

# РЕФЕРАТ

Отчет 22 с., 20 рис., 2 табл., 10 источн.

ТРАНСФОРМАТОР, ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА, БЛОК ПИТАНИЯ, ИНВЕРТОРНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА, ВЫПРЯМИТЕЛЬ ДЛЯ ГАЛЬВАНИКИ, ХИМИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ, ФОЛЬГОВАЯ ОБМОТКА, ЛИТЦЕНДРАТ, ФЕРРИТ N87, IP65

Объектом исследования являются импульсные трансформаторы, материалы их изготовления и схемы включения в инверторных источниках тока.

Цель работы - разработка трансформатора с низким тепловыделением для применения в инверторных источниках тока и блоков питания для химической металлизации в гальванических ваннах.

В процессе работы проводились исследования распределения магнитного поля обмоток, потерь мощности трансформатора при работе в режиме холостого хода, процессов насыщения магнитопровода трансформатора. Проведено исследование передаточной характеристики трансформатора при подключении к инверторной схеме с целью выбора номиналов компонентов для изготовления испытательного стенда для разрабатываемого трансформатора.

Инновационность данной разработки заключается в технологическом решении, в котором для формирования средней точки вторичной обмотки трансформатора будет применяться нестандартная топология, позволяющая строить аналогичные по параметрам импульсные трансформаторы на кольцевых или U-образных ферритах. Инновационная топология обмоток повысит характеристики устройства и уменьшит стоимость его изготовления.

Эффективность модели определяется достижением параметров из технического задания.

Структура работы включает Введение, пять разделов Исследование и Заключение. В разделах исследования дано подробное описание моделирования трансформатора, включая выбор необходимых компонентов для создания испытательного стенда.

# СОДЕРЖАНИЕ

Реферат .....	2
Термины и определения .....	4
Перечень сокращений и обозначений .....	5
Введение .....	6
1. Исследование в системе ELCUT/COMSOL распределения магнитного поля обмоток нескольких конфигураций обмоток разрабатываемого трансформатора .....	7
2. Исследование потерь мощности трансформатора при работе в режиме холостого хода .....	11
3. Исследование процессов насыщения магнитопровода трансформатора в режимах короткого замыкания.....	14
4. Исследование теплопроводности материалов трансформатора и выбор необходимой марки и сечения феррита .....	15
5. Исследование наиболее подходящего типа инверторной схемы для испытательного стенда .....	17
6. Исследование передаточной характеристики трансформатора при подключении к инверторной схеме в системе моделирования электрических цепей Multisim/PSIM .....	18
7. Исследование выбранной схемы с целью выбора номиналов компонентов для изготовления испытательного стенда для разрабатываемого трансформатора .....	19
Заключение .....	21
Список использованных источников .....	22

## Термины и определения

Инвертор — в электротехнике это электрическое устройство, способное преобразовывать постоянный ток в переменный при заданной частоте и напряжении [1].

Импульсный трансформатор — трансформатор, предназначенный для преобразования тока и напряжения импульсных сигналов с минимальным искажением исходной формы импульса на выходе [2].

Индуктивность рассеивания — параметр основанный на том факте, что магнитное поле рассеяния создается частью тока нагрузки. В этом магнитном поле сосредоточена магнитная энергия, которая при известных геометрических соотношениях между элементами конструкции трансформатора и токе нагрузки может быть вычислена [3].

## Перечень сокращений и обозначений

IGBT — Insulated gate bipolar transistor;  
MOSFET — Metal oxide semiconductor field effect transistor;  
ШИМ — широтно-импульсная модуляция;  
ИТ — импульсный трансформатор;  
КЗ — короткое замыкание;  
 $R_n$  — сопротивление эквивалентной нагрузки;  
 $R_{\text{маг}} = R_{\text{гист}} + R_{\text{вих.токи}}$  — потери в магнитопроводе ИТ;  
 $R_{\text{гист}}$  — потери на гистерезис, перемагничивание сердечника трансформатора;  
 $R_{\text{вих.токи}}$  — вихревые токи, круговые токи Фуко, перпендикулярные направлению основного магнитного потока;  
 $B_r$  — остаточная намагниченность;  
 $B_{\text{max}}$  — максимальная магнитная индукция;  
 $A$  — потери на гистерезис (для магнитопроводов из феррита);  
 $f$  — рабочая частота;  
 $B_{\text{max}}$  — максимальная магнитная индукция, определяемая положением рабочей точки на кривой намагничивания ИТ;  
 $\Delta P_{\Sigma}$  — суммарные потери мощности в трансформаторе, Вт;  
 $k_T$  — коэффициент теплопередачи, равен  $1,2 \cdot 10^{-3}$  Вт/(мм<sup>2</sup> °С);  
 $S_T$  — эффективная площадь трансформатора, участвующая в теплопередаче, мм<sup>2</sup>;  
 $L_u$  — индуктивность намагничивания ИТ;  
 $\mu_a$  — магнитная проницаемость ферритового сердечника;  
 $W_1$  — количество витков в первичной обмотке;  
 $S$  — площадь сечения ферритового сердечника;  
 $l_{\text{ср}}$  — периметр ферритового сердечника;  
 $i_2$  — наблюдаемый вторичный ток в нагрузке;  
 $L$  — индуктивность нагрузки;  
 $i_u$  — ток подмагничивания.  
 $H_m$  — максимальная напряженность магнитного поля трансформатора;  
 $R_p$  — сопротивление первички;  
 $R_s$  — сопротивление вторичной обмотки;  
 $L_p$  — индуктивность рассеивания первички;  
 $L_s$  — индуктивность рассеивания вторички;  
 $L_m$  — индуктивность намагничивания первички;  
 $N_p$  — число витков первички;  
 $N_s$  — число витков вторички.

## Введение

Трансформаторы в силовой электронике являются преобразователями сетевого электричества. С появлением мощных транзисторов типа IGBT или MOSFET в инверторных схемах нашли применение импульсные трансформаторы, которые по габаритам были компактнее сетевых, а по энергоэффективности такая система превосходила ранние схемы выпрямителей. ШИМ-регулирование на частотах от 30 до 100кГц вместо сетевых 50-60Гц позволило уменьшить габариты трансформаторов. Однако проблема уязвимости комплектующих таких источников тока остались уязвимы перед воздействием агрессивной среды производства, особенно при использовании их в химической металлизации в гальванических ваннах. Поэтому потребовалось разработка трансформатора мощностью 6кВт, способного работать с низким тепловыделением в закрытом корпусе с влагозащищённостью стандарта IP65.

