

Импульсный трансформатор

Доцент отд. материаловедения Юдин А.С.



School of Advanced
Manufacturing
Technologies

TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY



План

- Области применения
- Классификация
- Принцип работы
- Магнитная система (МС)
- Электромагнитные процессы в МС
- Расчет некоторых параметров обмоток

Внешний вид



Многие современные радиоэлектронные устройства не обходятся без таких видов трансформаторов.

Однако они применяются не только в импульсных источниках питания, компьютерах, современных телевизорах..., но и в качестве источников импульсов в научно-исследовательской аппаратуре.



Потребители импульсной энергии

- Генераторы сверхвысоких частот (магнетроны, лампы бегущей волны, клистроны и т.п.);
- Газовые лазеры;
- Мощные электромагниты (магнитное прессование);
- Разрядные промежутки (z-пинч, дробление, бурение, и т.п.).

Особенности:

- Требуются высокие импульсные напряжения от 20 до 1000 кВ;
- Нелинейная зависимость тока от напряжения (нелинейность ВАХ);

$$i_n = \beta u_n^q - \text{аппроксимация ВАХ}$$

β и q – коэффициенты, зависящие от типа нагрузки.

Требования к ИТ

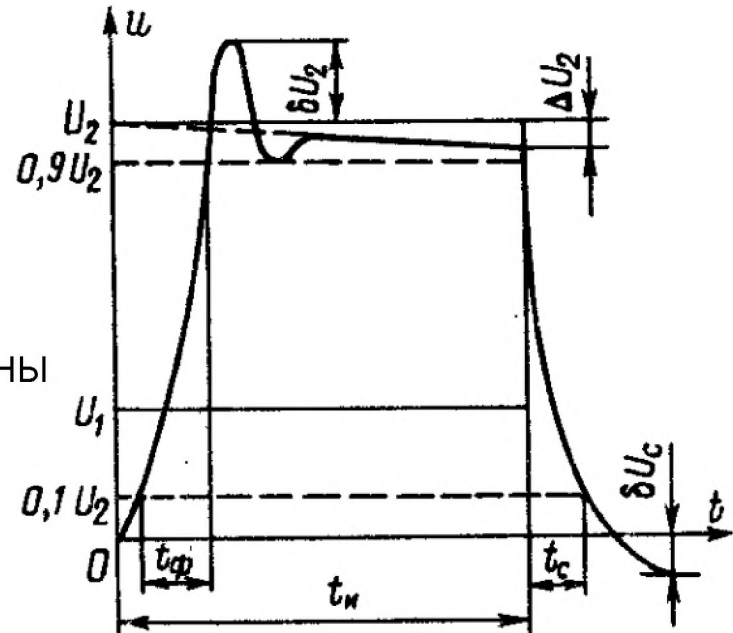
- Функциональные
 - Определяют значение электрических параметров (U,I,T,P и т.п.)
 - Ограничение уровня вносимых в импульс искажений
- Эксплуатационные
 - Определяют надежность, температурный диапазон эксплуатации и т.п.
- Технико-экономические
 - Определяют габариты, массу, стоимость изготовления и обслуживания и т. п.

Искажения формы импульса

- $t_{\text{ф}}$ – удлинение фронта
- δU_2 – выброс U на фронте
- ΔU_2 – снижение U на вершине
- $t_{\text{с}}$ – удлинение среза
- $\delta U_{\text{с}}$ – выброс U на срезе

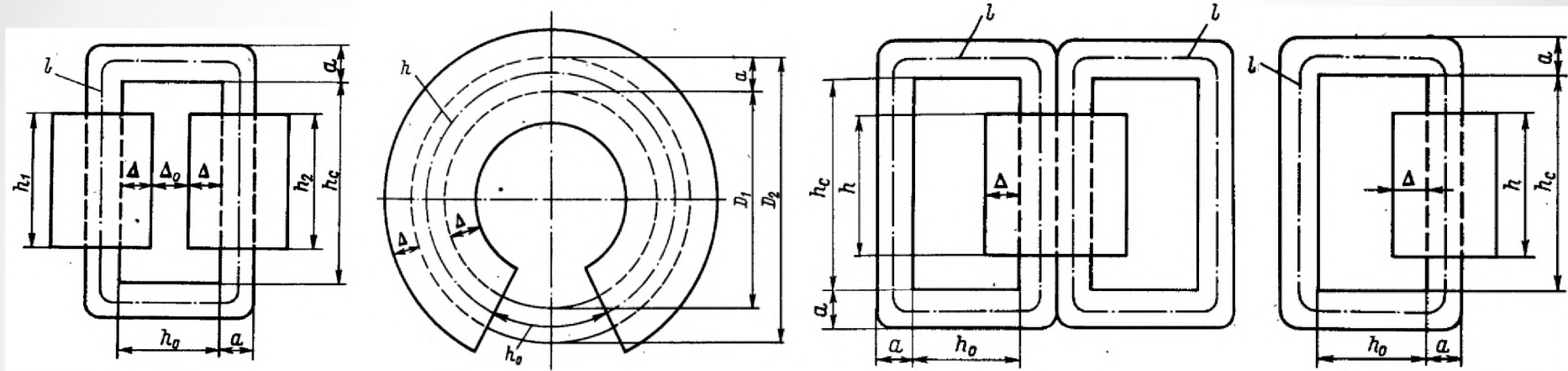
Для импульсных систем характерны следующие допустимые относительные искажения:

