

Практическая работа 1

Расчет электрических параметров импульсного трансформатора

Задача: Рассчитать импульсный трансформатор для источника импульсной зарядки емкостного накопителя.

Исходные параметры:

Напряжение на емкости первичного накопителя энергии $U_1=20000$ В;

Напряжение на емкости вторичного накопителя $U_2=120000$ В;

Емкость первично накопителя $C_1=0,42$ мкФ;

Емкость вторичного накопителя $C_2=8$ нФ;

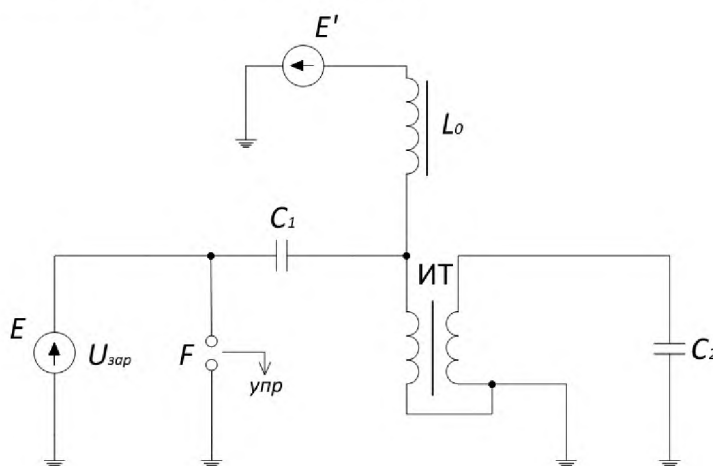
Частота следования импульсов $f= 100$ имп./с

Время импульса $t_1=0,8$ мкс;

Магнитная индукция материала магнитопровода $B_{MAX} = 1,5$

Форма сердечника магнитной системы (МС): тороидальная

Схема источника импульсной зарядки



E – источник питания; F - управляемый разрядник; C_1, C_2 – конденсаторы; $ИТ$ – импульсный трансформатор; L_o – катушка индуктивности; E' – маломощный источник

Рисунок 1– Структурная схема источника импульсной зарядки

Исходные данные для проектирования:

$$U_1 = 20000 \text{ В};$$

$$U_2 = 120000 \text{ В};$$

$$C_1 = 0,42 \text{ мкФ};$$

$$C_2 = 8 \text{ нФ};$$

$$f = 100 \text{ имп} \cdot \text{сек}$$

$$t_1 = 0,8 \text{ мкс};$$

Расчет энергии и мощности

$$W_c = \frac{CU^2}{2}, \text{ Дж} \quad (4)$$

где C -емкость конденсатора;

U -входное напряжение ;

$$W_{c1} = \frac{C_1 \cdot U_1^2}{2} = \frac{0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 20000^2}{2} = 80 \text{ Дж} = 0,08 \text{ кДж}$$

Частота следования импульсов F , принимаем : До 100 импульс*секунд

Тогда получим:

$$0,08 \cdot 100 = 8 \text{ кДж} \cdot \text{с}$$

Определяем мощность

$$P = \frac{A}{t} = \frac{8 \cdot 10^3}{1} = 8 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 8 \text{ кВт} \quad (5)$$

Расчет токов и сечение провода:

$$n = \frac{U_2}{U_1} = \frac{120000}{20000} = 6 \quad (6)$$

Средний ток в цепи нагрузки:

$$I_{2\text{cp}} = \frac{P}{U_2} = \frac{8 \cdot 10^3}{120 \cdot 10^3} = 0,066 \text{ A} \quad (7)$$

Средний ток в первичной обмотке ИТ:

$$I_{1\text{cp}} = I_{2\text{cp}} \cdot n = 0,0666 \cdot 6 = 0,4 \text{ A} \quad (8)$$

Расчет скважности

$$Q = \frac{T}{F t_{\text{и}}} ; \quad (9)$$

где T – период повторения импульсов

F – частота следования импульсов

$t_{\text{и}}$ – длительность импульса

$$Q = \frac{T}{F t_{\text{и}}} = \frac{1}{100 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6}} = 12500$$

Находим импульсный ток в цепи нагрузки:

$$I_{2\text{-имп}} = I_{2\text{cp}} \cdot Q = 0,066 \cdot 12500 = 825 \text{ A} \quad (10)$$

Также, определяем импульсный ток первичной обмотки

$$I_{1\text{-имп}} = I_{1\text{cp}} \cdot Q = 0,4 \cdot 12500 = 5000 \text{ A} \quad (11)$$

Расчет сечения проводов обмотки [4]

Расчет диаметра провода первичной обмотки

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{4I_1^2 t_n F k_6}{\pi^2 \Delta j^2}}; \quad (12)$$

где I_1 - импульсный ток той первичной обмотки

t_n -длительность импульса, мкс

F - частота следования импульсов, $F=100$

k_6 -коэффициент близости, выбирается в пределах $k_6=1,5 \div 2,5$.