Чтобы обеспечить наиболее энергоэффективную работу выбранной схемы мостового преобразователя в режиме непрерывных токов ССМ, необходимо поддерживать квазирезонансный режим изменения напряжения при коммутации транзисторами, а это возможно только при минимальной индуктивности рассеивания вторичной обмотки, что достигается определенной геометрией расположения витков первичной обмотки трансформатора и формой вторичной, в данном случае фольговой. Т.к. установка заключена в закрытый корпус без доступа к воздуху извне, что обеспечивает продолжительный срок эксплуатации управляющей схемотехники, то существует проблема охлаждения всех элементов такого источника тока. Поэтому инвертор должен иметь наибольшее КПД за счет минимального выделения тепла с рабочих компонентов. В схеме применены наиболее энергоэффективные SiC транзисторов на нетрадиционных полупроводниковых материалах SiC, который в отличие от Si выделяют меньше энергии при переключении, а также для выпрямления выходного тока применяются диоды Шоттки с меньшим падением напряжения в паре со сглаживающими low ESR конденсаторами.

## 1. Исследование в системе ELCUT/COMSOL распределения магнитного поля обмоток нескольких конфигураций обмоток разрабатываемого трансформатора

Роль импульсного трансформатора (ИТ) заключается в преобразовании тока и напряжения между источником и потребителем. ИТ выполняют следующие задачи:

- 1) изменение уровня и полярности формируемых импульсов тока или напряжения;
- 2) согласование сопротивления устройств на входе и выходе;
- 3) разделение потенциалов потребителя и генератора импульсов;
- 4) поддержание обратной связи в импульсной схеме;

Форма импульсов на выходе зависит от свойств и конструкции импульсных трансформаторов. ИТ подразделяют на четыре основных вида (рисунок 1) в зависимости от конфигурации обмоток и геометрии сердечника:

- 1) стержневой – обмотки охватывают магнитопровод;
- 2) броневой – обмотки охватываются магнитопроводом, и образуют своеобразную «броню»;
- 3) тороидальный – магнитопровод выполнен в виде фигуры тора;
- 4) бронестержневой – представляет собой среднюю конструкцию между броневым и стержневым видом.

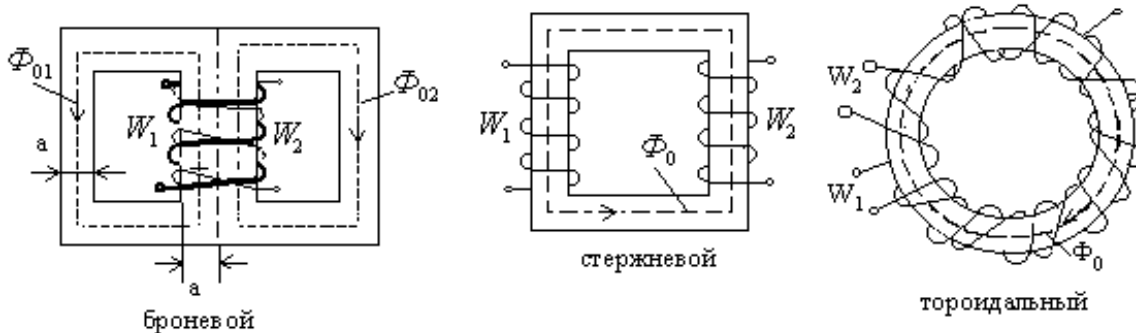


Рисунок 1. Конструктивные исполнения импульсных трансформаторов [4]

Согласно технического заданию:

- 1) Мощность: 6 кВт (24Vdc/250A<sub>dc</sub>)
- 2) Рабочая частота: 50 кГц – 200 кГц
- 3) Максимальное входное напряжение: 800 В
- 4) Максимальная рабочая температура: +100°C
- 5) Диэлектрическая изоляция: 5 кВ (rms)

Было решено промоделировать трансформатор стержневого типа с применением 2-х U-образных ферритов (рисунок 2)

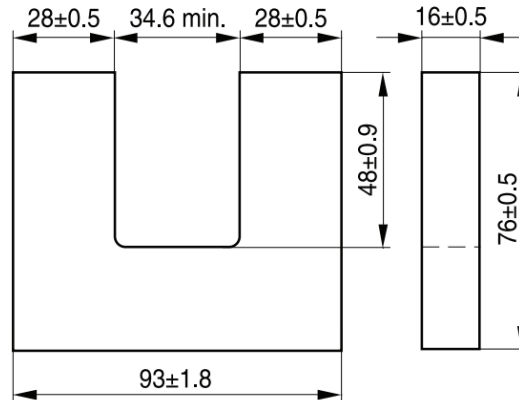


Рисунок 2. Размеры ферритового сердечника U 93/76/16 [5]

Определим площадь поперечного сечения ферритовых стержней трансформатора и средней длины магнитопровода. Поперечное сечение стержней и ярем ИТ выполняются строго прямоугольной формы (Рисунок 3). Чертеж трансформатора выполнен в программе SolidWorks 2022.

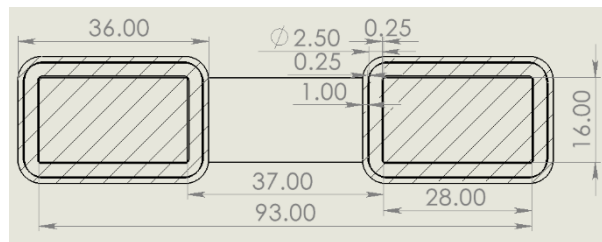


Рисунок 3. Чертеж поперечного сечения ферритового сердечника и обмоток ИТ

Зададим число витков обмоток ИТ. Число витков в первичке и вторичке ИТ соответственно: 33:1.

Таблица 1. Характеристики сердечника [5].

	UU	UI	
	93/152/16	93/104/16	
$\Sigma l/A$	0.79	0.58	$\text{mm}^{-1}$
$l_e$	354	258	mm
$A_e$	448	448	$\text{mm}^2$
$A_{min}$	448	448	$\text{mm}^2$
$V_e$	159000	116000	$\text{mm}^3$
$m$	800	600	g/set

В данном трансформаторе вторичка будет выполнена из медной фольги и для упрощенного доступа к ее подключению к выбранной схеме она будет располагаться снаружи (рисунок 4).

