели опыт работы с редакторами схем. В любом случае, вы можете вызвать справку, кликнув на название элемента в строчке Info. В справке подробно расписаны параметры выбранного элемента [13].

После того, как схема составлена, сохраняем файл схемы. Желательно, что бы потом не потерять, сохранить в папке проекта. Переходим во вкладку Maxwell Circuit – Export Netlist. Открывается окно экспорта (рисунок 25).

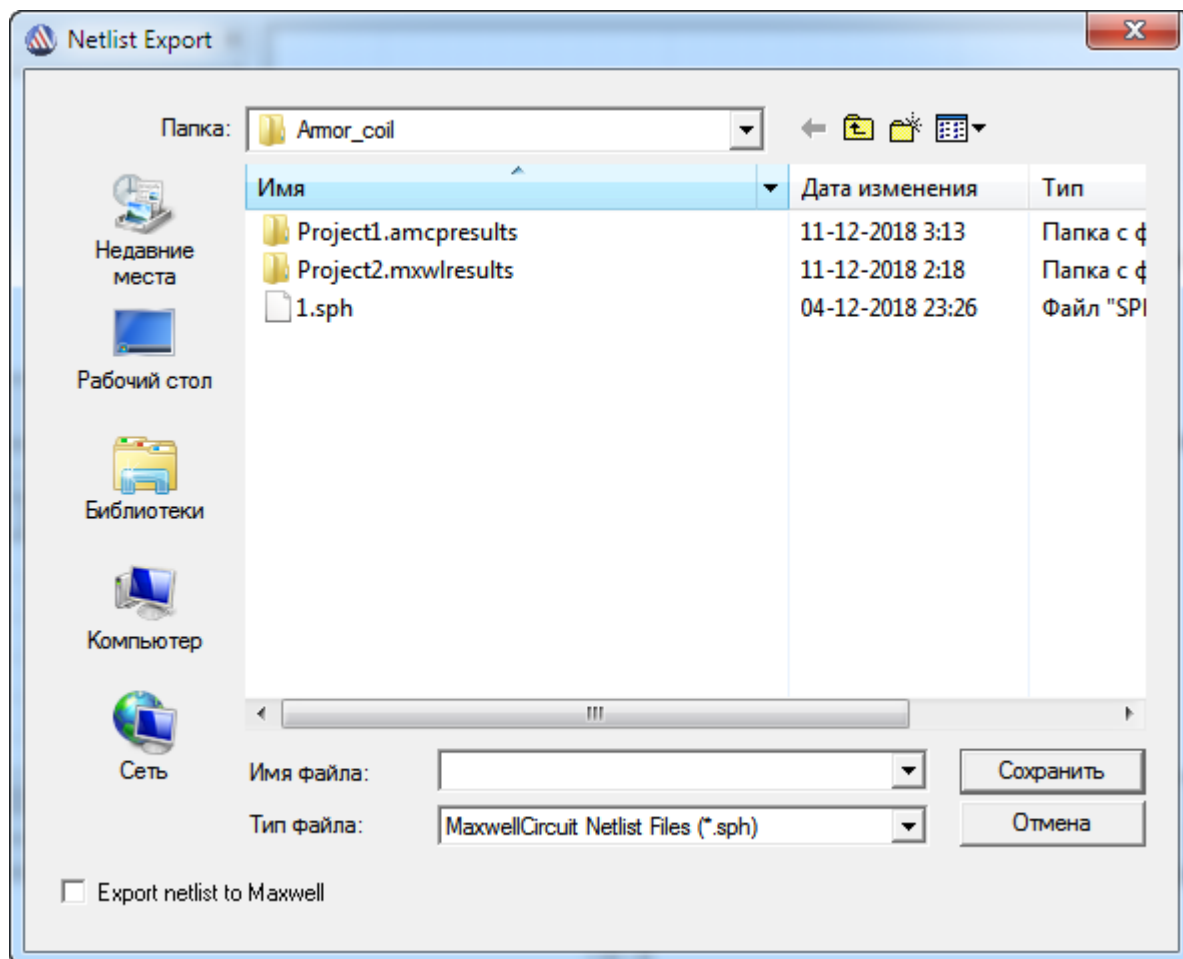


Рисунок 25 – Окно экспорта

Активируем опцию Export netlist to Maxwell, вводим имя и нажимаем на клавишу сохранить. Появляется окно, сообщающее об успешном выполнении операции (рисунок 26) [14]

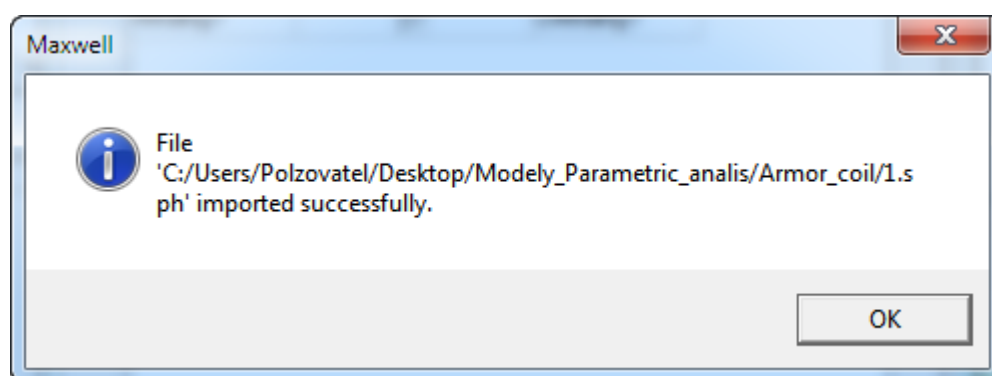


Рисунок 26 – Окно успешного выполнения операции

Зададим сетку для модели. Выделяем все элементы модели, используя сочетание клавиш Gtrl+A, нажимаем на выделенных объектах ПКМ – Assign Mesh Operation – Inside Selection – Length Based. Так же можно выбрать не Inside Selection, а On Selection. В этом случае мы будем выбирать параметры

сетки, строящейся только на краях выбранных элементов. После выбора (ПКМ на выделенных объектах – Assign Mesh Operation – Inside Selection – Length Based), появится окно Element Length Based Refinement (рисунок 27).

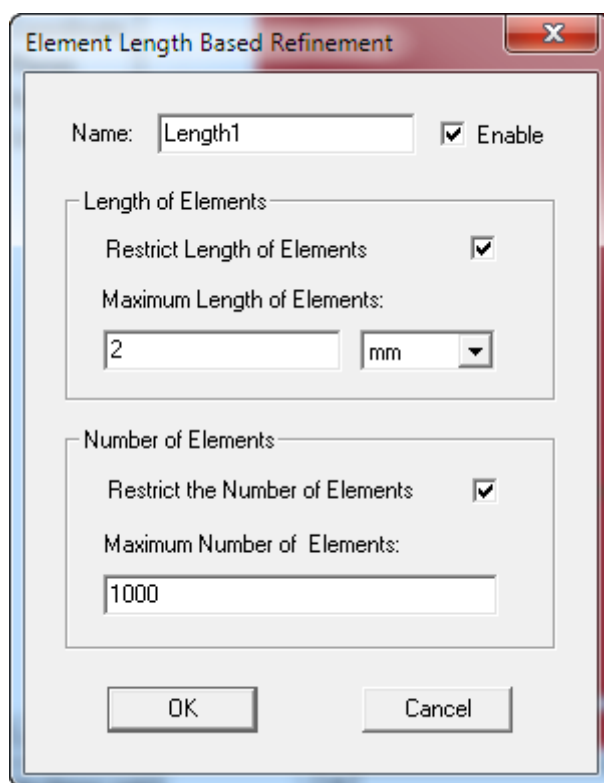


Рисунок 27 – Окно Element Length Based Refinement

В области Length of Elements необходимо указать максимальную длину ребра элемента, составляющего сетку. В области Number of elements выставляется максимальное количество элементов в выделенных областях. Нажимаем Ok. Теперь нажимаем ПКМ на вкладке Mesh Operations, находящейся в области Project Manager и переходим на вкладку Initial Mesh Settings. Появится одноименное окно, показанное на рисунке 28.

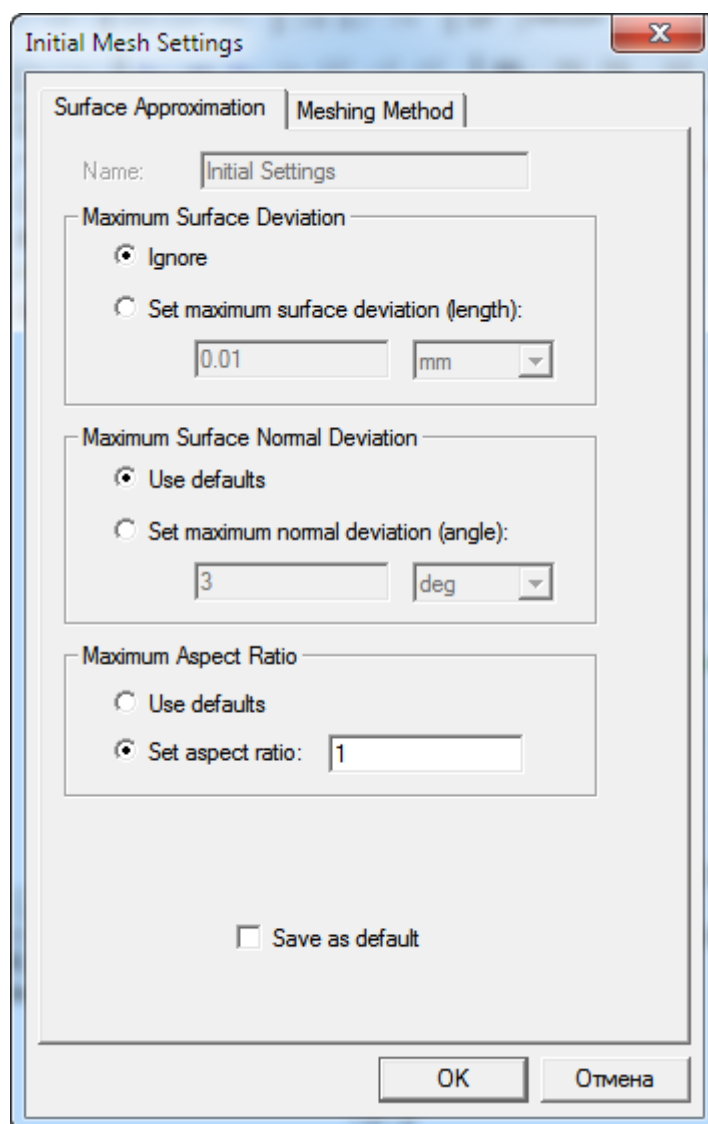


Рисунок 28 – Окно Initial Mesh Settings

В области Aspect Ratio выставляем значение, равное единице, что означает, что треугольники, составляющие сетку, будут приближаться к равносторонним треугольникам. Чем больше это значение, тем более тонкий будет треугольник, составляющий сетку. Нажимаем Ok.

Осталось только задать настройки анализа. Для этого в области Project Manager нажимаем ПКМ на параметре Analysis – Add Solution Setup. Появляется окно Solve Setup (Рисунок 29)

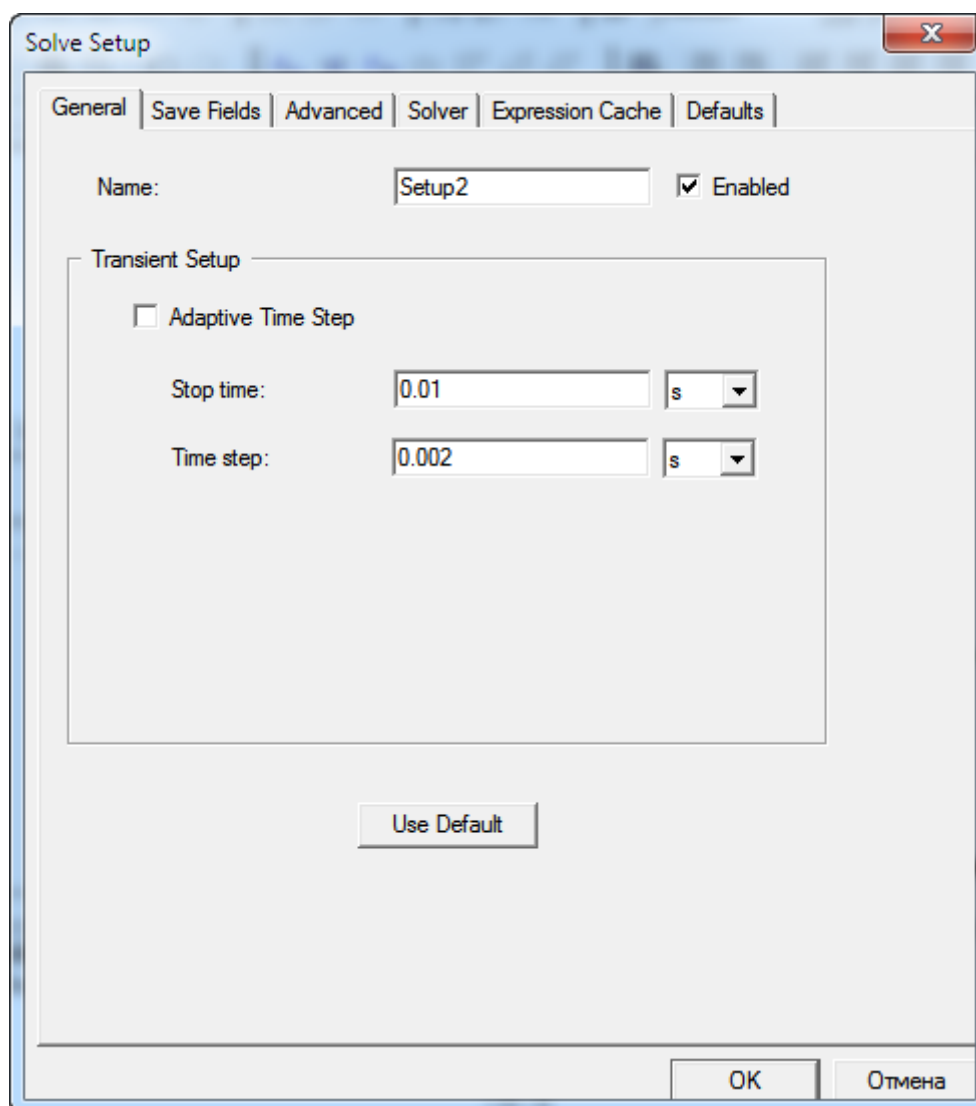


Рисунок 29 – Окно Solve Setup

В первой же вкладке, устанавливаем время окончания моделирования и шаг, с которым будет оно проведено. Во второй вкладке (рисунок 30), с помощью выбора диапазона и шага, определяются моменты времени, для которых будут сохранены все значения и картины поля.

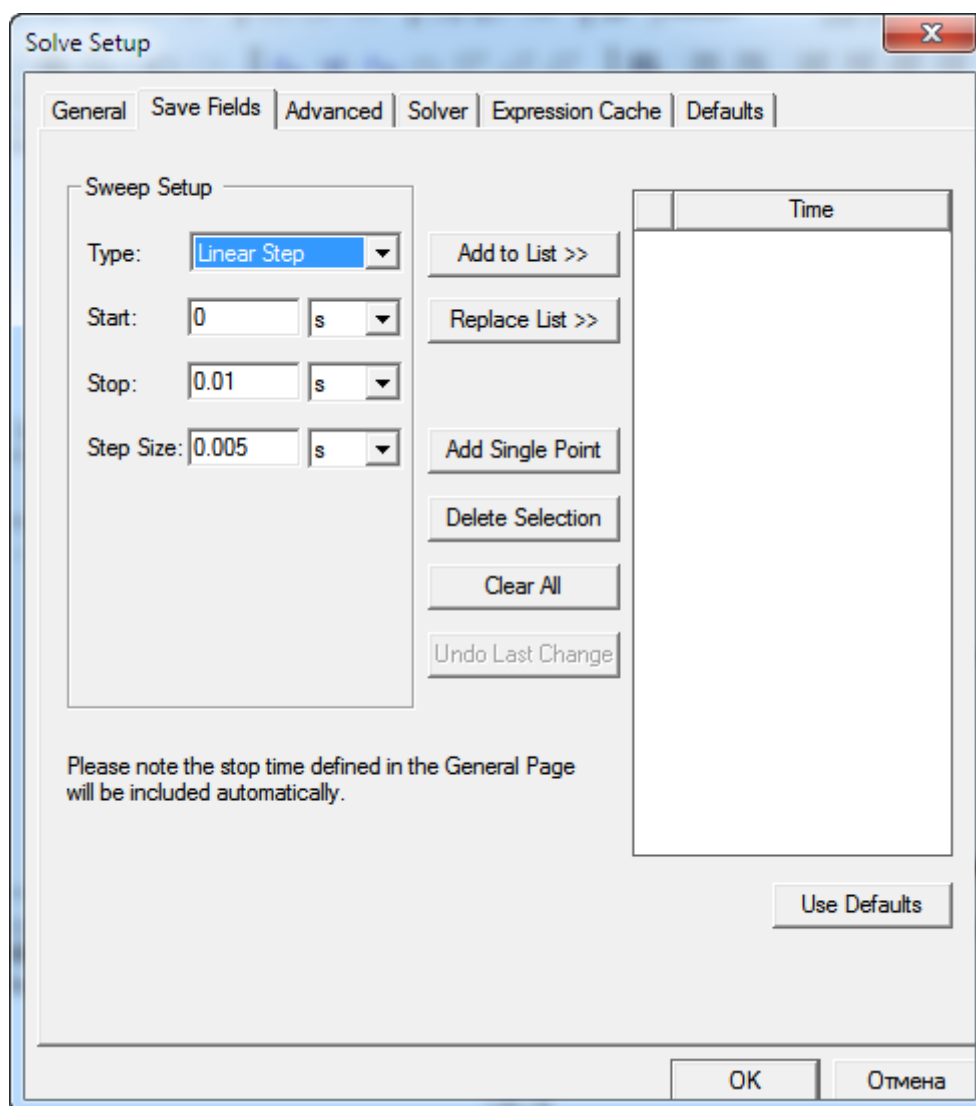


Рисунок 30 – Вкладка Save Fields

Остальные вкладки оставляем без изменения, жмем Ok и выходим из окна настроек анализа[15].

Переходим по ссылке Maxwell2D – Excitations – Set Eddy Effects, в результате чего открывается окно, показанное на рисунке 31.

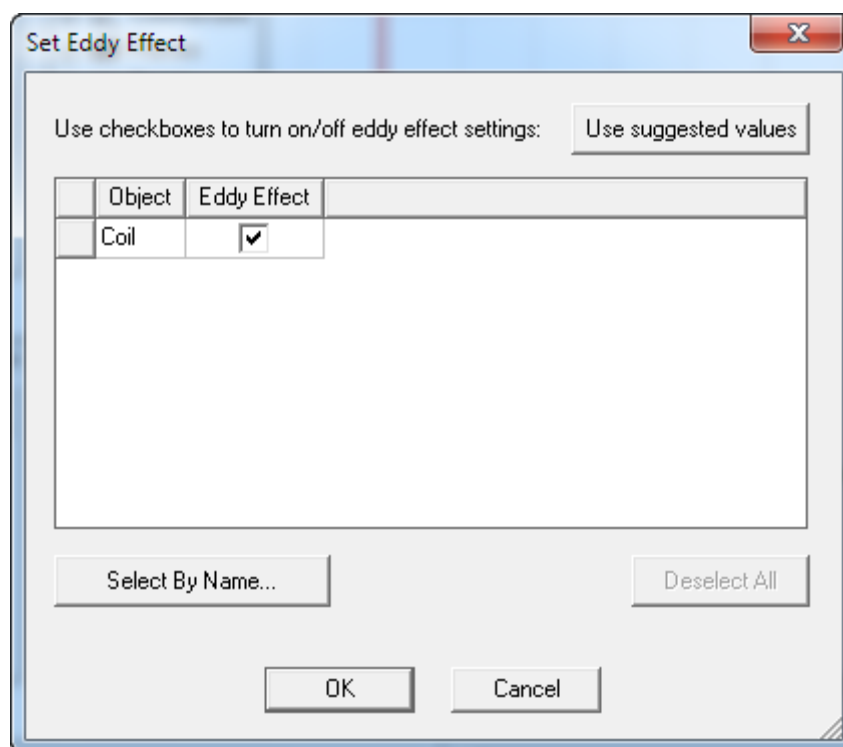


Рисунок 31 – Окно Set Eddy Effects

Необходимо установить галочку напротив нашей катушки и нажать Ok. Тем самым мы учитываем вихревые токи, имеющие место в проводнике.

Перейдем в Maxwell2D – Excitations – Set Core Loss. Появится окно, показанное на рисунке 32.

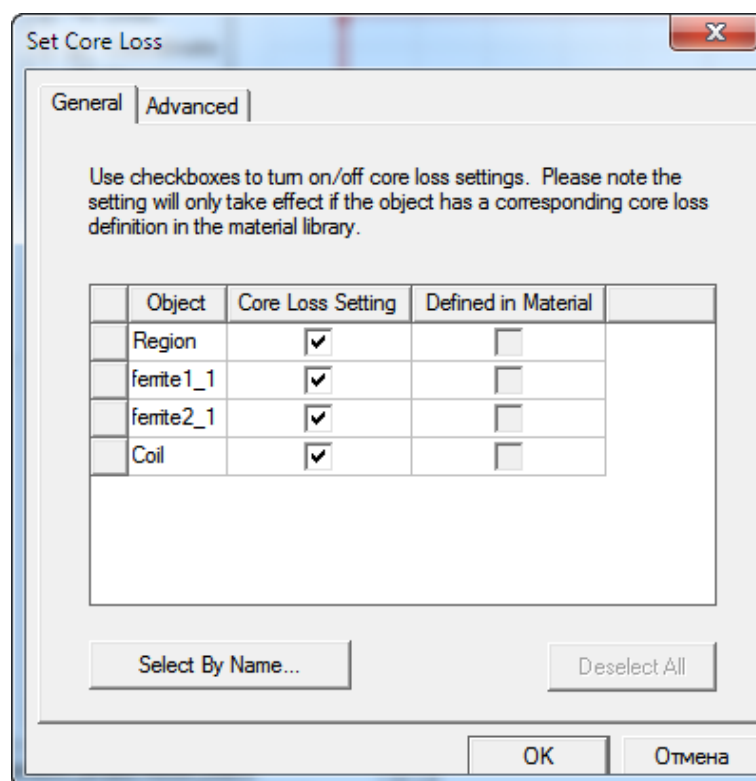


Рисунок 32 – Окно Set Core Loss

Устанавливаем галочки напротив всех объектов, тем самым учитывая потери, обусловленные гистерезисом.

Необходимо проверить, все ли готово к запуску моделирования. Для этого в области 15 (рисунок 3) выбираем опцию validate, в результате чего должна появляться картинка, показанная на рисунке 33.

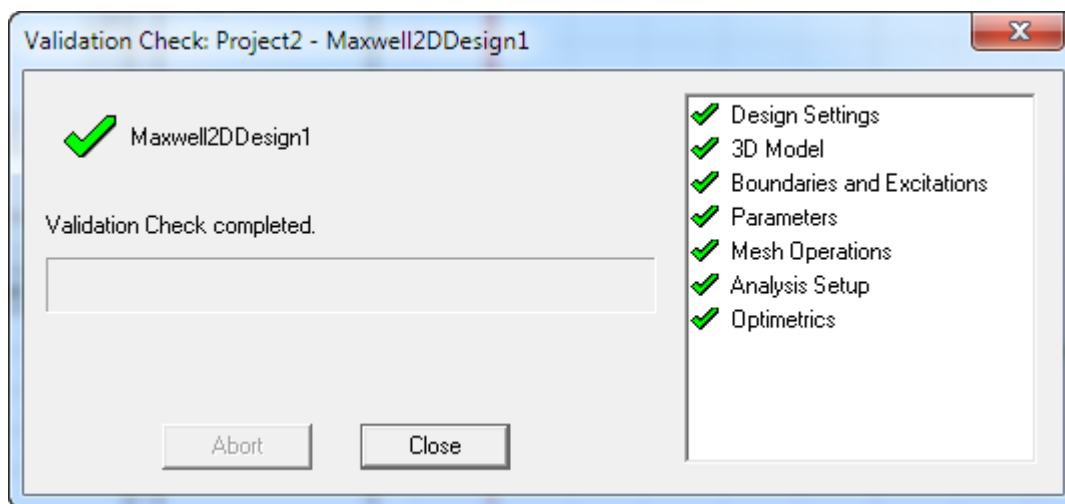


Рисунок 33 – Окно проверки Maxwell

Если что-то будет не соответствовать условию успешного начала выполнения моделирования, то программа сообщит об этом, в том числе с помощью сообщений в окне Message Manager (Область 7, рисунок 3). На этом подготовка к моделированию завершена. Нажимаем на кнопку Analyse All, находящуюся в области 15 (рисунок 3), тем самым запуская моделирование[16].

2.4 Получение результатов моделирования

После окончания моделирования в области Message Manager ошибок быть не должно. Для понимания точности всех результатов моделирования необходимо убедиться в адекватности сетки, построенной программой в соответствии с параметрами, которые мы ей указали. Для этого выделяем все объекты сочетанием клавиш Gtrl+A. В области Project Manager жмем ПКМ на пункте Field Overlays и выбираем пункт Plot Mesh. Появится окно Create Mesh Plot. Вводим название выводимого результата в поле Name и подтверждаем свой выбор нажатием клавиши Done. В нижней части области 5 (рисунок 3) двойным щелчком мыши на надписи Time = -1 вызываем окно Set View Context,

показанное на рисунке 34.

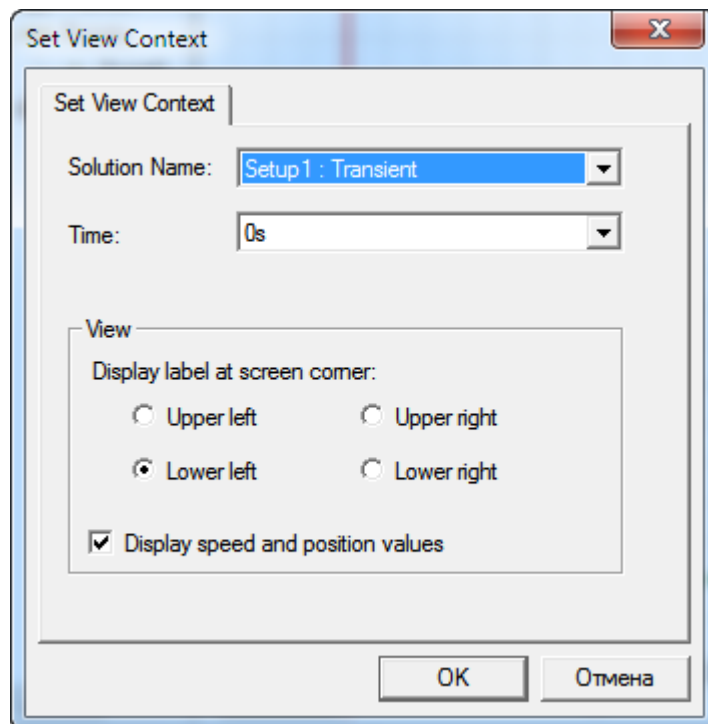


Рисунок 34 - Окно Set View Context

В пункте Time выбираем интересующее нас время (для просмотра сетки время значение не имеет) и подтверждаем свой выбор нажатием клавиши Ok. В результате в области 5 (рисунок 3) выводится сетка модели (рисунок 35).

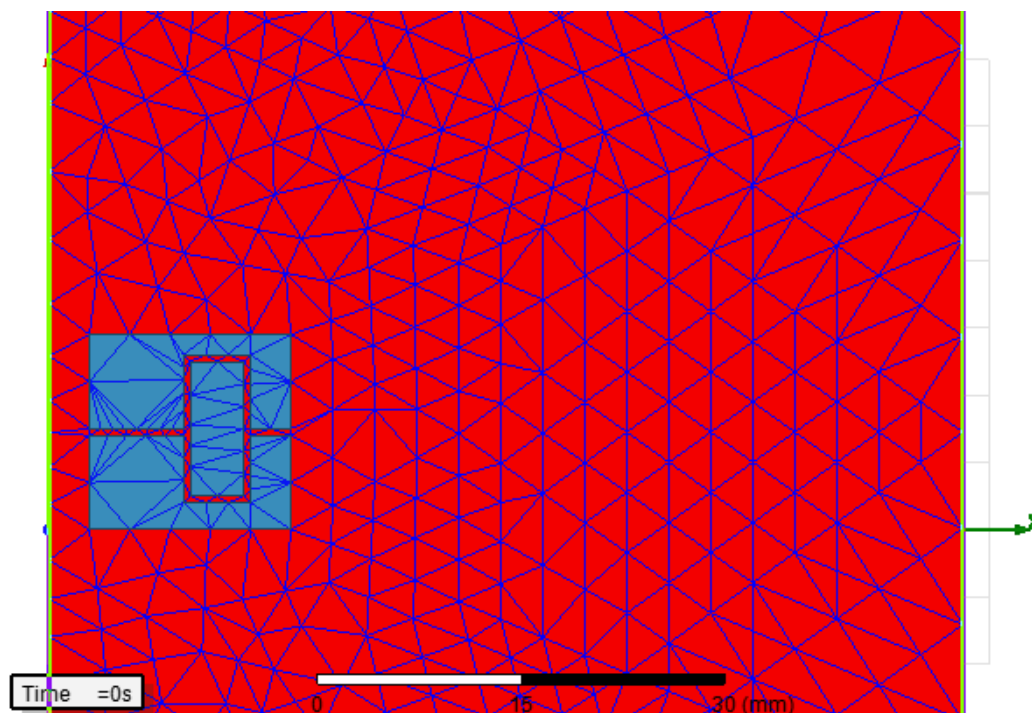


Рисунок 35 – Сетка модели

Как можно заметить, сетка в области катушки слишком редкая.

Способом, описанным ранее, выделим область катушки и увеличим количество элементов сетки, а также уменьшим их размер. В результате получили сетку, показанную на рисунке 36.

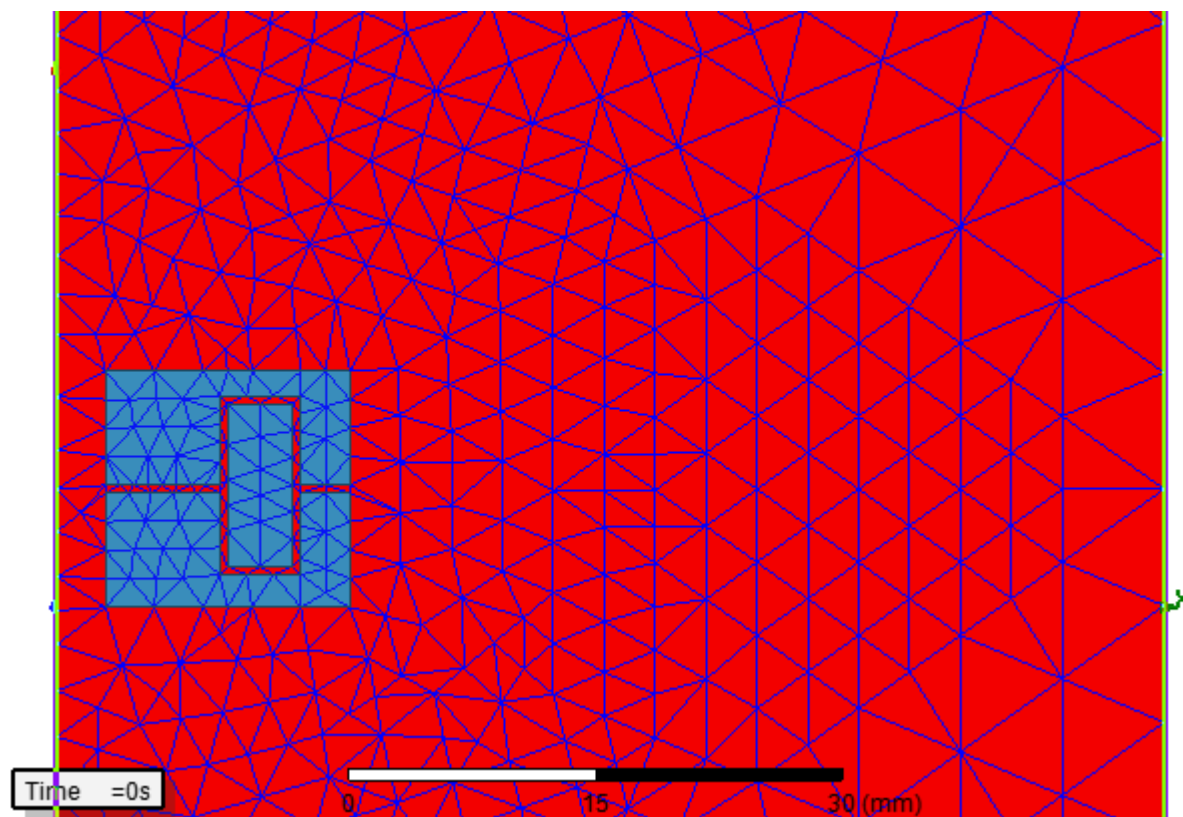


Рисунок 36 – Оптимизация сетки модели

Если вам не нравится красный фон за сеткой, появляющийся автоматически в программе, стандартно настроенной, то проделываем следующие действия. В области Project Manager переходим во вкладку Fields Overlays и нажимаем ПКМ на пункте Mesh Plots. Далее выбираем опцию Modify Attributes, в результате чего на экране появится окно с настройками отображения сетки (рисунок 37).

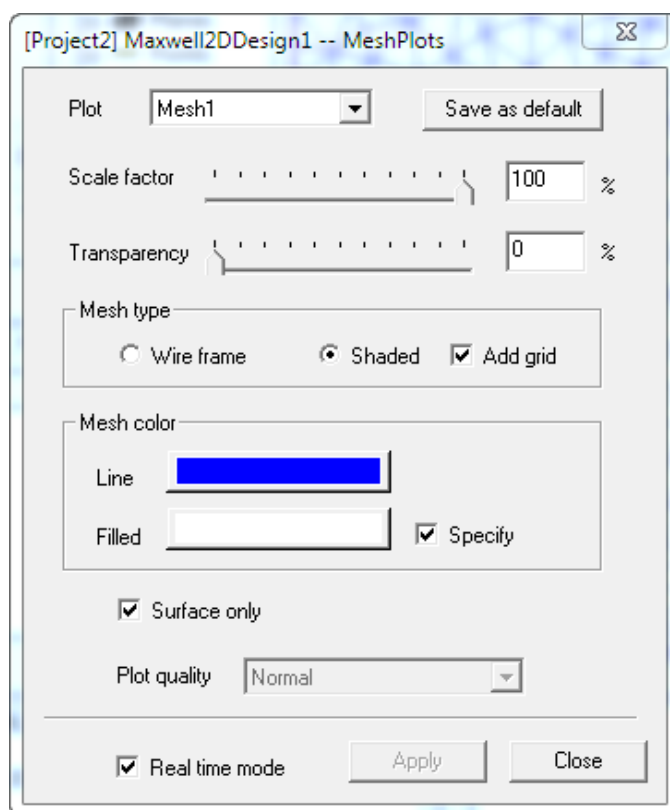


Рисунок 37 - окно с настройками отображения сетки

В области Mesh Color, можно выбрать необходимый нам фон за сеткой и цвет самой сетки. В окне настройки присутствуют и другие опции, позволяющие настроить внешний вид сетки и её оформление.

Что бы в дальнейшем сетка нам не мешала, необходимо скрыть её видимость. Для этого в области Project Manager переходим во вкладку Fields Overlays – Mesh Plots и выбираем название сетки, которую необходимо скрыть, ждем на ней ПКМ и снимаем галочку с опции Plot Visible [17].

Для просмотра магнитного потока, создаваемого катушкой индуктивности, в области Project Manager нажимаем ПКМ на пункте Field Overlays, переходим по ссылке: Fields – B – B_Vector. В результате открывается окно Create Field Plot (Рисунок 38).

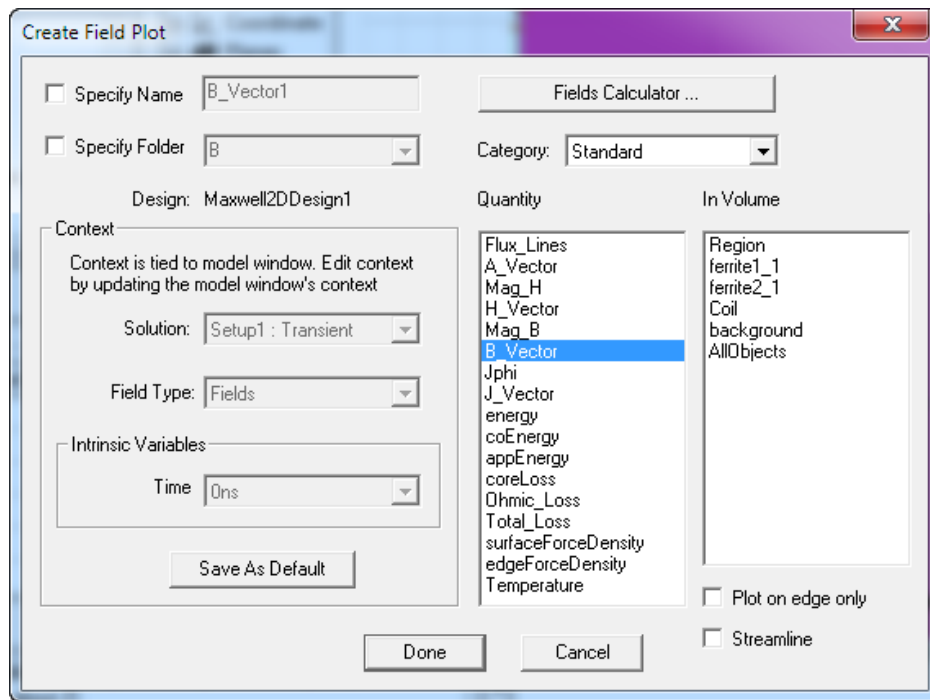


Рисунок 38 – Окно Create Field Plot

В области Quantity выбираем опцию Flux_lines и нажимаем Done, подтверждая свой выбор. В результате получаем картину магнитного поля для выбранного времени (Рисунок 39).