Принимаем - $k_6=2$.

Δ -глубина проникновения тока с частотой f . Определяется следующим образом

$$f=1/(2t_n)=625000 \text{ Гц, то } \Delta=0,0662 \frac{1}{\sqrt{f}} \text{ м} \quad (13)$$

Принимаем:

$$\Delta = \frac{0,0662}{\sqrt{f}} = \frac{0,0662}{\sqrt{625000}} = 84 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad (14).$$

j -допустимая плотности тока, А/мм².

– для сухих. ИТ $j = 4 \div 6 \text{ А/мм}^2$,

– для бумажно.-масляных $j = 6 \div 8 \text{ А/мм}^2$.

– В высоковольтных. масляных ИТ, $j = 10 \div 12 \text{ А/мм}^2$ [9]

Принимаем:

$$j = 12 \text{ А/мм}^2$$

Тогда:

$$\begin{aligned} D_1 &= \sqrt[3]{\frac{4I_1^2 t_n F k_6}{\pi^2 \Delta j^2}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 5000^2 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 2}{3,14^2 \cdot 84 \cdot 10^{-6} \cdot 144 \cdot 10^{12}}} = \sqrt[3]{\frac{16000}{0,119 \cdot 10^{12}}} \\ &= 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{aligned}$$

$$5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 5,1 \text{ мм}$$

Расчет сечение провода:

$$S_{\text{пр1}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5,1^2}{4} = 20,42 \text{ мм}^2$$

Зная диаметр провода первичной обмотки , можно определить диаметр провода вторичной обмотки.

Формула диаметр провода вторичной обмотки:

$$D_2 = \frac{D_1}{\sqrt[3]{n^2}}; \quad (15)$$

где n - коэффициент трансформации.

Тогда:

$$D_2 = \frac{D_1}{\sqrt[3]{n^2}} = \frac{5,1 \cdot 10^{-3}}{\sqrt[3]{6^2}} = 1,54 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,54 \text{ мм}$$

Расчет сечение провода вторичной обмотки:

$$S_{\text{пр2}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,54^2}{4} = 1,86 \text{ мм}^2 \quad (16)$$

Расчет площади магнитной системы

За основу возьмем трансформатор с одним первичным витком:

$$w_1 = 1.$$

Входное напряжение:

$$U_1 = 20000 \text{ В};$$

Тогда с учетом времени импульса приращение магнитной индукции в магнитопроводе определится как:

$$\Delta B = \frac{U_1 t_1}{S w_1} \quad \text{Тл} \quad (1)$$

где U_1 - входное напряжение (В);

t_1 - длительность импульса (мкс);

S - сечение магнитопровода (мм^2);

w_1 - количество витков

Выразим из (1) S – сечение магнитопровода.

Тогда:

$$S w_1 = \frac{U_1 t_1}{\Delta B} \text{ мм}^2 \quad (2)$$

И с учетом количества витков:

$$S = \frac{S w_1}{w_1} \text{ мм}^2 \quad (3)$$

Поскольку схема с внешним источником размагничивания, будем использовать полный цикл петли гистерезиса, тем не менее чтобы иметь запас по времени насыщения, используем коэффициент 1,7. Таким образом полный размах индукции за полпериода составит $\Delta B \approx 1,7 B_{MAX}$ – (рисунок 2).