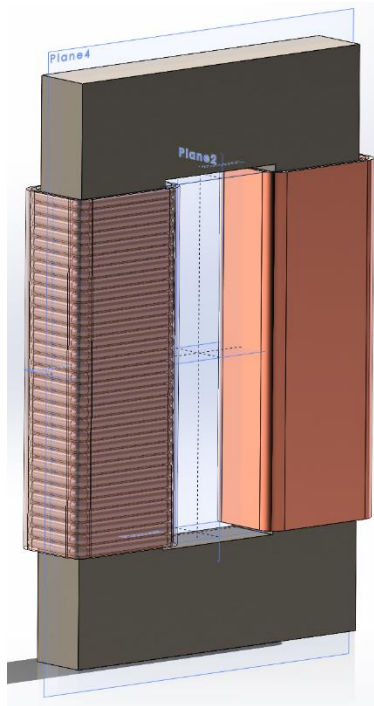


Рисунок 4. Изометрическая проекция ИТ

При выполнении трехмерного моделирования сердечника размер сердечника трансформатора определяют по формулам площади сечения сердечника —  $S_c$  ( $\text{мм}^2$ ) и площадь поперечного сечения окна —  $S_0$  ( $\text{мм}^2$ ) [6].

$$S_c = a \cdot b, (1.1)$$

где  $h$  — высота окна;

$c$  — ширина окна.

$$S_0 = h \cdot c, (1.2)$$

где  $a$  — ширина сердечника;

$b$  — толщина сердечника.

Конкретные значения показаны на рисунке 5.



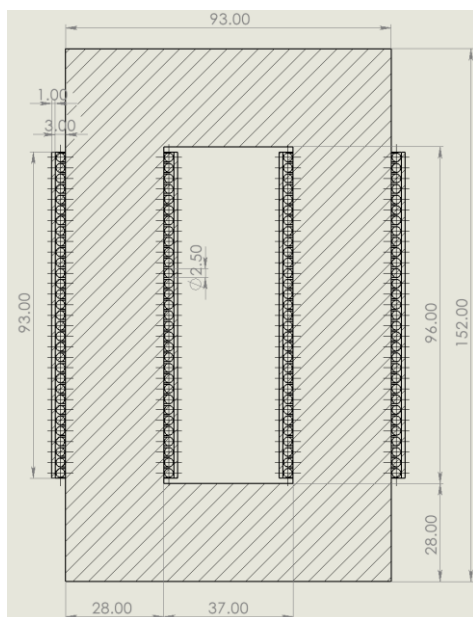


Рисунок 5. Чертеж продольного сечения ферритового сердечника и обмоток ИТ

При расчёте распределения магнитного поля обмоток трансформатора в системе ELCUT зададим величину приращения индукции за импульс в зависимости от мощности в импульсе и по магнитным характеристикам материала сердечника (рисунок 6).

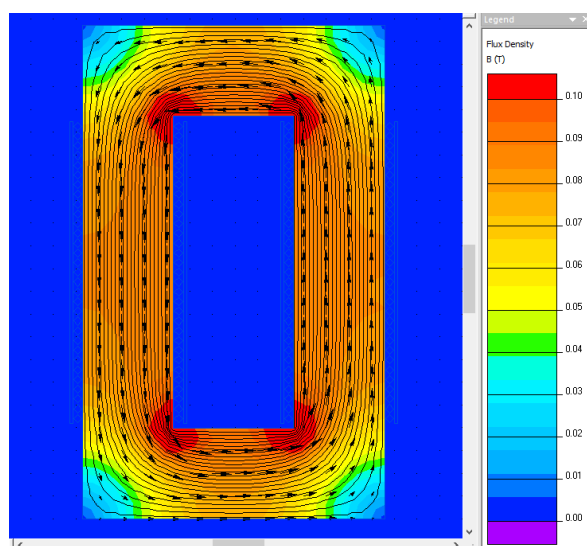


Рисунок 6. Магнитное поле вокруг разрабатываемого ИТ

В полученной модели в системе ELCUT 6.6 поток магнитной индукции едва превышает значение 0.1 Тл. Нет необходимости в применении схем релейной защиты, достаточно установить трансформаторный датчик тока с пиковым детектором и отслеживать токи насыщения с помощью микроконтроллера со встроенным компаратором.

## 2. Исследование потерь мощности трансформатора при работе в режиме холостого хода

Проанализируем диаграммы, полученные при моделировании в среде ELCUT 6.6. На первичку ИТ подаются трапецеидальные импульсные сигналы с удвоенной 300В амплитудой разной полярности с частотой 100кГц (рисунок 7).

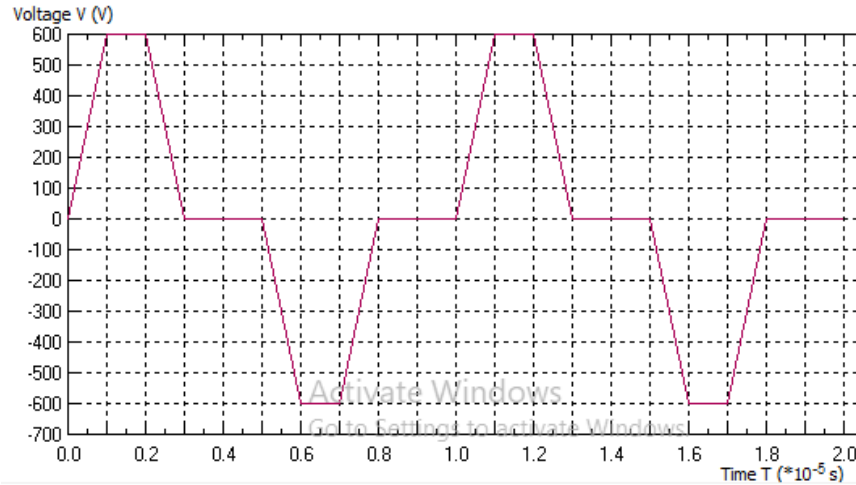


Рисунок 7. Временная диаграмма импульсов напряжения  $U_m$  в первичке

Задержка между импульсами составляет 80% от периода, что приводит к возрастанию магнитной индукции  $B$  во время интервала  $t_u$ , затем наблюдается спад в интервале  $(T-t_u)$  (рисунок 8).