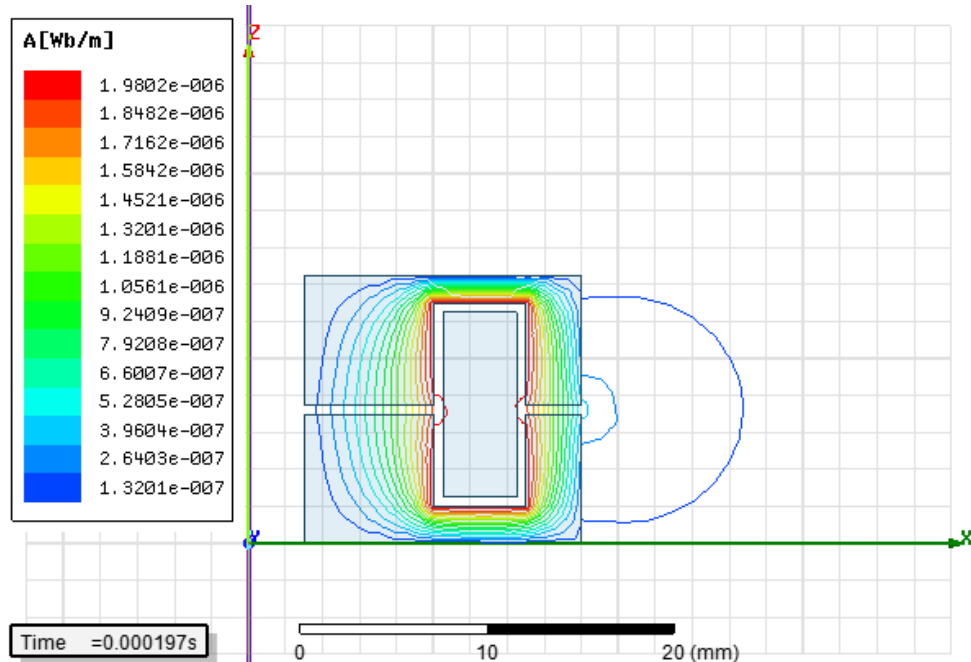


Рисунок 39 – Картина распределения магнитного потока, создаваемого катушкой индуктивности с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

Что бы изменить масштаб, оформление, стиль вывода информации на экран, в области Project Manager переходим во вкладку Fields Overlays и

выбираем вкладку, соответствующую результату, внешний вид которого мы хотим изменить (В нашем случае выбираем вкладку A). Жмем по ней ПКМ и выбираем пункт Modify Attributes. В результате появится окно, показанное на рисунке 40.

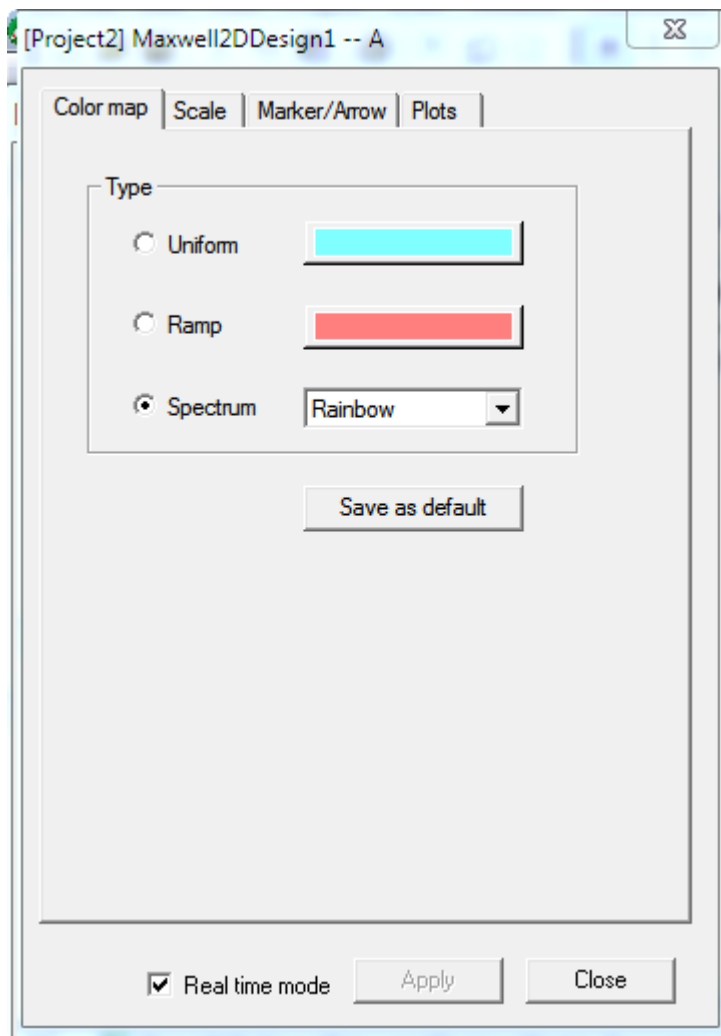


Рисунок 40 – Окно настройки внешнего вида отображаемого результата

Это же окно может быть вызвано двойным щелчком по легенде, расположенной в левом верхнем углу (рисунок 39).

В соответствующих вкладках можно изменить масштаб выводимого результата, цвет легенды и другие атрибуты, отвечающие за отображение результата.

Рассмотрим, как узнать численное значение индукции в сердечнике магнитопровода, индуктивность катушки и ток, протекающий через обмотку. Для этого нарисуем точку в области магнитопровода. В этой точке будет проведено измерение магнитной индукции. Выбираем функцию Draw Point в

области 12 (рисунок 3) и производим необходимое построение. Для построения графика, отражающего зависимость индукции магнитного поля от времени и зависимость тока в катушке от времени выполним следующие действия. В области Project Manager жмем ПКМ на вкладке Results, после чего выбираем пункт Create Fields Report – Rectangular Plot. Появляется окно выбора параметров временной зависимости (Рисунок 41).

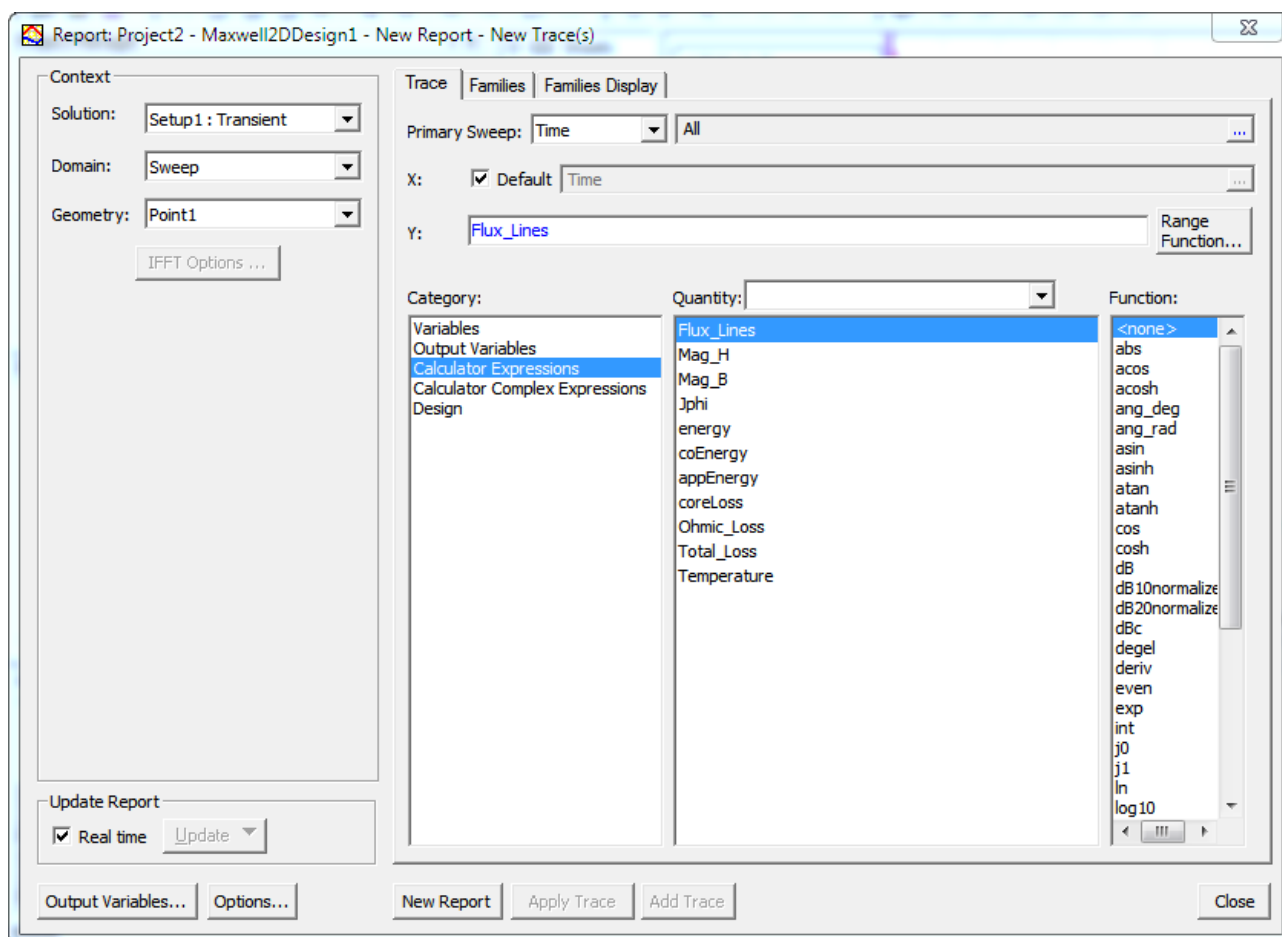


Рисунок 41 - Окно выбора параметров временной зависимости

В области Context в графе Geometry выбираем построенную заранее точку в которой будет измеряться индукция магнитного поля. Справа, во вкладке Trace, видно, что по оси X будет отложено время, в то время как по оси Y, будут отражены те результаты, которые мы выберем в окне Quantity. Выбираем в окне Quantity параметр Mag_B, который соответствует значению индукции магнитного поля в указанной точке. Что бы на одном графике с индукцией отображался ещё и ток, необходимо его взять из другого типа отчета, а именно из отчета transient. Для этого нажимаем на кнопку Output Variables в нижнем

левом углу окна, показанного на рисунке 41, в результате чего появляется окно, показанное на рисунке 42.

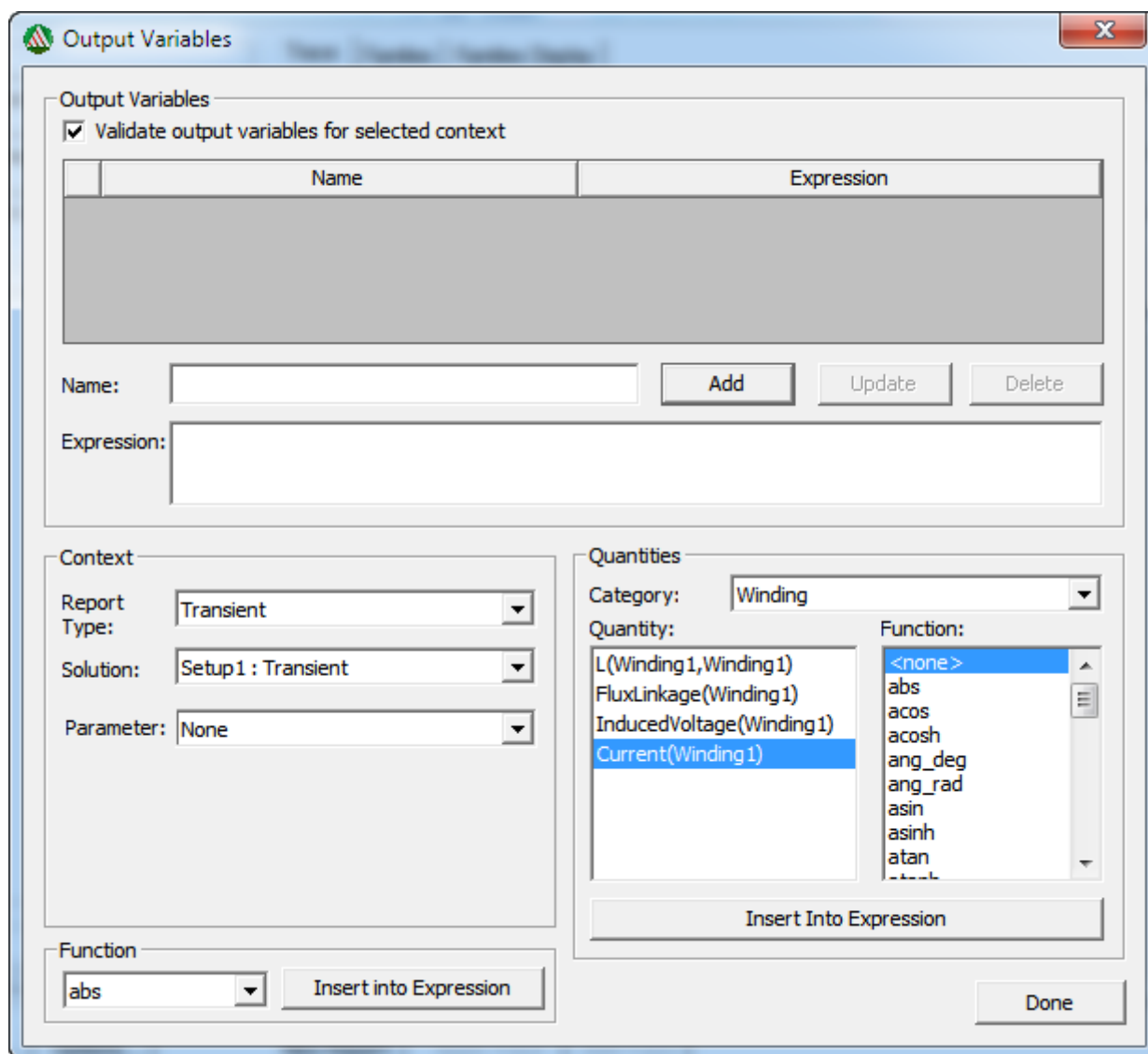


Рисунок 42 - Окно добавления переменных из другого типа отчета

В области Context, в графе Report Type выбираем тип отчета – Transient. В области Quantities, в подобласти Quantity, выбираем интересующую нас переменную, а именно - выбираем ток Current(Winding1) и нажимаем Insert Into Expression. В результате в области Output Variables, в графе Expression появится выбранная переменная. В графе Name даем имя этой переменной, например I и нажимаем на клавишу Add, тем самым добавляя нашу переменную в список Output Variable. Закрываем окно клавишей Done, подтверждая создание переменной. В окне, показанном на рисунке 41, в пункте Output Variables, который находится во вкладке Trace, в области Category, появилась созданная

нами переменная. Снова выбираем параметр MAG_B в категории Calculator Expressions и через точку с запятой дописываем к нему параметр I (рисунок 43).

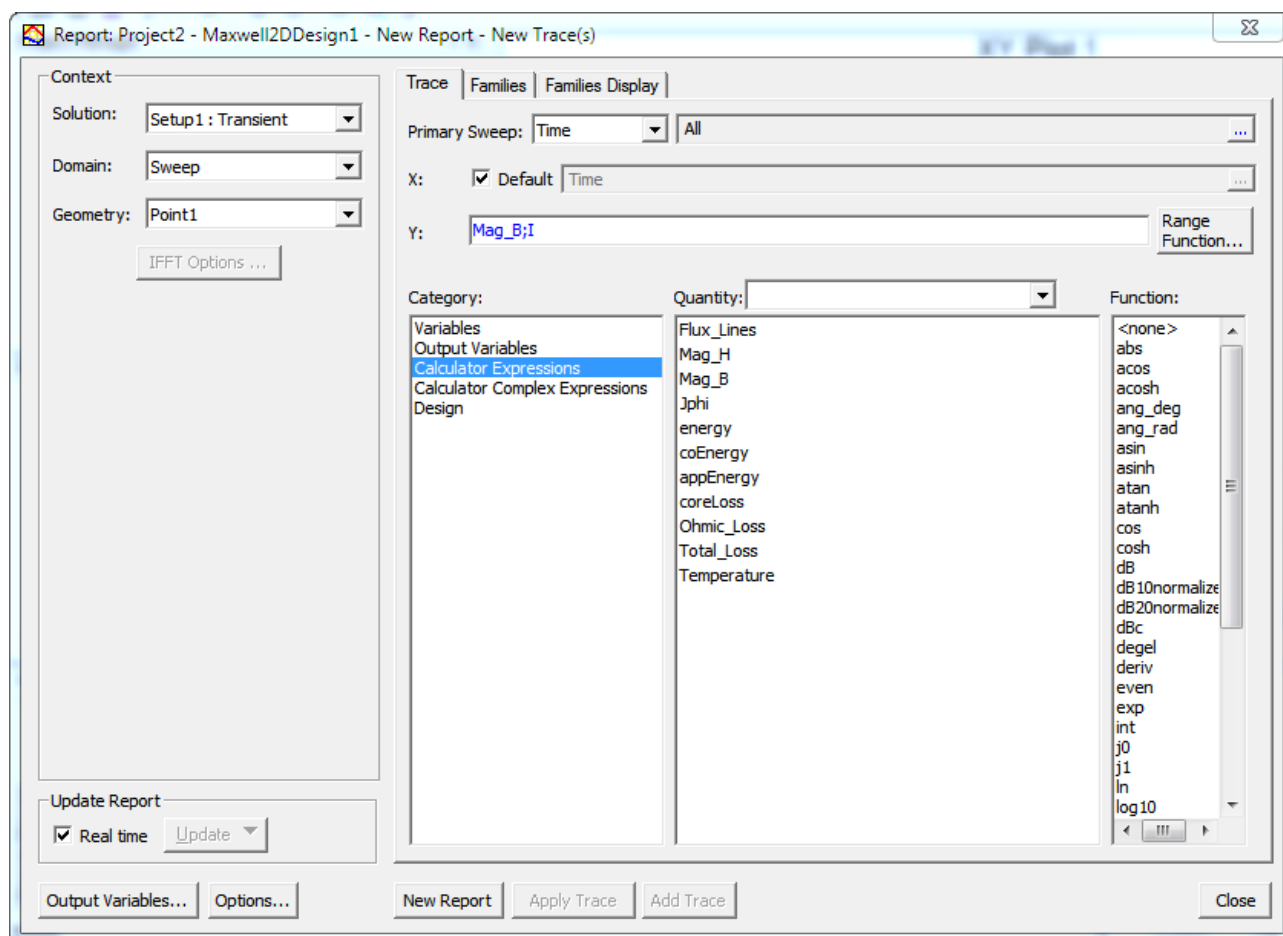


Рисунок 43 – Построение графика

Нажимаем на клавишу New Report. Построенный график показан на рисунке 44.

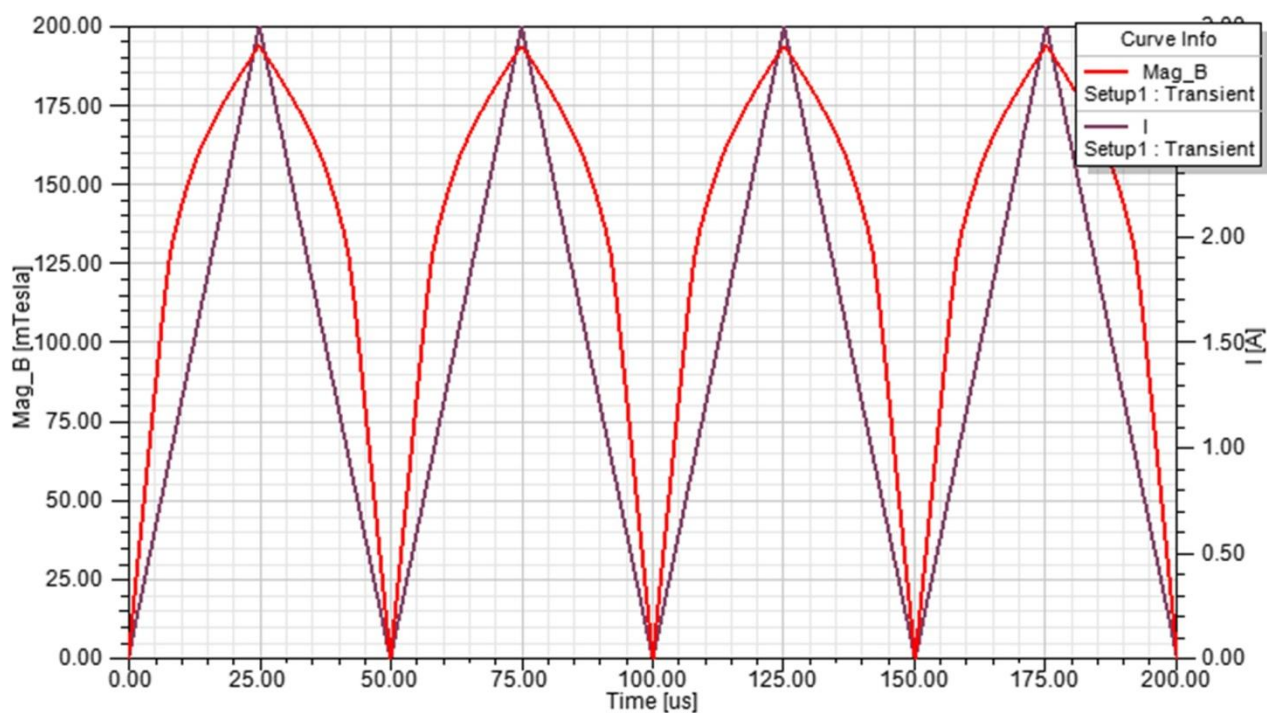


Рисунок 44 – Зависимость индукции магнитного поля B и тока катушки I от времени

Для того, чтобы изменить единицы измерения, например, магнитной индукции, необходимо дважды щелкнуть мышью на надписи Mag_B [mTesla], тем самым вызвать окно, показанное на рисунке 45.

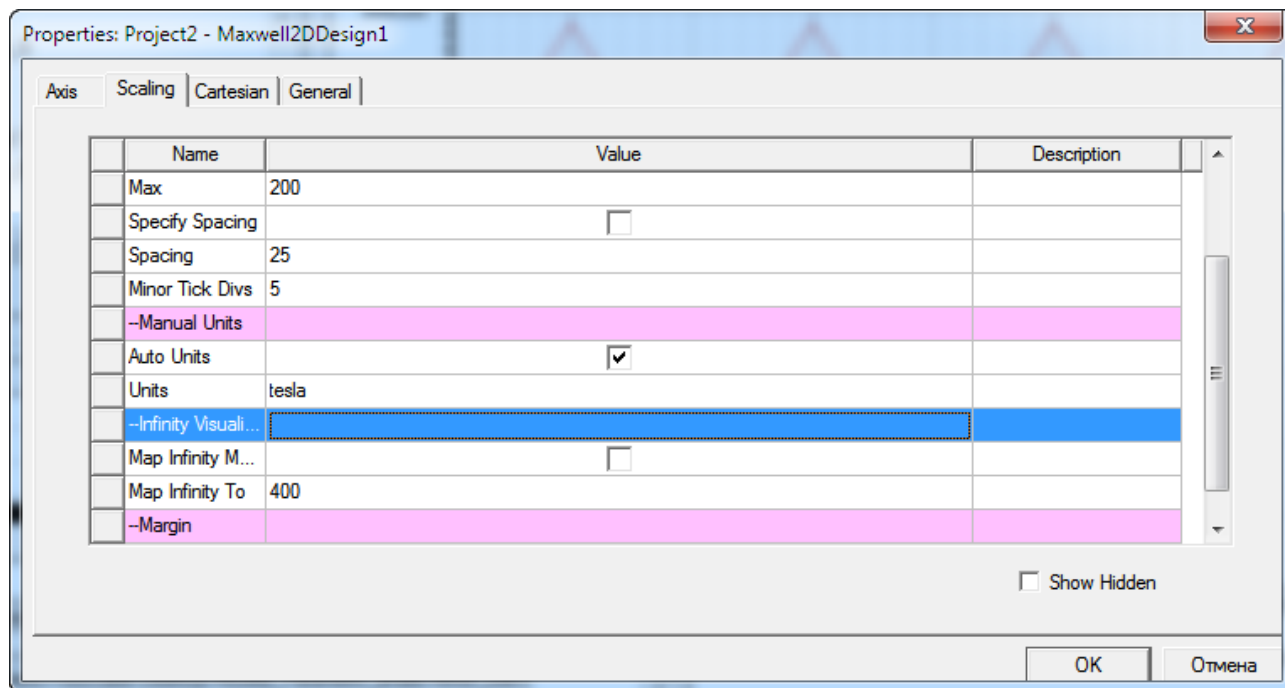


Рисунок 45 – Окно настроек вывода результата в виде графика

Переходим во вкладку Scaling и снимаем галочку с параметра Auto Units.

Изменяем параметр Units, например, выставив значение не mTesla, а Tesla; нажимаем клавишу Ok. Теперь магнитная индукция на графике отображается в Тл, а не в мТл. Аналогичным образом, если это необходимо, меняются единицы измерения и для других параметров, отображаемых на графике [18].

Для построения графика, отражающего зависимость индуктивности катушки и тока от времени будет достаточно сделать следующие действия. В области Project Manager нажимаем ПКМ на пункте Result и переходим по ссылке: Create Transient Report – Rectangular Plot. В результате появляется окно, показанное на рисунке 46.

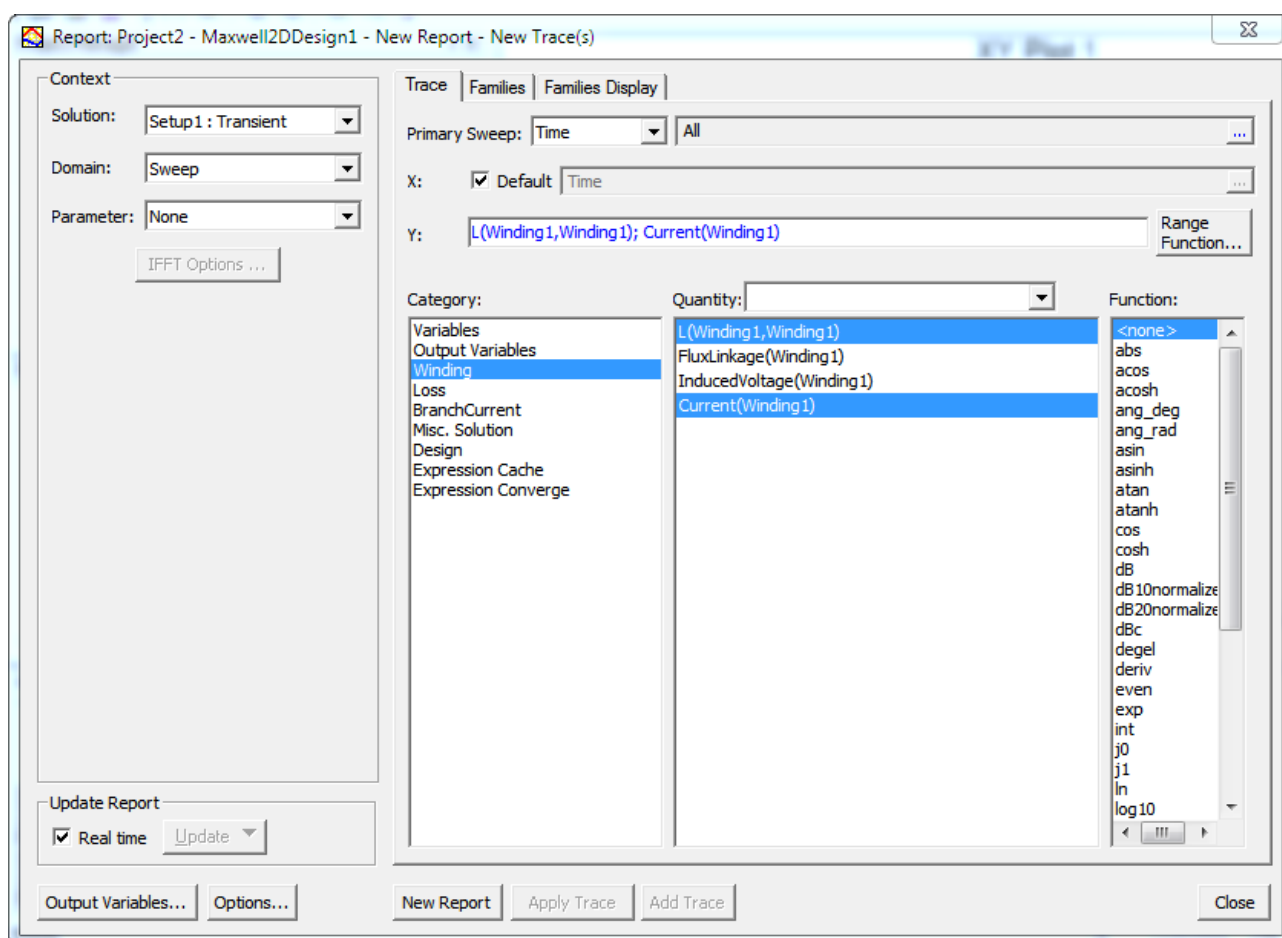


Рисунок 46 – Создание графика, отражающего временную зависимость

Это тоже окно, которое мы использовали для создания графика, отражающего зависимость индукции в точке от времени. Здесь все переменные уже имеются и для создания графика необходимо вписать их через точку с запятой в поле Y, которое находится во вкладке Trace. Создаем график нажатием клавиши New Report в нижней области окна (рисунок 47) [19].

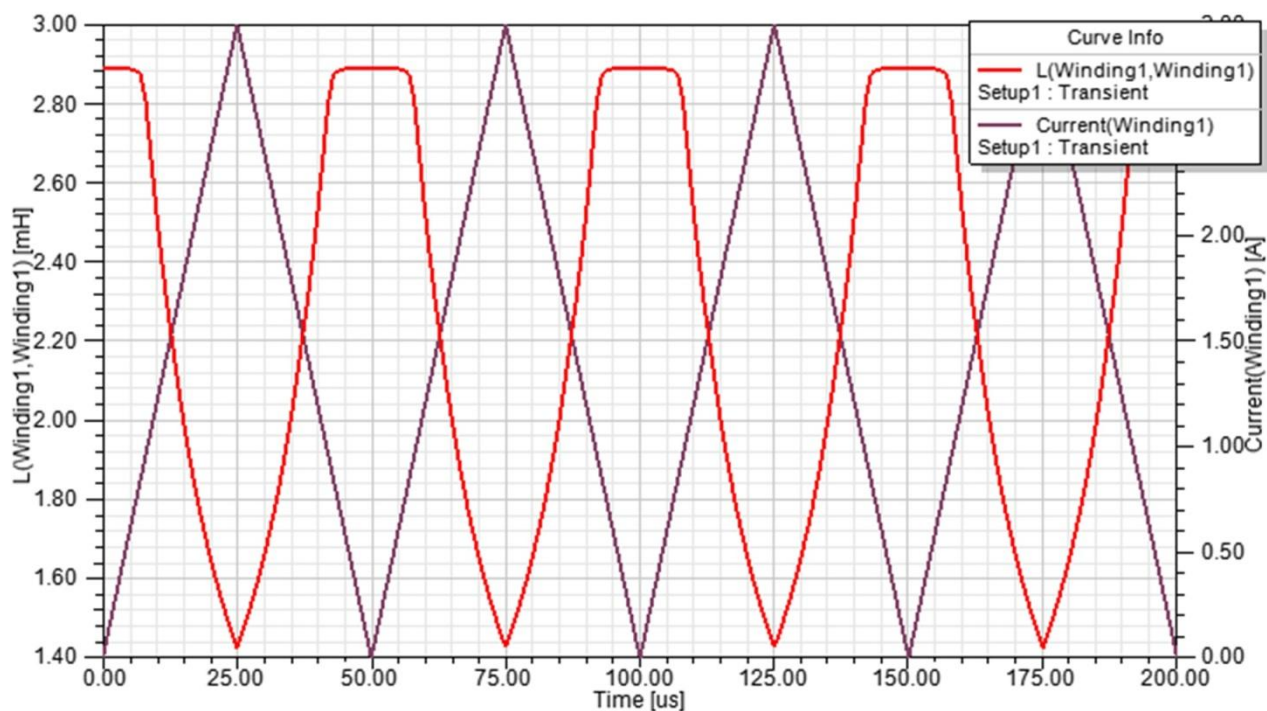


Рисунок 47 – Зависимость индуктивности L и тока I катушки от времени

3. Исследование магнитного поля катушек цилиндрического типа

Проведем исследование магнитного поля катушек цилиндрического типа.

Исследовать будем катушки трех видов:

1. Катушка без магнитопровода
2. Катушка с внутренним сердечником
3. Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

Рассчитанные картины магнитного поля приведены на рисунке 48.

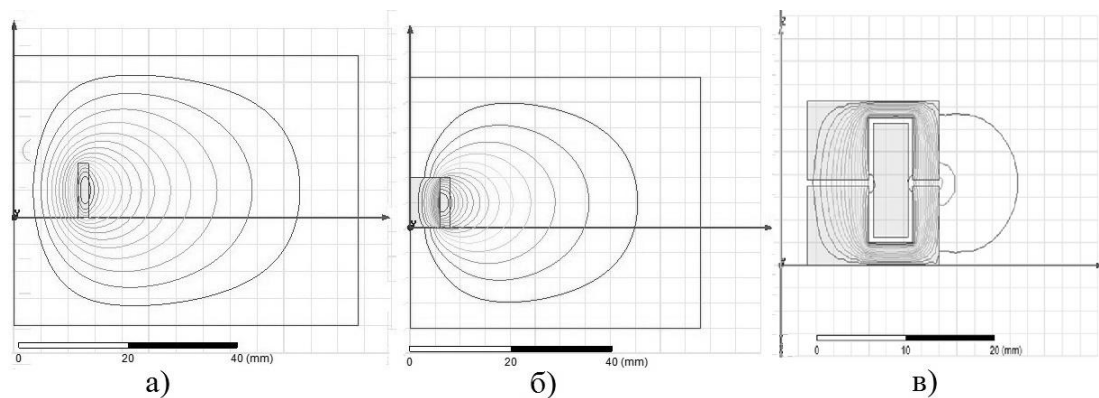


Рисунок 48 - Рассчитанные картины магнитного поля, полученные в программе Maxwell: а – картина магнитного поля для катушки без магнитопровода; б - картина магнитного поля для катушки с внутренним сердечником; в - картина магнитного поля для катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

Во всех катушках индуктивности (разделы 3.1 – 3.3) запасается одинаковое количество энергии. Габаритные размеры, количество витков и ток в обмотках катушек индуктивности, соответствующие одинаковой энергии, запасаемой в них, приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Сравнение диаметра катушек и числа витков, при одинаковой энергии, запасаемой в катушке

Тип катушки индуктивности	Диаметр катушки d , мм	Число витков в обмотке N	Длина катушки l , мм	Ток в обмотке I , А
Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор	36	80	14.5	3
Катушка без магнитопровода	55.2	170	20	3
Катушка с внутренним сердечником	32	120	20	4

3.1 Исследование магнитного поля катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор и схема замещения магнитной цепи, показаны на рисунке 49.

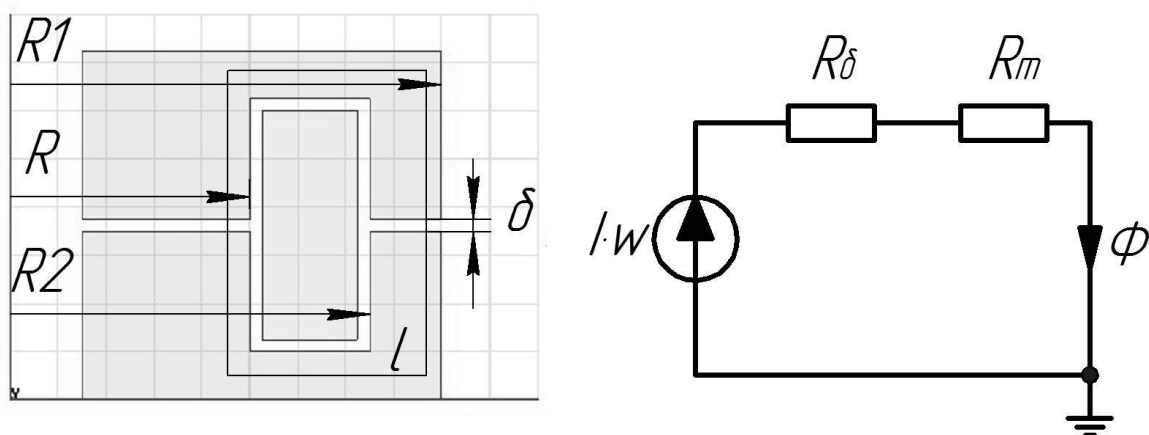


Рисунок 49 – Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

В этой катушке площадь сечения центрального полюса равна площади сечения внешнего кольца сердечника. Соотношение радиусов (рисунок 49) определяется следующим образом (формулы 15, 16):

$$\pi R^2 = \pi R1^2 - \pi R2^2, \quad (15)$$

$$R = \sqrt{R1^2 - R2^2}. \quad (16)$$

Применим сердечник из марганец – цинкового феррита 3000НМ [20], имеющего кривую намагничивания, показанную на рисунке 50.

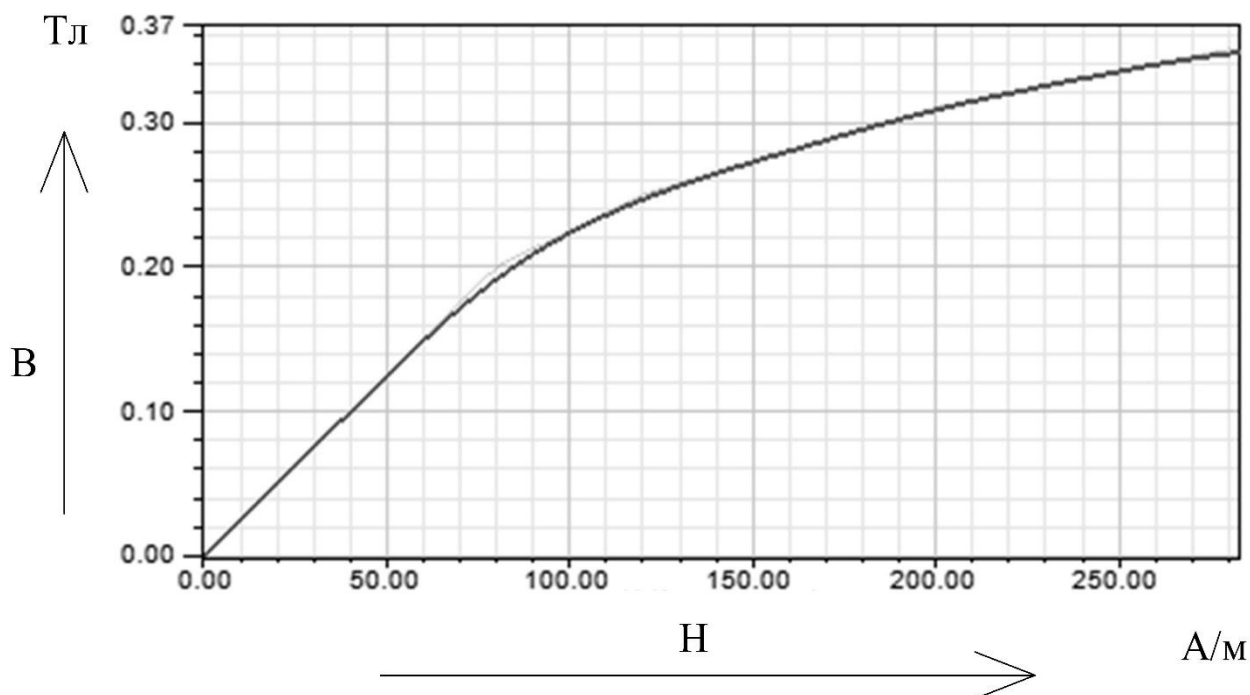


Рисунок 50 – Кривая намагничивания марганец – цинкового феррита
3000НМ

Магнитная проницаемость используемого феррита $\mu = 3000$. Чтобы рационально использовать материал сердечника, ограничим индукцию на уровне $B = 0.25 \text{ Тл}$.

Расчет параметров катушки носит итерационный характер. Рассмотрим последовательность расчета.