- $t_{\text{ф}}/t_{\text{и}} = 0,05 \dots 0,25$
- $\delta U_2/U_2 = 0,00 \dots 0,05$
- $\Delta U_2/U_2 = 0,002 \dots 0,050$
- $t_{\text{с}}/t_{\text{и}} = 0,10 \dots 0,30$
- $\delta U_{\text{с}}/U_2 = 0,3.$



Классификация форм ИТ

Конструктив (форма МС)

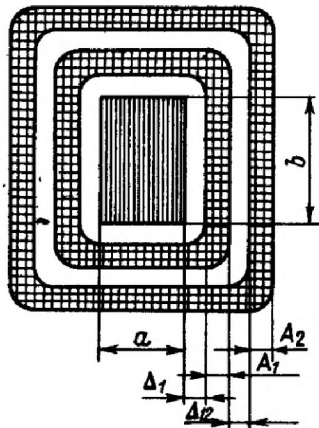


стержневой

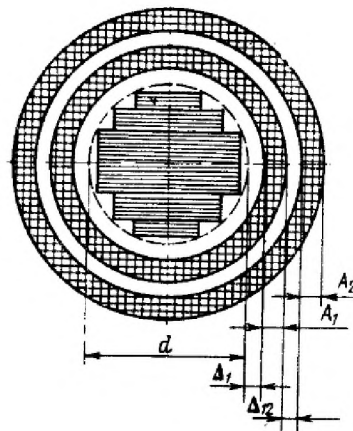
тороидальный

броневой

бронестержневой



прямоугольное



круглое

Сечение МС

Особенности мощных ИТ

- **Относительно малое количество витков**

Есть трансформаторы с минимально возможным количеством витков $W_1 = 1$, $W_2 = n$

- **Показатель технико-экономической экономической эффективности**

$\lambda = h/l$ – коэффициент использования длины МС, где h – высота обмоток, l длина средней линии МС.

λ для стержневой = 0,6

λ для броневой = 0,3

λ для тороидальной = 0,95

- **Лучшие функциональные показатели достигаются** при максимальной площади сечения и минимальной длине МС

Классификация по U

- **До 20 кВ**

Сухая изоляция из слоистых диэлектриков, компаунда или в некоторых случаях воздушная.