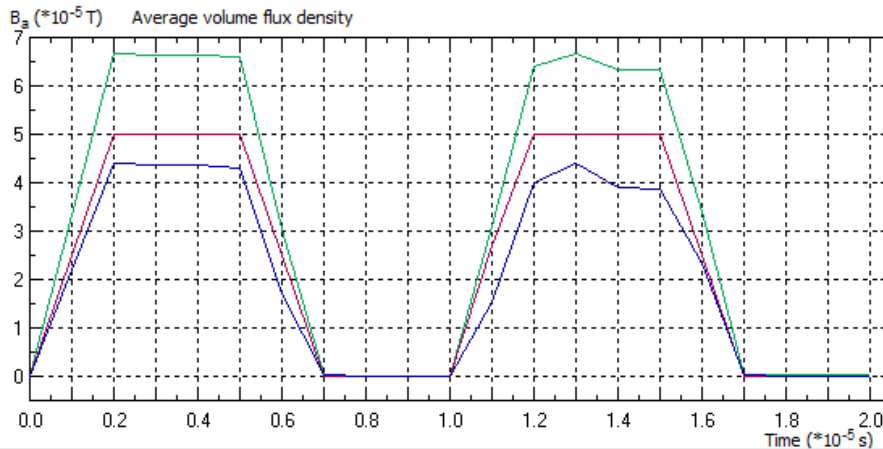


Рисунок 8. Временная диаграмма магнитной индукции  $B$  к толщине феррита ИТ

Скорость изменения индукции определяется через постоянную времени по формуле:

$$\tau_p = \frac{L_0}{R_H} [7], (2.1)$$

где  $R_H$  — сопротивление эквивалентной нагрузки.

Среднее значение магнитной индукции определяются согласно формуле:

$$\Delta B = B_{max} - B_r, (2.2)$$

где  $B_r$  — остаточная намагниченность;

$B_{max}$  — максимальная магнитная индукция.

Из осциллограммы на рисунке 9 видно, что через противоположно направленные витки вторичной обмотки ИТ проходит  $U_2$  разной полярности.

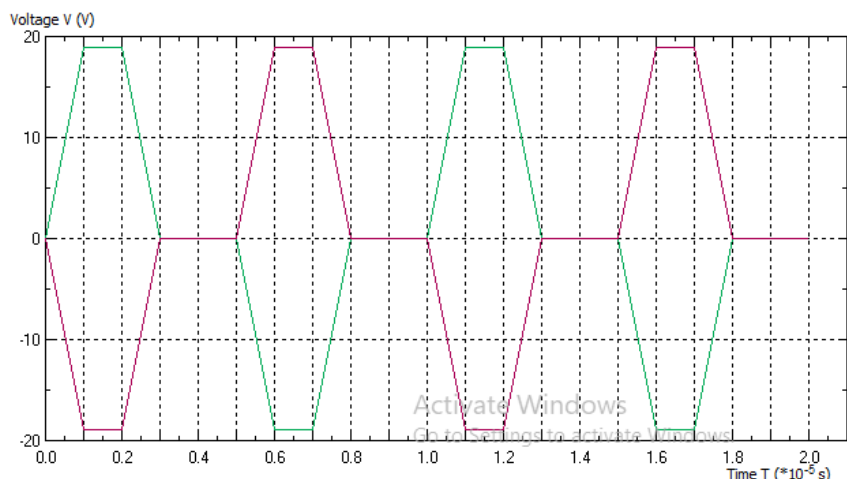


Рисунок 9. Временная диаграмма напряжения  $U_2$  во вторичной обмотке ИТ

Импульсы тока, которые проходят через первичную обмотку ИТ имеют трапециевидную форму (рисунок 10), вследствие совмещения токов нагрузки и подмагничивания  $i_u$ . Обратные выбросы, вызванные влиянием накопленной в магнитопроводе энергии, зависят от тока намагничивания, параметра  $i_u$ .

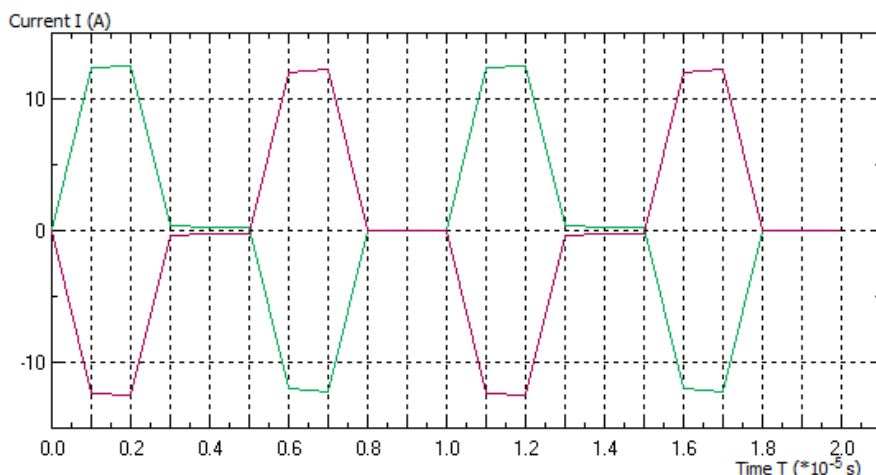


Рисунок 10. Временная диаграмма тока  $I$  в первичной обмотке ИТ

Рассмотрим КПД ИТ и коэффициент полезной мощности. КПД трансформатора — это отношение активной (полезной) мощности в нагрузке к потребляемой (активной) мощности трансформатора, т.е.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{маг}} + P_{\text{об}}}[8], (2.3)$$

где  $P_{\text{маг}} = P_{\text{гист}} + P_{\text{вих.токи}}$  — потери в магнитопроводе ИТ;

$P_{\text{гист}}$  — потери на гистерезисе, вызванные перемагничиванием сердечника ИТ;

$P_{\text{вих.токи}}$  — вихревые токи, круговые токи Фуко

Полученные в следствие моделирования потери в магнитопроводе  $P_{\text{маг}}$  зависят от следующих параметров (рисунок 11):

$$P_{\text{маг}} = Af^{\frac{3}{2}}B_{\text{max}}^2, (2.4)$$

где  $A$  — потери на гистерезис (для магнитопроводов из феррита);

$f$  — рабочая частота;

$B_{\text{max}}$  — максимальная магнитная индукция ИТ.

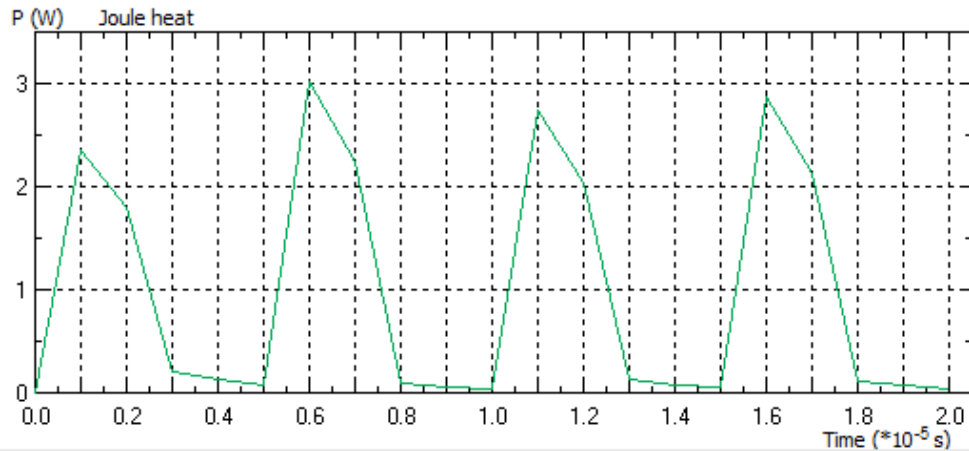


Рисунок 11. Потери мощности P(W) ИТ

Магнитные потери с увеличением частоты преобразования при работе ИТ в режиме холостого хода (без нагрузки) возрастают. Чтобы невелировать данный эффект применяют сердечники из нанокристаллического порошка позволяющее снизить рабочее значение магнитной индукции  $B_{\text{max}}$ . Площадь петли гистерезиса определяет потери вследствие гистерезиса при перемагничивании материала.