Зададимся параметрами катушки индуктивности: зазор δ , длина средней линии прохождения магнитного потока l , радиус центрального полюса катушки R , ток I , число витков w (рисунок 49).

Рассчитаем площадь, через которую проходит магнитный поток (формула 17):

$$S = \pi R^2. \quad (17)$$

Рассчитаем магнитное сопротивление зазора (формула 18)

$$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S}, \quad (18)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$.

Рассчитаем магнитное сопротивление магнитопровода:

$$R_m = \frac{l - \delta}{\mu \cdot S}. \quad (19)$$

Рассчитаем магнитный поток в схеме замещения:

$$\Phi = \frac{I \cdot w}{R_\delta + R_m}. \quad (20)$$

Получим среднее значение индукции сердечника:

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad (21)$$

Если в результате расчетов магнитопровод катушки входит в насыщение, то необходимо задаться другими начальными параметрами расчета (пункт 1 последовательности) и повторить расчет [21].

Проведем расчет.

Зададимся параметрами катушки: $\delta = 0.5 \text{ мм}$, $l = 41 \text{ мм}$, $R = 10 \text{ мм}$, $I = 3 \text{ А}$, $w = 60$.

Рассчитаем площадь, через которую проходит магнитный поток по формуле 17.

$$S = \pi R^2 = 3.14 \cdot 0.01^2 = 3.14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Магнитное сопротивление зазора (формула 18):

$$R_\delta = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S} = \frac{0.001 \text{ м}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3.14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 2.533 \cdot 10^6.$$

Магнитное сопротивление магнитопровода (формула 19):

$$R_m = \frac{l - \delta}{\mu \cdot S} = \frac{0.041 \text{ м} - 0.001 \text{ м}}{3000 \cdot 3.14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 0.042.$$

Магнитный поток (формула 20):

$$\Phi = \frac{I \cdot w}{R_\delta + R_m} = 7.106 \cdot 10^{-5}.$$

Получим среднее значение индукции сердечника (формула 21):

$$B = \frac{\Phi}{S} = 0.23 \text{ Тл}.$$

Полученное значение индукции не вводит сердечник катушки в насыщение, поэтому расчет окончен.

Получим картину магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности (рисунок 51).

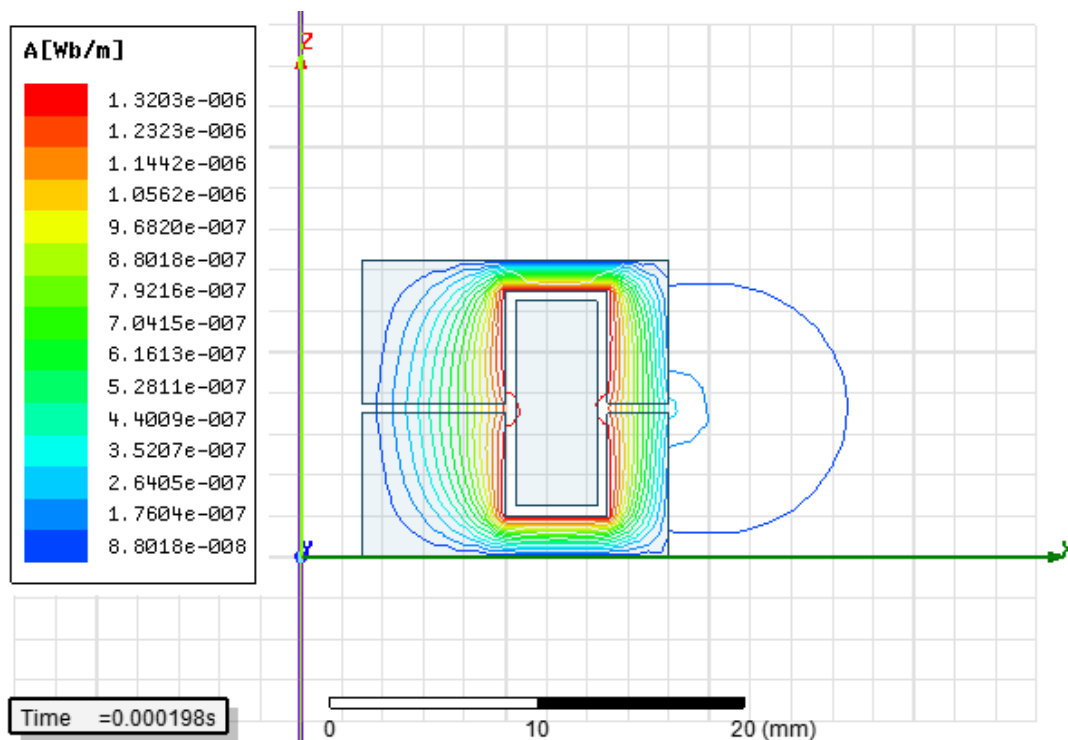


Рисунок 51 – Картина магнитного поля (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Из картины магнитного поля видно, что магнитный поток катушки индуктивности имеет поля краевых эффектов вблизи технологического зазора; Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор обладает экранирующим эффектом - магнитный поток замыкается вокруг обмотки по магнитопроводу.

На рисунке 52 показана сеть конечных элементов.

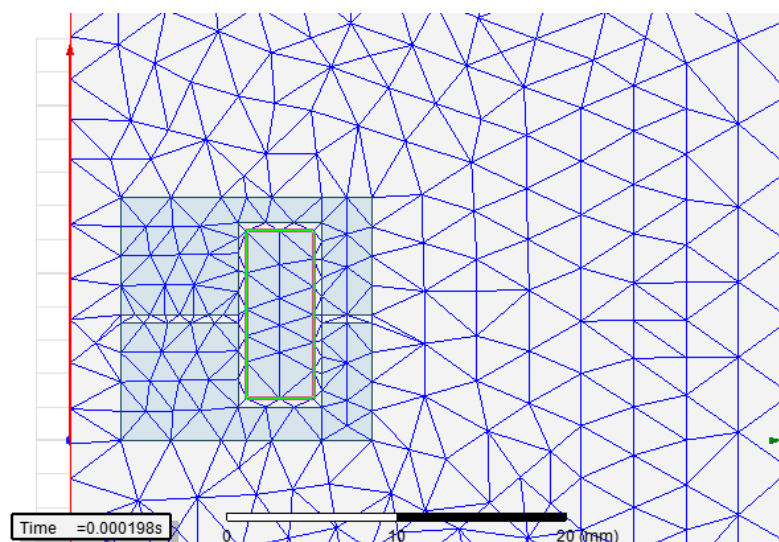


Рисунок 52 – Сеть конечных элементов (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Из рисунка видно, что сеть конечных элементов равномерно распределена по всей области модели. Если бы имелись какие-либо искажения, присутствовала неравномерность или, например, сеть конечных элементов состояла бы из слишком малого количества элементов, то картина магнитного поля и все параметры, рассчитываемые программой, были бы далеки от истины.

На рисунке 53 показана осциллограмма, отражающая зависимость магнитной индукции в магнитопроводе катушки и тока в обмотке катушки от времени.

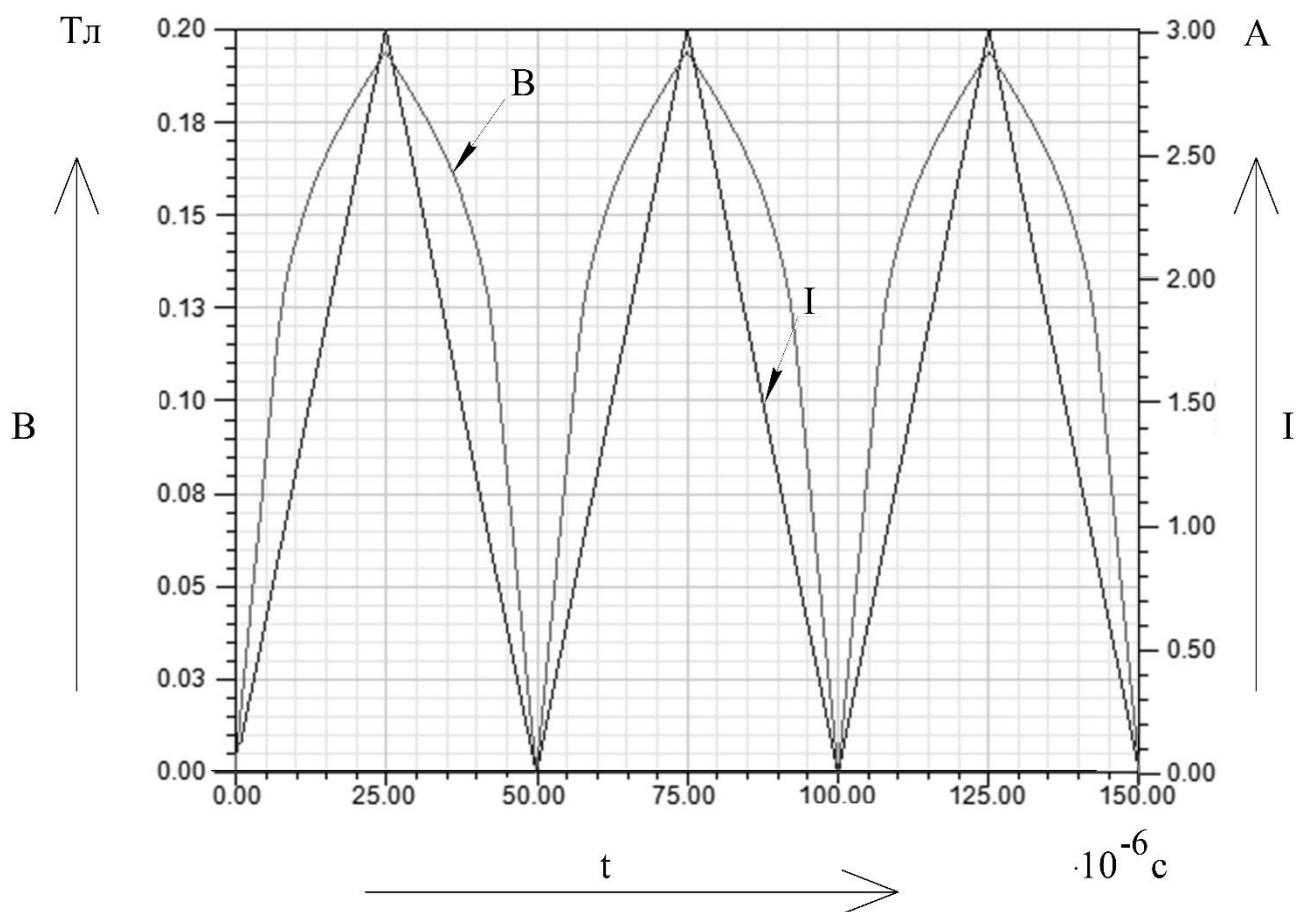


Рисунок 53 - Зависимость индукции магнитного поля B и тока в катушке I от времени (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Индукция магнитного поля в магнитопроводе катушки не превышает 0.2 Тл. Материал магнитопровода используется в оптимальном режиме, не входя в насыщение.

Для расчета энергии, запасаемой в катушке, необходимо знать индуктивность катушки и ток, протекающий через неё. Осциллограмма, отражающая зависимость индуктивности катушки и тока, протекающего по обмотке катушки, показана на рисунке 54.

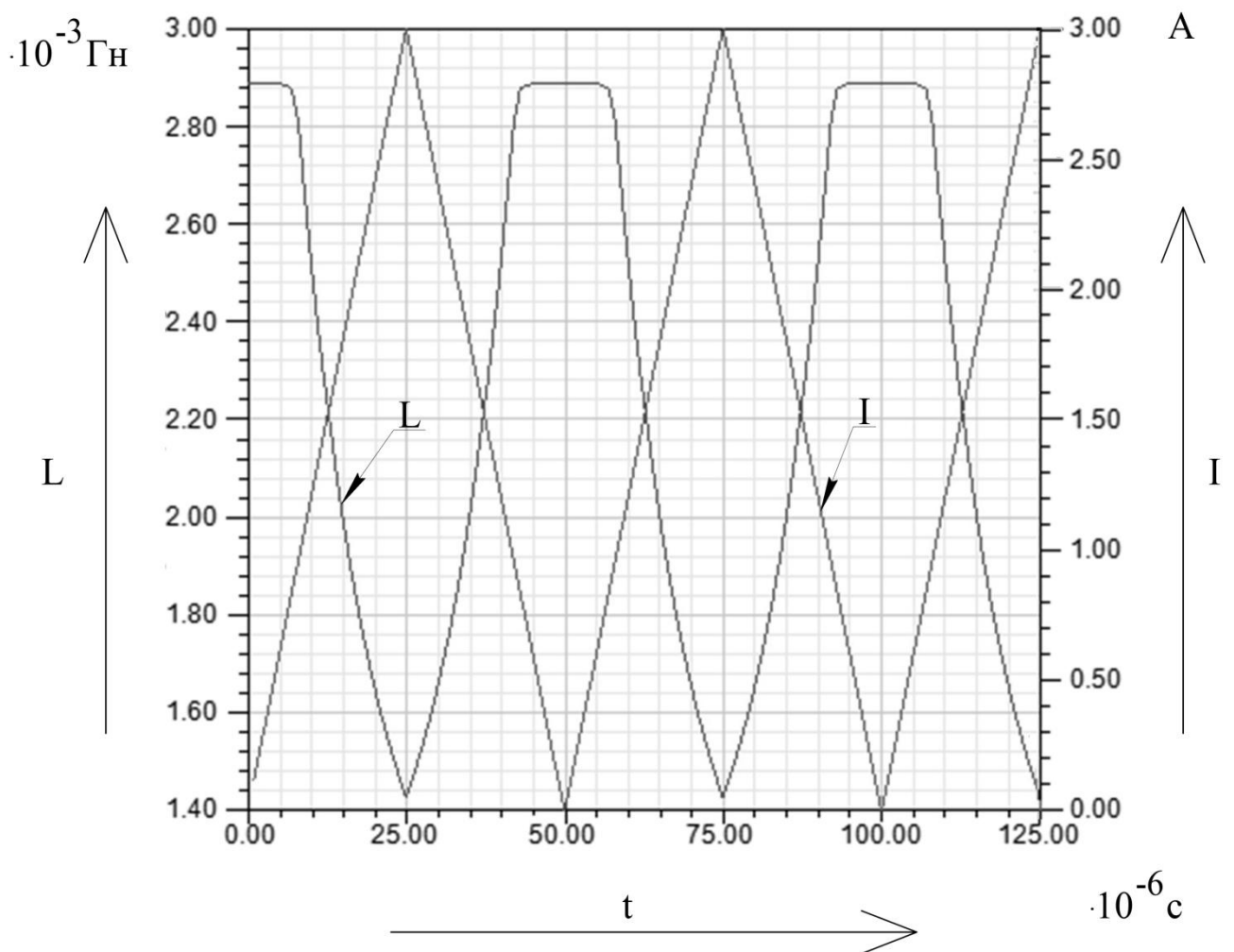


Рисунок 54 - Зависимость индуктивности L и тока I катушки от времени (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Энергия, запасаемая в катушке индуктивности, рассчитывается по формуле 22.

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2}, \quad (22)$$

где L – индуктивность катушки,

I – ток, протекающий по обмотке катушки,

W – энергия магнитного поля.

Функционал программы Ansys Maxwell позволяет производить математические операции с полученными в ходе моделирования зависимостями, поэтому, воспользовавшись этой особенностью программы и формулой, приведенной выше, получим осциллограмму, отражающую зависимость энергии, запасенной в катушке индуктивности от времени

(рисунок 55) [22].

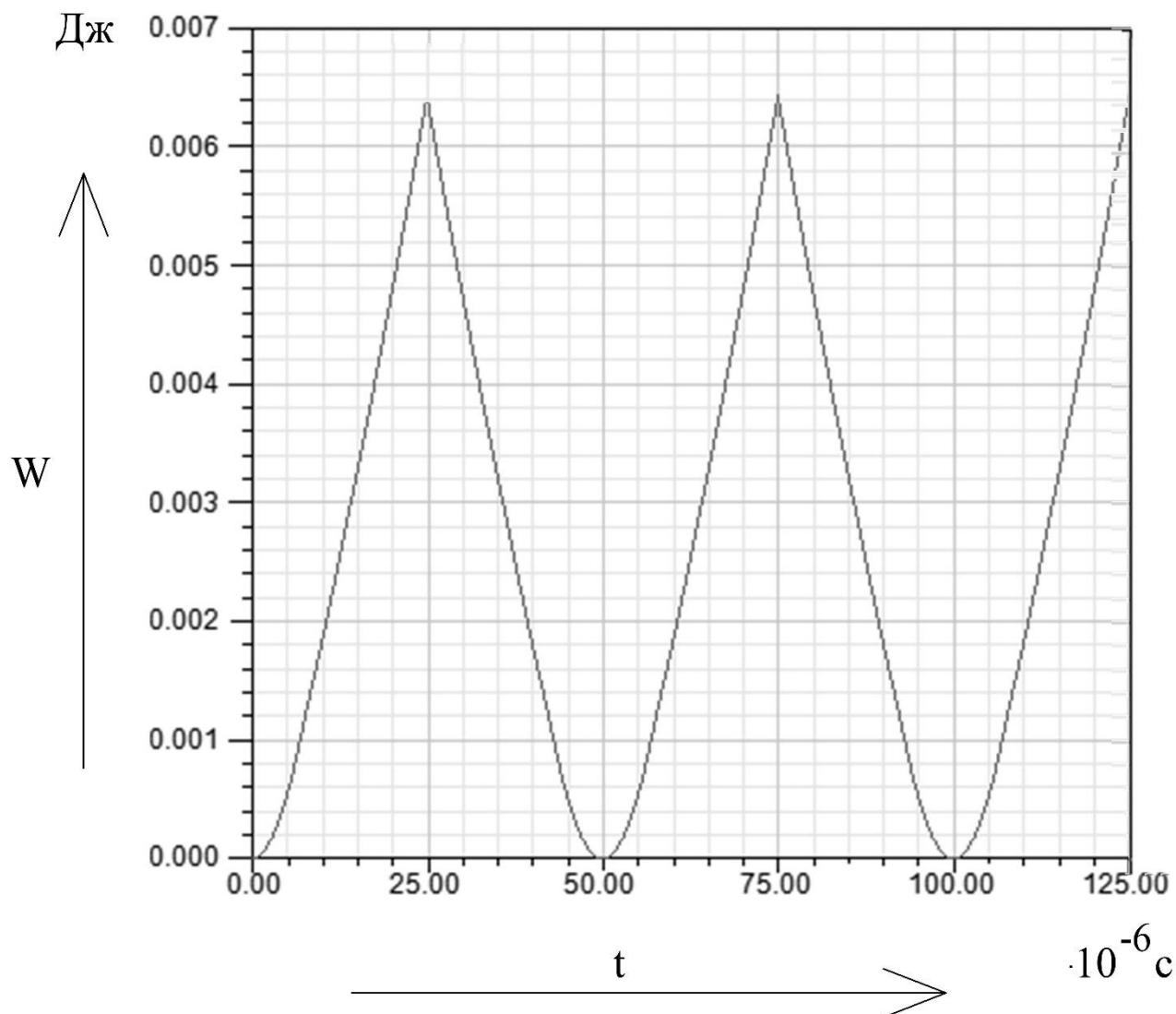


Рисунок 55 - Зависимость энергии W , запасенной в катушке индуктивности от времени (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Максимальная энергия, запасаемая в катушке, равна 6.4мДж. Это значение примем за основу и остальные катушки индуктивности, которые будем исследовать, должны иметь значение запасаемой энергии, равной 6.4мДж.

Получим график, отражающий зависимость индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки (рисунок 56).

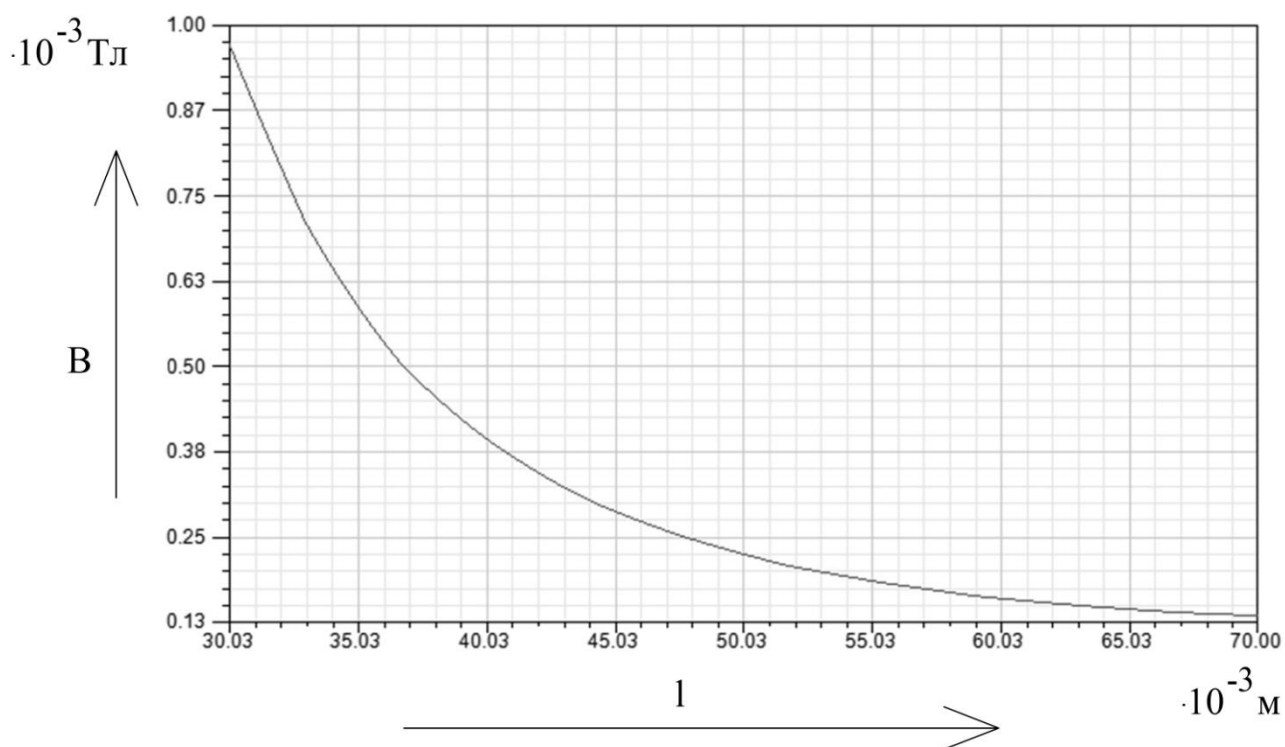


Рисунок 56 - Зависимость индукции магнитного поля B на расстоянии l от края катушки (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

3.2 Исследование магнитного поля катушки без магнитопровода

Геометрия катушки индуктивности без магнитопровода показана на рисунке 57.

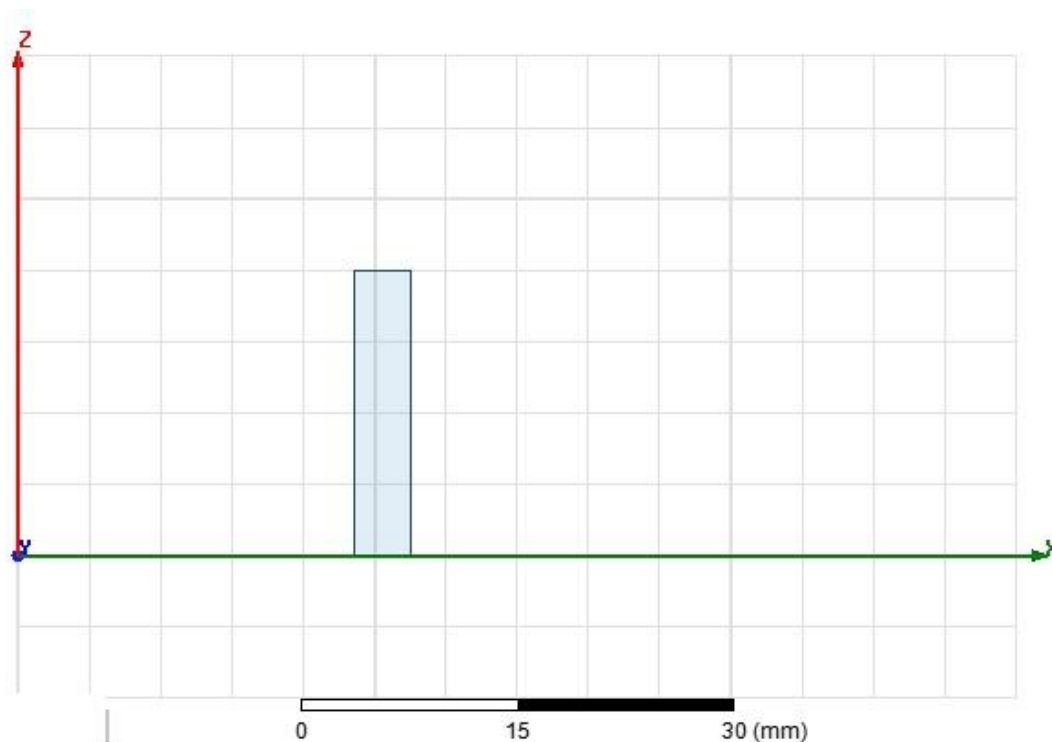


Рисунок 57 - Геометрия катушки индуктивности без магнитопровода

Полученная сеть конечных элементов показана на рисунке 58.

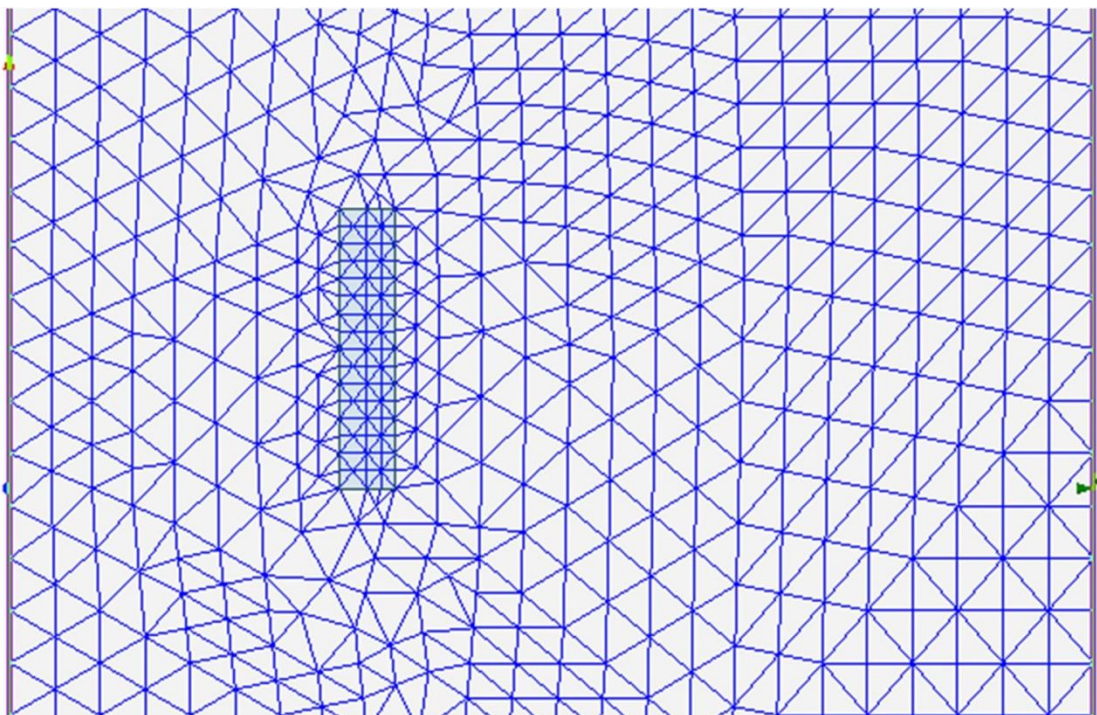


Рисунок 58 - Сеть конечных элементов (Катушка без магнитопровода)

Картина магнитного поля катушки индуктивности без магнитопровода показана на рисунке 59.

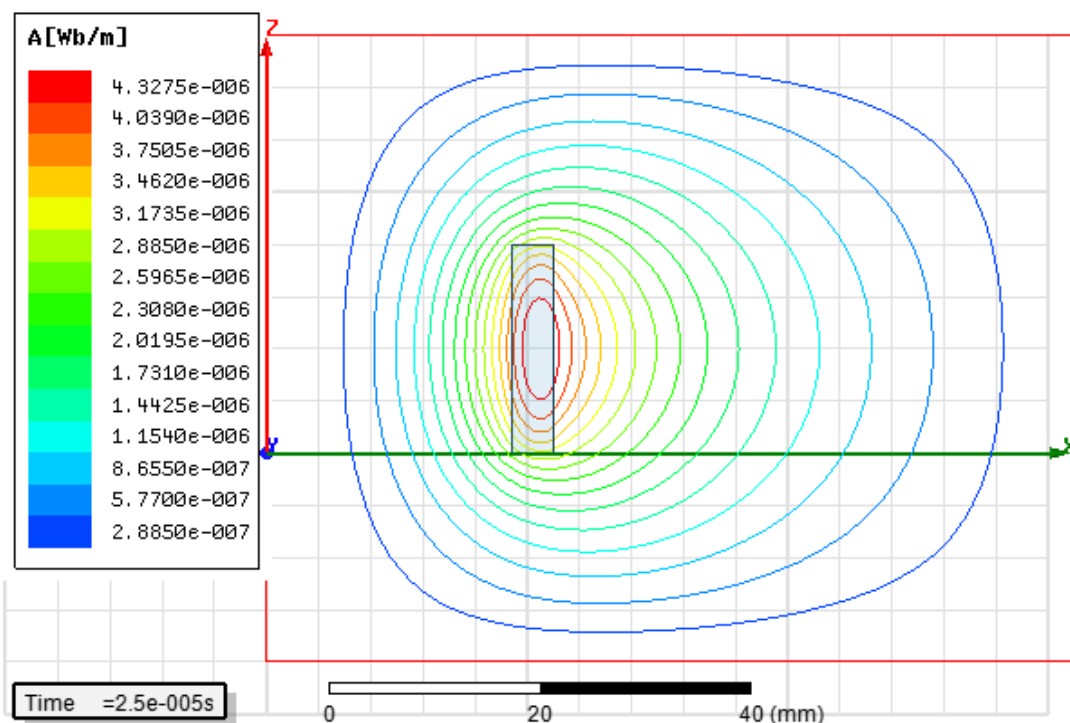


Рисунок 59 - Картина магнитного поля (катушка без магнитопровода)

Магнитное поле распространяется вдоль оси x .

На рисунке 60 показана осциллограмма, отображающая зависимость

индуктивности катушки и тока в катушке от времени.

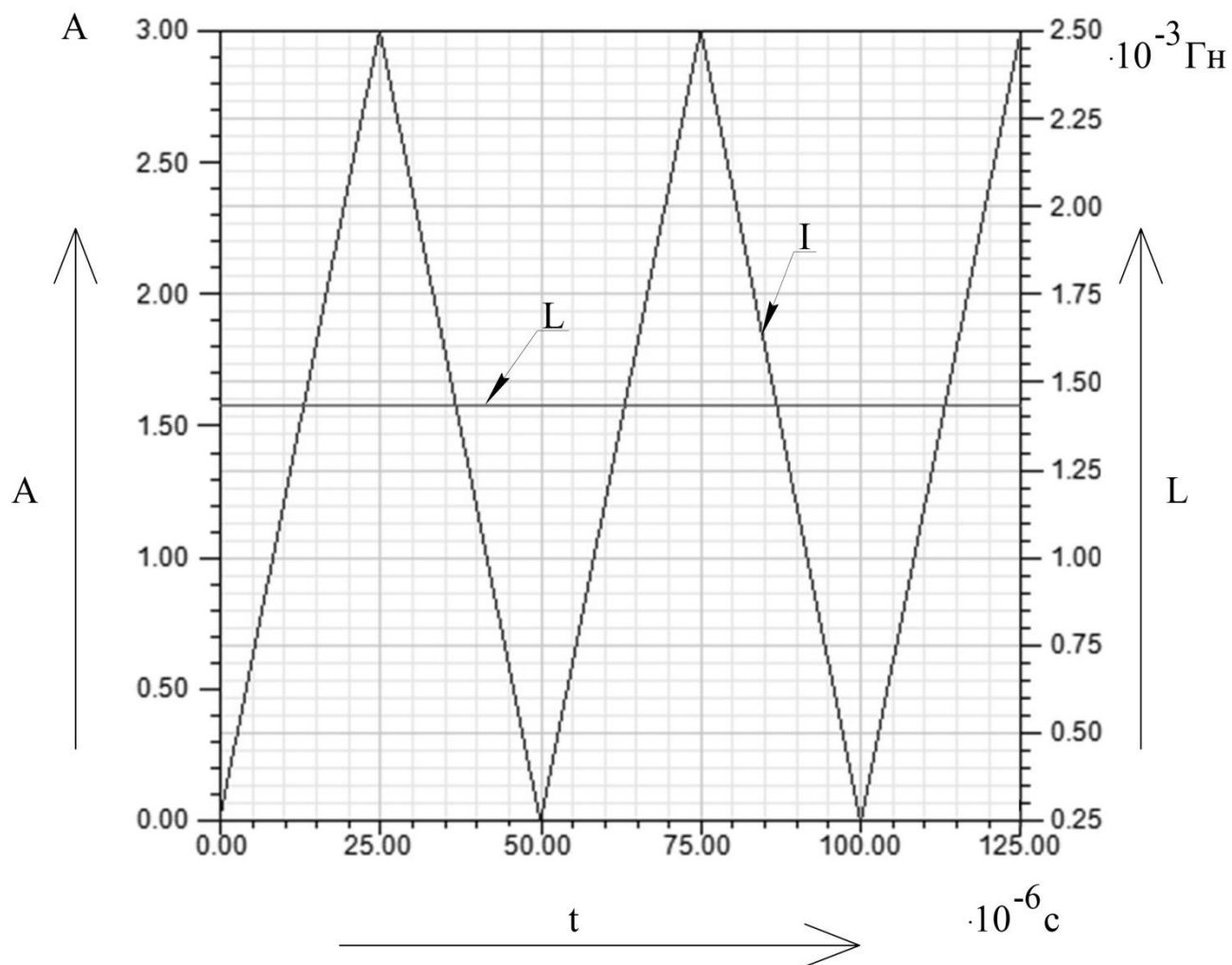


Рисунок 60 - Зависимость индуктивности L и тока I катушки от времени
(катушка без магнитопровода)

Энергия, запасаемая в катушке индуктивности, показана на рисунке 61.

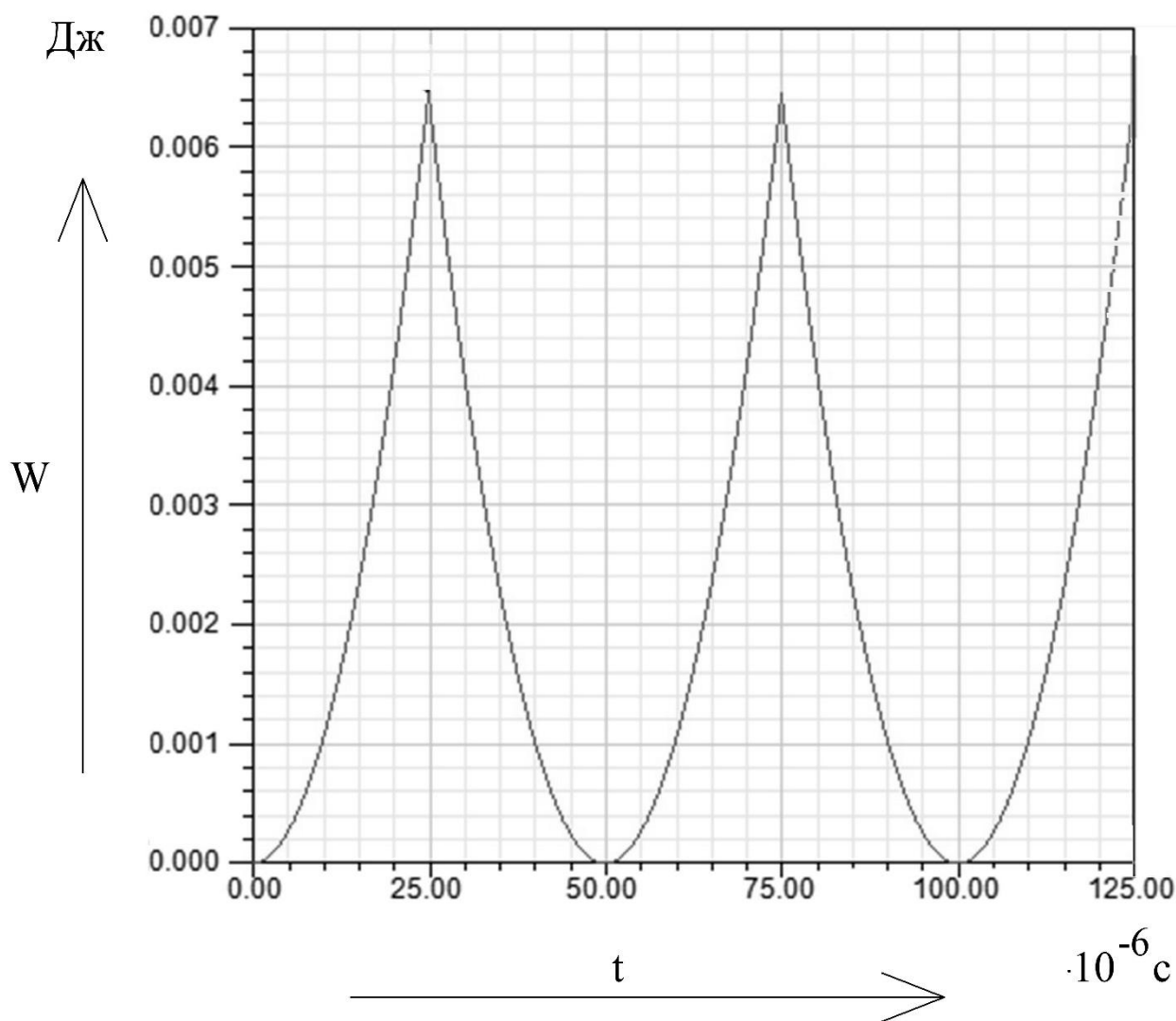


Рисунок 61 – Энергия W , запасаемая в катушке (катушка без магнитопровода)

Максимальная энергия, запасаемая в катушке, равна $W = 0.0064$ Дж, что соответствует значению энергии, запасаемой в катушке с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор (пункт 3.1).

Построим график зависимости значения индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки (рисунок 62).