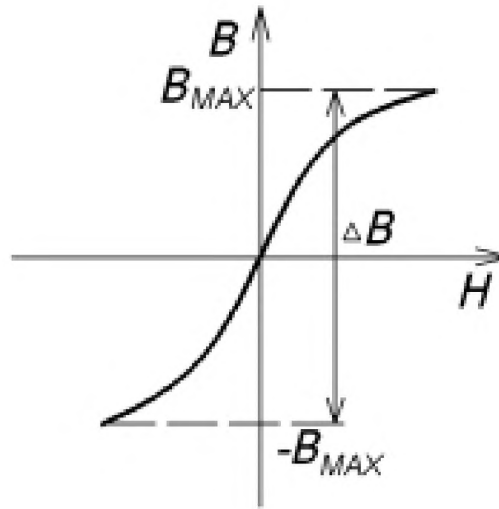


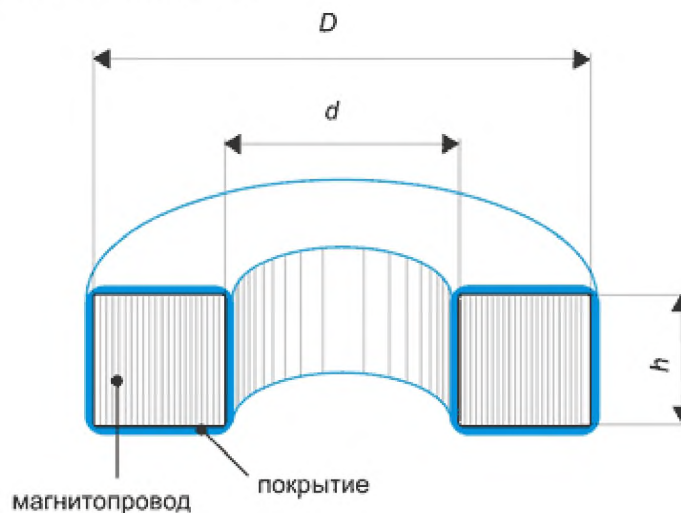
Рисунок 2 - Зависимость B (Тл) от H (А/м)

$$S_{w_1} = \frac{U_1 t_1 k_\phi}{2 B_{MAX} k_c} = \frac{20000 \cdot 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}{1,7 \cdot 1,5 \cdot 0,75} = 4,183 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Поскольку первичный виток один, то площадь МС максимальная:

$$S_{расч} = \frac{S_{w_1}}{w_1} = \frac{4,183 \cdot 10^{-3}}{1} = 4,183 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Геометрия сердечника МС



D -внешний диаметр; d -внутренний диаметр; h -высота

Рисунок 3 - Внешний вид магнитопровода

Лучшие результаты обеспечивает квадратная форма сечения магнитопровода, однако в угоду компактности от этого правила допустимо отступать.

Магнитная система обычно набирается стопкой из некоторого количества колец стандартной высоты. Обычно 25 мм, однако могут быть исключения, в том числе, производители могут изготовить магнитопровод другой толщины обычно кратный какому-либо значению высоты имеющейся ленты.

Выберем следующие размеры кольца сердечника :

Таблица 1- Типоразмеры сердечника

| Наружный диаметр D, мм | Внутренний диаметр d, мм | Высота h, мм | Сечение S, мм ² |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 217 | 135 | 25 | 1025 |

И возьмем таких колец 5 штук с учетом запаса по площади.

$$S_1^{\text{реал}} = S \cdot m = 1025 \cdot 5 = 5125 \text{ мм}^2$$

где m – количество последовательных колец,

Сравнение расчетного и реального значения, поперечного сечения магнитопровода:

$$S_{\text{расч}} = 4183 \text{ мм}^2 \cong S_{\text{реал}} = 5125 \text{ мм}^2$$

Выбор материалов

Выбор магнитопровода для магнитной системы

В трансформаторе, смысл использования магнитопровода заключается в том, что при использовании магнитопровода коэффициент связи обмоток улучшается, и ток намагничивания снижается. Магнитная проницаемость магнитопровода прямо пропорциональна собственной индуктивности обмоток и следовательно чем выше собственная индуктивность тем меньше ток намагничивания. Поэтому в качестве магнитопровода требуется магнитопровод с магнитной проницаемостью больше единицы ($\mu \gg 1$). Ферромагнетики обладают такой параметр магнитной системы.

Ферромагнетики имеют две основные особенности:

- магнитной индукции ферромагнетики B (Тл), нелинейно зависит от напряженности магнитного поля H (А/м)
- магнитной проницаемости ферромагнетики не является постоянной величиной

Магнитной проницаемости ферромагнетики можно добиваться до значения 10^{10} . В зависимости от остаточной намагниченности, ферромагнетики бывают магнито жесткие которые, обладают высокой остаточной намагниченностью и магнитомягкие которые обладают низкой остаточной намагниченностью. Магнито жесткие имеют высокие потери на перемагничивание и поэтому они не принимаются для работы в переменном поле.

Существуют следующие требования для магнитных материалов:

- магнитные материалы должны обладать узкой петлей гистерезиса
- магнитные материалы должны иметь большой начальной μ_0
- магнитные материалы должны обладать высокой индукцией насыщения
- магнитные материалы должны обладать меньшей потерей энергии на вихревые токи

В качестве магнитопровода для магнитной системы импульсного трансформатора берем магнитопровод : ГАММАМЕТ 440А – с аморфной структурой в защитном контейнере с прямоугольной петлей гистерезиса.

Магнитопроводы ГАММАМЕТ 440А изготавливаются из ленты магнитомягкого аморфного сплава ГМ 440 с номинальной толщиной 25 мкм, которой получают методом сверхскоростной закалки расплава. Магнитопроводы отличаются повышенной магнитной индукцией насыщения, поставляются после термической обработки в продольном магнитном поле и готовы к применению в силовых цепях на частоте до 200 кГц в сигнальных цепях на частоте до 10 МГц.