### 3. Исследование процессов насыщения магнитопровода трансформатора в режимах короткого замыкания

Второй параметр, описывающий работу ИТ, — индуктивность намагничивания, зависящий от сечения, магнитной проницаемости сердечника магнитопровода и числа витков на ферритовом сердечнике:

$$L_u = \frac{W_1^2 \cdot S \cdot \mu_a}{l_{cp}} [7], (2.6)$$

$$\mu_a = \frac{B_m - Br}{H_m} = \frac{\Delta B}{H_m}, (2.7)$$

$L_u$  — индуктивность намагничивания ИТ;

$\mu_a$  — магнитная проницаемость ферритового сердечника;

$W_1$  — количество витков в первичной обмотке;

$S$  — площадь сечения ферритового сердечника;

$l_{cp}$  — периметр ферритового сердечника (магнитной силовой линии);

$H_m$  — максимальная напряженность магнитного поля трансформатора;

При протекании большого тока через обмотку ИТ магнитный материал ферритового сердечника может войти в состояние насыщения. В этот момент его относительная магнитная проницаемость резко падает, что влечет пропорциональное снижение индуктивности ИТ. На малой индуктивности происходит выброс большого значения тока  $I_2$  при условии коротко замкнутой вторичной обмотки ИТ (рисунок 13).

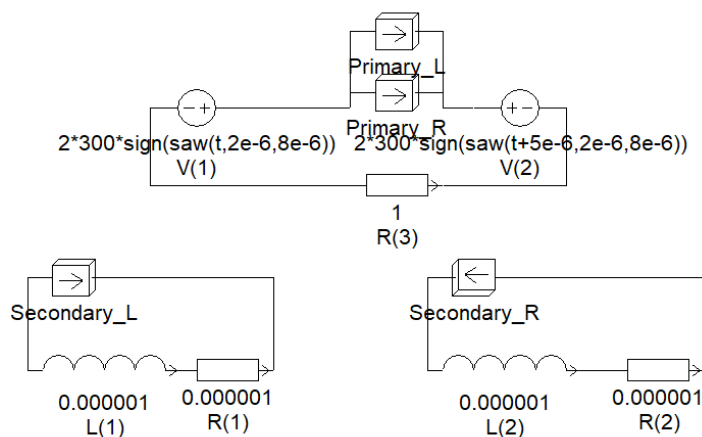


Рисунок 13 – Схема включения ИТ в режиме КЗ в системе моделирования ELCUT 6.6

Модель насыщенного ИТ с активно-индуктивной нагрузкой описывается формулой:

$$L_u = \frac{di_u}{dt} = R_n + \frac{L di_2}{dt}, (2.8)$$

где  $i_2$  – наблюдаемый вторичный ток в нагрузке;

$L$  – индуктивность нагрузки;

$i_u$  – ток подмагничивания.

Снизить одностороннее насыщение трансформатора можно уменьшив максимальную индукцию  $B_{max}$  в сердечнике на величину индукции подмагничивания  $L_u$  или ввести немагнитный зазор в ферритовый сердечник, тем самым скомпенсировав напряженность подмагничивания (рисунок 14).

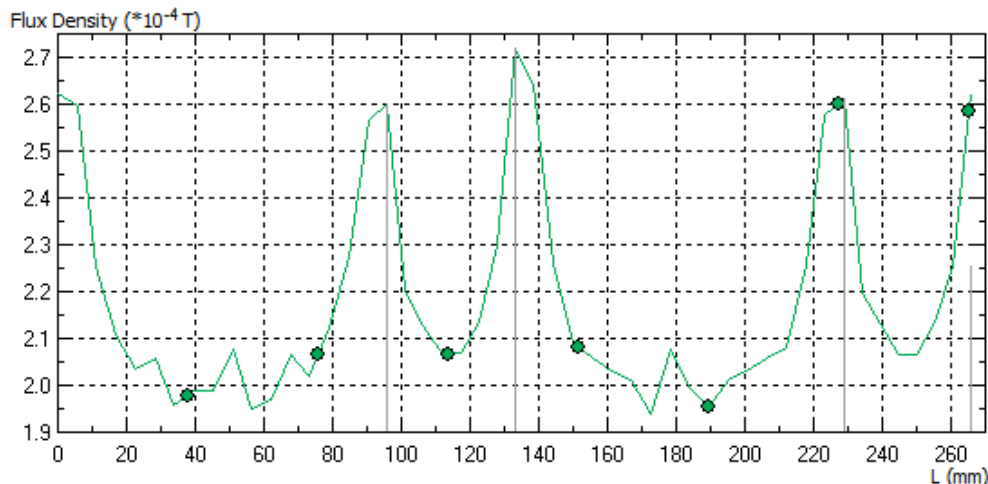


Рисунок 14 – Магнитная индукция  $B_{max}$  и  $B_r$  ИТ

В режиме КЗ бросков тока во вторичке ИТ не наблюдалось.  $B_{max}$  удовлетворяет условиям эксперимента.

#### 4. Исследование теплопроводности материалов трансформатора и выбор необходимой марки и сечения феррита

Проведем расчет тепловых потерь ИТ, определим  $\Delta T$  по формуле использующуюся при работе с дросселями. Формула для изменения температуры феррита ИТ:

$$\Delta T = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{k_T S_T} [8], (4.1)$$

где  $\Delta P_{\Sigma}$  — суммарные потери мощности в трансформаторе, Вт;

$k_T$  — коэффициент теплопередачи, равен  $1,2 \cdot 10^{-3}$  Вт/(мм<sup>2</sup> °С);

$S_T$  — эффективная площадь трансформатора, участвующая в теплопередаче, мм<sup>2</sup>.

Решим задачу теплового расчета ИТ в программе ELCUT 6.6 и получим диаграмму, представленную на рисунке 15.