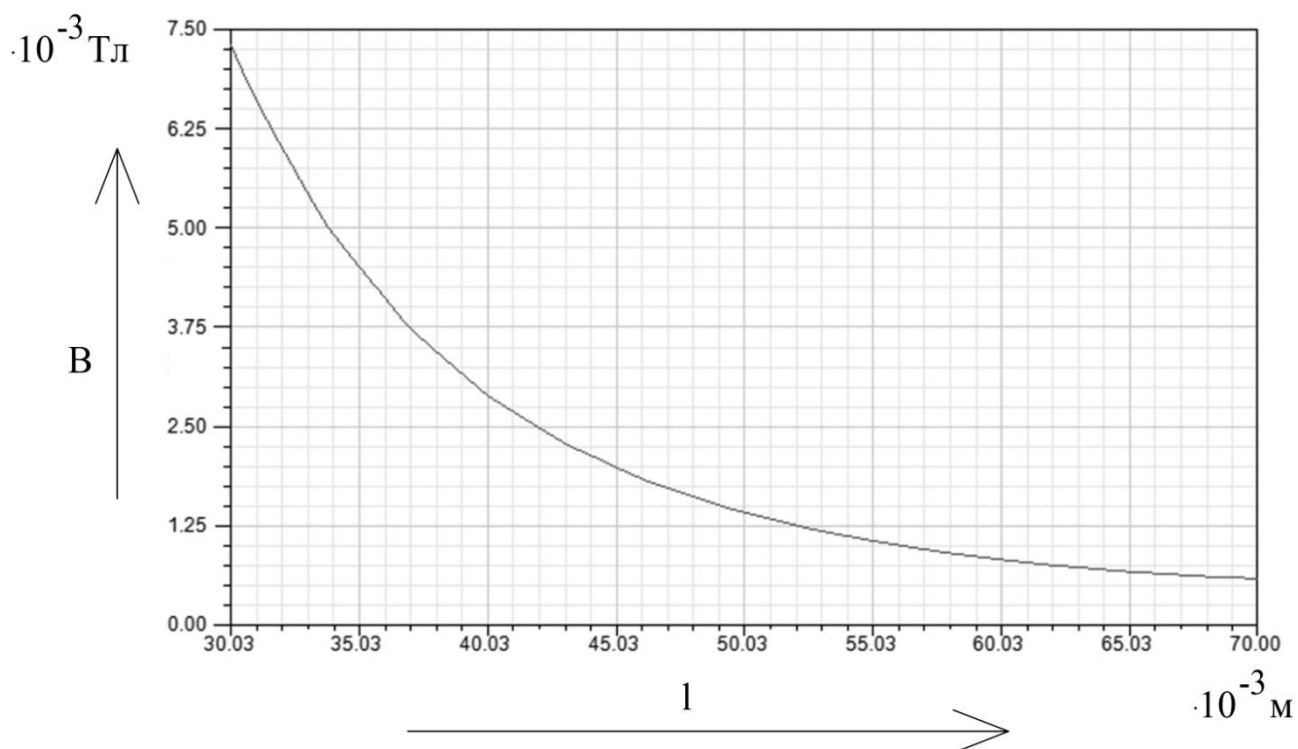


Рисунок 62 - Индукция магнитного поля B на расстоянии l от края катушки (катушка без магнитопровода)

3.3 Исследование магнитного поля катушки с внутренним сердечником

Геометрия катушки индуктивности с внутренним сердечником показана на рисунке 63.

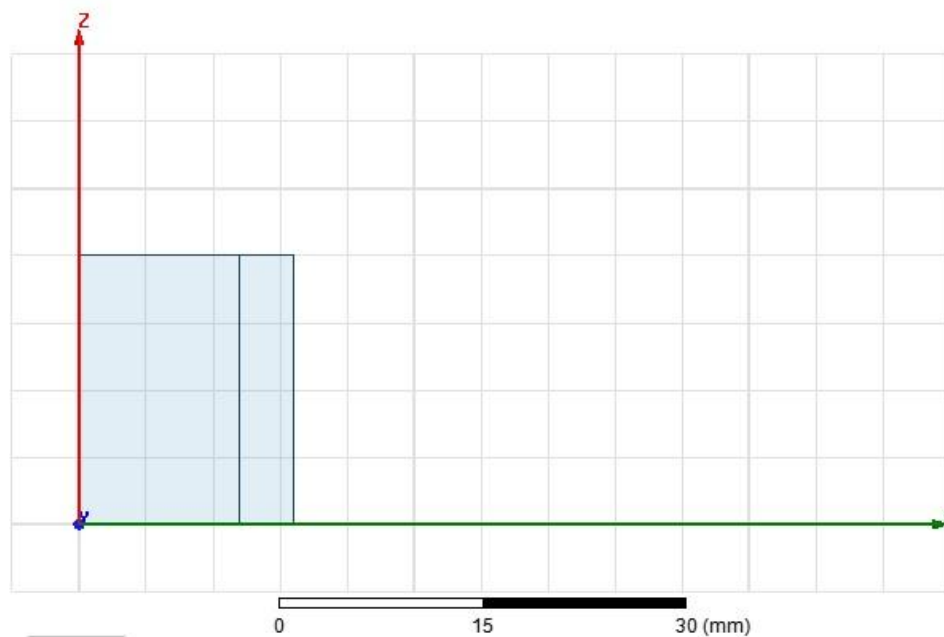


Рисунок 63 - Геометрия катушки (катушка с внутренним сердечником)

Сеть конечных элементов показана на рисунке 64.

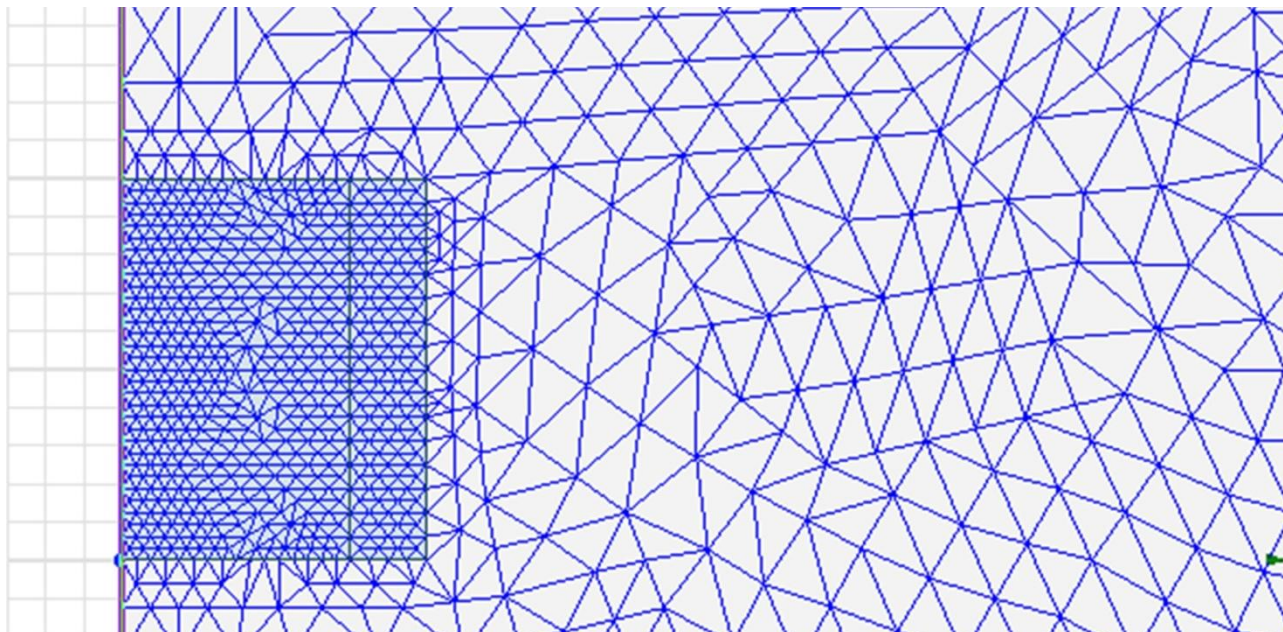


Рисунок 64 - Сеть конечных элементов (катушка с внутренним сердечником)

Картина магнитного поля катушки индуктивности с внутренним сердечником показана на рисунке 65.

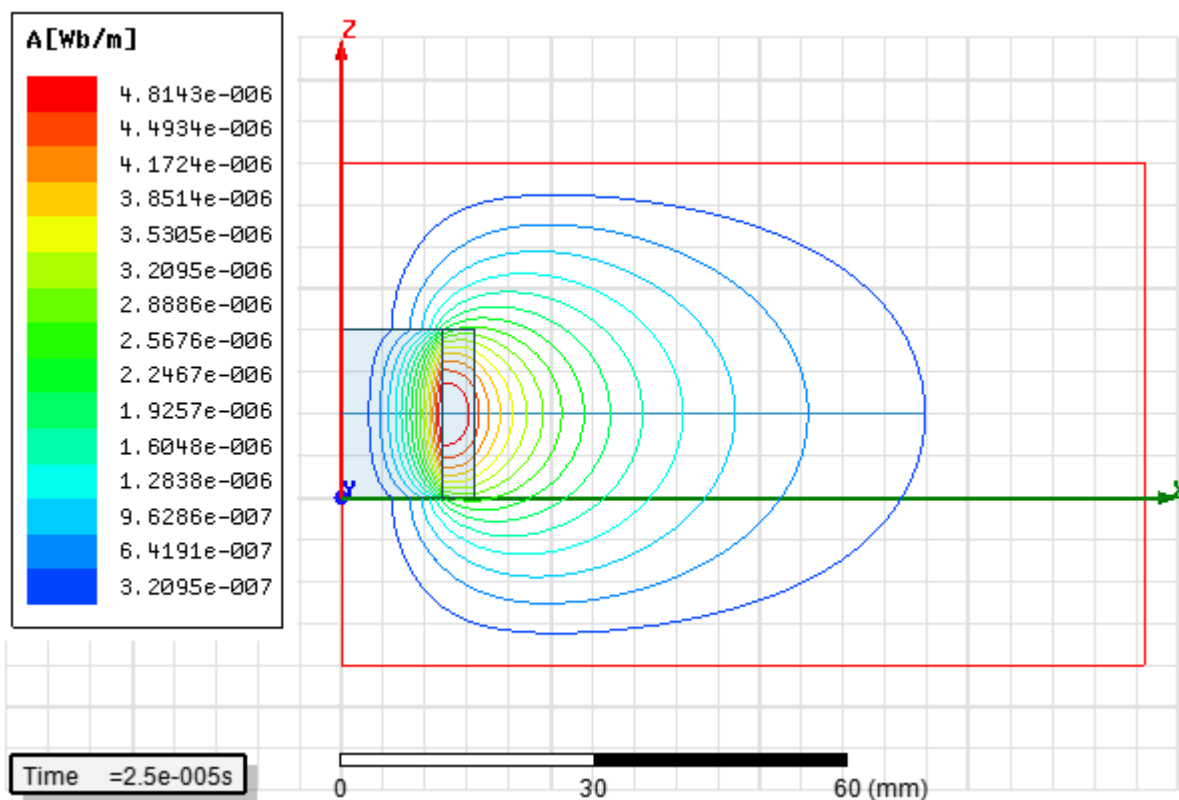


Рисунок 65 - Картина магнитного поля (катушка с внутренним сердечником)

Из рисунка видно, что магнитный поток замыкается по воздуху через сердечник катушки и распространяется вдоль оси x.

На рисунке 66 показана осциллограмма, отображающая зависимость индуктивности катушки и тока в катушке от времени.

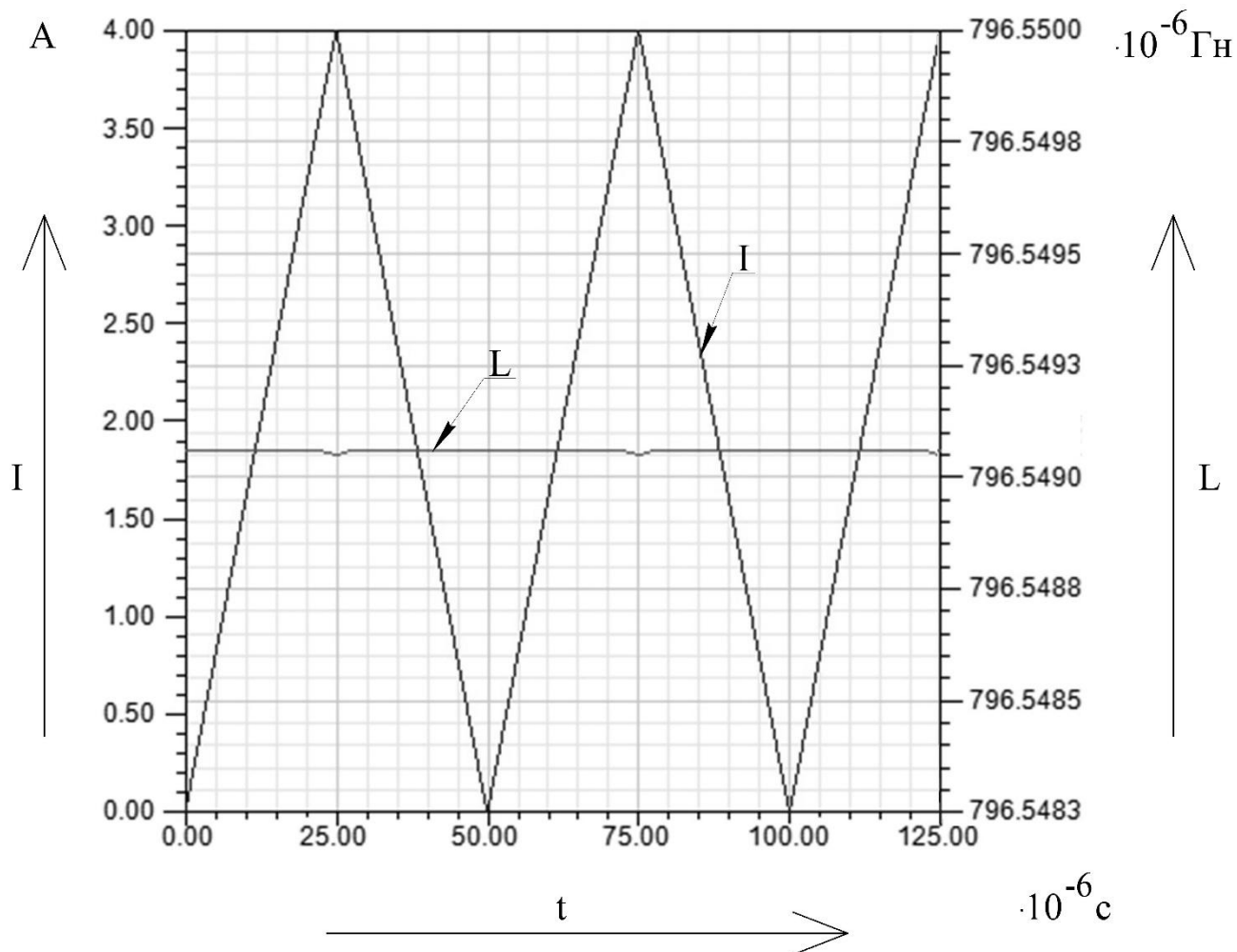


Рисунок 66 - Зависимость индуктивности L и тока I катушки от времени (катушка с внутренним сердечником)

На рисунке 67 показана осциллограмма, отражающая зависимость магнитной индукции от времени.

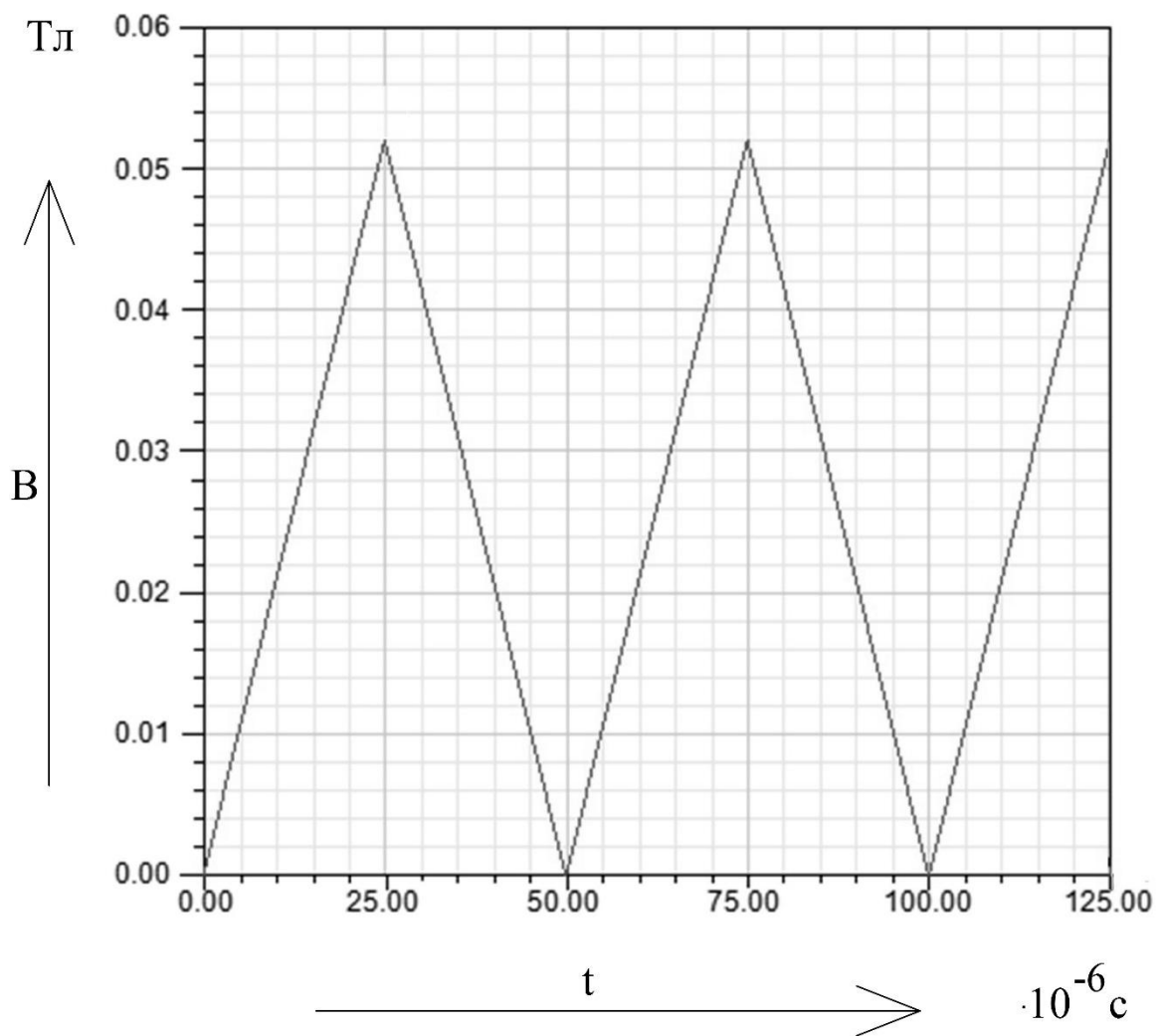


Рисунок 67 - Зависимость магнитной индукции B от времени (катушка с внутренним сердечником)

Осциллограмма, отражающая зависимость энергии, запасаемой в катушке, показана на рисунке 68.

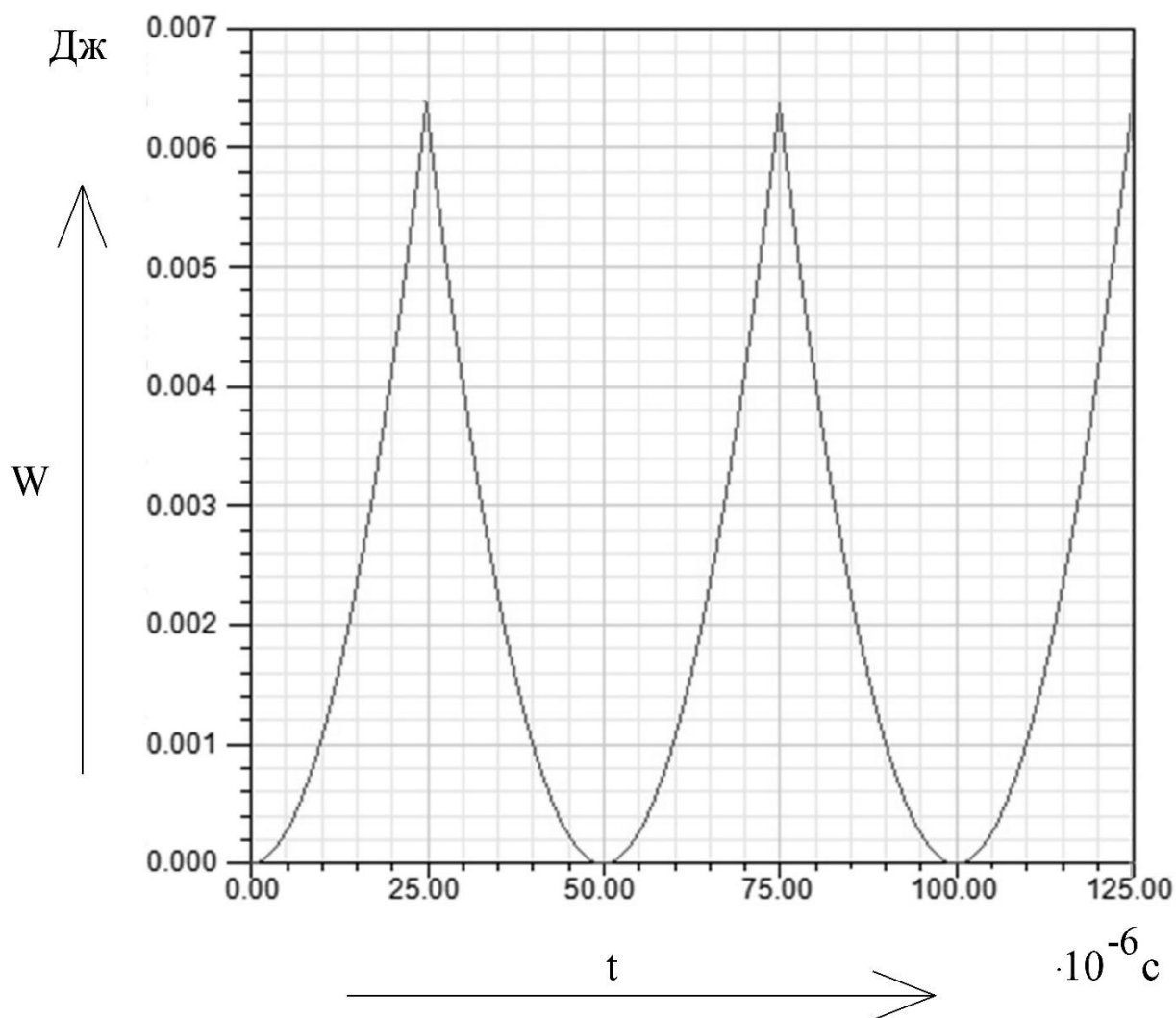


Рисунок 68 - Осциллограмма, отражающая зависимость энергии W , запасаемой в катушке от времени (катушка с внутренним сердечником)

Максимальная энергия, запасаемая в катушке, равна $W = 0.0064$ Дж, что соответствует значению энергии, запасаемой в двух других катушках, рассмотренных выше (пункт 3.1 и пункт 3.2).

На рисунке 69 приведена осциллограмма, отражающая зависимость индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки.

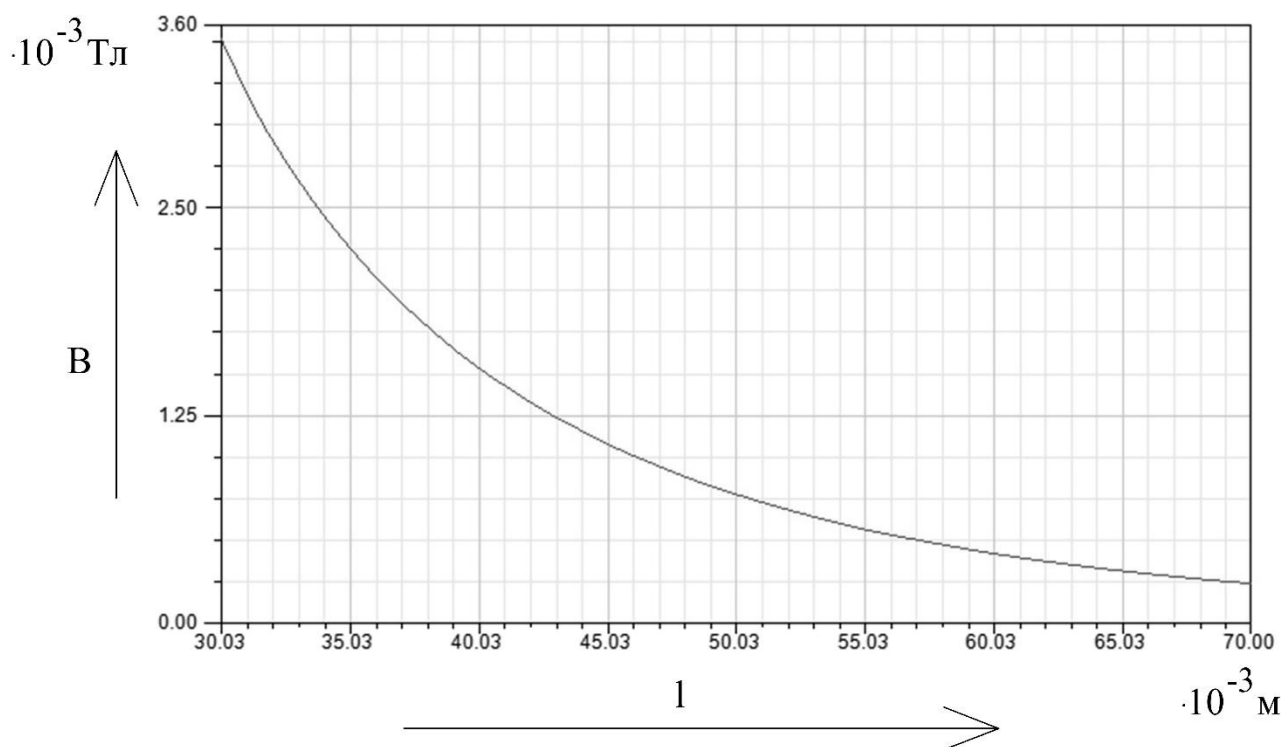


Рисунок 69 - Индукция магнитного поля B на расстоянии l от края катушки (катушка с внутренним сердечником)

3.4 Сопоставление полученных результатов

Все катушки индуктивности исследовались при одинаковой энергии, запасаемой в них.

Сравним катушку без магнитопровода и катушку с внутренним сердечником. Из таблицы 13 видно, что диаметр катушки без магнитопровода в 1.7 раз больше. Для намотки катушки без магнитопровода необходимо сделать 170 витков. Для намотки катушки с внутренним сердечником понадобится 120 витков, что в 1.4 раз меньше.

Диаметр катушки с замкнутым сердечником, имеющим зазор больше, чем у катушки с внутренним сердечником, но меньше, чем у катушки без магнитопровода. Для намотки этой катушки понадобилось наименьшее количество витков. Длина катушки без магнитопровода равна длине катушки с внутренним сердечником и составляет 20мм. Длина катушки с замкнутым магнитопроводом составляет 14.5мм.

Сравним значение индукции магнитного поля на расстоянии для всех типов катушек. С этой целью объединим осциллограммы, показанные на

рисунках 56, 62, 69. Начальная точка - точка отсчета расстояния, на всех осциллограммах находится в центре катушек. Совмещенные осциллограммы показаны на рисунке 70.

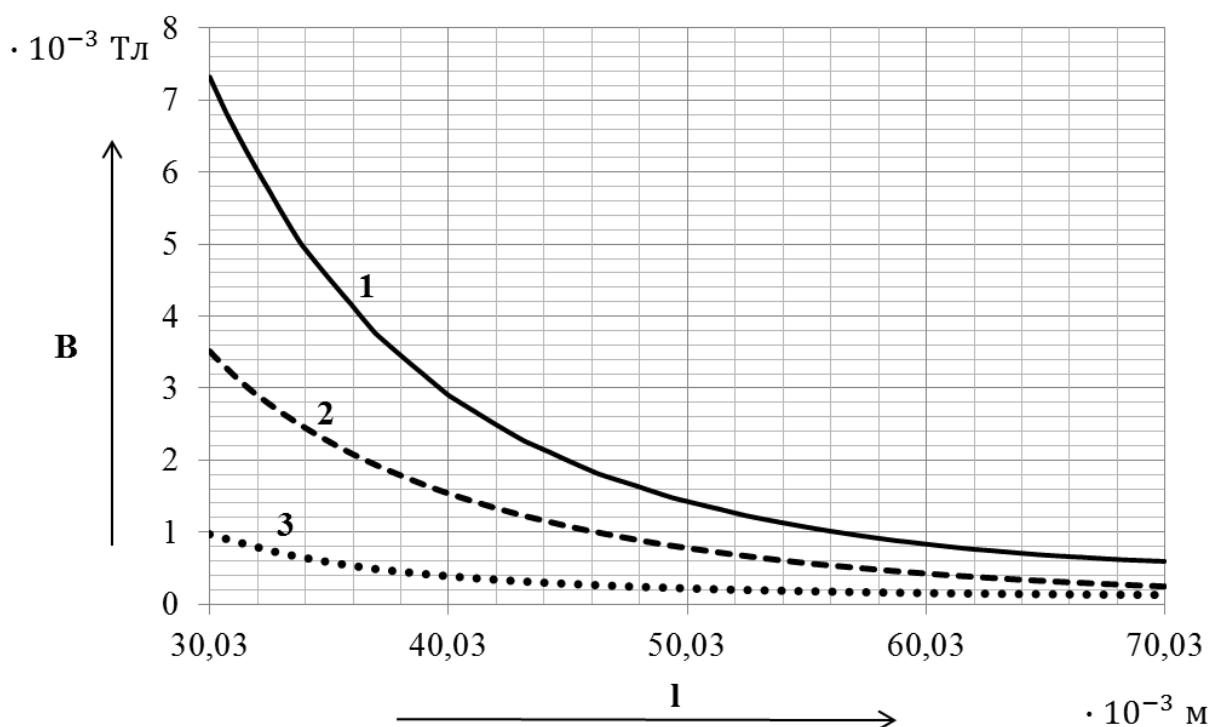


Рисунок 70 – Индукция магнитного поля B , создаваемого катушками индуктивности, на расстоянии l : 1 - катушка без магнитопровода, 2 - катушка с внутренним сердечником, 3 - катушка с замкнутым сердечником, имеющим зазор

Наибольшее значение индукции магнитного поля, на протяжении всего расстояния l , имеет катушка без магнитопровода. Индукция магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности с внутренним сердечником меньше, чем у катушки без магнитопровода, но больше чем у катушки с замкнутым сердечником, имеющим зазор.

4. Исследование магнитного поля тороидальной катушки и катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

Проведем исследование тороидальной катушки и катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор.

Рассчитанные картины магнитного поля приведены на рисунке 71.

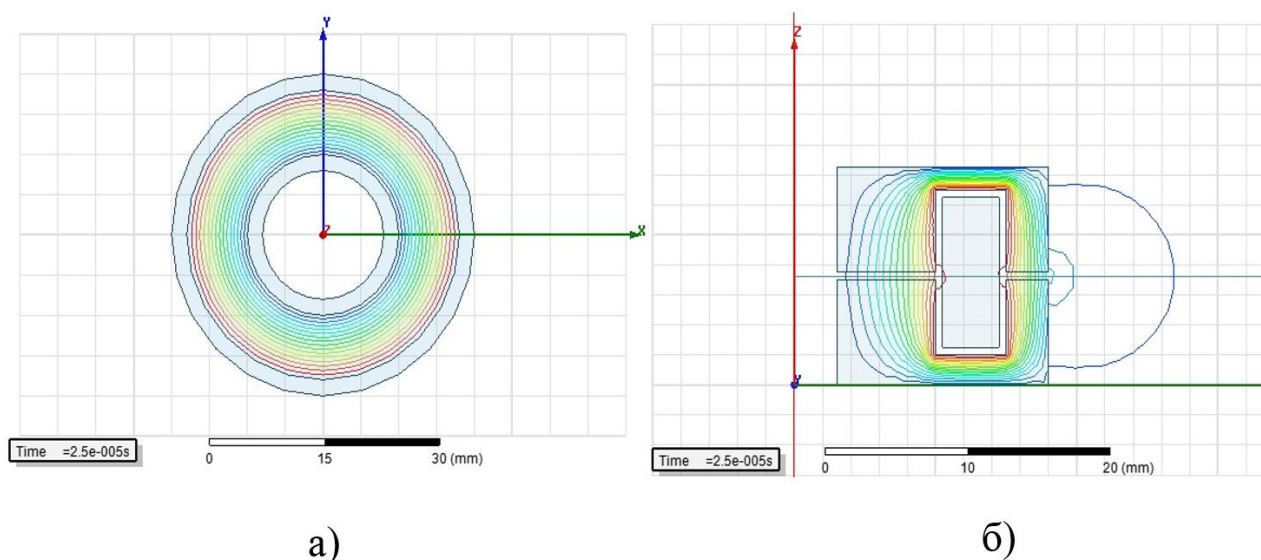


Рисунок 71 - Картины магнитного поля: а – картина магнитного поля для тороидальной катушки; б - катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

В катушках (разделы 4.1 – 4.2) запасается одинаковое количество энергии, равное 0.3 мДж. Габаритные размеры, количество витков и ток в обмотках катушек индуктивности, соответствующие одинаковой энергии, запасаемой в них, приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Сравнение диаметра катушек, тока, протекающего по обмотке катушки и числа витков, при одинаковой энергии, запасаемой в катушке

Тип катушки индуктивности	Диаметр катушки d , мм	Длина катушки l , мм	Число витков в обмотке N	Ток в обмотке I , А
Тороидальная катушка	40	20	5	3
Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор	36	14.5	13	3

4.1 Исследование магнитного поля тороидальной катушки

Геометрия тороидальной катушки индуктивности показана на рисунке 72.

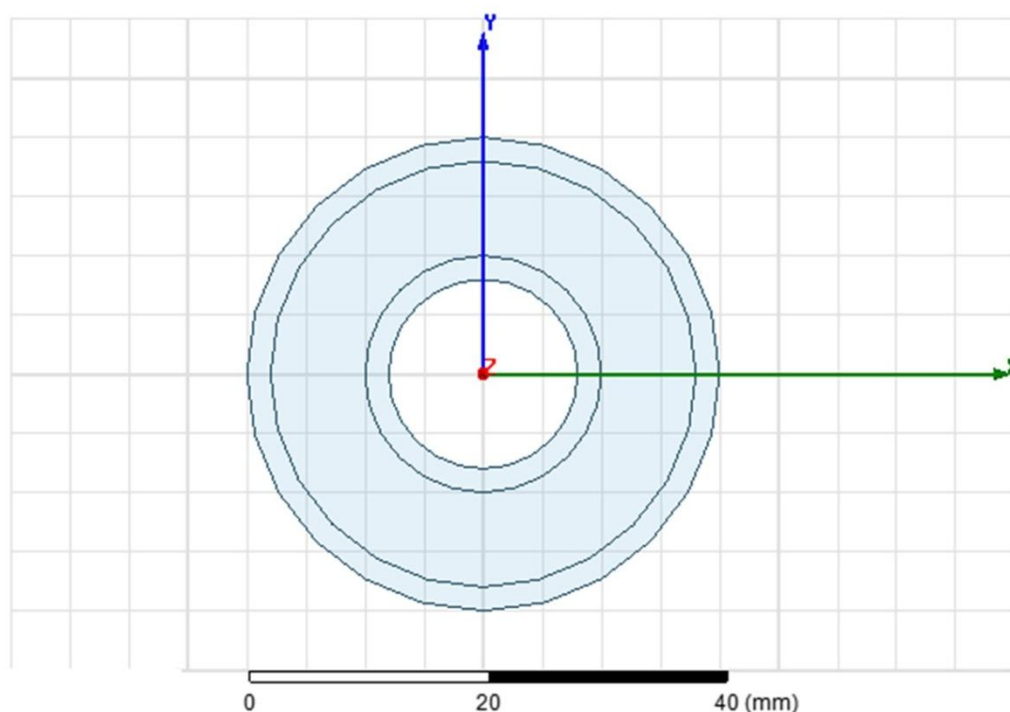


Рисунок 72 – Геометрия катушки (тороидальная катушка)

Сеть конечных элементов показана на рисунке 73.

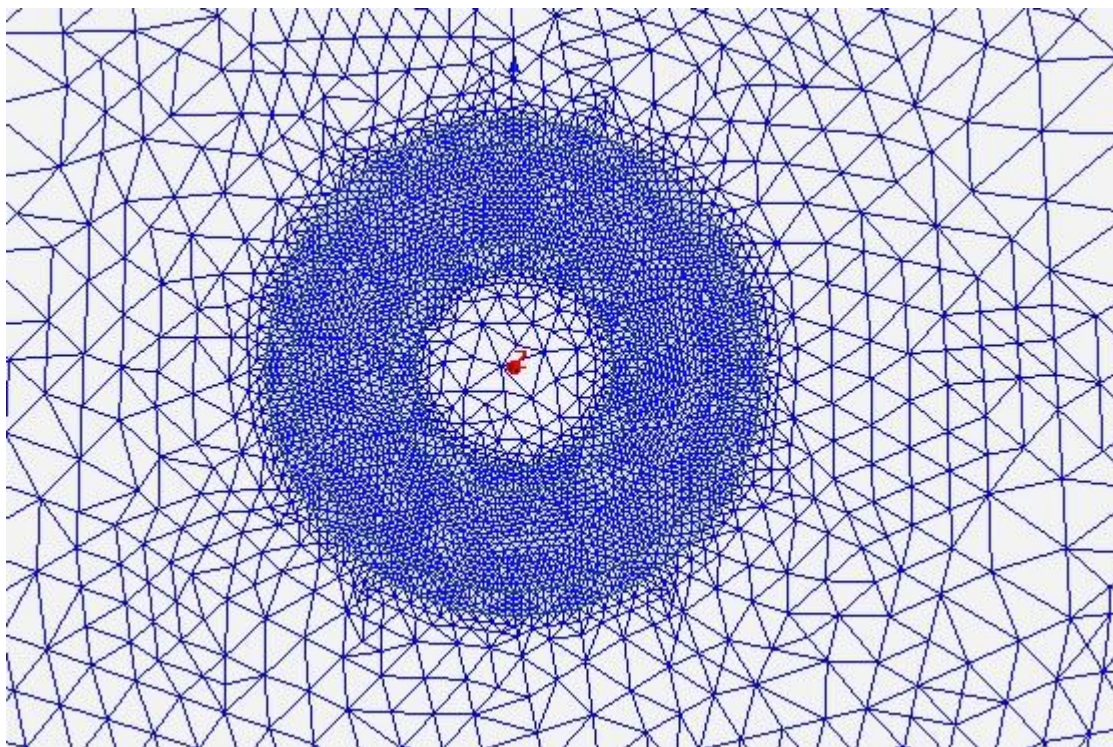


Рисунок 73 - Сеть конечных элементов (тороидальная катушка)

Картина магнитного поля тороидальной катушки показана на рисунке 74.