Таблица 2-Типичные физические свойства магнитопровода ГМ 440А

| | |
|--|---|
| Магнитная индукция B_{800} , Тл | 1,5 |
| Коэффициент прямоугольности B_r/B_{800} | 0,9 |
| Коэрцитивная сила, А/м | 4 |
| Максимальная относительная магнитная проницаемость | 600000 |
| Магнитострикция насыщения | $25 \cdot 10^{-6}$ |
| Температура Кюри, °С | 420 |
| Температура кристаллизации, °С | 540 |
| Плотность, кг/м ³ | 7300 |
| Удельное электросопротивление, Ом·м | $1,3 \cdot 10^{-6}$ |
| Удельные магнитные потери P (Вт/кг) для частоты 3-200 кГц и $B_m < 0,1$ Тл | $P = 2,8 \cdot 10^{-4} f^{1,5}(B_m)^{1,85}$ |
| Удельные магнитные потери P (Вт/кг) для частоты 3-200 кГц и $B_m > 0,1$ Тл | $P = 10^{-4} f^{1,5}(B_m)^{1,4}$ |
| Удельные магнитные потери P (Вт/кг) для частоты менее 3 кГц | $P = 2,2 \cdot 10^{-4} f^{1,4}(B_m)^{1,65}$ |

Выбор проводов обмоток

Провода обмоток ИТ должны удовлетворять нескольким требованиям. Провод должен быть электрически прочным и должен обладать минимальным сопротивлением и индуктивностью рассеяния. Кроме того провод должен обладать высоким свойством электропроводности и меньше удельного сопротивления. На счет механической прочности быть достаточно прочным и виброустойчивым для того чтобы выдерживать при воздействии электродинамических сил. Обычно для выполнения требования минимального сопротивления проводов обмоток в качестве материал провода выбираются медные провод. Провод обмотки выбираются малого диаметра чтобы снизить уровень поверхностного

эффекта и эффект близости провода. Для выполнения требования площади сечения добавляют параллельных проводников. В качестве провода можно принимать прямоугольного сечения, трубчатого или медные ленты. Эти виды провода принимаются смотря, какая конструкция у обмоток. Проектируемый ИТ имеет необычную конструкцию обмоток.

Надо отметить, что одна из важнейшей цели разрабатываемого ИТ, является неиспользования твердой изоляции в конструкции. Витки обмоток не прикасается к сердечнику, т.е. между сердечник и катушки будет воздушный зазор и это зазор наполняются в трансформаторном масле. Трансформаторное масло служит в качестве каркасной и межвитковой изоляции. Катушка импульсного трансформатора будут висеть на воздухе, поэтому при проектировании надо учесть механическую прочность проводов

С учетом конструкции генератора, масса и объем катушки для выполнения требования механической прочности принимаем провод круглого сечения трубчатой форме. Так же при расчете эффекта поверхности или глубины проникновения импульсного тока получили :

$$\Delta = \frac{0,0662}{\sqrt{f}} = \frac{0,0662}{\sqrt{625000}} = 84 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Из этого выходит, что использования провода круглого сечения трубчатой формы считается актуальным. Потому что внутренней части провода эффективно не используется, и это считается как ущерб. Исходя из этой причины, выбираем провод трубчатой формы.

Выбираем медную трубу, существующую на рынке с диаметром 12 мм и толщиной 1 мм.



Рисунок 4 – Медная труба $d=12$ мм.

Таблица 3 Характеристики медной трубы $d=12$ мм [18]

| | |
|-----------------------------------|----------------|
| Рабочая температура, °C | от 25 до +100. |
| Плотность, $\rho = \text{г/дм}^2$ | 8,94 |
| температура плавления, °C | 1083 |

Выбор изоляционного материала

Изоляция высоковольтного импульсного трансформатора при эксплуатации и возникновении аварийных случаях должна выдержать. Поэтому следует выбрать изоляцию импульсного трансформатора, чтобы она выдержала при возникновении разных повреждений. Виды повреждений в импульсных трансформаторах могут быть электрическими, механическими, тепловыми и т.д. При возникновении повреждений в виде перенапряжения, изоляция трансформатора могут потерять свою изоляционную способности из – за недостатки электрической прочности изоляционного материала. От зависимости свойства изоляционного материала при возникновении перенапряжений по поверхности твердого материала могут, произойти частичные разряды и это приводит к пробое изоляции. Существует ряд требований к изоляции импульсного трансформатора:

- Изоляция импульсного трансформатора должна сохранить изоляционную способность при воздействии рабочих напряжений.

- Изоляция должна иметь малое сопротивление и высокой диэлектрической прочности.

- Изоляция должна быть электрически и механически прочной.