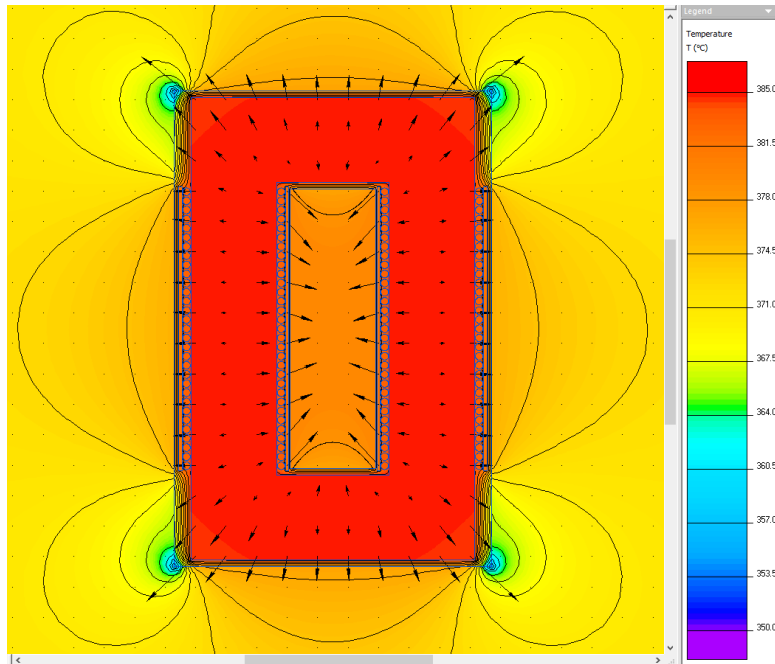


Рисунок 15 – Диаграмма теплопроводности разрабатываемого ИТ

В малых ИТ допускается превышение температуры сердечника над окружающей средой при воздушном охлаждении не более чем на 60 - 65 °С при температуре среды 40 и изоляции обмоток класса А, где граница 105 °С.

Было решено выбрать в качестве материала ферритовые сердечники марки N87, которые представляют собой оксид, изготовленный из Fe (железо), Mn (марганец) и Zn (цинк). Такие ферриты обладают хорошими магнитными свойствами (высокая проницаемость и индукция насыщения) ниже температуры Кюри и имеют довольно высокое электрическое сопротивление. Они производятся в различных формах, включая тороидальные, E-сердечники, U-сердечники, I-сердечники кольцевые сердечники. Импульсные трансформаторы до 6 кВт выполняются с воздушным охлаждением.

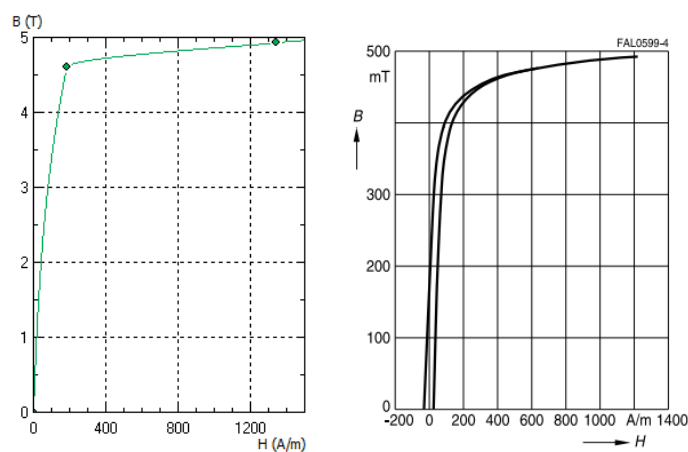


Рисунок 16 – Выбор кривой намагничивания В/Н для феррита марки N87 [9]

## 5. Исследование наиболее подходящего типа инверторной схемы для испытательного стенда

Существуют различные схемы инверторов. Нипростейшей из них является нулевая схема. В ней выходы источника питания соединены с выводами первичной обмотки трансформатора согласно схеме на рисунке 17 а. Транзисторные ключи S1 и S2 поочерёдно коммутируются, прикладывая напряжение к первичной обмотке ИТ. В данной схеме постоянное подмагничивание ИТ отсутствует. Данная схема применяется при работе с малыми напряжениями, в следствие перегруженности тарнзисторного ключа в закрытом состоянии.

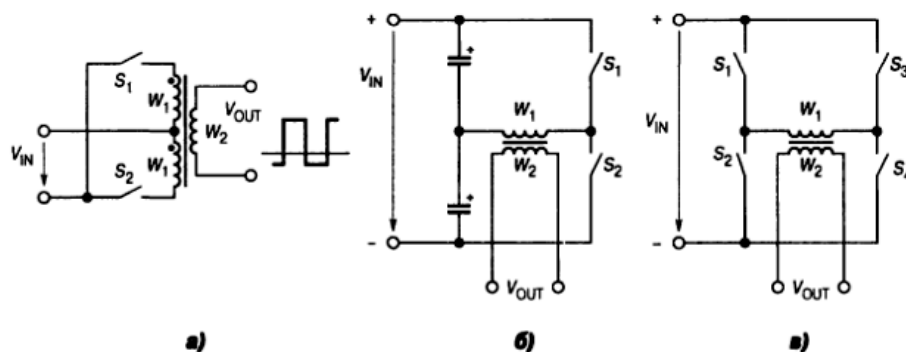


Рисунок 17. Основные схемы инверторов [10]: а) нулевая, б) полумостовая, в) мостовая

Полумостовая схема (рисунок 17 б) используется при построении источников питания небольшой мощности, порядка 100Вт. С помощью конденсаторов входное амплитуда входного напряжения снижается вдвое. Транзисторные ключи коммутируются поочерёдно. При замыкании одного из транзисторов к первичной обмотке трансформатора прикладывается напряжение  $V_{IN}/2$ , в следствие чего для передачи той же мощности необходимо подавать вдое больший ток.

На рисунке 17 в показана упрощенная схема полного моста со сдвигом по фазе. MOSFET-переключатели S1, S2, S3 и S4 образуют полный мост на первичной обмотке трансформатора T1. S1 и S2 переключаются при нагрузке 50% и смещены по фазе на 180 градусов. Точно также переключаются S3 и S4. Сигналы переключения ШИМ для стойки S1 – S2 полного моста: сдвинуты по фазе относительно стойки S3 - S4. Величина этого фазового сдвига определяет величину перекрытия между диагональными переключателями, что, в свою очередь, определяет количество передаваемой энергии.