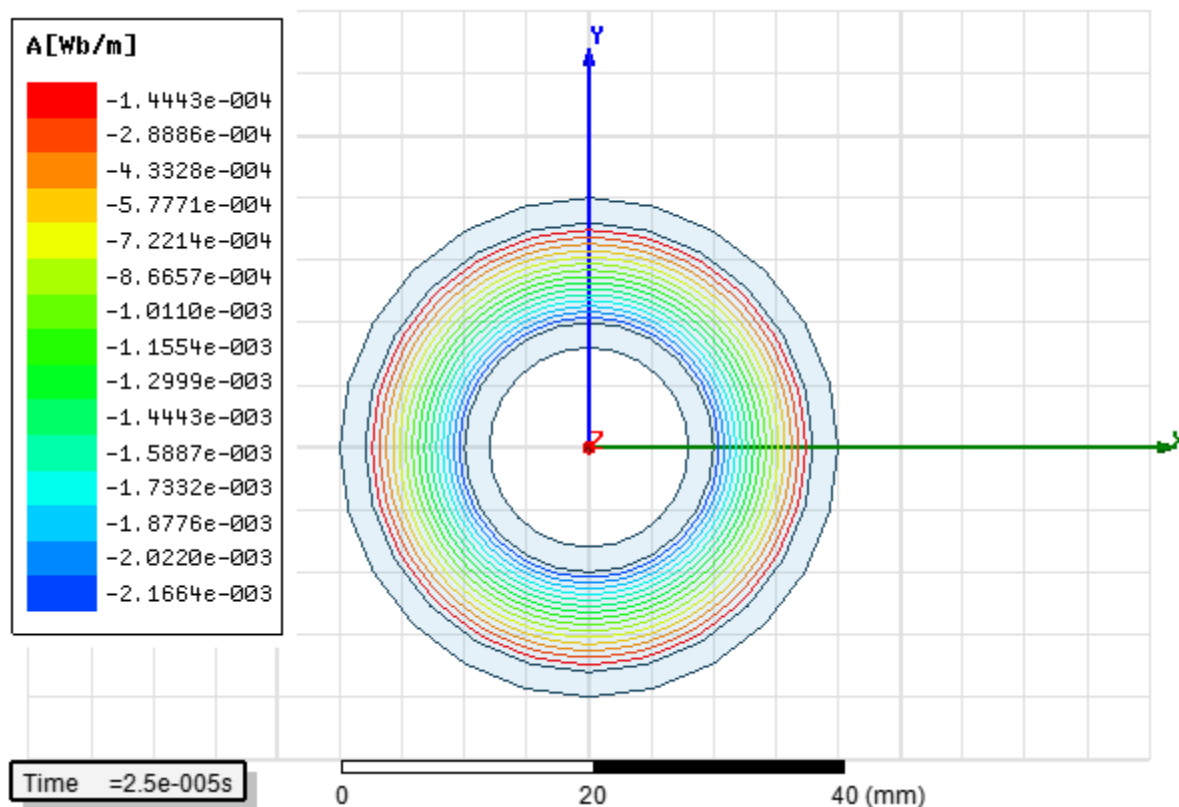


Рисунок 74 - Картина магнитного поля (тороидальная катушка)

Магнитное поле замыкается внутри катушки по магнитопроводу.

На рисунке 75 показана осциллограмма, отображающая зависимость

индуктивности катушки и тока в катушки от времени.

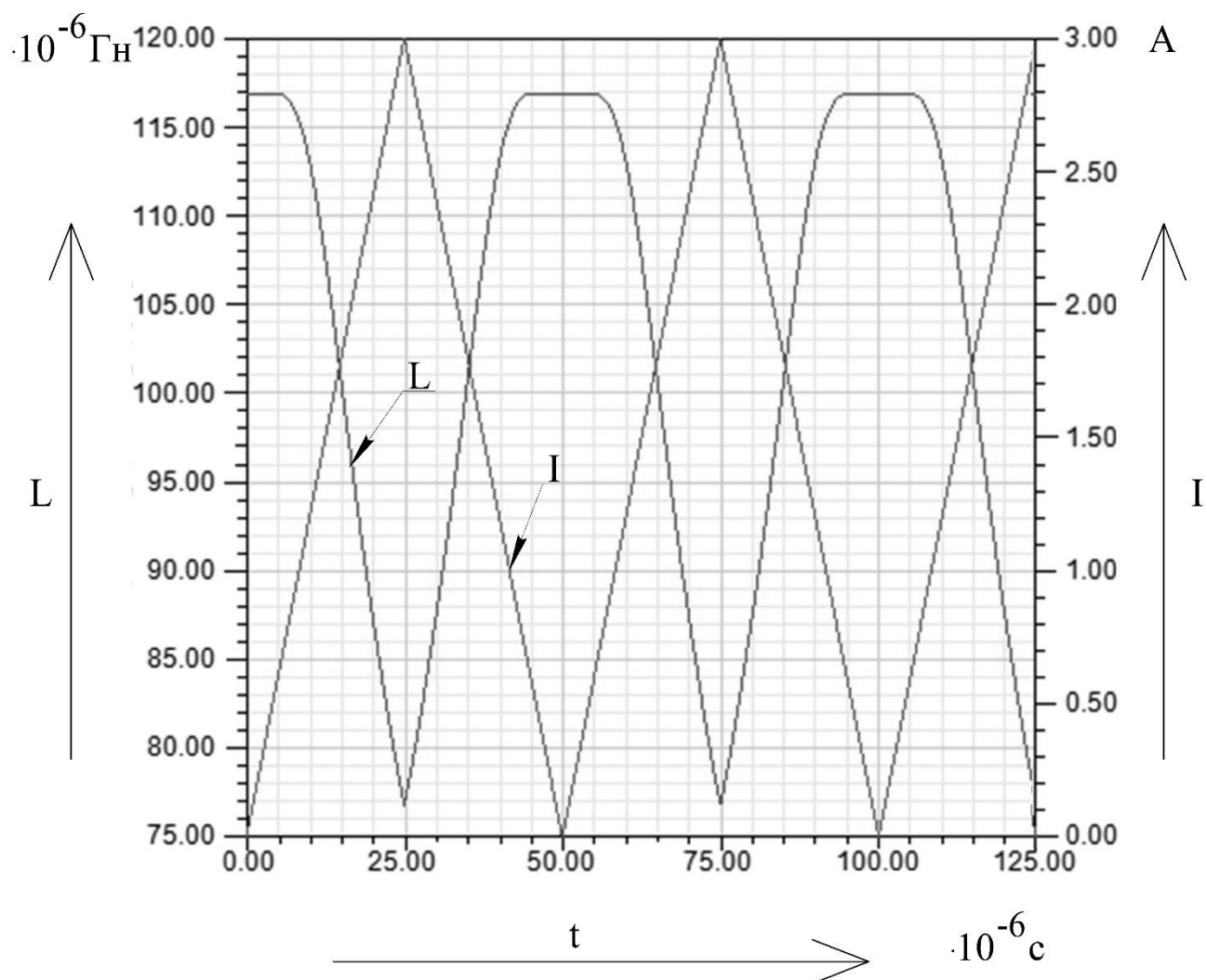


Рисунок 75 - Зависимость индуктивности L и тока I катушки от времени (тороидальная катушка)

На рисунке 76 показана осциллограмма, отражающая зависимость магнитной индукции и тока от времени.

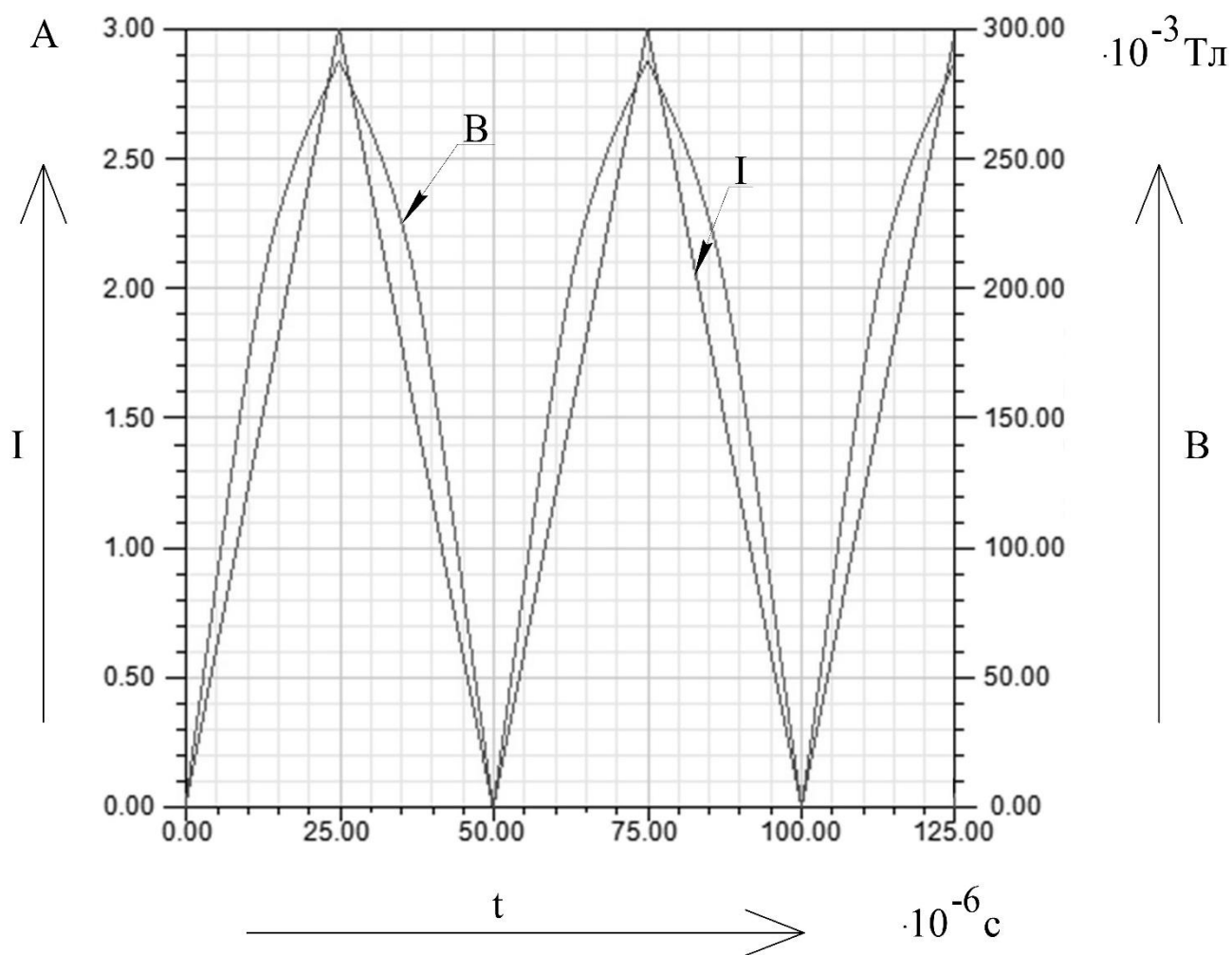


Рисунок 76 - Зависимость магнитной индукции B и тока I катушки от времени (тороидальная катушка)

Энергия, запасаемая в катушке индуктивности, показана на рисунке 77.

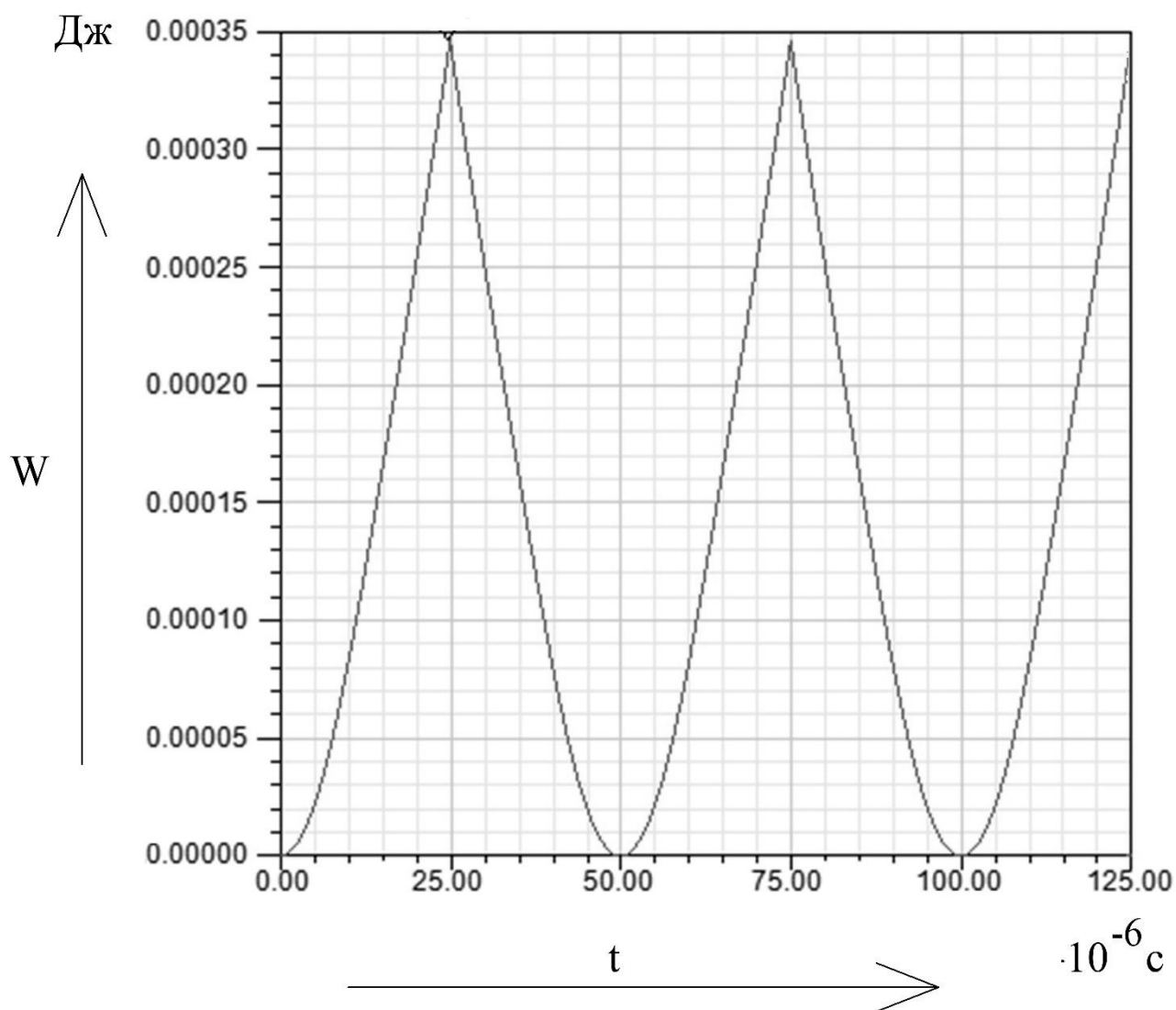


Рисунок 77 – Энергия W , запасаемая в катушке (тороидальная катушка)

Максимальная энергия, запасаемая в катушке, равна 0.3мДж. Построим график, отражающий зависимость индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки (рисунок 78).

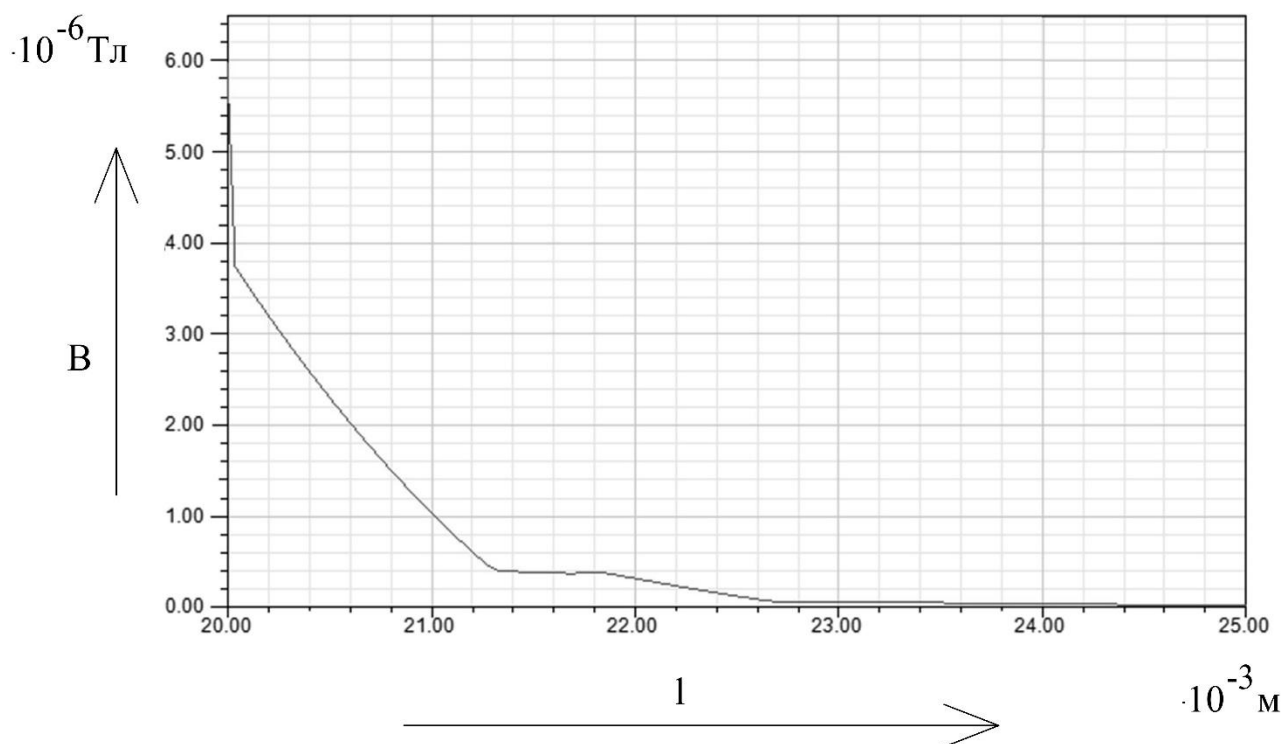


Рисунок 78 - Индукция магнитного поля B на расстоянии l от края катушки (тороидальная катушка)

4.2 Исследование магнитного поля катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

Геометрия катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор показана на рисунке 79.

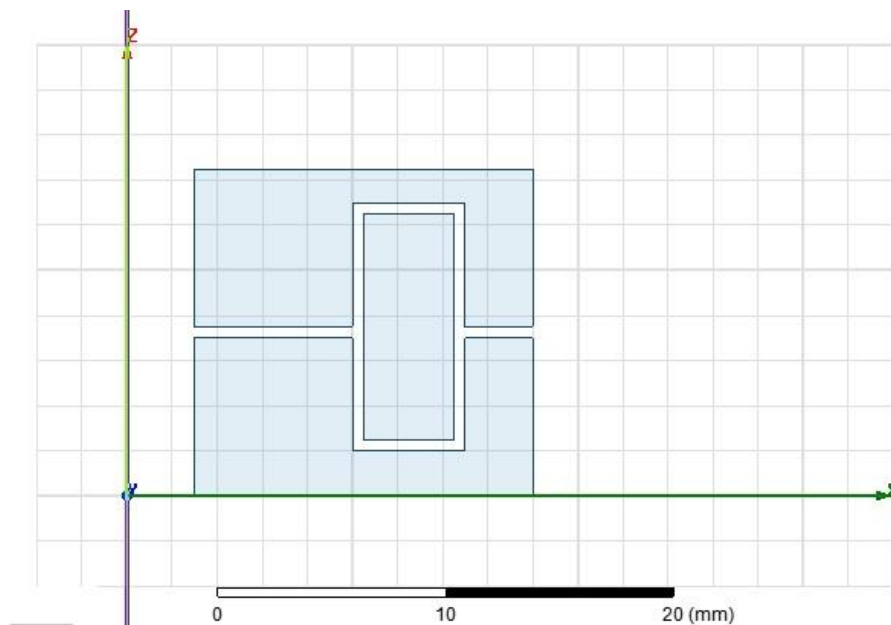


Рисунок 79 – Геометрия катушки (Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Сеть конечных элементов показана на рисунке 80.

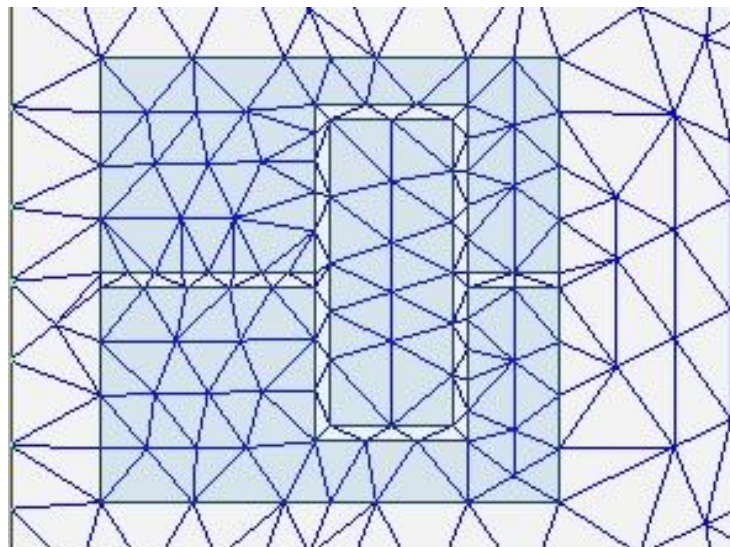


Рисунок 80 - Сеть конечных элементов (Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Картина магнитного поля катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор, показана на рисунке 81.

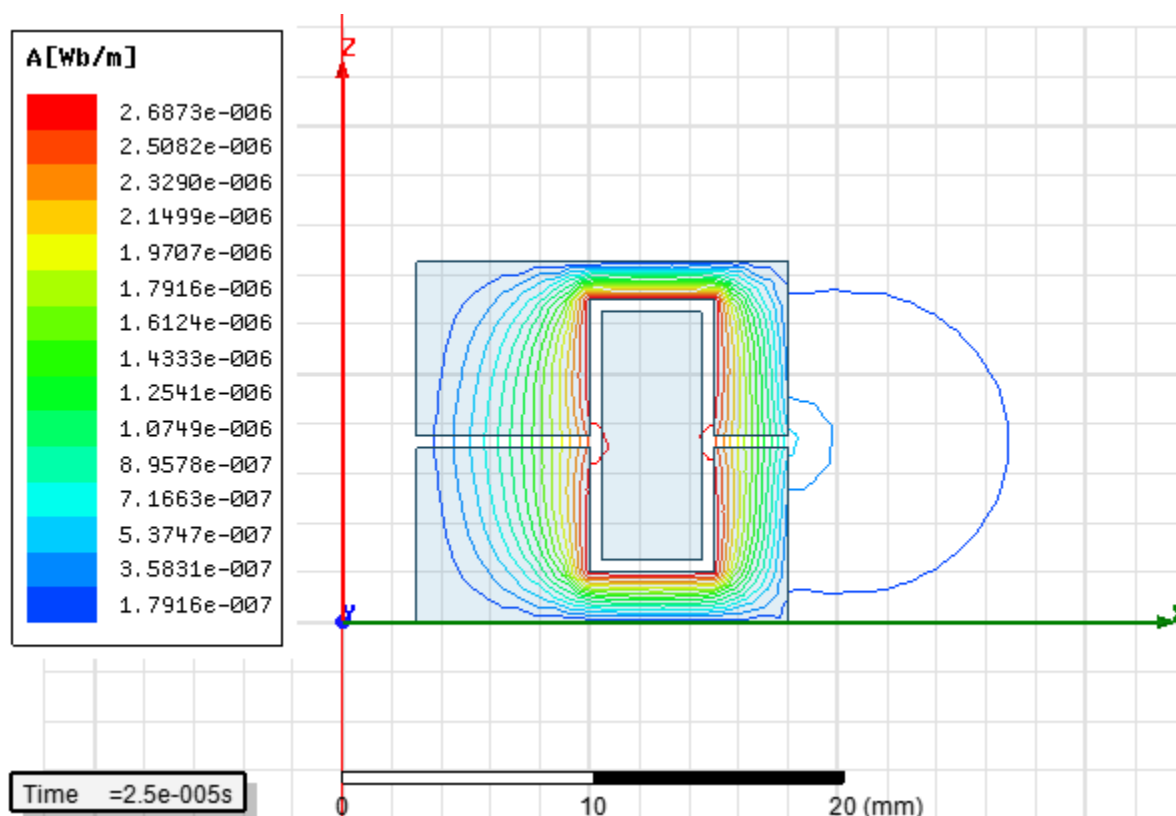


Рисунок 81 - Картина магнитного поля (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Магнитное поле замыкается внутри катушки по магнитопроводу,

наблюдаются краевые эффекты вблизи зазора.

На рисунке 82 показана осциллограмма, отображающая зависимость индуктивности катушки и тока в катушке от времени.

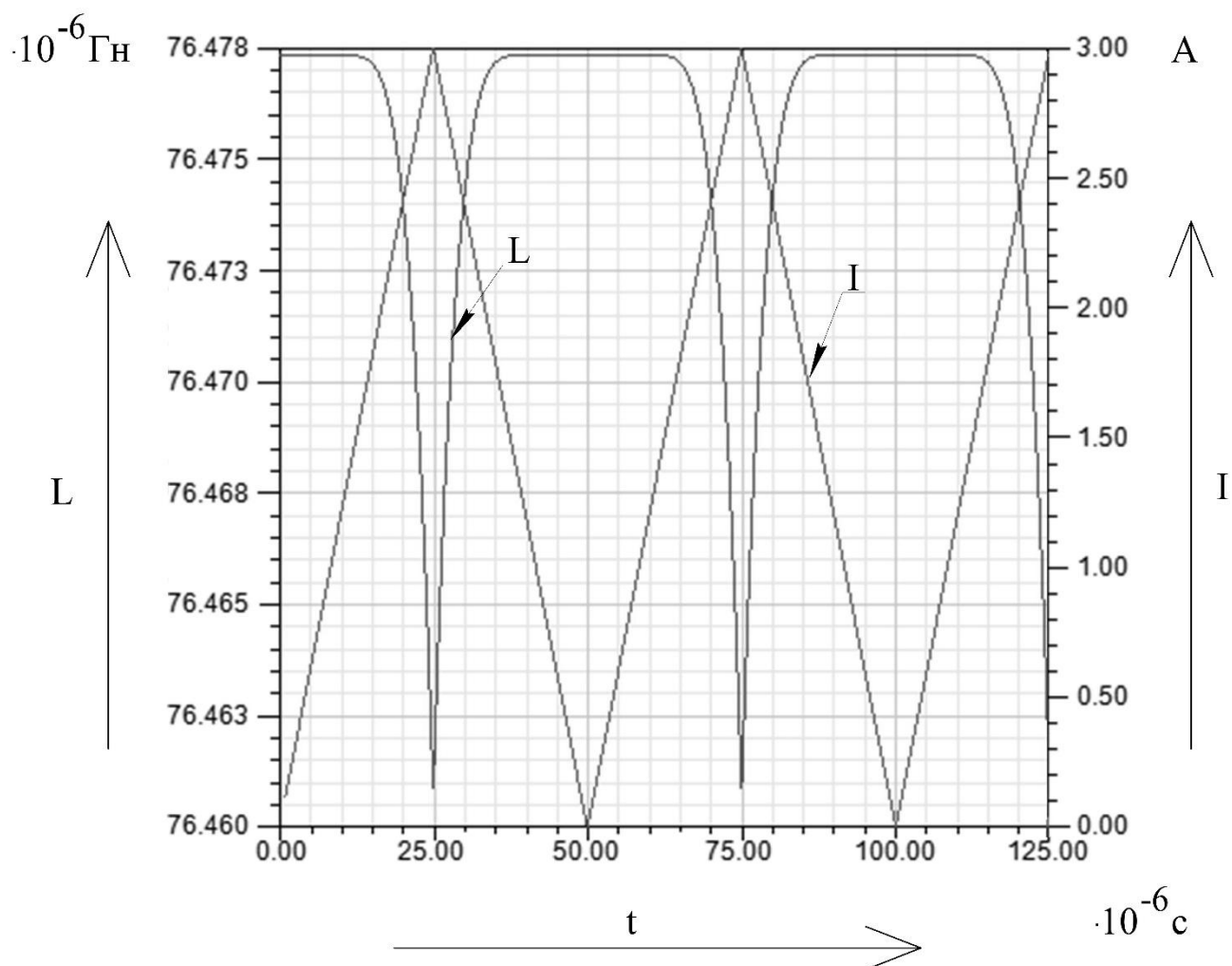


Рисунок 82 - Зависимость индуктивности L и тока I катушки от времени (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

На рисунке 83 показана осциллограмма, отражающая зависимость магнитной индукции и тока от времени.

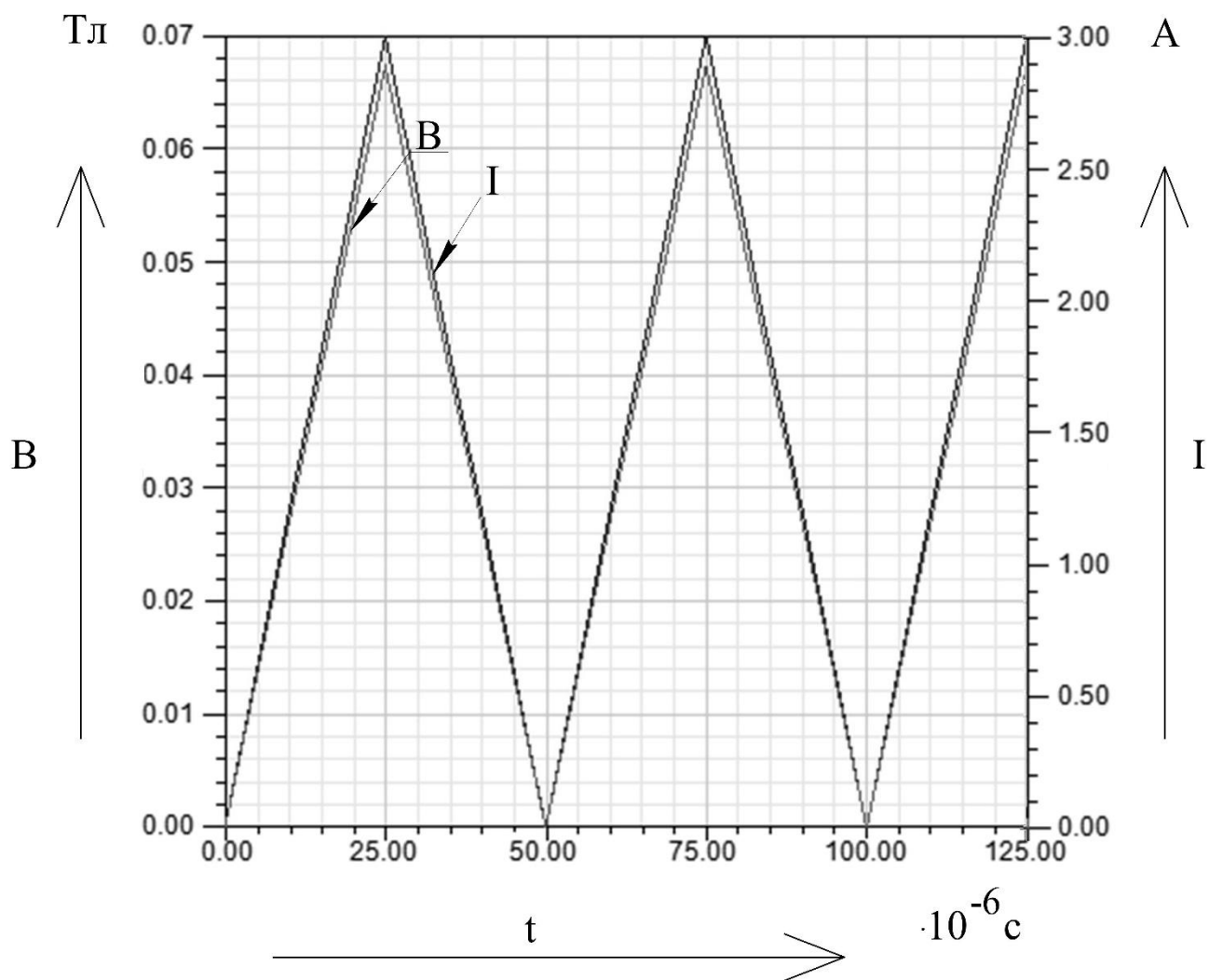


Рисунок 83 - Зависимость магнитной индукции B и тока I от времени
(катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Энергия, запасаемая в катушке индуктивности, показана на рисунке 84.

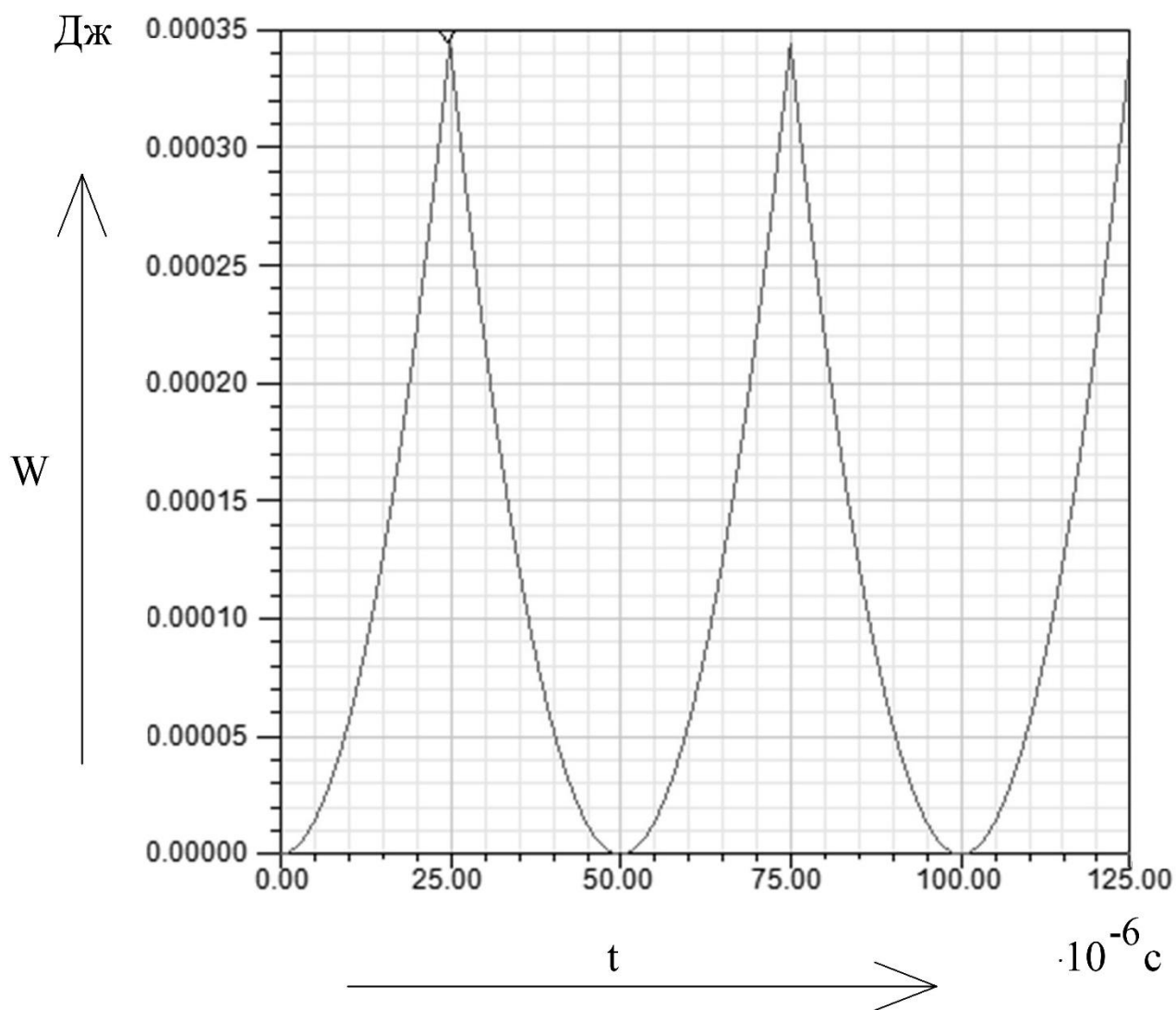


Рисунок 84 – Энергия W , запасаемая в катушке (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Максимальная энергия, запасаемая в катушке, равна 0.3мДж. Построим график, отражающий зависимость индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки (рисунок 85).

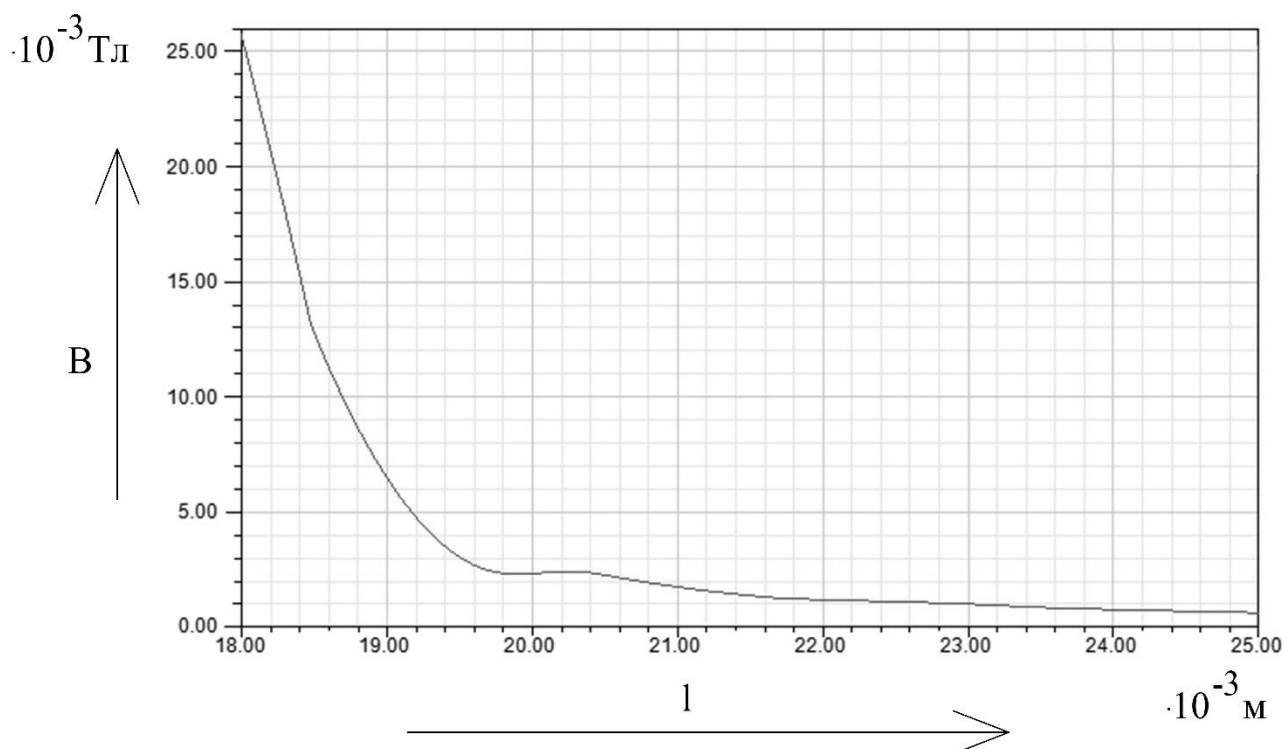


Рисунок 85 - Индукция магнитного поля B на расстоянии l от края катушки (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

4.3 Сопоставление полученных результатов

Катушки индуктивности исследовались при одинаковой энергии, запасаемой в них.

Сравним катушку с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор и катушку тороидального типа. Из таблицы 14 видно, что их диаметры примерно равны (отличаются на 4 мм). Для намотки тороидальной катушки необходимо сделать всего 5 витков. Для намотки катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор понадобится сделать 13 витков провода, что в 2.6 раз больше. Длина катушки тороидального типа составляет 20 мм, длина катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор, равна 14.5 мм.