При проектировании не получится принципиально выполнить все требования. Изменения некоторых параметров приводят к изменению другого параметра. Например: чтобы удовлетворить минимальную индуктивности рассеяния придется уменьшить толщину изоляционного материала. А для того чтобы изоляция выдержала на воздействие высоких напряжений надо увеличить толщины изоляционного материала. В импульсных трансформаторах выполнения требования минимальной индуктивности рассеяния считается самым важным. Так же уменьшение емкости обмоток тоже обратно действует к требованию минимальной индуктивности рассеяния. Для уменьшения межобмоточной и межвитковой емкости выбираются изоляция с минимальной диэлектрической проницаемости.

В качестве изоляционного материала трансформатора можно выбрать следующие материалы, которые удовлетворяют основными требованиями:

- Чистое трансформаторное масло, обладает хорошей текучестью, высокий уровень однородности, хороший отвод теплоты и более меньше диэлектрической проницаемости которая равно $\varepsilon = 2,2$.

- Трансформаторная бумага и электрокартон, в большинстве случаев применяется в месте с трансформаторном маслом. Достоинство трансформаторной бумаги является термостойкость. При высоких температурах не расплавиться.

- Органическое стекло или оргстекло, это является экологической чистой и легко обрабатывается, обладает хорошим изоляционным свойством, по массе является легким материалом.

–Элегаз, диэлектрическая проницаемость при высоких давлениях равняется $\varepsilon = 1$, потребуется дополнительные устройство для выдержки высокого давления и герметичный бак, является взрывоопасной.

Таблица 4 – Физические характеристики изоляционных материалов.

| Материал | Максимальная напряженность электрического поля, МВ/м | Относительная диэлектрическая проницаемость | Максимально допустимая температура, °С |
|---|--|---|--|
| Трансформаторное масло ГОСТ 982-80 | 30 | 2,2 | 95 |
| Трансформаторная бумага ТВ-120, ТВУ-080 в масле ГОСТ 24874-86 | 100 | 4...5 | 95 |
| Электрокартон АМ, А, Б, Г ГОСТ 4194 – 83 | 50 | 4...5 | 95 |
| Пленка фторопластовая ПТФЭ, ГОСТ 24222 – 80 | 100 | 2 | 250 |
| Органическое стекло ГОСТ 17622 – 72: | | | |
| ТОСН | 25...40 | 3,0...3,2 | 110 |
| ТОСП | 25...40 | 3,0...3,2 | 90 |

При проектировании изоляционных материалов в импульсной технике, надо обращать внимание на их степени однородности. Применение много слоистых изоляционных материалов не всегда является целесообразным. Потому что у многослойных материалов высокая степень неоднородности во многих случаях не получится сделать их однородной. Как же известно, из источников, что возникающие воздушные пузырьки, сделает их неоднородной. Напряженность электрического поля нарастает там, где значения диэлектрической проницаемости ниже. Увеличение напряженности электрического поля приводит к возникновением коронирование в изоляционных материалов. Впоследствии этого произойдет пробой изоляции.

Учитывая таких факторов, рекомендуются применение бумажно-масляной изоляции в импульсных техниках с толщиной не более 15 мм, иначе изоляционная конструкция станет неоднородной.

Следует, что применение трансформаторного масла в качестве изоляционного материала в импульсных электротехниках является практически полезным. Трансформаторное масло при высоких напряжениях выше 100 кВ широко применяется в электрических установках. Потому что, трансформаторное масла имеет ряд достоинств, которые не встречаются на других изоляционных материалов. Чисто трансформаторное масло является более однородно относительно твердых и слоистых изоляционных материалов. Уменьшение динамические емкости обмоток не требуется, потому что диэлектрическая проницаемость чистого трансформаторного масла намного ниже относительно других материалов. Кроме того трансформаторное масло покрывает все воздушные пространство между частями импульсного трансформатора. Относительно твердых изоляционных материалов, трансформаторное масло обладает способности восстанавливаемости после аварийных ситуациях. Исходя, из перечисленных факторов для импульсного трансформатора применения масляной изоляции считается, актуальным. Кроме трансформаторного масла есть тип изоляции, которая могут стать конкурентом в применение трансформаторного масла. Этот тип изоляции называется «газовая изоляция» с элегазом (SF₆).

Изоляционным свойством элегаза при повышенном давлении несколько раз выше, чем у трансформаторного масла. При использовании элегаза емкость обмотки можно снизить до минимума, потому что диэлектрическая проницаемости элегаза близка к единице. Применение элегаза в импульсных трансформаторах заставляет его помещать в герметичном баке, которые обладает способности выдерживать высокие давление. Эти причины приводит к увеличению массы и габаритов импульсного трансформатора. Кроме того жестко требуется его требований безопасности. Ещё один недостатки элегаза

является его малой теплоемкости и это недостаток усложняется теплоотвод в активных частях импульсных трансформаторов. Вследствие указанных причин в импульсных трансформаторах, элегазовая изоляция широко не принимается.