## 6. Исследование передаточной характеристики трансформатора при подключении к инверторной схеме в системе моделирования электрических цепей Multisim/PSIM

Электрическая схема включения ИТ была промоделирована в программе для моделирования электрических цепей PowerSim 9.1. Была построена мостовая принципиальная схема инвертора тока (рисунок 18).

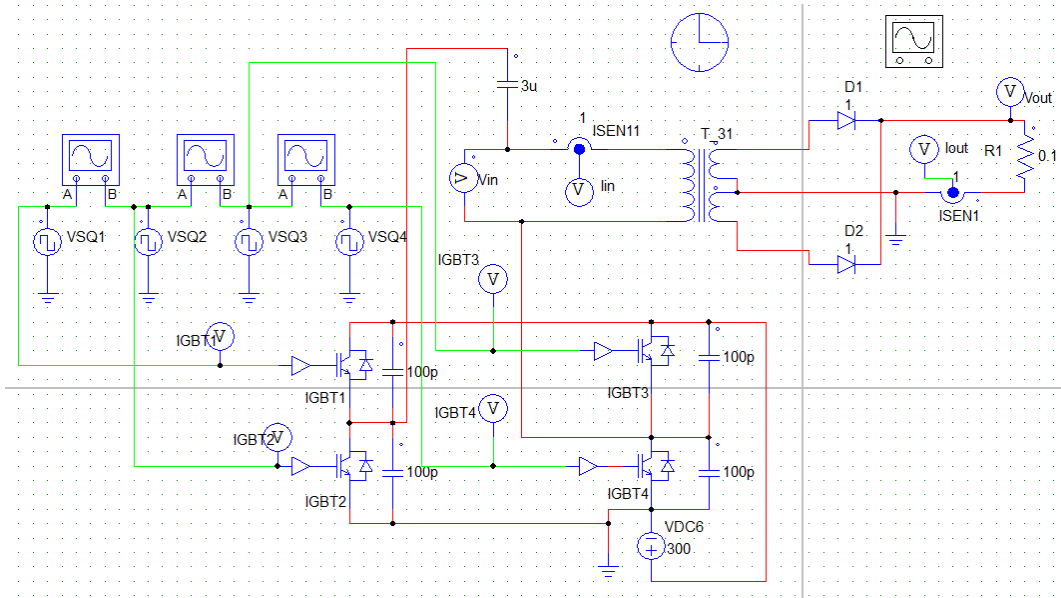


Рисунок 18. Принципиальная схема полномостового инвертора

Силовая часть схемы содержит источник прямоугольных импульсов напряжения VDC6 300В, четыре силовых транзистора IGBT1– IGBT 4, трансформатор T\_31, датчики тока ISEN1 и ISEN11. Резистор R1 служит нагрузкой для силовой цепи.

Трансформатор T\_31 имеет параметры разрабатываемого ИТ с выходной мощностью 6кВт, измеренные с помощью приборов и опытов холостого хода и короткого замыкания. Его параметры приведены на рисунке 19.

		Display
Name	T_31	<input type="checkbox"/>
Rp (primary)	0.001	<input type="checkbox"/> ▾
Rs (secondary)	0.001	<input type="checkbox"/> ▾
Rt (tertiary)	0.001	<input type="checkbox"/> ▾
Lp (primary)	10u	<input type="checkbox"/> ▾
Ls (sec. leakage)	0.1u	<input type="checkbox"/> ▾
Lt (tertiary leakage)	0.1u	<input type="checkbox"/> ▾
Lm (magnetizing)	5m	<input type="checkbox"/> ▾
Np (primary)	33	<input type="checkbox"/> ▾
Ns (secondary)	1	<input type="checkbox"/> ▾
Nt (tertiary)	1	<input type="checkbox"/> ▾

Рисунок 19. Параметры разрабатываемого ИТ

$R_p$  — сопротивление первички;  
 $R_s$  — сопротивление вторичной обмотки;  
 $L_p$  — индуктивность рассеивания первички;  
 $L_s$  — индуктивность рассеивания вторички;  
 $L_m$  — индуктивность намагничивания первички;  
 $N_p$  — число витков первички;  
 $N_s$  — число витков вторички.

## 7. Исследование выбранной схемы с целью выбора номиналов компонентов для изготовления испытательного стенда для разрабатываемого трансформатора

Схема обладает широким диапазоном регулирования тока. При задании частоты коммутации транзисторов 100кГц и амплитуды импульсов напряжения  $V_{in} = \pm 300V$  амплитуда тока  $I_{in}$  в первичной обмотке ИТ будет достигать 2.2 А. Осциллограмма вольтметра  $V_{in}$ ,  $V_{out}$  и датчиков тока ISEN1, ISEN11 показана на рисунке 20.

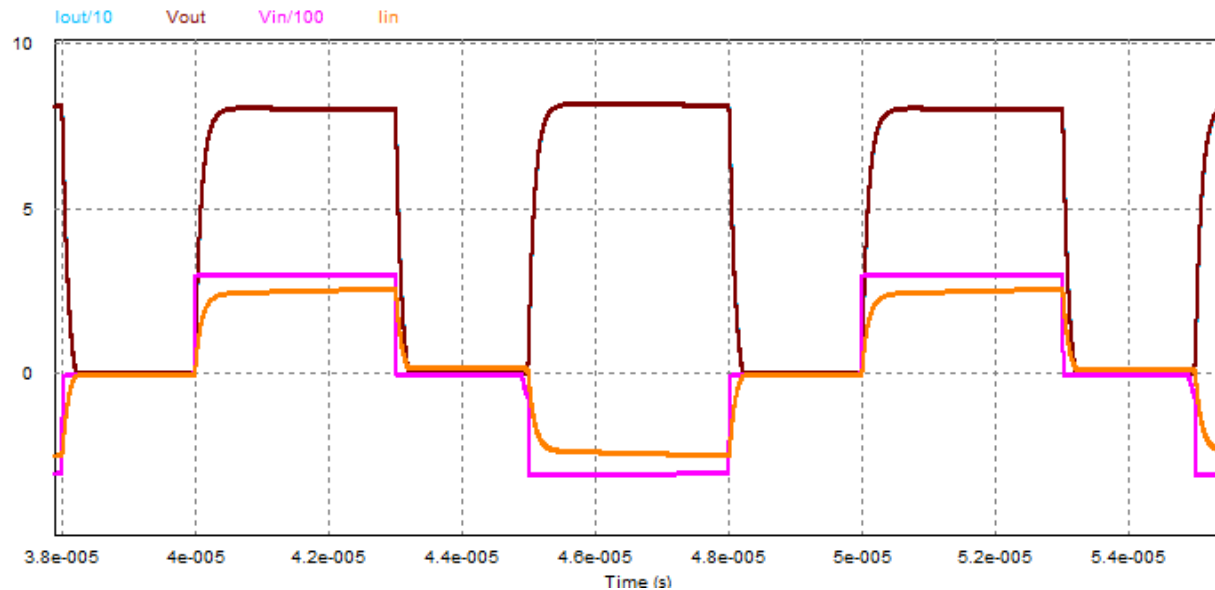


Рисунок 20. Осциллограммы вольтметров  $V_{in}$ ,  $V_{out}$  и датчиков тока ISEN1, ISEN11

Таблица 2. Список компонентов для будущего испытательного стенда для ИТ.