Сравним значение индукции магнитного поля на расстоянии для данных типов катушек. С этой целью объединим осциллограммы, показанные на рисунках 78 и 85. Начальная точка - точка отсчета расстояния, на всех осциллограммах находится в центре катушек. Совмещенные осциллограммы показаны на рисунке 86.

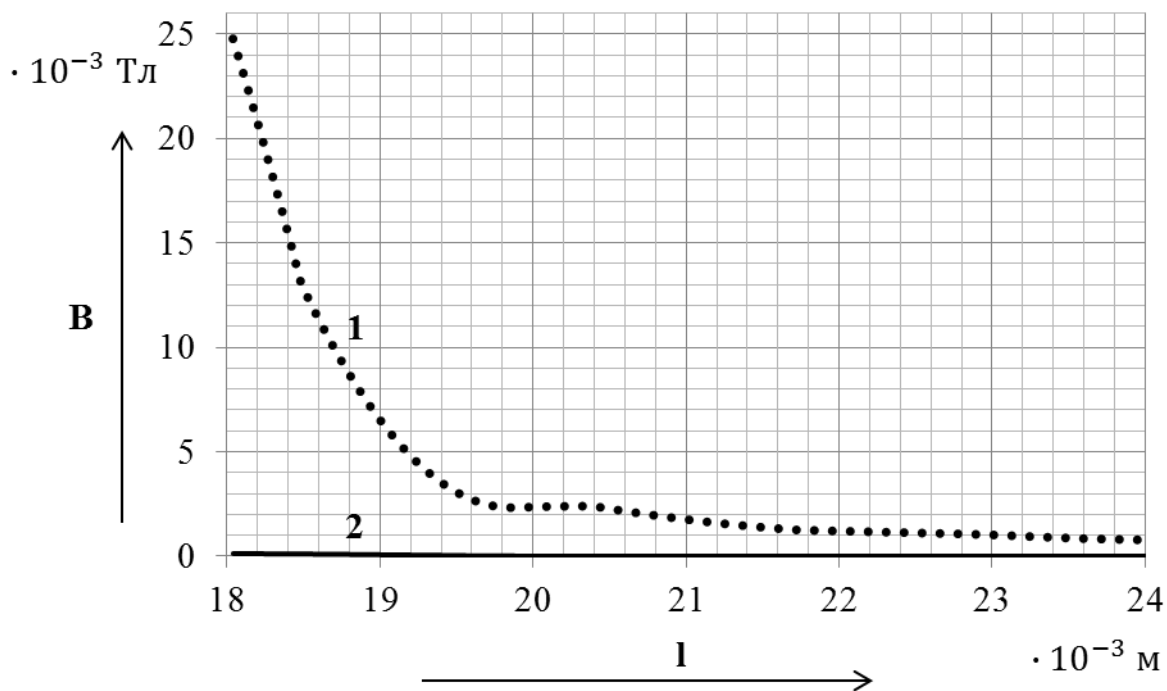


Рисунок 86 – Индукция магнитного поля B , создаваемого катушками индуктивности, на расстоянии l от края катушки: 1 – катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор, 2 - тороидальная катушка

Наибольшее значение индукции магнитного поля, на протяжении расстояния l , имеет катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор.

5. Исследование магнитного поля катушки с прямоугольным магнитопроводом и катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

Проведем исследование катушки с прямоугольным магнитопроводом и катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор.

Рассчитанные картины магнитного поля приведены на рисунке 87.

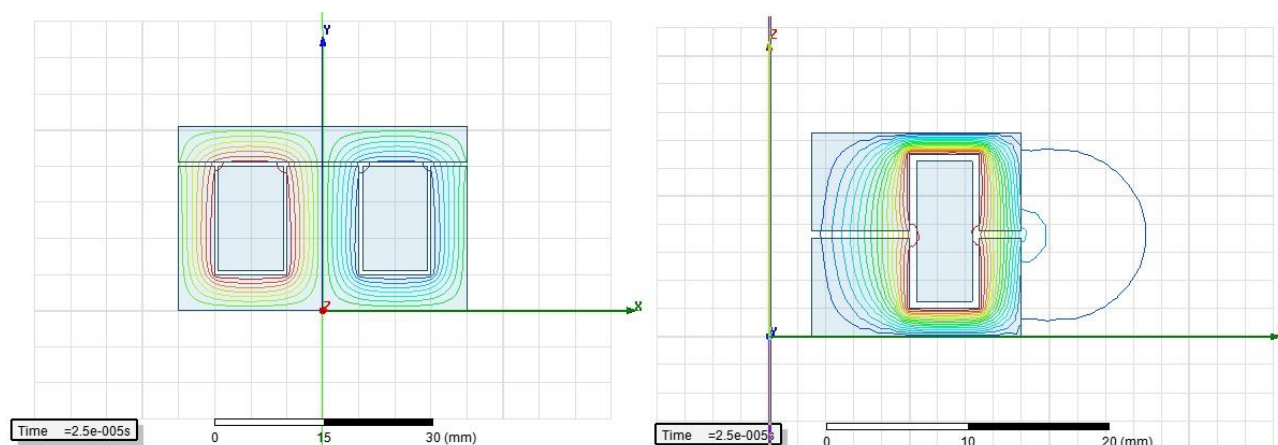


Рисунок 87 - Рассчитанные картины магнитного поля: а – картина магнитного поля для катушки с прямоугольным магнитопроводом; б - картина магнитного поля для катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

В катушках индуктивности (разделы 5.1 – 5.2) запасается одинаковое количество энергии, равное 0.3 мДж. Габаритные размеры, количество витков и ток в обмотках катушек индуктивности, соответствующие одинаковой энергии, запасаемой в них, приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Сравнение диаметра катушек и числа витков, при одинаковой энергии, запасаемой в катушке

Тип катушки индуктивности	Диаметр/Ширина катушки d/b , мм	Длина катушки l , мм	Число витков в обмотке N	Ток в обмотке I , А
катушка с прямоугольным магнитопроводом	40	25.5	18	3
Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор	36	14.5	13	3

5.1 Исследование магнитного поля катушки с прямоугольным магнитопроводом

Геометрия катушки с прямоугольным магнитопроводом показана на рисунке 88.

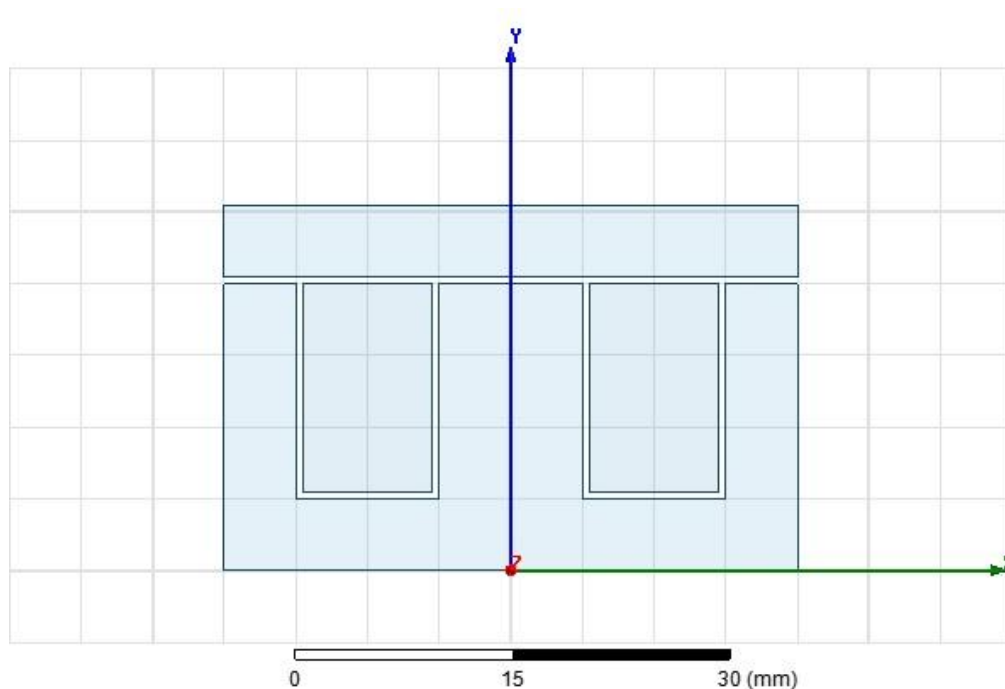


Рисунок 88 – Геометрия катушки (катушка с прямоугольным магнитопроводом)

Сеть конечных элементов показана на рисунке 89.

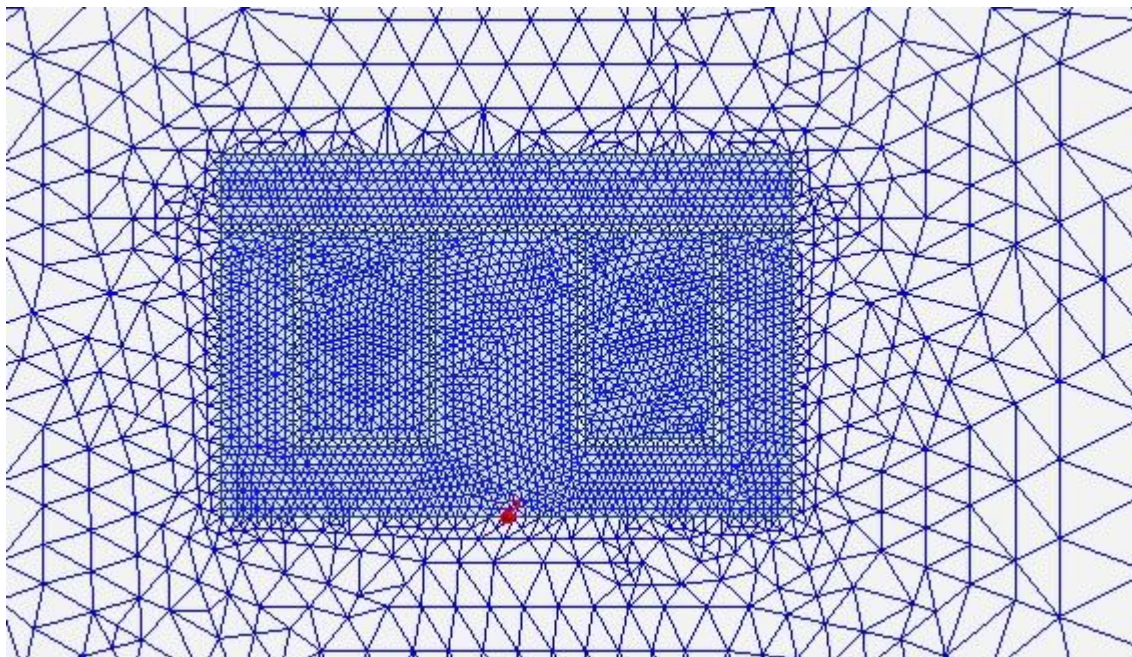


Рисунок 89 - Сеть конечных элементов (катушка с прямоугольным магнитопроводом)

Картина магнитного поля катушки с прямоугольным магнитопроводом показана на рисунке 90.

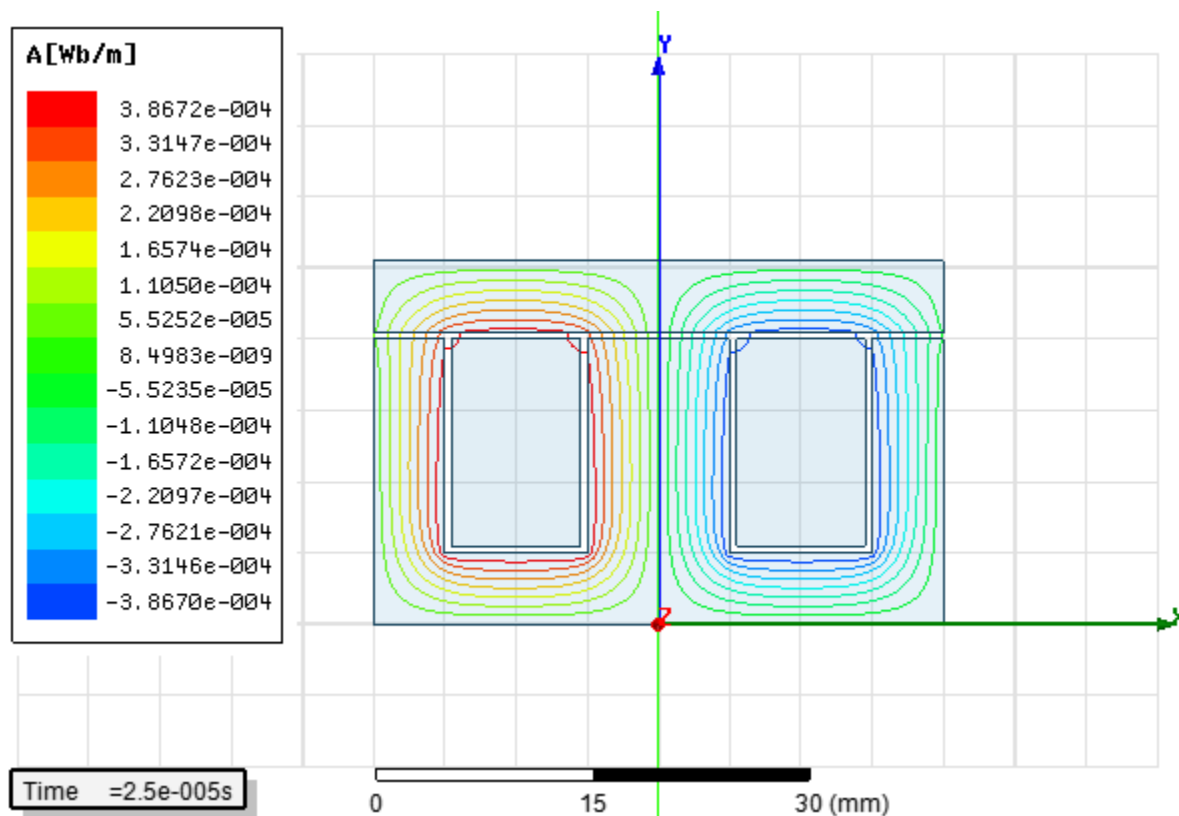


Рисунок 90 - Картина магнитного поля (катушка с прямоугольным магнитопроводом)

На рисунке 91 показана осциллограмма, отображающая зависимость индуктивности катушки и тока в катушке от времени.

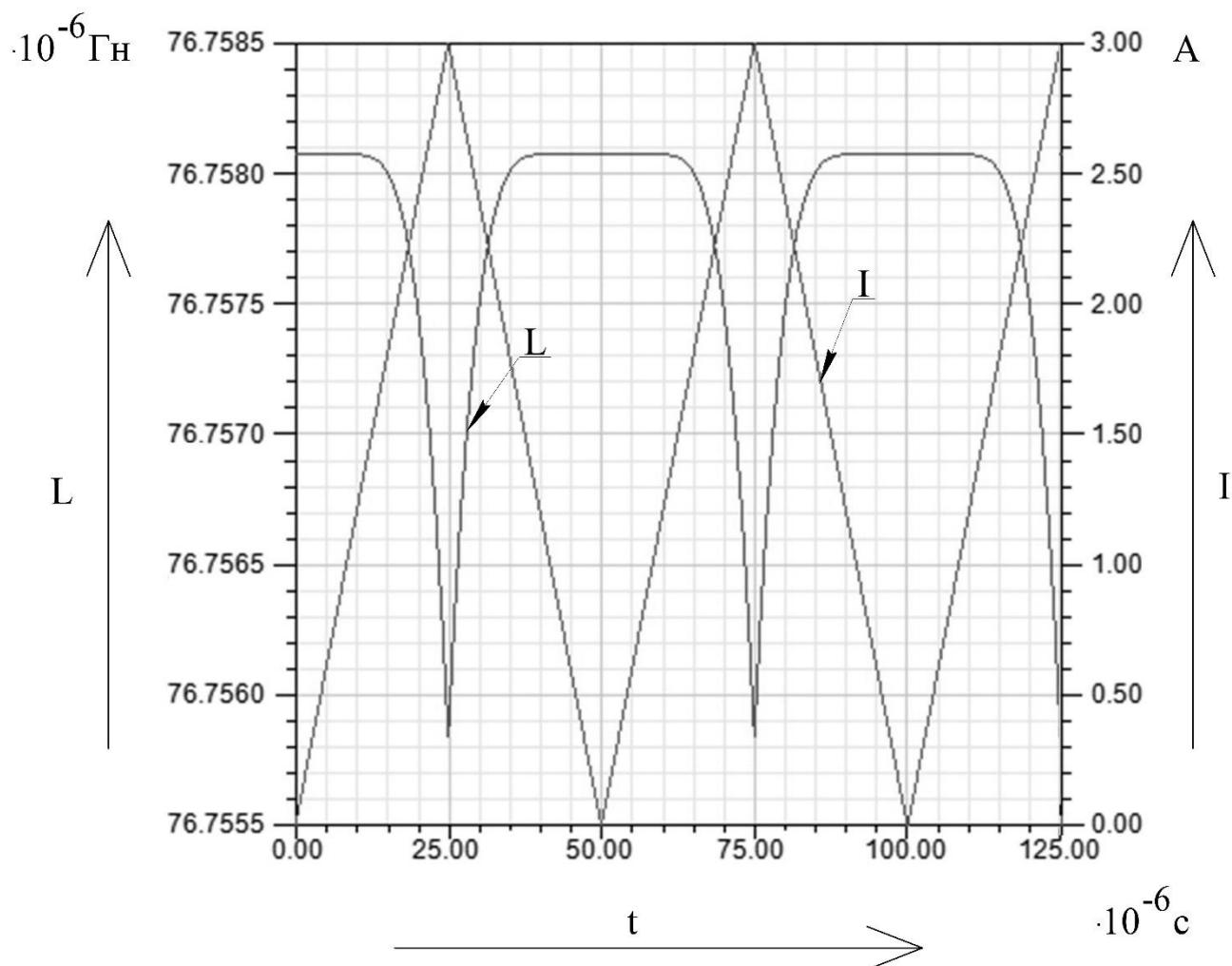


Рисунок 91 - Зависимость индуктивности L и тока I катушки от времени (катушка с прямоугольным магнитопроводом)

На рисунке 92 показана осциллограмма, отражающая зависимость магнитной индукции и тока от времени.

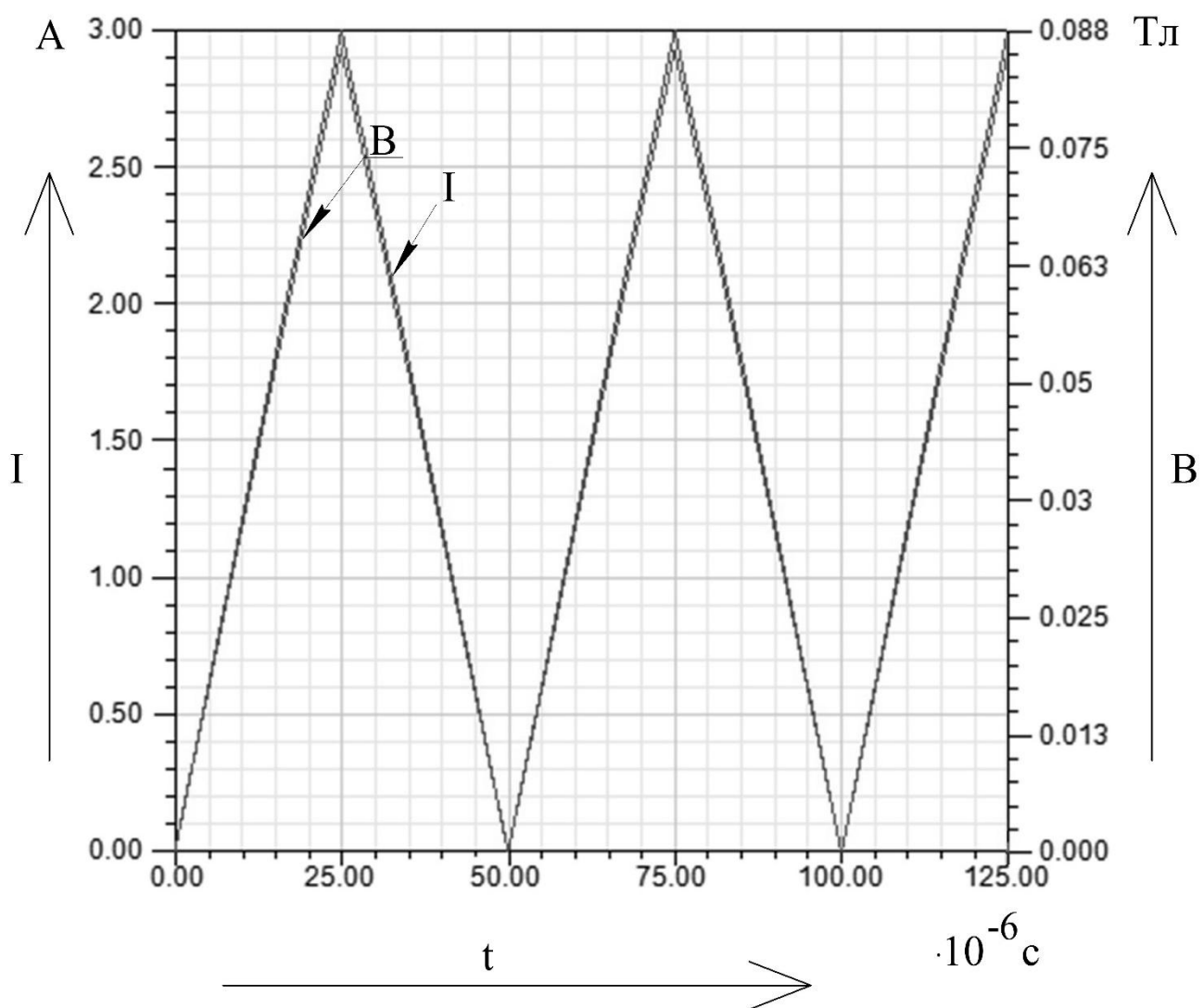


Рисунок 92 - Зависимость магнитной индукции B и тока I от времени
(катушка с прямоугольным магнитопроводом)

Энергия, запасаемая в катушке индуктивности, показана на рисунке 93.

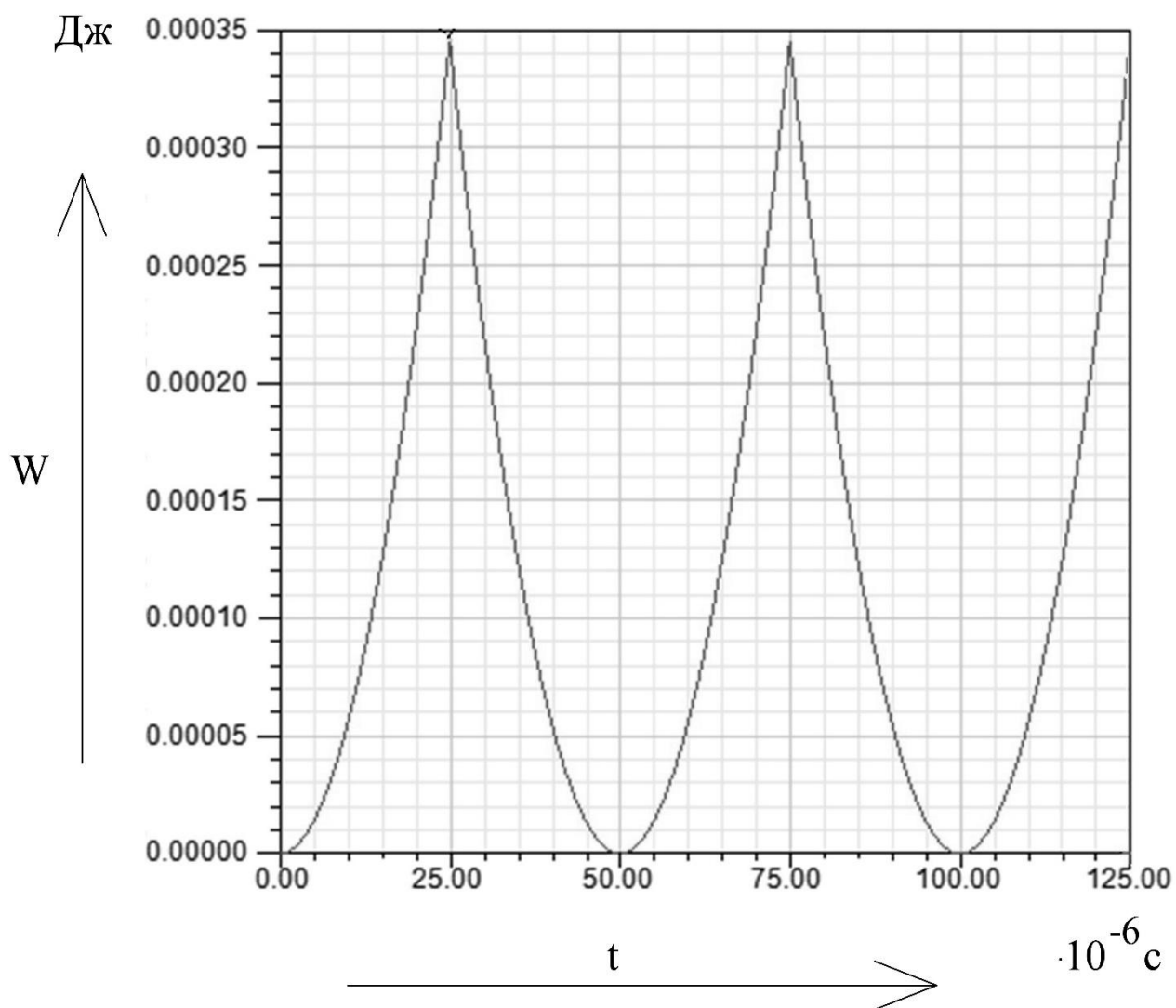


Рисунок 93 – Энергия W , запасаемая в катушке (катушка с прямоугольным магнитопроводом)

Максимальная энергия, запасаемая в катушке, равна 0.3мДж. Построим график, отражающий зависимость индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки (рисунок 94).

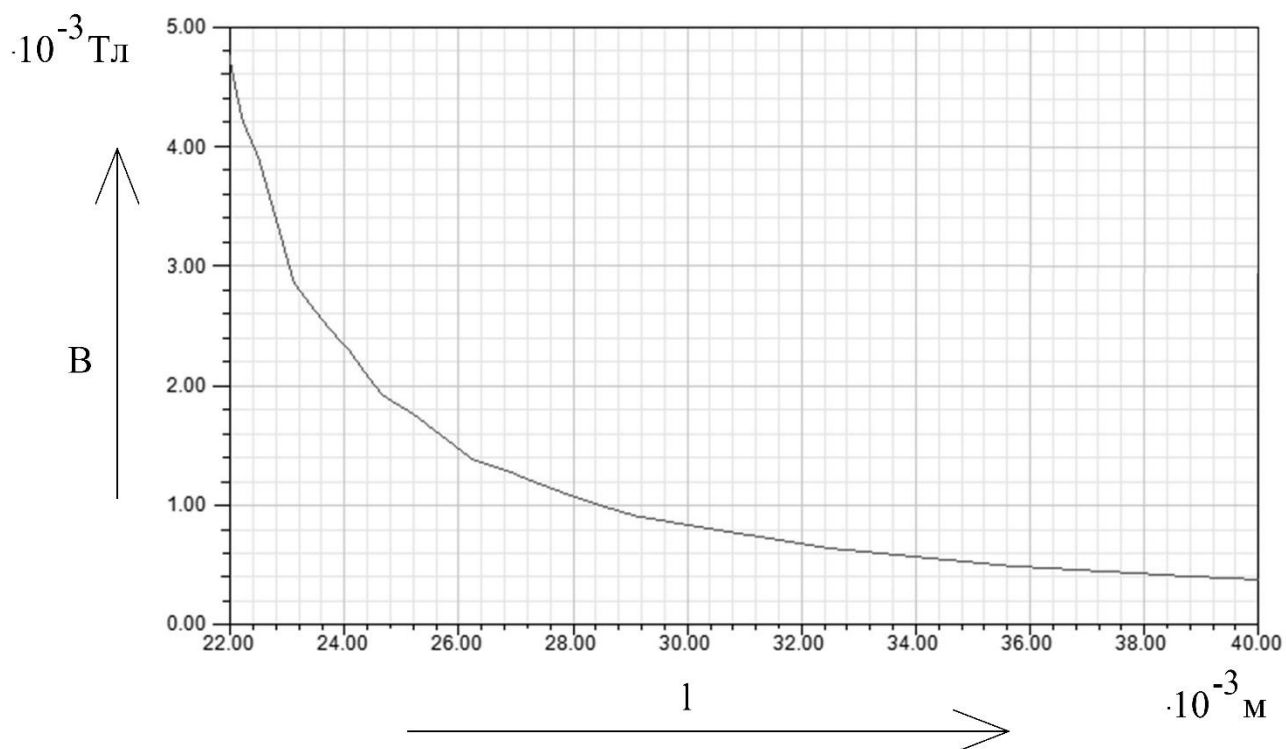


Рисунок 94 - Индукция магнитного поля B на расстоянии l от края катушки (катушка с прямоугольным магнитопроводом)

5.2 Исследование магнитного поля катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

Геометрия катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор показана на рисунке 95.

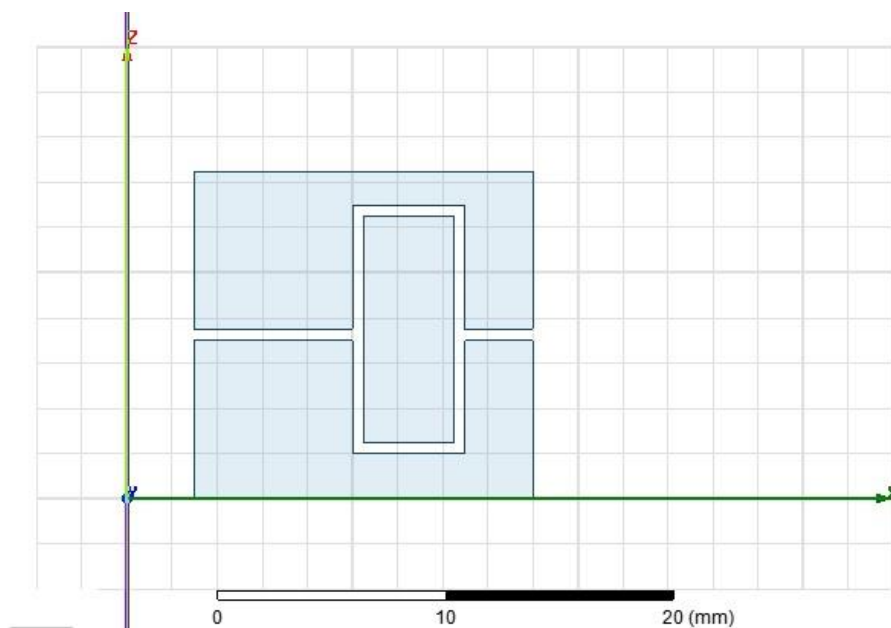


Рисунок 95 – Геометрия катушки (Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Сеть конечных элементов показана на рисунке 96.

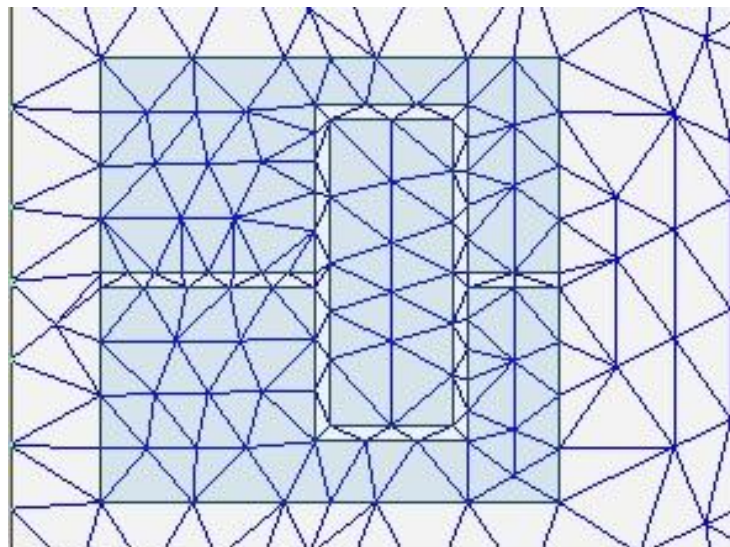


Рисунок 96 - Сеть конечных элементов (Катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Картина магнитного поля катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор, показана на рисунке 97.

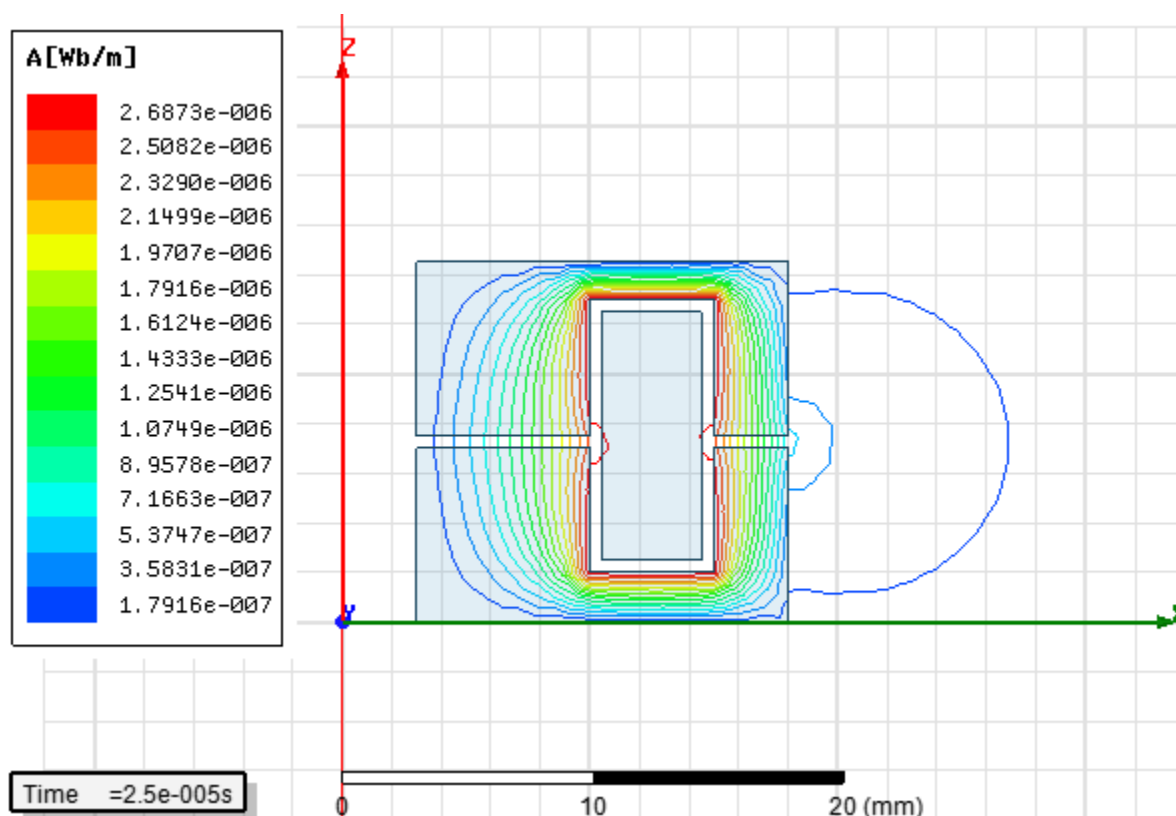


Рисунок 97 - Картина магнитного поля (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Магнитное поле замыкается внутри катушки по магнитопроводу,

наблюдаются краевые эффекты вблизи зазора.

На рисунке 98 показана осциллограмма, отображающая зависимость индуктивности катушки и тока в катушке от времени.

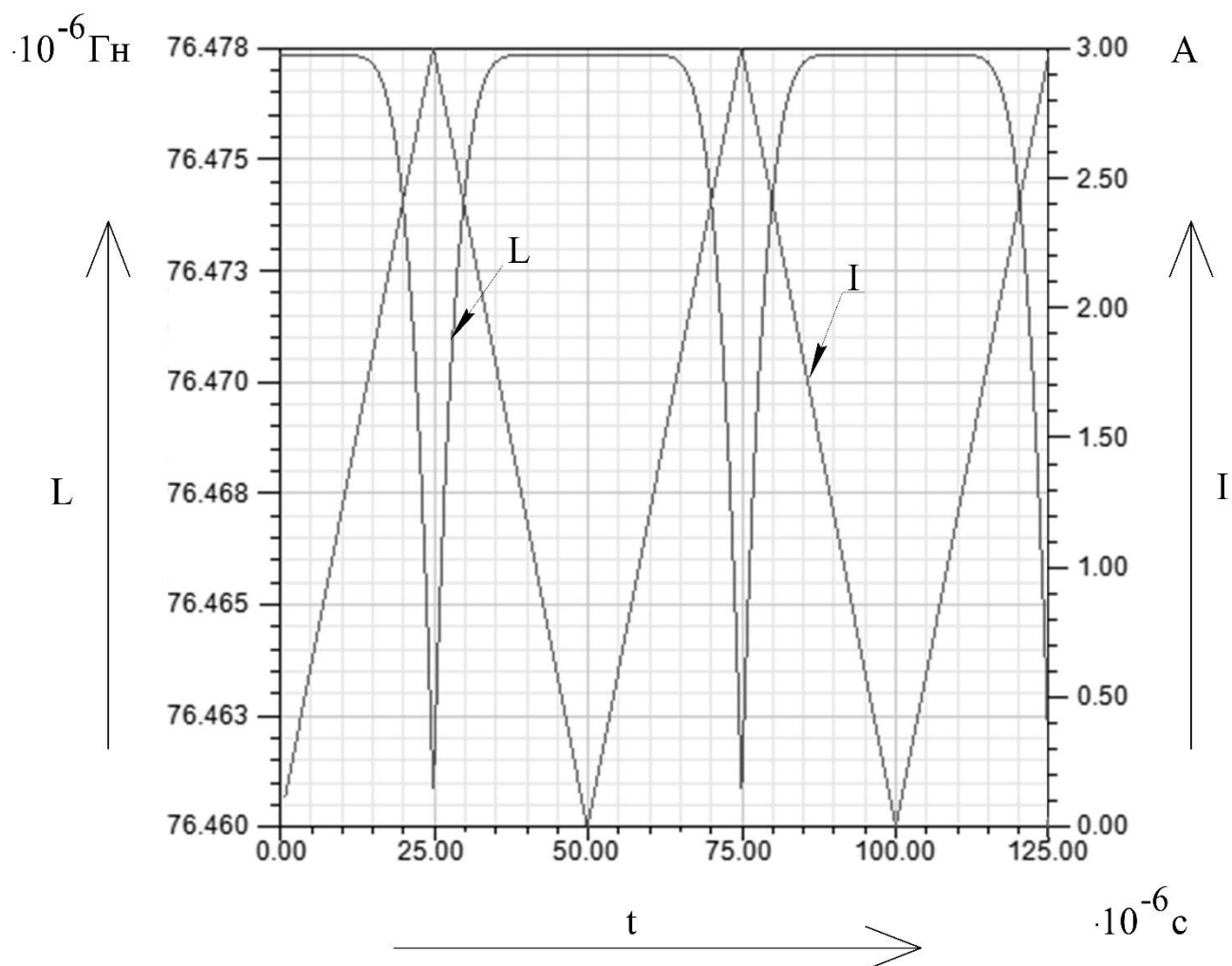


Рисунок 98 - Зависимость индуктивности L и тока I катушки от времени (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

На рисунке 99 показана осциллограмма, отражающая зависимость магнитной индукции и тока от времени.