В качестве основной изоляции выбираем масло трансформаторное.

Расчет электромагнитных параметров обмоток

Основные электромагнитные параметры импульсного трансформатора: индуктивность намагничивания, индуктивность рассеивания, динамическая емкость, сопротивление обмоток.

Индуктивность намагничивания

Индуктивность намагничивания это отношение потокосцепления катушки к протекающему через катушку току:

$$L = \frac{\psi}{i} = w\Phi_0/i;$$

При расчете индуктивности намагничивания импульсного трансформатора можно считать, что весь магнитный поток Φ , сосредоточен в магнитной системе, поскольку по сравнению с магнитной проницаемостью воздуха магнитная проницаемость МС из стали многократно выше. Из этого следует, что лишь незначительная часть магнитных силовых линий в виде потока рассеяния замыкается вне МС.

Для расчета индуктивности намагничивания используют следующую упрощенную формулу:

$$L_{\mu} = \frac{\mu_0 \mu w^2 S}{l}; \text{ Гн}$$

где μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

μ – магнитная проницаемость

w - количество виток

S – поперечное сечение МС, м²

l – связь длины МС, м

Связь длины МС тороидального сердечника определяется формулой:

$$l = \pi \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \sqrt{\frac{a}{b}} S; \text{ м}$$

где D_2 – внешний диаметр МС, м

D_1 – внутренний диаметр МС, м

a и b - стороны прямоугольного поперечного сечения МС, м

S – поперечного сечения МС, м²

вычислим индуктивность намагничивания

Первичная обмотка:

$$L_{\mu 1} = \frac{\mu_0 \mu w^2 S}{l} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} * 6 \cdot 10^5 * 1^2 * 5,125 \cdot 10^{-3}}{0,552} = 6,99 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

где n – число параллельных проводов

$$l = \pi \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \sqrt{\frac{a}{b}} S = 3,14 * \frac{217 + 135}{217 - 135} \sqrt{\frac{41}{25 * 5}} * 5125 = 552,5 \text{ мм} = 0,552 \text{ м}$$

$$L_{\mu 1}' = \frac{L_{\mu 1}}{n} = \frac{6,99 \cdot 10^{-3}}{2} = 3,49 \cdot 10^{-3}$$

Вторичная обмотка

$$L_{\mu 2} = \frac{\mu_0 \mu w^2 S}{l} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} * 6 \cdot 10^5 * 6^2 * 5,125 \cdot 10^{-3}}{0,552} = 0,251 \text{ Гн}$$

$$L_{\mu 2}' = \frac{L_{\mu 2}}{n} = \frac{0,251}{2} = 0,125 \text{ Гн}$$

Индуктивность рассеяния

Индуктивности рассеяния ИТ считается паразитным параметром. Она не имеет никаких отношений с сердечником или другой обмоткой. Индуктивности рассеяния можно определить с помощью значений магнитной энергии, которая запасена в потоках рассеяния обмоток. При проектировании ИТ надо отметить, что принципиально не возможно учитывать всех влияющих факторов на индуктивности рассеяния. Из этого паразитного параметра неизбежно но принимая некоторые способы можно уменьшит их влияния. Практика конструирования ИТ показывает, что магнитная проницаемость, магнитной системы не имеет отношений к индуктивности рассеяния. Тем не менее, само значение магнитной проницаемости МС с $\mu > 1$, незначительно увеличивает индуктивность рассеяния.

Индуктивность рассеяния, приведенная к числу витков вторичной обмотки определяется формулой:

$$L_{s(2)} = \frac{\mu_0 w_2^2 p}{h} \left(\Delta_{12} + \frac{d_1 + d_2}{3} \right); \text{Гн}$$

Учитывая, что $w_2 = n w_1$, после приведения к виткам первичной обмотки получим:

$$L_{s(1)} = \frac{\mu_0 w_1^2 p}{h} \left(\Delta_{12} + \frac{d_1 + d_2}{3} \right); \text{Гн}$$

где μ_0 – магнитная постоянная , $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

w - количество виток

p – периметр МС, м

Δ_{12} – максимальная толщина междуобмоточной изоляции, м

d_1 – диаметр провода первичной обмотки, м

d_2 – диаметр провода вторичной обмотки, м

h – высота катушки, м

Высота катушки определяются формулой:

$$h = D \frac{w}{v} p; \text{ м}$$

где D – диаметр провода, м

w – число витков обмотки

v – число слоев обмотки

p – число слоев обмотки

При проектировании надо учитывать, что при автотрансформаторном включений обмоток, индуктивность рассеяния снижается в $(n - 1)^2/n^2$ раз, чем в трансформаторном включений обмоток (n – коэффициент трансформации).