Обозначение компонента	Наименование компонента	Номинал компонента
C	C3	3u F, 0
C	C5	100p F, 0
C	C4	100p F, 0
C	C2	100p F, 0
C	C1	100p F, 0
DIODE	D2	1 V, 0 Ohm
DIODE	D1	1 V, 0 Ohm
IGBT	IGBT4	0 V, 0 Ohm, 0 V, 0 Ohm
IGBT	IGBT3	0 V, 0 Ohm, 0 V, 0 Ohm
IGBT	IGBT2	0 V, 0 Ohm, 0 V, 0 Ohm
IGBT	IGBT1	0 V, 0 Ohm, 0 V, 0 Ohm
ISEN	ISEN1	1
ISEN	ISEN11	1
ONCTRL	ON4	
ONCTRL	ON3	
ONCTRL	ON2	
ONCTRL	ON1	
R	R1	0.1 Ohm, 1/4W
TF_1F_3W	T_31	0.001 , 0.001 , 0.001 , 10u , 0.1u , 0.1u , 5m , 33 , 1 , 1
VDC	VDC6	300
VP	IGBT4	
VP	IGBT3	
VP	IGBT2	
VP	IGBT1	
VP	Iout	
VP	Vout	
VP	Iin	
VP2	Vin	
VSQU	VSQ4	1 , 100000 , 0.49 , 0 V, 0 sec, 0 deg
VSQU	VSQ2	1 , 100000 , 0.3 , 0 V, 0 sec, 180 deg
VSQU	VSQ3	1 , 100000 , 0.49 , 0 V, 0 sec, 180 deg
VSQU	VSQ1	1 , 100000 , 0.3 , 0 V, 0 sec, 0 deg

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе НИР были выполнены следующие поставленные задачи:

1. Проведено исследование в системе ELCUT 6.6 распределения магнитного поля обмоток нескольких конфигураций обмоток трансформатора и выбран стержневой тип импульсного трансформатора. Трансформатор решено построить на базе двух U-образных ферритов с габаритными размерами 93x76x16 с индукцией поля порядка 0.1 Тл.

2. Проведено исследование потерь мощности на гистерезис и вихревые токи Фуко импульсного трансформатора в режиме холостого хода. Они не превышают 3 Вт при усредненной импульсной нагрузке порядка 1.2 кВт и при частоте пульсации тока 100 кГц. Потери в мощности в ферритовых материалах на нагрев могут составлять порядка 100 Вт, что в сумме составляет порядка 8% общих потерь

3. Проведено исследование процессов насыщения магнитопровода трансформатора в режиме короткого замыкания. Максимальная индукция вокруг сердечника составляет 0.27 мТл, что не должно нарушать работу приборов. Магнитная индукция внутри феррита при работе на средней мощности порядка 1.2 кВт едва ли превышает значение 0.17 Тл. Многие марки ферритов типа N87, N97, N92 входят в магнитное насыщение при индукции свыше 0.39 Тл. Так же температура Кюри этих материалов редко находится ниже 200 °С.

4. Проведено исследование теплопроводности различных материалов сердечника трансформатора, для соблюдения температурных режимов порядка 80 – 125 °С выбран феррит марки N87, чья температура Кюри находится на отметке выше 210 °С. При этом разница температур при воздушном охлаждении между сердечником импульсного трансформатора и внешней средой не будет превышать 60 – 65 °С.

5. Определена наиболее подходящая мостовая инверторная схема включения экспериментального стенда на основе анализа существующих на рынке. Приоритет при закупке схем управления электроэнергией будет отдан системам с 3-х фазным питанием на основе транзисторов типа MOSFET, предположительно GaN FET, предназначенных к работе при напряжениях порядка 800 В и длительных токах в 20 А.

6. Проведено исследование передаточной характеристики трансформатора при подключении к мостовой инверторной схеме в системе моделирования электрических цепей PSIM 9.1. Передаточное число витков первичной и вторичной обмоток утверждено в соотношении 33:1. Индуктивность рассеивания разрабатываемого трансформатора составляет порядка 100 – 1000 мкГн, индуктивность намагничивания 10 мГн.

7. Проведено исследование выбранной схемы с целью определения номиналов всех активных и пассивных электрических компонентов для изготовления испытательного стенда для включения разрабатываемого трансформатора. Составлен список заказов необходимых элементов с общей суммой не более 50 000 рублей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Матханов П. Н., Гоголицын Л. З. Расчет импульсных трансформаторов. — Энергия, 1980.
2. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов 2-е изд. перераб. и доп. — Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. — 208 с. с.
3. Trkulja, Bojan, et al. “Lightning Impulse Voltage Distribution over Voltage Transformer Windings — Simulation and Measurement.” *Electric Power Systems Research*, vol. 147, 2017, pp. 185–91, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.02.024>.
4. Каштанов В. В. Анализ фронта выходных импульсов трансформатора. — *Радиотехника*, 1995. — Т. 12. — С. 38 - 40.
5. Ferrites and accessories - U 93/76/16 with I 93/28/16 - Cores (tdk.com), Date: 2018-10.
6. Ostrenko, Maxym, and Bogdan Andriienko. “Transformer Impulse Surges Calculation by FEM Coupled to Circuit.” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, 2017, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2661402>.
7. Górecki, Krzysztof, and Małgorzata Godlewska. “Modelling Characteristics of the Impulse Transformer in a Wide Frequency Range.” *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 48, no. 5, 2020, pp. 750–61, <https://doi.org/10.1002/cta.2764>.
8. Бушуев В.М., Деминский В. А., Захаров Л.Ф., Козляев Ю.Д., Колканов М.Ф. Электропитание устройств и систем телекоммуникаций. — М.: Горячая линия - Телеком, 2009. — 384 с. — ISBN 978-5-9912-0077-6.
9. Ferrites and accessories SIFERRIT material N87, Date: September 2017.
10. Ирвинг М., Готтлиб. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы. = *Power Supplies, Switching Regulators, Inverters and Converters*. — 2-е изд. — М.: Постмаркет, 2002. — 544 с. — ISBN 5-901095-05-7.