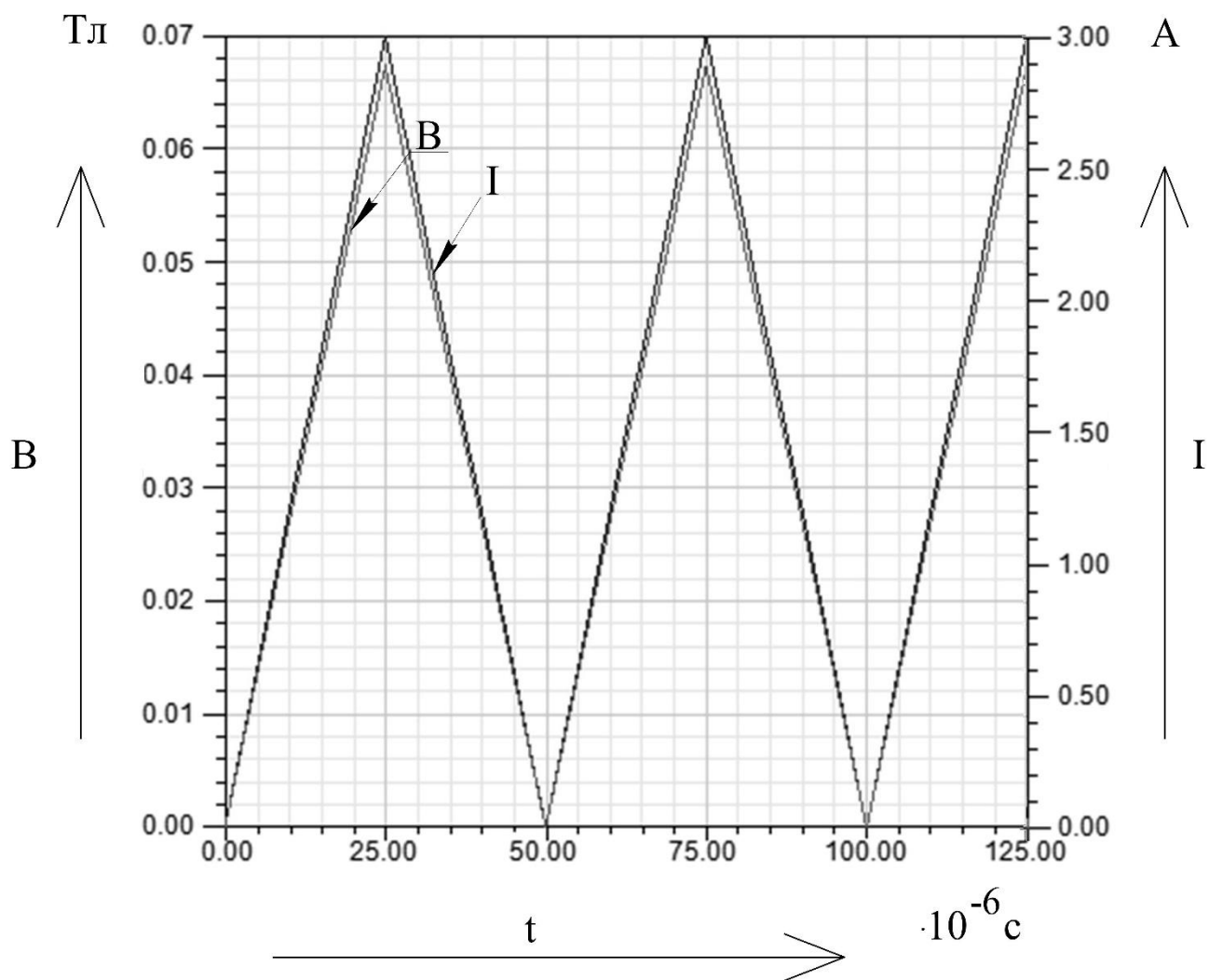


Рисунок 99 - Зависимость магнитной индукции B и тока I от времени (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Энергия, запасаемая в катушке индуктивности, показана на рисунке 100.

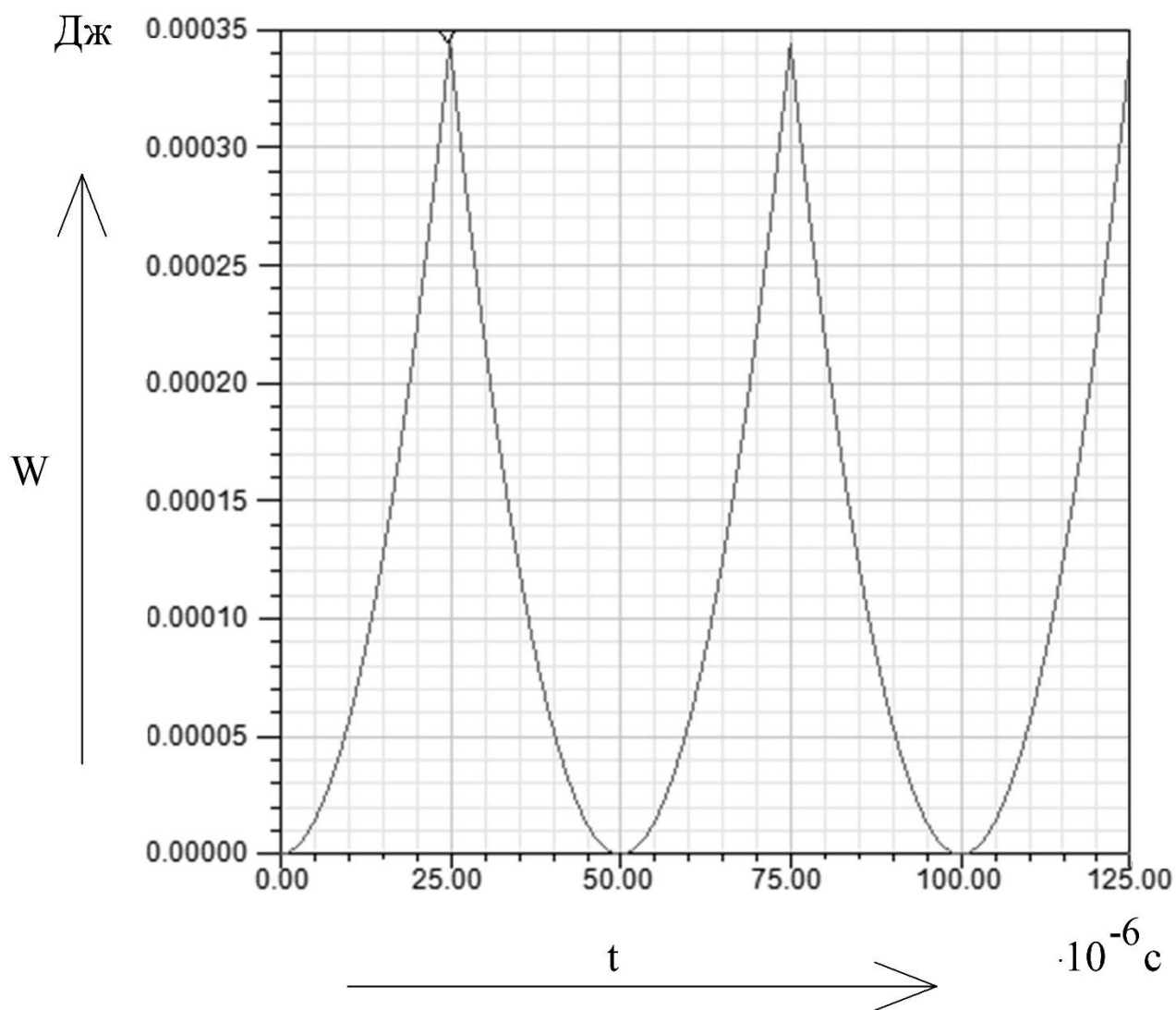


Рисунок 100 – Энергия W , запасаемая в катушке (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

Максимальная энергия, запасаемая в катушке, равна 0.3мДж. Построим график, отражающий зависимость индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки (рисунок 101).

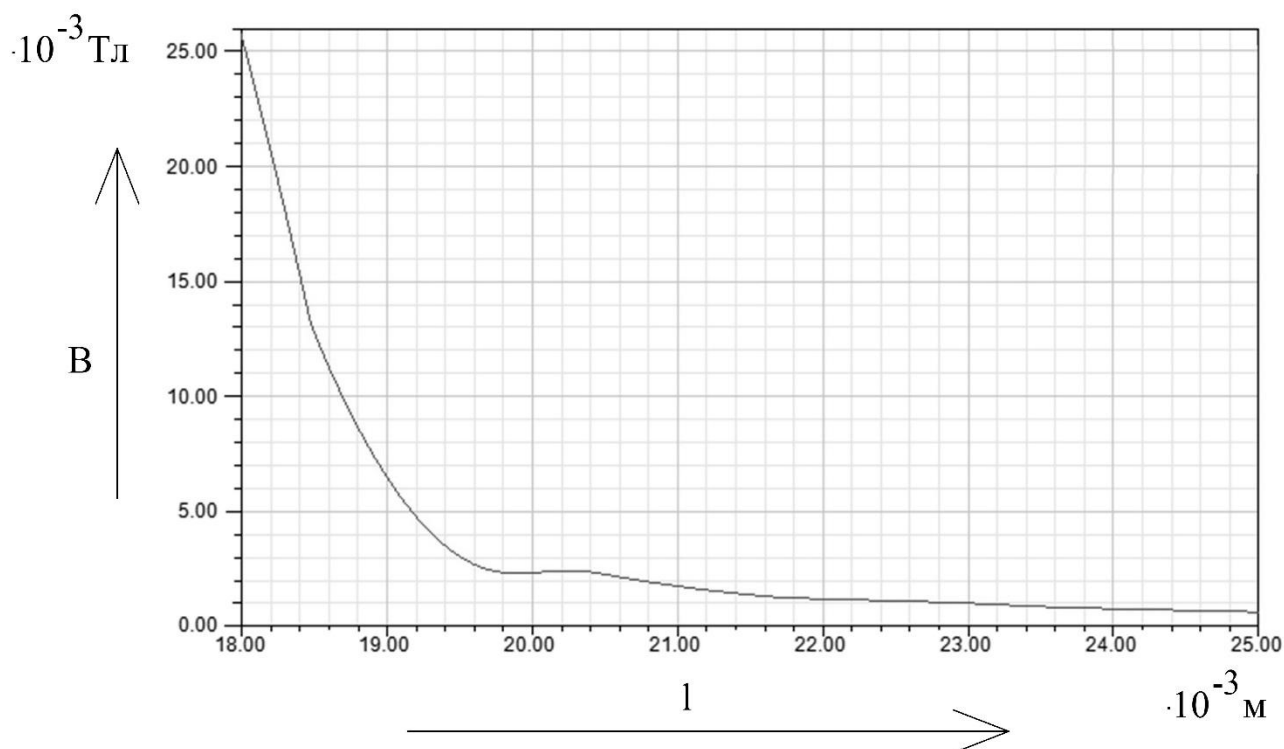


Рисунок 101 - Индукция магнитного поля B на расстоянии l от края катушки (катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор)

5.3 Сопоставление полученных результатов

Катушки индуктивности исследовались при одинаковой энергии, запасаемой в них.

Сравним катушку с прямоугольным магнитопроводом и катушку с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор. Из таблицы 15 видно, что их диаметры примерно равны (отличаются на 4 мм). Для намотки катушки с прямоугольным магнитопроводом необходимо сделать 18 витков провода. Для намотки катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор понадобится сделать 13 витков. Длина катушки с прямоугольным магнитопроводом составляет 25.5 мм, длина катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор, составляет 14.5 мм.

Сравним значение индукции магнитного поля на расстоянии для данных типов катушек. С этой целью объединим осциллограммы, показанные на рисунках 94 и 101. Начальная точка - точка отсчета расстояния, на всех осциллограммах находится в центре катушек. Совмещенные осциллограммы показаны на рисунке 102.

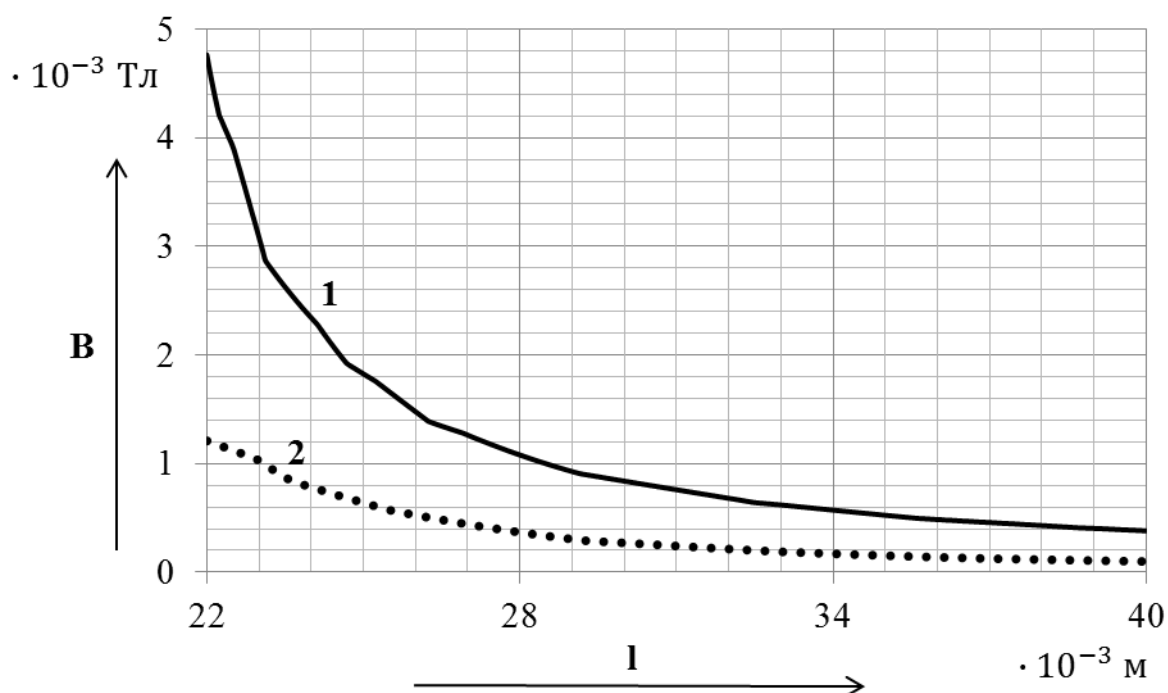


Рисунок 102 – Индукция магнитного поля B , создаваемого катушками индуктивности, на расстоянии l : 1 - катушка с прямоугольным магнитопроводом 2 - катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

Наибольшее значение индукции магнитного поля, на протяжении всего расстояния l , имеет катушка с прямоугольным магнитопроводом.

6. Исследование экранов

Проведем исследование стального (пункт 6.1) и медного (пункт 6.2) экранов листового типа.

Для исследования применим катушку без магнитопровода (пункт 3.2), создаваемую магнитное поле на расстояние с наибольшим значением индукции. Также исследуем влияние толщины медного экрана на его свойство подавлять магнитные поля (пункт 6.3).

6.1 Исследование стального экрана

Для экранирования применим стальной лист толщиной 0.8 мм из стали 1008. Рассчитанная картина магнитного поля приведена на рисунке 103.

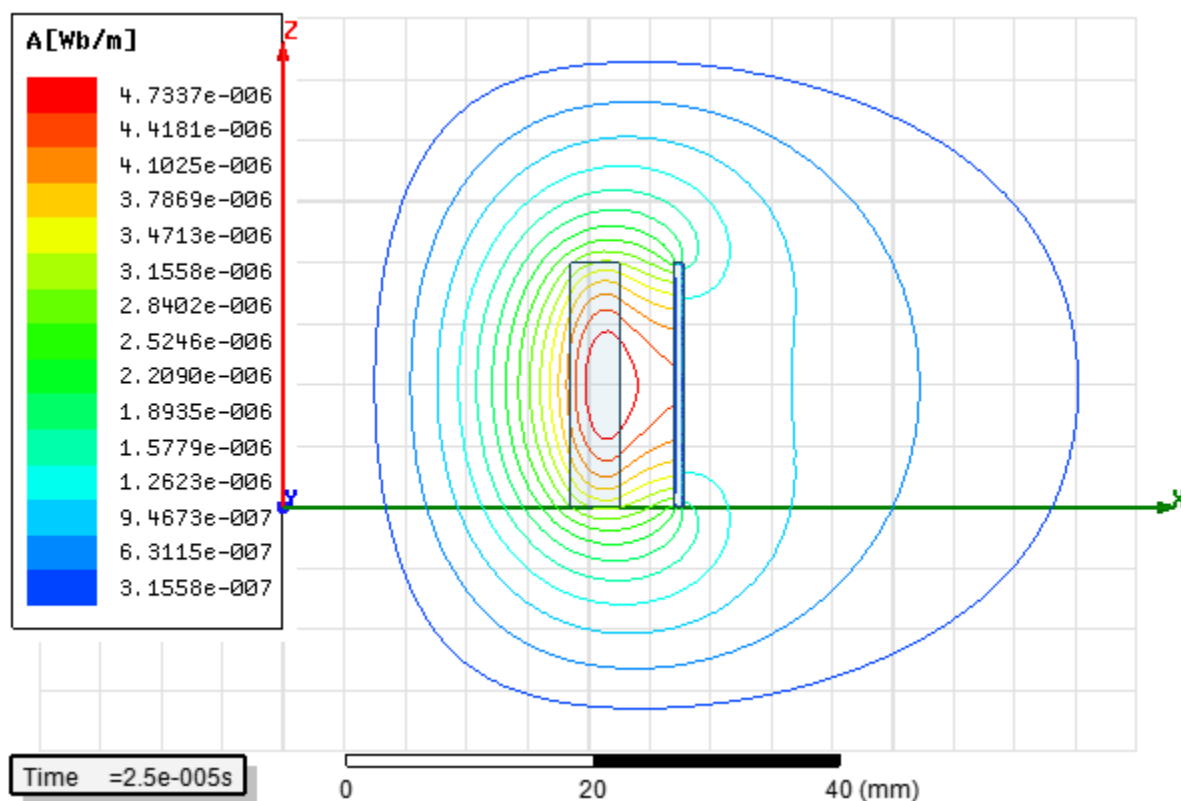


Рисунок 103 – Картина магнитного поля (катушка без магнитопровода со стальным экраном)

Сеть конечных элементов показана на рисунке 104.

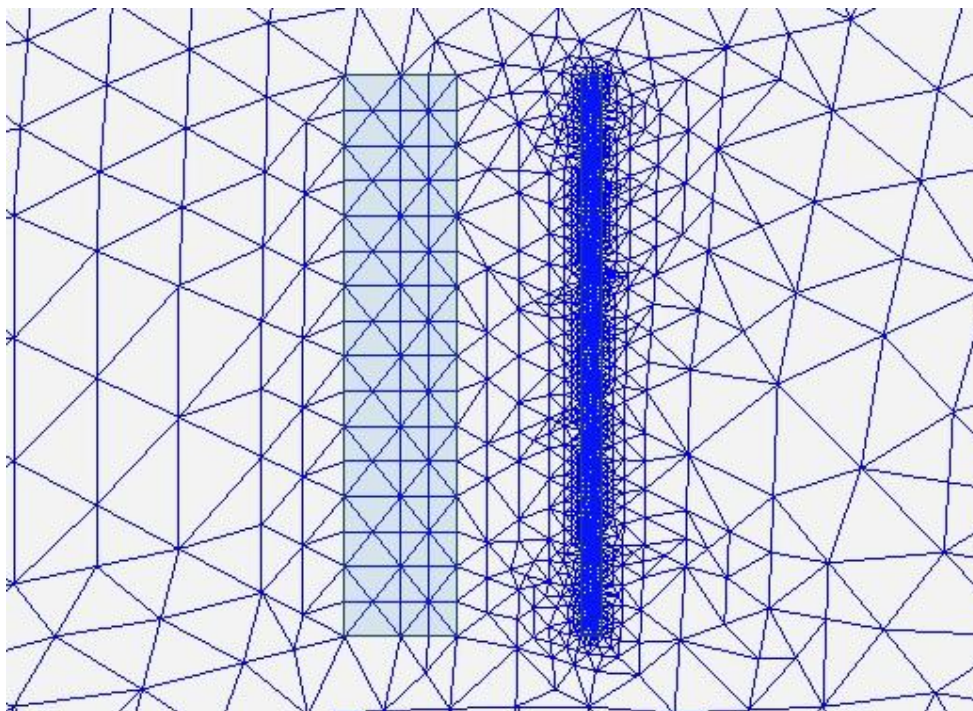


Рисунок 104 - Сеть конечных элементов (катушка без магнитопровода со стальным экраном)

Энергия, запасаемая в катушке индуктивности, показана на рисунке 105.

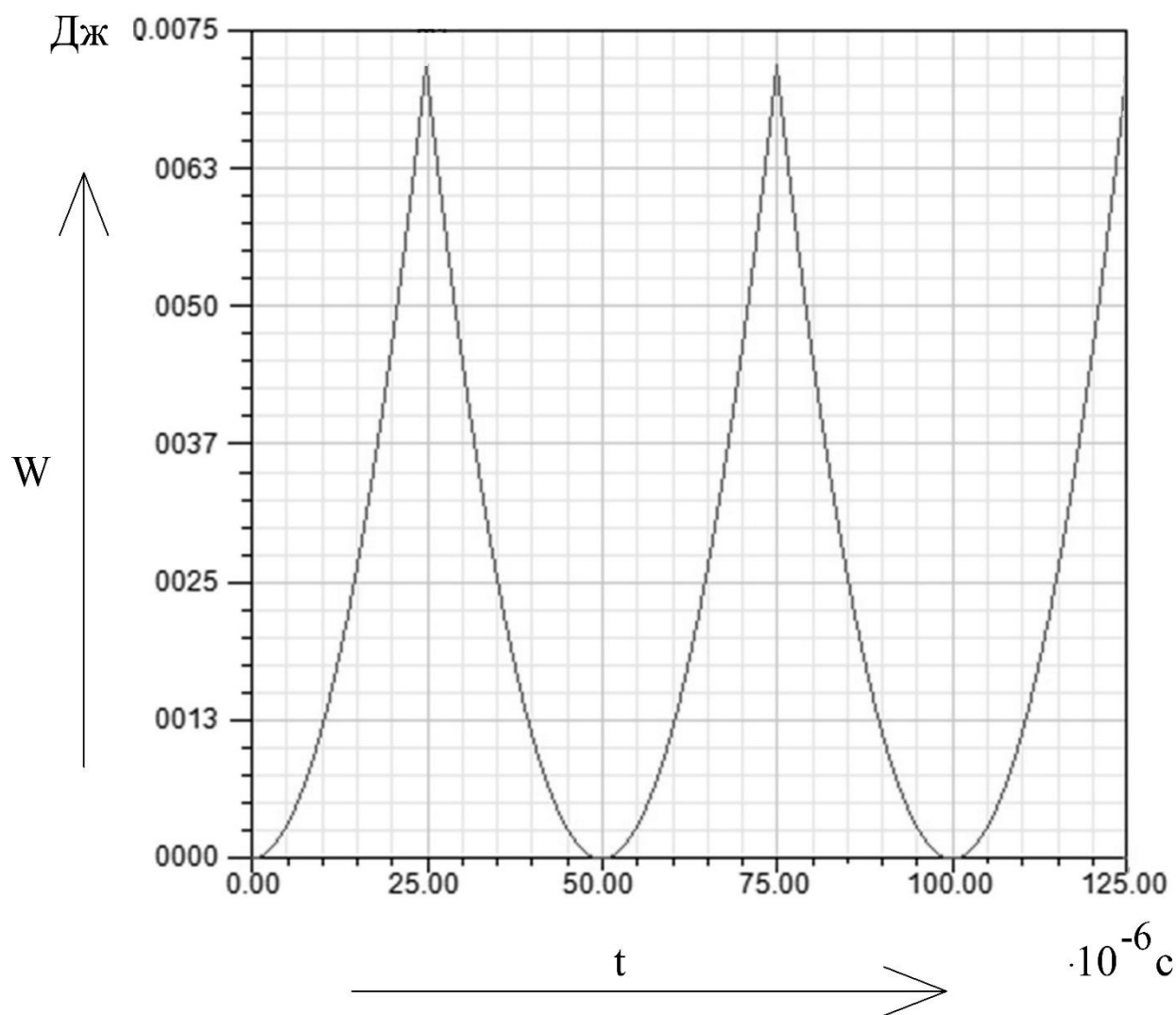


Рисунок 105 – Энергия W , запасаемая в катушке (катушка без магнитопровода со стальным экраном)

Стальной экран выступает в роли дополнительного сердечника и увеличивает энергию, запасаемую в катушке.

Построим график, отражающий зависимость индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки (рисунок 106).

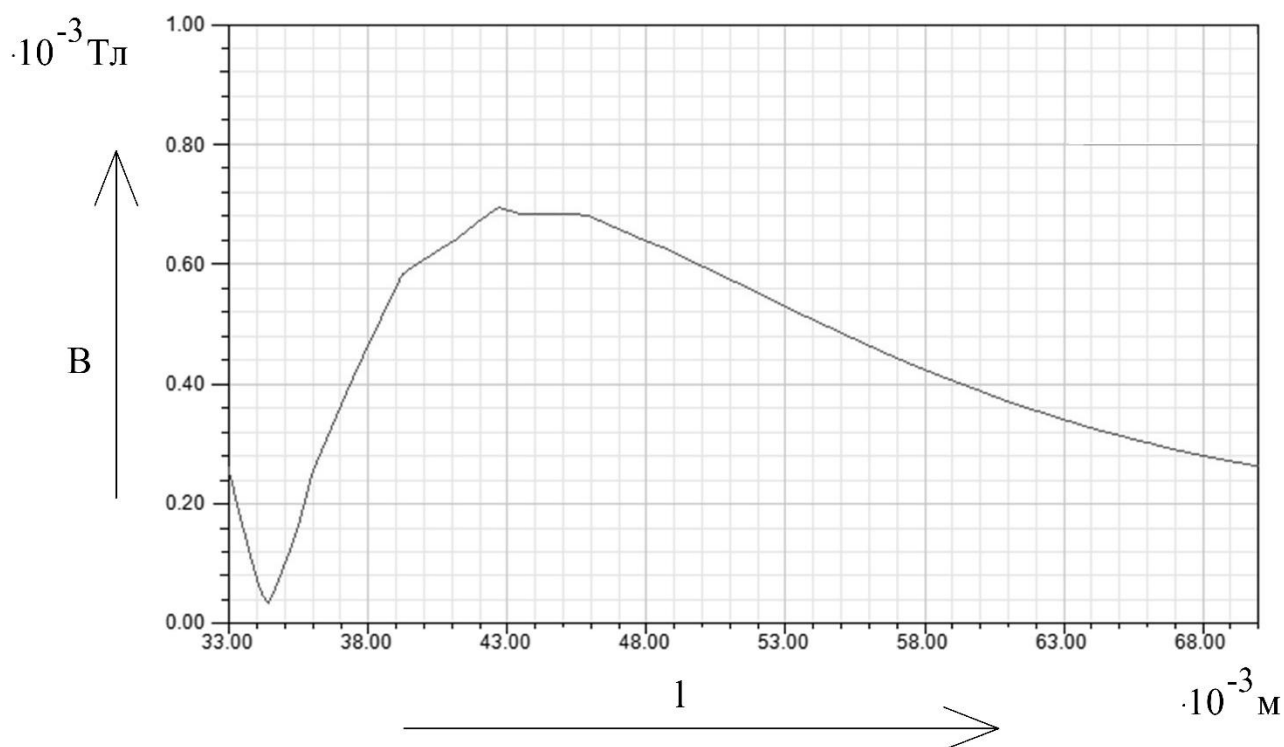


Рисунок 106 - Индукция магнитного поля B на расстоянии l от края катушки (катушка без магнитопровода со стальным экраном)

Совместим графики, отражающие зависимость индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки для катушки без магнитопровода со стальным экраном (рисунок 106) и катушки без магнитопровода без экрана (рисунок 62). Совмещенная осциллограмма показана на рисунке 107.

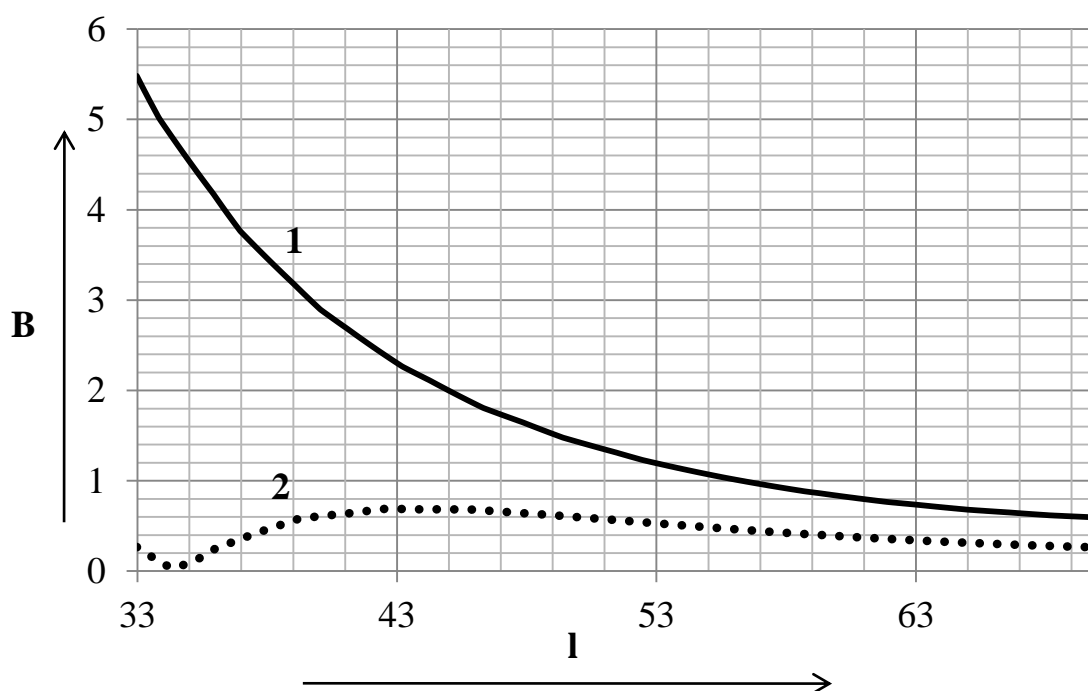


Рисунок 107 - Индукция магнитного поля B , создаваемого катушками индуктивности, на расстоянии l от края катушек: 1 - катушка без магнитопровода, 2 - катушка без магнитопровода со стальным экраном

Применение экрана позволяет значительно уменьшить индукцию магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности, непосредственно рядом с катушкой. На удалении от катушки значение индукции магнитного поля уменьшается с увеличением расстояния. Эффективность применения экрана падает с увеличением расстояния.

6.2 Исследование медного экрана

Рассчитанная картина магнитного поля приведена на рисунке 108.

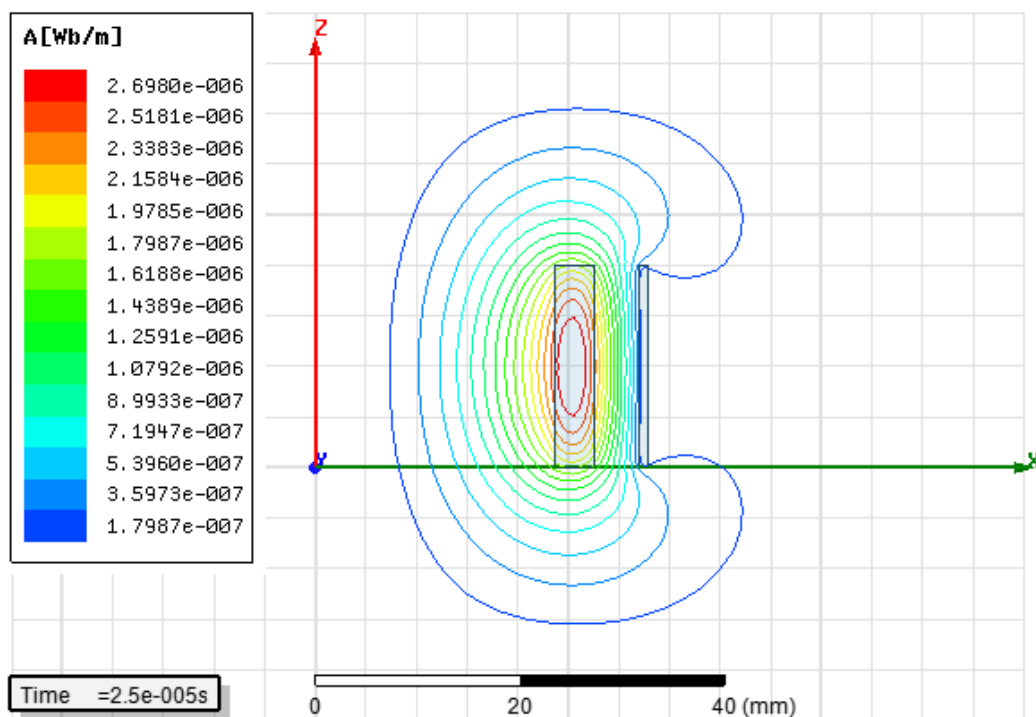


Рисунок 108 – Картина магнитного поля (катушка без магнитопровода с медным экраном)

Сеть конечных элементов показана на рисунке 109.

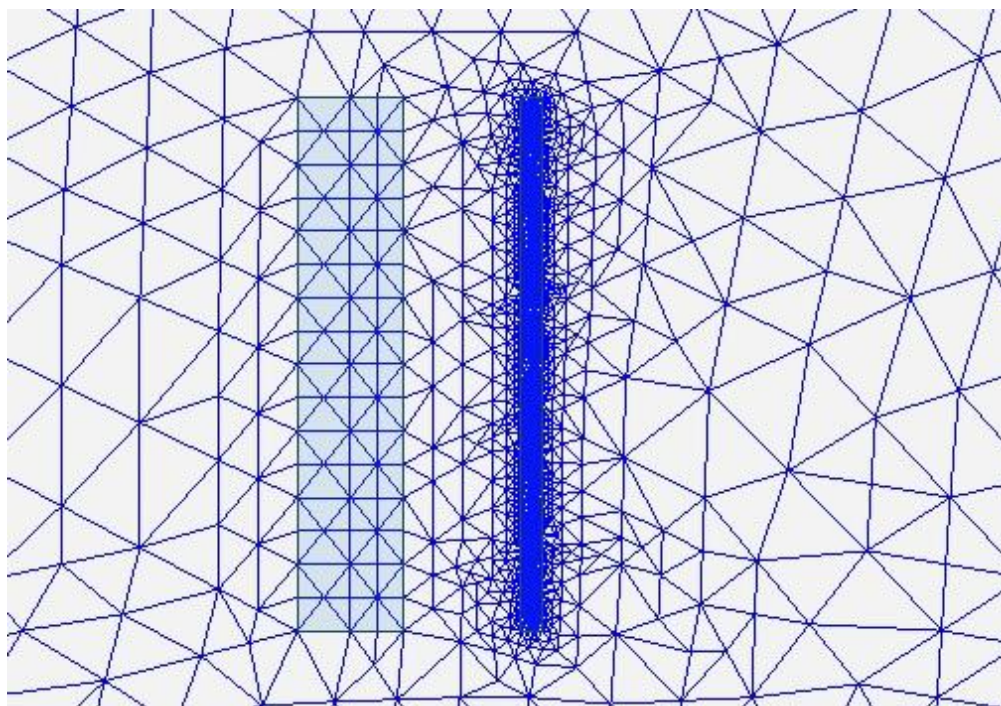


Рисунок 109 - Сеть конечных элементов (катушка без магнитопровода с медным экраном)

Энергия, запасаемая в катушке индуктивности, показана на рисунке 110.

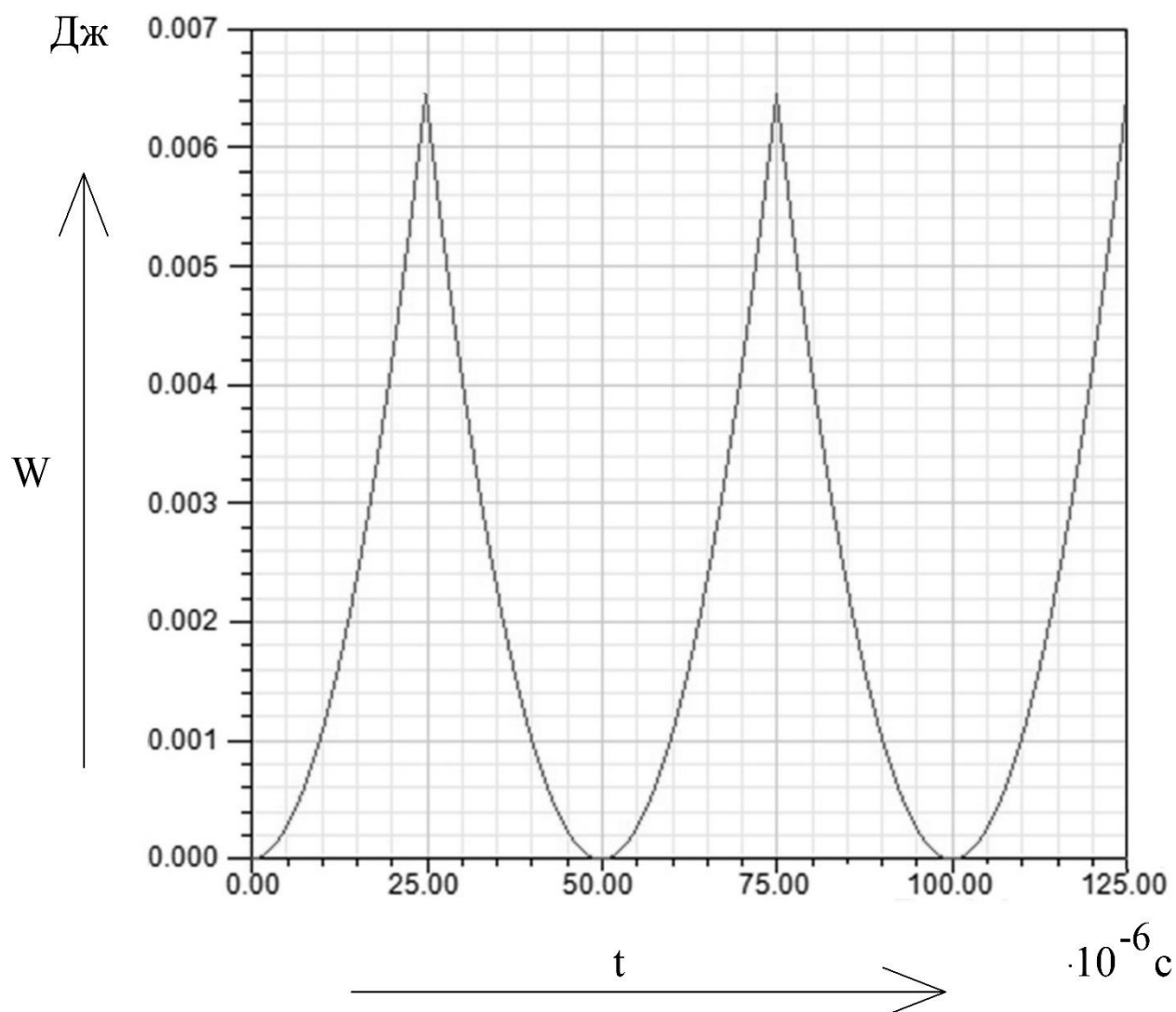


Рисунок 110 – Энергия W , запасаемая в катушке (катушка без магнитопровода с медным экраном)

Медный экран не меняет энергию, запасаемую в катушке [23].