Вычислим индуктивность рассеяния

Первичная обмотка:

$$h = D_1 \frac{w}{v} p = 12 * \frac{1}{1} * 1 = 12 \text{ мм} = 0,012 \text{ м};$$

$$\begin{aligned} L_{S(1)} &= \frac{\mu_0 w_2^2 p}{h} \left(\Delta_{12} + \frac{d_1 + d_2}{3} \right) = \\ &= \frac{4 * 3,14 * 10^{-7} * 1^2 * 0,552}{0,012} * \left(0,01 + \frac{0,012 + 0,012}{3} \right) \\ &= 1 * 10^{-6} \text{ Гн} \end{aligned}$$

При автотрансформаторном включении обмоток в $(n - 1)^2/n^2$ раз меньше будет, тогда получим:

$$L'_{S(1)} = L_{S(1)} * 0,694 = 1 * 10^{-6} * 0,694 = 0,694 * 10^{-6} \text{ Гн}$$

$$L''_{s(1)} = \frac{L'_{s(1)}}{n} = \frac{0,694 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,347 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

Вторичная обмотка:

$$\begin{aligned} L_{s(2)} &= \frac{\mu_0 w_2^2 p}{h} \left(\Delta_{12} + \frac{d_1 + d_2}{3} \right) = \\ &= \frac{4 * 3,14 \cdot 10^{-7} * 6^2 * 0,552}{0,012} * \left(0,01 + \frac{0,012 + 0,012}{3} \right) \\ &= 37 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \end{aligned}$$

$$L'_{s(2)} = L_{s(2)} * 0,694 = 37 \cdot 10^{-6} * 0,694 = 25,67 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

$$L''_{s(2)} = \frac{L'_{s(2)}}{n} = \frac{25,67 \cdot 10^{-6}}{2} = 12,8 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

Динамические емкости

Вычисления динамической емкости как индуктивность рассеивания основана на энергетическом принципе. Энергию электрического поля можно определить, если известны геометрические параметры обмоток и на их распределение напряжения.

$$W = \frac{C_T U_1^2}{2};$$

где C_T – динамическая емкость ;

U_1 - напряжение на первичной обмотке.

Определение емкости, в таком образом называется динамической емкости. При автотрансформаторном включении обмоток при $n > 1$ динамические емкости обмоток определяется по следующей формулой:

$$C_{1a} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon p h}{3\Delta_1}; \Phi$$

Динамическая емкость вторичной обмотки:

$$C_{2a} = \varepsilon_0 \varepsilon p h \cdot \left(\frac{n-1}{m}\right)^2 \sum_{k=1}^{m-1} \frac{1}{\Delta_2 k}; \Phi$$

Межобмоточная емкость:

$$C_{12a} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon p h}{3\Delta_{12}} \cdot \left[\left(\frac{n}{m} + 1\right)^2 + \frac{n}{m} + 1 \right]; \Phi$$

где

ε_0 – электрическая постоянная, $8,85 \cdot 10^{-12}$ ($\Phi \cdot \text{м}^{-1}$)

ε – диэлектрическая проницаемость изоляционного материала

p – периметр МС, м

h – высота катушки, м

Δ_1 – максимальная толщина изоляции, м

n – коэффициент трансформации

m – число слоев

k – коэффициент заполнения обмоток

Вычислим динамические емкости

Первичная обмотка:

$$C_{1a} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon p h}{3\Delta_1} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} * 2,2 * 0,552 * 0,012}{3 * 0,01} = 4,29 \cdot 10^{-12} \Phi$$

Вторичная обмотка

$$C_{2a} = \varepsilon_0 \varepsilon p h \cdot \left(\frac{n-1}{m}\right)^2 \sum_{k=1}^{m-1} \frac{1}{\Delta_2 k} = 8,85 \cdot 10^{-12} * 2,2 * 0,552 * 0,012 \cdot$$

$$\cdot \left(\frac{6-1}{1}\right)^2 \sum_{k=1}^{m-1} \frac{1}{0,01 \cdot 1} = 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

Межобмоточной емкости:

$$C_{12a} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon p h}{3 \Delta_{12}} \cdot \left[\left(\frac{n}{m} + 1\right)^2 + \frac{n}{m} + 1 \right] =$$

$$= \frac{8,85 \cdot 10^{-12} * 2,2 * 0,552 * 0,012}{3 * 0,01} \cdot \left[\left(\frac{6}{1} + 1\right)^2 + \frac{6}{1} + 1 \right] =$$

$$= 0,24 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

Сопротивления проводов обмоток

В импульсных трансформаторах число витков немного и следовательно их сопротивление меньше чем сопротивление генератора и нагрузки. Надо отметить, что значение сопротивление обмоток не оказывает влияние на КПД импульсного трансформатора. При проектировании ИТ учитывается по причине влияния на тепловом режим обмоток ИТ, которые работают при большой частоте повторения импульсов. В обмотках ИТ при повторение коротких импульсов тока, необходимо разделить сопротивление на два вида: а) сопротивление постоянного тока которое определяет потери энергии в обмотках при паузе между импульсами и зависит от геометрии и материала проводов обмотки; б) сопротивление пульсирующего тока – это сопротивление определяют потери энергии в обмотках при протекании импульсов тока на нагрузки и зависит от поверхностного эффекта.

Сопротивление постоянному току:

$$r_0 = \rho \frac{l}{S_M}, \text{ Ом} \quad (27)$$

где ρ - удельное сопротивление, Ом*мм²/м

l -длина провода, м

S_M -сечение провода, мм²

Сопротивление пульсирующему току определяется следующей формулой:

$$Z = \frac{6d}{\sqrt{\tau_{и}}};$$

где d – диаметр провода

$\tau_{и}$ – длительность импульса

Первичная обмотка:

$$r_0^1 = (\rho \frac{l}{S_M})/n = (0,0171 \cdot \frac{0,56}{34,54})/2 = 0,138 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

где n –числа параллельных обмоток

$$S_M = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) = \frac{3,14}{4} \cdot (12^2 - 10^2) = 34,54 \text{ мм}^2$$

Вторичная обмотка:

$$r_0^2 = (\rho \frac{l}{S_M})/n = (0,0171 \cdot \frac{2,8}{34,54})/2 = 0,693 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Сопротивление пульсирующему току:

$$Z = \frac{6d}{\sqrt{\tau_{и}}} = \frac{6 \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{0,8 \cdot 10^{-6}}} = 80,49 \text{ Ом}$$

Расчет потерь мощности

При протекании токов на обмотках и в магнитопроводе импульсного трансформатора часть энергии выделяется в тепло.

Мощность потерь на вихревые токи

$$P_B = U_2^2 \frac{\delta^2 l_c \tau F}{12 \rho_c X^2}; \text{ Вт}$$

где ρ_c - удельное сопротивление стали Ом*м

$X = w \sqrt{S} = 0,43$ - коэффициент параметры

$$P_B = U_2^2 \frac{\delta^2 l_c \tau F}{12 \rho_c X^2} = 120 \cdot 10^{32} \frac{(5,6 \cdot 10^{-62}) * 0,552 * 0,8 \cdot 10^{-6} * 100}{12 * 1,6 \cdot 10^{-6} * 0,43^2} = 6,9 \text{ Вт}$$

Мощность потерь в проводах обмоток. Если первичная обмотка имеет p_1 , а вторичная p_2 параллельно соединенных проводов, то

$$P_B = U_2^2 \rho_M \frac{k_6 k_1 \tau F X}{\pi \Delta D_2 R_H^2} \left(\frac{n}{p_1 \sqrt[3]{n^2}} + \frac{1}{p_2} \right); \text{ Вт}$$

где ρ_M удельное сопротивления меди

$$P_B = 120 \cdot 10^{32} * 1,78 \cdot 10^{-8} \frac{2 * 5 * 0,8 \cdot 10^{-6} * 100 * 0,43 * 0,43}{3,14 * 84 \cdot 10^{-6} * 12 \cdot 10^{-3} * 145,45^2} * \left(\frac{6}{1 * \sqrt[3]{6^2}} + \frac{1}{2} \right) = 3 \text{ Вт}$$

Таблица 6. Результат расчетов.

| Обмотки ИТ2 | Наименование параметры | | | | | | |
|----------------------|------------------------|-----|-------------|----------------------------|-------------|------------|----------------|
| | U , кВ | w | r_0 , МОм | $S_{пр}$, мм ² | L'_S мкГн | C_a , пФ | L'_μ , мГн |
| Первичная обмотка | 20 | 1 | 0,138 | 34,54 | 0,347 | 4,29 | 3,49 |
| Вторичная обмотка | 120 | 6 | 0,693 | 34,54 | 12,8 | 300 | 125 |

Задание на практическую работу:

Напряжение на емкости первичного накопителя энергии $U_1=25$ кВ;

Напряжение на емкости вторичного накопителя $U_2=250$ кВ;

Емкость первично накопителя $C_1=1$ мкФ;

Емкость вторичного накопителя $C_2=8$ нФ;

Частота следования импульсов $f= 10$ имп./с

Время импульса $t_1=1,4$ мкс;

Магнитная индукция материала магнитопровода $B_{MAX} = 1,5$

Форма сердечника магнитной системы (МС): тороидальная