Построим график, отражающий зависимость индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки (рисунок 111).

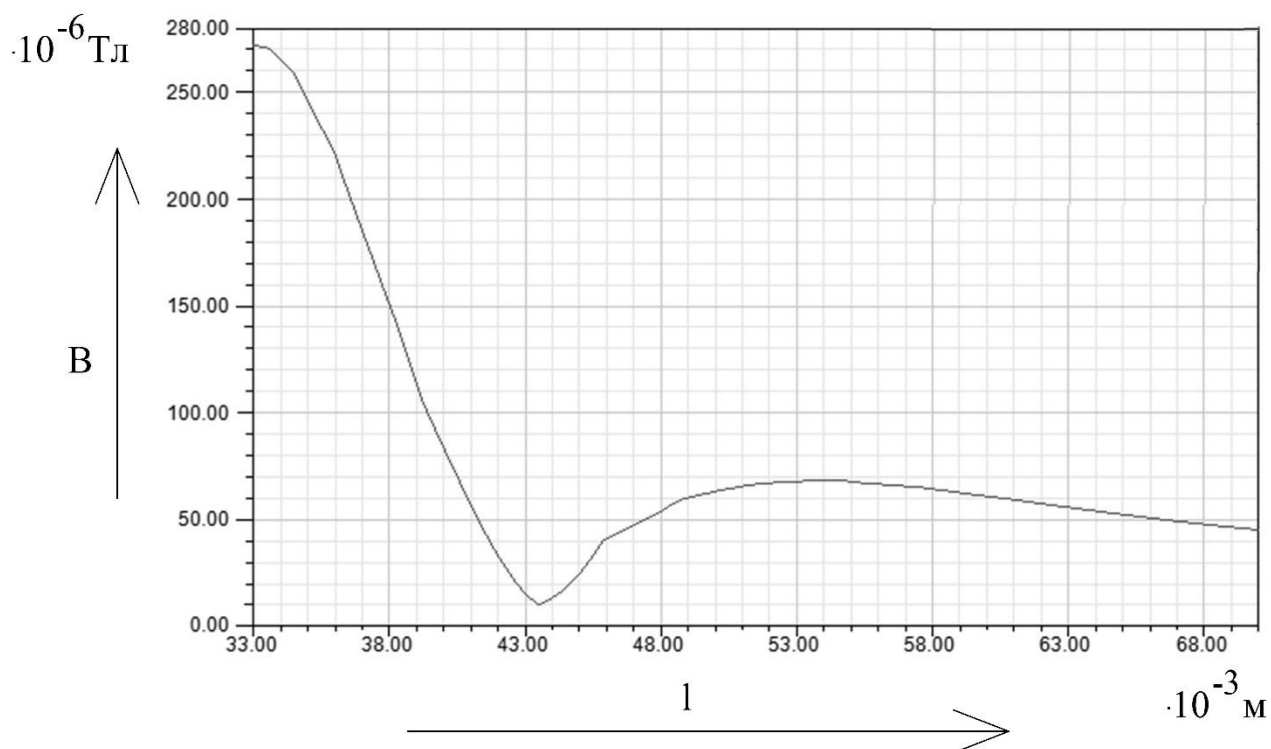


Рисунок 111 - Индукция магнитного поля B на расстоянии l от края катушки (катушка без магнитопровода с медным экраном)

Совместим графики, отражающие зависимость индукции магнитного поля на расстоянии от края катушки для катушки без магнитопровода с медным экраном (рисунок 111) и катушки без магнитопровода без экрана (рисунок 62). Совмещенная осциллограмма показана на рисунке 112.

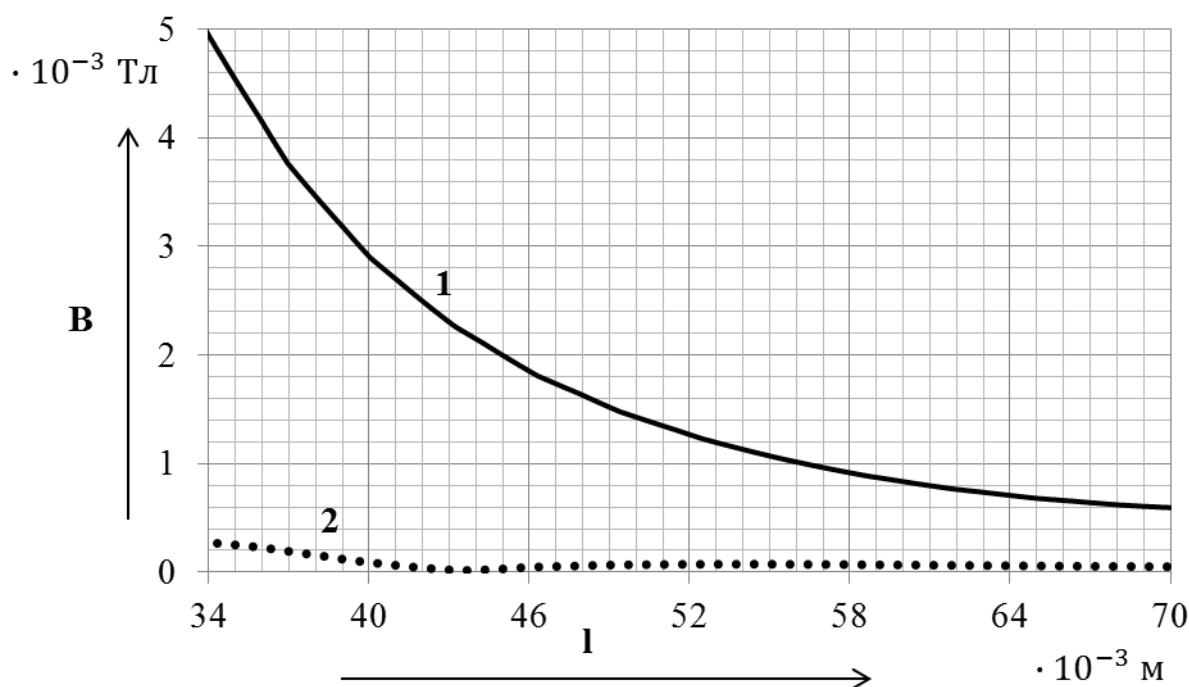


Рисунок 112 - Индукция магнитного поля B , создаваемого катушками индуктивности, на расстоянии l от края катушек: 1 - катушка без магнитопровода, 2 - Катушка без магнитопровода с медным экраном

Применение экрана позволяет значительно уменьшить значение индукции магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности, непосредственно рядом с катушкой. На удалении от катушки значение индукции магнитного поля уменьшается с увеличением расстояния. Эффективность применения экрана падает с увеличением расстояния.

6.3 Сравнение медного и стального экрана

В пунктах 6.1 и 6.2 было проведено сравнение катушки индуктивности без экрана и той же катушки индуктивности со стальным и медным экраном соответственно. Сравним все три варианта: Катушка без экрана, та же катушка со стальным экраном, и та же катушка с медным экраном. Объединим осциллограммы, показанные на рисунках 62, 107, 112. Объединенные осциллограммы показаны на рисунке 113.

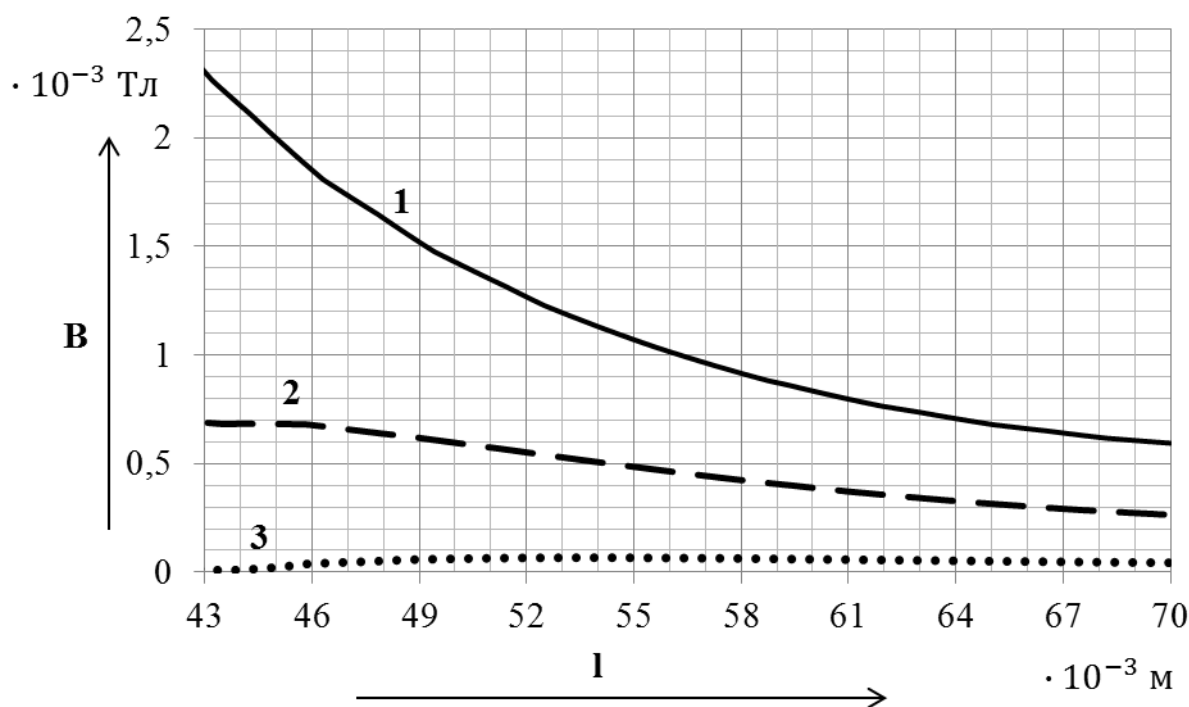


Рисунок 113 – Индукция магнитного поля B , создаваемого катушками индуктивности, на расстоянии l : 1 - катушка без магнитопровода, 2 - катушка без магнитопровода со стальным экраном, 3 - катушка без магнитопровода с медным экраном

Наиболее эффективным является медный экран.

6.4 Исследование влияния толщины медного экрана на его экранирующие свойства

Для исследования воспользуемся моделью катушки индуктивности без магнитопровода с медным экраном (пункт 6.2). Изменяя толщину экрана от 0.01мм до 1мм, будем фиксировать значение магнитной индукции на удалении 33мм от края катушки.

С помощью функции параметрического анализа, поддерживаемой программой Ansys Maxwell, получим график, отражающий зависимость магнитной индукции, создаваемой катушкой без магнитопровода на расстоянии 33мм (от экрана), от толщины медного экрана (рисунок 114).

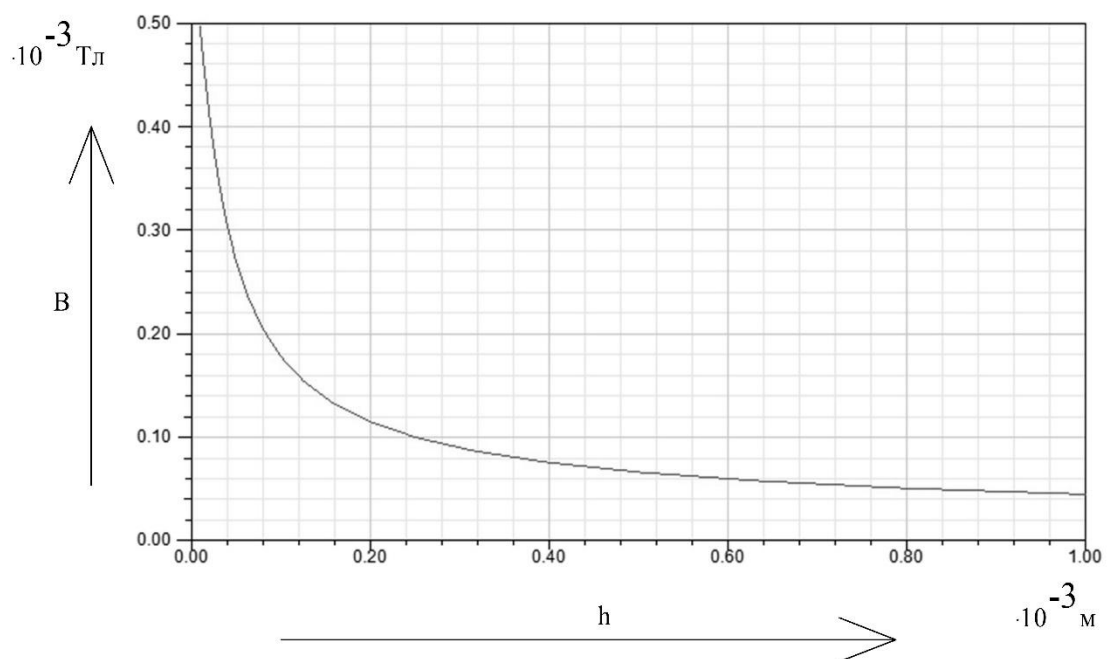


Рисунок 114 – Зависимость индукции магнитного поля B от толщины экрана h

Из графика видно, что в данном случае применение экрана толщиной более 0.6 мм нецелесообразно, так как дальнейшее увеличение толщины экрана сильно не влияет на его экранирующие свойства [24].

7. Исследование физической модели компьютерного блока питания.

7.1 Физическая модель

Для исследования воспользуемся компьютерным блоком питания (БП) Power Man IP – S350Q2–0. Этот БП обеспечивает выходные напряжения 3.3В, 5В, 12В - при максимальном токе нагрузки 10А, 12В - при максимальном токе нагрузки 13А и 12В - при максимальном токе нагрузки 2.5А. Также присутствует дежурное питание 5В, максимальная нагрузочная способность которого составляет 2.5А. Заявленная выходная мощность БП составляет 350Вт [25].

Исследуемый ИИП показан на рисунке 115.

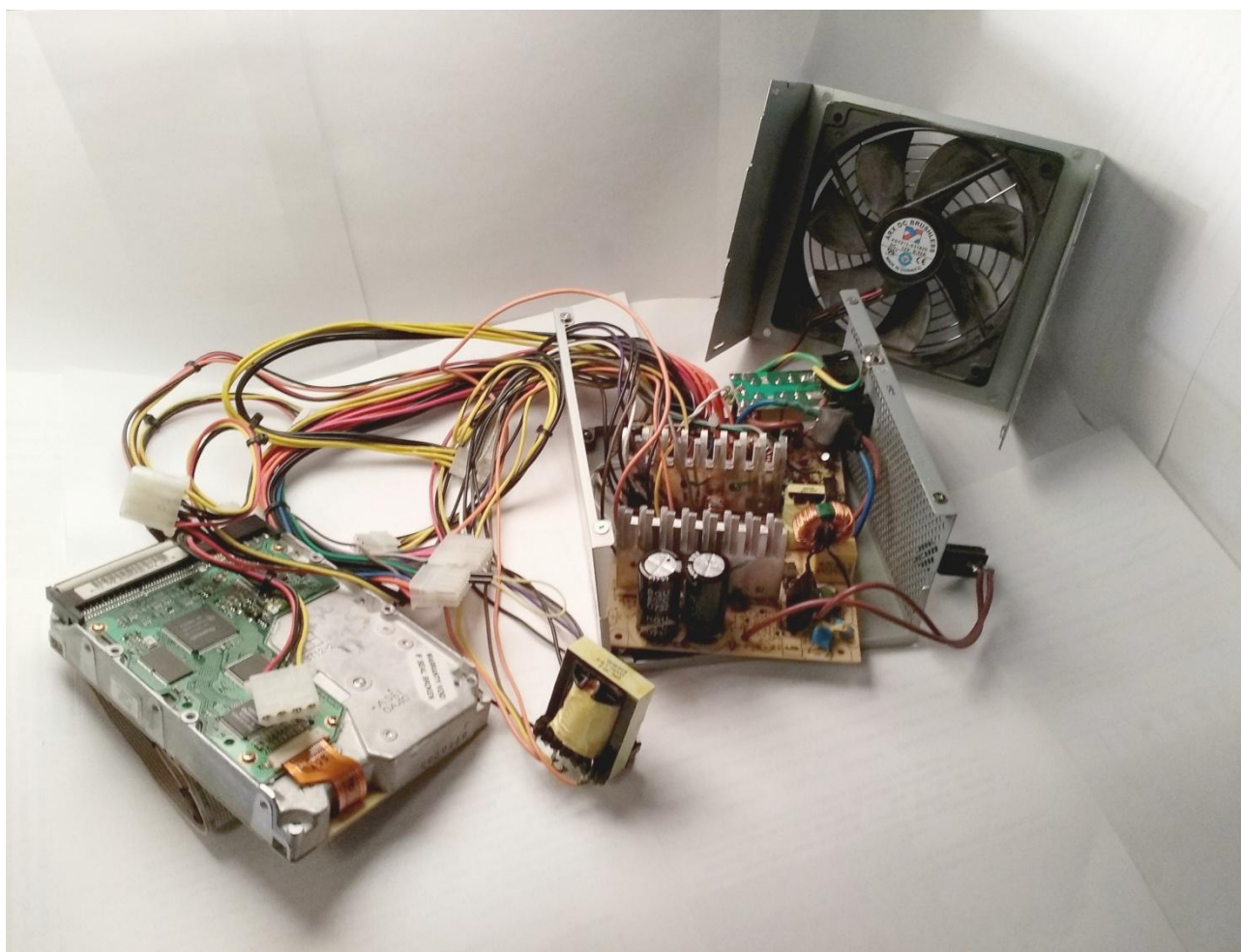


Рисунок 115 – исследуемый БП

В качестве нагрузки подключается жесткий диск Quantum Fireball 3.5 Series. Для гарантированного пуска БП, его вывод PG подключен к выводу GND [26].

7.2 Средство измерения магнитного поля

Для измерения магнитного поля, создаваемого исследуемым устройством, был собран прибор [27], показанный на рисунке 116.

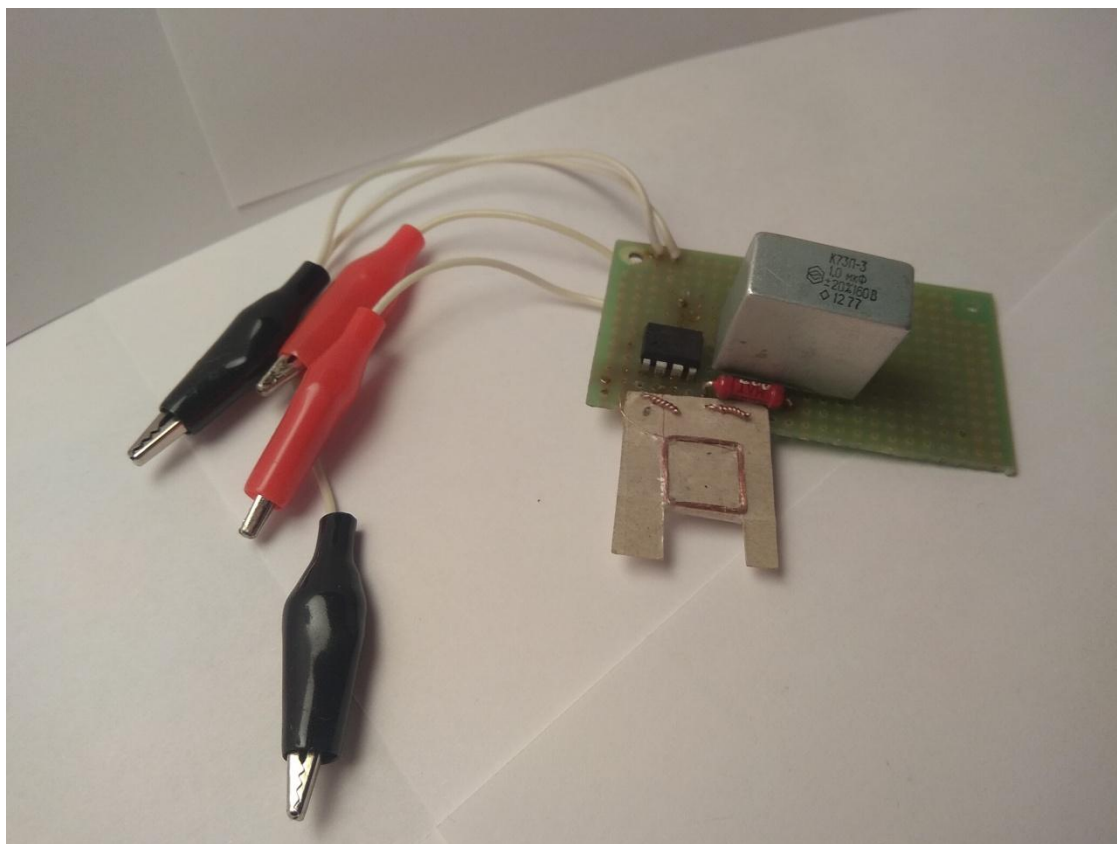


Рисунок 116 – Прибор для измерения магнитного поля, создаваемого исследуемым устройством

Его устройство и принцип работы поясняются рисунком 117.

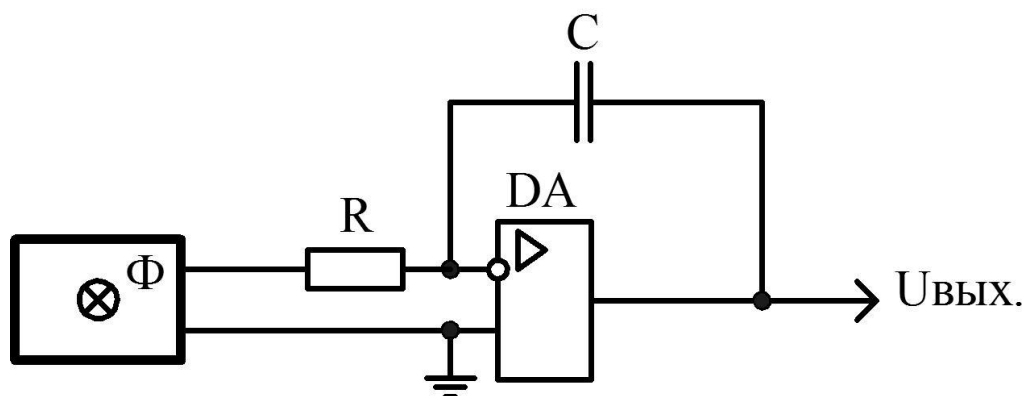


Рисунок 117 – Устройство и принцип работы собранного прибора для измерения магнитного поля

Прибор представляет собой интегратор, на вход которого подключен измерительный контур, через который проходит магнитный поток Φ ,

создаваемый исследуемым устройством. В качестве измерительного контура используется 10 витков тонкого изолированного провода [28]. Сопротивление резистора и емкость конденсатора были выбраны 1МОм и 1мкФ соответственно.

Токи на входе и на выходе интегратора равны по модулю, но противоположны по направлению (формулы 23, 24):

$$I_{\text{ex}} = -I_{\text{блх}}, \quad (23)$$

$$\frac{U_{\text{ex}}}{R} = -C \frac{dU_{\text{блх}}}{dt}. \quad (24)$$

Выразим $U_{\text{блх}}$, решив дифференциальное уравнение (формулы 25-27):

$$-\frac{U_{\text{ex}}}{CR} dt = dU_{\text{блх}}, \quad (25)$$

$$-\int \frac{U_{\text{ex}}}{CR} dt = \int dU_{\text{блх}}, \quad (26)$$

$$U_{\text{блх}} = -\frac{1}{CR} \int U_{\text{ex}} dt. \quad (27)$$

Произведение $CR = 1$, получим формулу 28:

$$U_{\text{блх}} = -\int U_{\text{ex}} dt. \quad (28)$$

Так как $U_{\text{ex}} = \frac{d\Psi}{dt}$, получим формулу 29:

$$U_{\text{блх}} = -\int -\frac{d\Psi}{dt} dt = \int d\Psi = \Psi = w\Phi, \quad (29)$$

где w – число витков в контуре.

На выходе устройства получим сигнал $U_{\text{блх}}$, пропорциональный магнитному потоку Φ с коэффициентом пропорциональности w . В нашем случае число витков $w = 10$.

7.3 Ход эксперимента

7.3.1 Исследование зависимости индукции магнитного поля на расстоянии от края трансформатора

Для выполнения другой диссертационной работы, связанной с нагревом трансформатора, трансформатор Т1 был вынесен на проводах за пределы корпуса БП (рисунок 115). Однако, в ходе эксперимента выяснилось, что провода, с помощью которых был вынесен трансформатор, создают настолько сильных магнитные поля, что на их фоне невозможно отследить зависимость индукции магнитного поля (создаваемого трансформатором) на расстоянии от края трансформатора. Для решения этой проблемы провода, выводящие трансформатор за корпус БП, были попарно перевиты между собой, тем самым образуя несколько витых пар которые, в свою очередь, тоже были перевиты. Сверху весь этот жгут проводов был плотно обмотан заземленным с двух сторон проводом, выступающим в роли экрана (рисунок 118).



Рисунок 118 – Снижение уровня магнитного поля, создаваемого проводами

Эти меры позволили значительно снизить магнитные поля, создаваемые проводами (раздел 7.3.2) [29].

Значения индукции магнитного поля на расстоянии от края трансформатора показаны на рисунке 119.

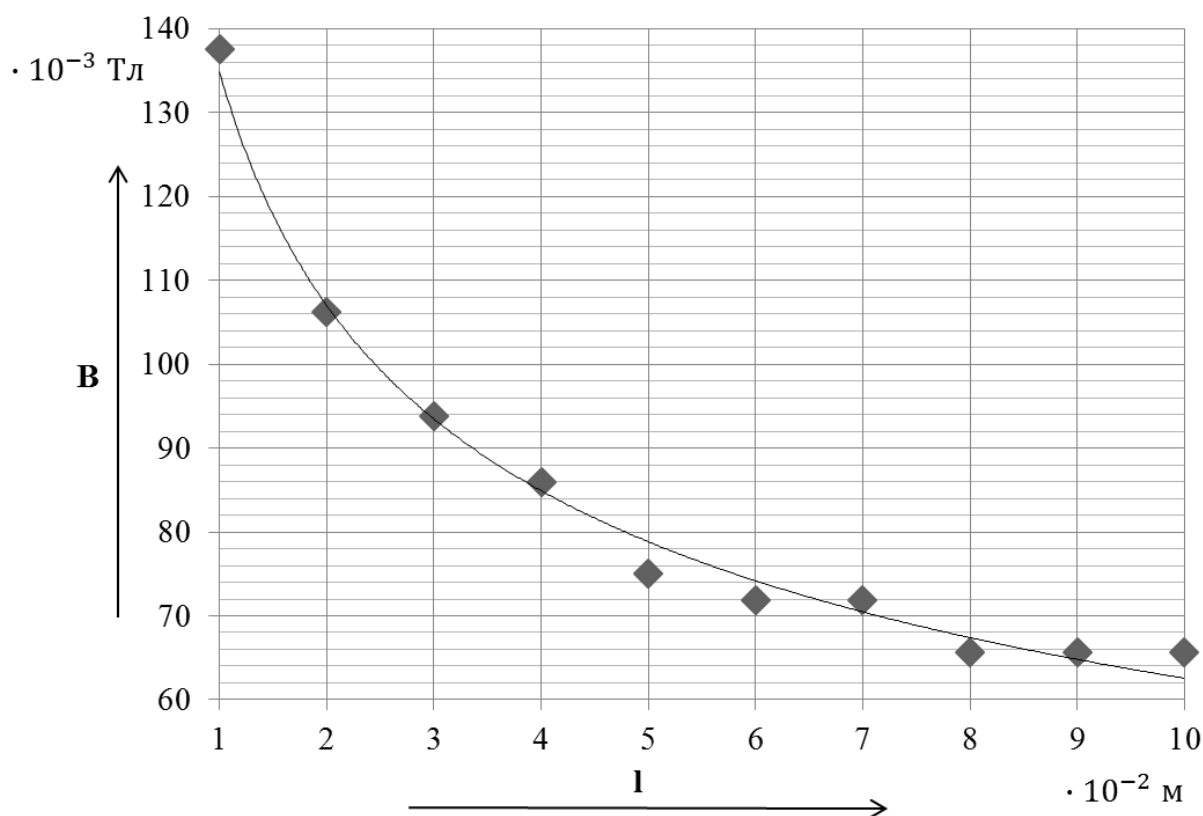


Рисунок 119 - Зависимость индукции магнитного поля B на расстоянии l от края трансформатора

Индукция магнитного поля, создаваемого трансформатором, уменьшается с увеличением расстояния. В ходе проведения измерений выяснилось, что магнитное поле вблизи лобовых частей трансформатора больше, чем с его боковых сторон. Поэтому характеристика, показанная на рисунке 119, характеризует магнитное поле, создаваемое лобовой стороной трансформатора. Для создания компьютерной модели, учитывающей магнитное поле, создаваемое лобовой частью трансформатора, необходимо создавать 3D модель. 3D модель была создана. Однако выяснилось, что мощности имеющегося ПК недостаточно для получения данных о магнитных полях, рассеиваемых лобовой частью трансформатора.

7.3.2 Сравнение индукции магнитного поля, создаваемого проводами без экрана, с индукцией магнитного поля, создаваемого экранированным проводом

Для уменьшения потока магнитного поля, создаваемого проводами, с помощью которых был вынесен трансформатор Т1, провода были попарно перевиты между собой, образуя несколько витых пар, которые также были перевиты. Полученный жгут проводов плотно обмотали проводом, заземленным с двух концов, выступающим в роли экрана (рисунок 118).

Размах магнитного потока, соответствующий неэкранированными проводами составляет 36мВб. Размах магнитного потока, соответствующий экранированным проводам составляет 0.672мВб.

Экранирование проводов путем плотной намотки на них отдельного провода, заземленного с двух сторон и скручивание экранируемых проводов в витые пары оказалось довольно эффективным, уменьшая магнитный поток создаваемого поля более чем в 50 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом магистерской работы «Исследование создаваемых импульсным источником питания электромагнитных помех» является изучение магнитных полей, создаваемых элементами ИИП, способов экранирования от этих элементов и эффективности экранирующего действия в различных условиях. Для исследования применялись как математические (разделы 3 - 6), так и физическая (раздел 7) модели. В составленной инструкции по работе с программой Ansys Maxwell на примере исследования магнитных полей катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор, подробно разобран процесс создания модели, от построения геометрии (раздел 2.2) до получения результатов (раздел 2.4). В первом разделе магистерской работы приведены данные документов, устанавливающих ПДУ электромагнитных помех в различных условиях применения [30].

Исследуя магнитное поле катушек цилиндрического типа (раздел 3), выяснили, что наибольшее значение индукции магнитного поля имеет катушка без магнитопровода. Индукция магнитного поля, создаваемого катушкой индуктивности с внутренним сердечником меньше, чем у катушки без магнитопровода, но больше чем у катушки с замкнутым сердечником, имеющим зазор (рисунок 69). Выбирая катушку индуктивности цилиндрического типа, для уменьшения создаваемого ей магнитного потока, лучше выбрать катушку с замкнутым сердечником, имеющим зазор.

Сравнивая значение магнитной индукции тороидальной катушки и катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор (раздел 4), выяснили, что индукция магнитного поля, создаваемого тороидальной катушкой во много раз меньше магнитного поля, создаваемого катушкой с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор (рисунок 86). Выбирая катушку индуктивности из двух представленных, для уменьшения создаваемого ей магнитного потока, лучше выбрать тороидальную катушку.

Проводя исследование магнитного поля катушки с прямоугольным магнитопроводом и катушки с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор

(раздел 5) выяснили, что наименьшее значение магнитного поля, создаваемого катушкой, имеет катушка с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор (рисунок 102). Выбирая катушку индуктивности из двух представленных, для уменьшения создаваемого ей магнитного потока, лучше выбрать катушку с замкнутым магнитопроводом, имеющим зазор.

Исследуя экраны (раздел 6), выяснили, что медный экран обладает лучшими экранирующими свойствами по сравнению со стальным (рисунок 113) [31]. Кроме того, стальной экран выступает в роли дополнительного сердечника, увеличивая энергию, запасаемую в катушке. Стальной экран менее эффективный по сравнению с медным, однако его стоимость меньше [32]. Исследуя влияние толщины медного экрана на его экранирующие свойства (рисунок 114) выяснили, что применение экрана толщиной более 0.6 мм нецелесообразно, так как дальнейшее увеличение толщины экрана сильно не влияет на его экранирующие свойства.

Исследовали физическую модель компьютерного блока питания (раздел 7). Для этого собрали средство измерения магнитного поля (раздел 7.2), с помощью которого измерили значения индукции магнитного поля на расстоянии от края трансформатора (раздел 7.3.1, рисунок 119). В процессе измерения столкнулись с проблемой сильного магнитного поля, создаваемого проводами, на которых был вынесен трансформатор. Проблема была решена применением в качестве экрана плотно намотанного, заземленного с двух сторон провода поверх экранируемых проводов, которые были перевиты в витые пары (раздел 7.3.2) [33].

Список использованных источников

1. Методы подавления шумов и помех в электронных системах: Учеб. пособие для вузов / Gengy W.Ott., Б.Н. Бронина, М.В. Гальперина – М.: МИР, 1979. – 318с.
2. СанПиН 2.1.2.1002 – 00. Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям. - Введ. 2001-07-01. - М.: Главный государственный санитарный врач РФ: Бюллетень нормативных и методических документов Госсанэпиднадзора, 2001. - 11с.
3. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. - Введ. 2003-03-24. - М.: Главный государственный санитарный врач РФ: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. - 14с.
4. СанПиН 2.5.2/2.2.4. Электромагнитные поля на плавательных средствах и морских сооружениях. Гигиенические требования безопасности. - Введ. 2006-05-01. - М.: Главный государственный санитарный врач РФ: Государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование РФ, 2006. - 12с.
5. ГОСТ 28279-89. Совместимость электромагнитная электрооборудования автомобиля и автомобильной бытовой радиоэлектронной аппаратуры. Нормы и методы испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 1983.
6. ANSYS Maxwell общая информация [Электронный ресурс] URL: <https://cae-expert.ru/product/ansys-maxwell> (дата обращения 26.04.2019)
7. Геометрический построитель Maxwell [Электронный ресурс] URL: http://ansoft-maxwell.narod.ru/dragon/help2_1.html (дата обращения 26.04.2019)
8. Maxwell 2D Electromagnetic and Electromechanical Analysis, user's guide – Maxwell 2D, Ansoft Corporation.
9. Geometry Operations [Электронный ресурс] URL: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L02_Geometry_Operations.pdf (дата обращения 26.04.2019)

10. Transient Solvers [Электронный ресурс] URL: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L05_Transient_Solvers.pdf (дата обращения 26.04.2019)
11. Static Magnetic Solvers [Электронный ресурс] URL: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L03_Static_Magnetic_Solvers.pdf (дата обращения 26.04.2019)
12. Полезные материалы по Ansoft Maxwell [Электронный ресурс] URL: <http://maxwell.ipb2.ru/index.php?showtopic=119> (дата обращения 26.04.2019)
13. Electric Machines Considering Power Electronics [Электронный ресурс] URL: <https://support.ansys.com/staticassets/ANSYS/Conference/Confidence/Detroit/Downloads/electric-machines-and-power-electronics.pdf> (дата обращения 26.04.2019)
14. ANSYS Maxwell (ANSYS Electromagnetics) [Электронный ресурс] URL: <http://maxwell.ipb2.ru/lofiversion/index.php/t47> (дата обращения 26.04.2019)
15. Lecture8 Optimetrics Analysis [Электронный ресурс] URL: <https://studylib.net/doc/8883974/lecture-8--optimetrics-analysis---ansoft-maxwell---ansys-...> (дата обращения 26.04.2019)
16. Solver и Solve Setup [Электронный ресурс] URL: <http://maxwell.ipb2.ru/lofiversion/index.php/t9-50.html> (дата обращения 26.04.2019)
17. Lecture 7 Maxwell Post processing [Электронный ресурс] URL: <https://studylib.net/doc/18915742/lecture-7--maxwell-postprocessing> (дата обращения 26.04.2019)
18. Output Variable [Электронный ресурс] URL: <http://maxwell.ipb2.ru/index.php?showtopic=173> (дата обращения 26.04.2019)
19. Lecture 1: Introduction to ANSYS Maxwell [Электронный ресурс] URL: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L01_Introduction.pdf (дата обращения 26.04.2019)

20. Классификация магнитных материалов [Электронный ресурс] URL:
https://studopedia.su/9_79609_chem-bolshe-velichina-Kp--tem-pryamougolnee-gisterezhisnaya-petlya-dlya.html (дата обращения 26.04.2019)
21. Певчев, В. П. Составление электрических схем замещения электротехнических систем на основе метода аналогий: учебное пособие / В. П. Певчев. – Тольятти : изд-во ТГУ, 2010. – 88 с.
22. Энергия магнитного поля [Электронный ресурс] URL:
<https://zna4enie.ru/opredelenie/jenergija-magnitnogo-polja-opredelenie.html> (дата обращения 26.04.2019)
23. Электромагнитное экранирование [Электронный ресурс] URL:
<http://gauss-instruments.ru/elektromagnitnoe-ekranirovanie/> (дата обращения 26.04.2019)
24. Медный экран [Электронный ресурс] URL:
<https://www.ngpedia.ru/id609952p1.html> (дата обращения 26.04.2019)
25. Блок питания INWIN POWER MAN IP-S350Q2-0 350 Вт [Электронный ресурс] URL: https://www.nix.ru/autocatalog/power_supply_inwin/Blok-pitaniya-INWIN-POWER-MAN-IP-S350Q2-0-350W-ATX-24-plus-4-plus-6pin_69156.html (дата обращения 26.04.2019)
26. Как включить блок питания без компьютера [Электронный ресурс] URL:
<https://skesov.ru/kak-vklyuchit-blok-pitaniya-bez-kompyutera/> (дата обращения 26.04.2019)
27. Хоровиц п., Хилл у. Искусство схемотехники: Том 1 и том 2. Пер с англ.–6-е изд. Перераб. И доп.–м.: Мир, 2001. – 704 с.
28. Интегратор на основе ОУ [Электронный ресурс] URL:
https://studbooks.net/2368606/tehnika/integrator_osnove_operatsionnogo_usilitelya (дата обращения 26.04.2019)
29. Экранирование сигнальных проводов [Электронный ресурс] URL:
<http://gauss-instruments.ru/metody-ekranirovaniya-signalnyh-provodov/> (дата обращения 26.04.2019)
30. Гости, законы, САНПИН [Электронный ресурс] URL:

<http://www.triro.ru/g.php> (дата обращения 26.04.2019)