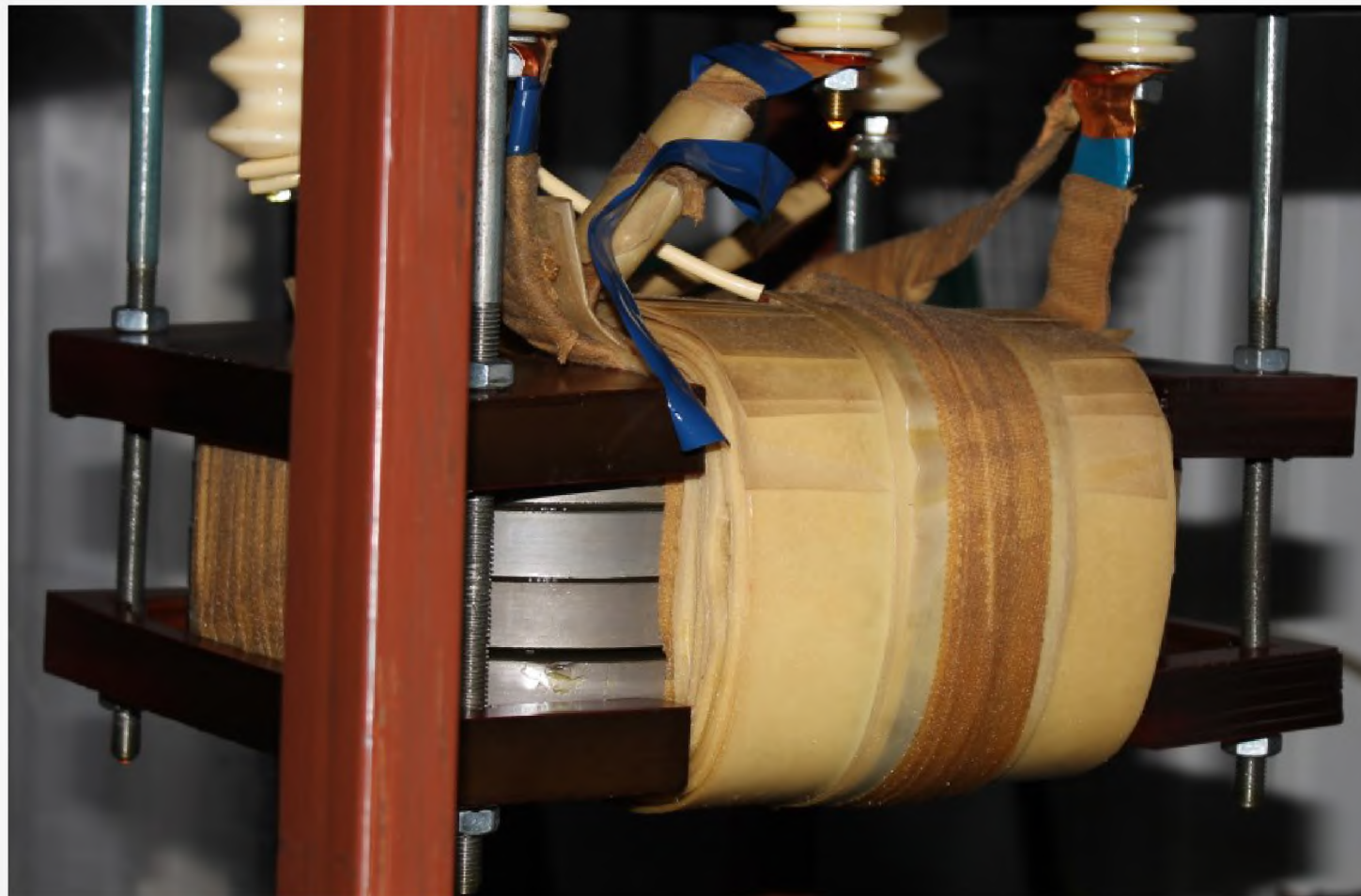
- **От 20 до 100 кВ**

Бумажно-масляная или бумажно-пленочно-масляная изоляция

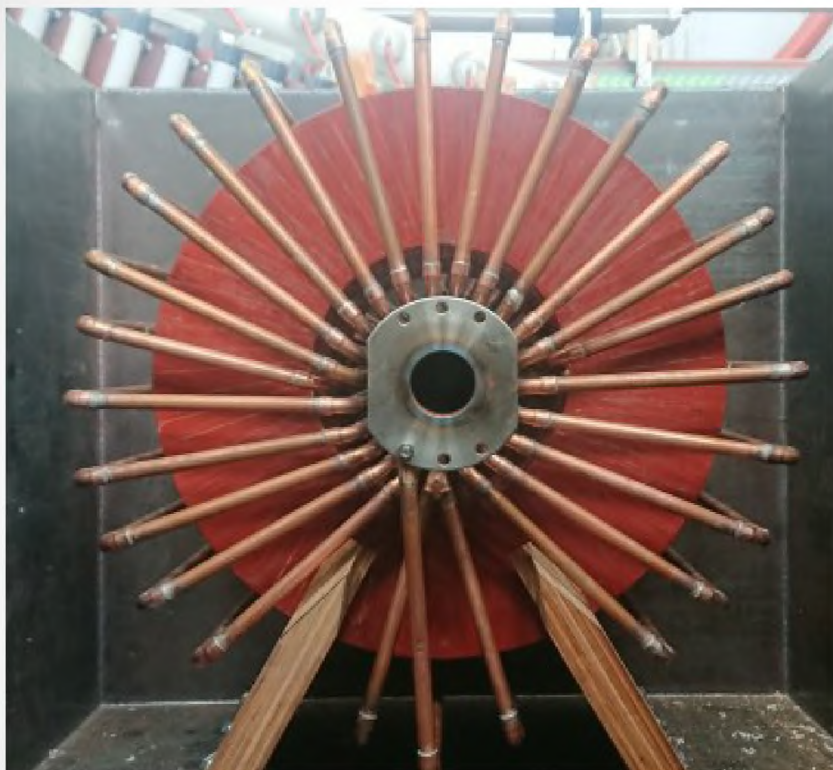
- **Более 100 кВ**

Лучший результат достигается применением чисто масляной изоляции с несущими элементами из бакелита или стекло-эпоксидных композитов.

Примеры

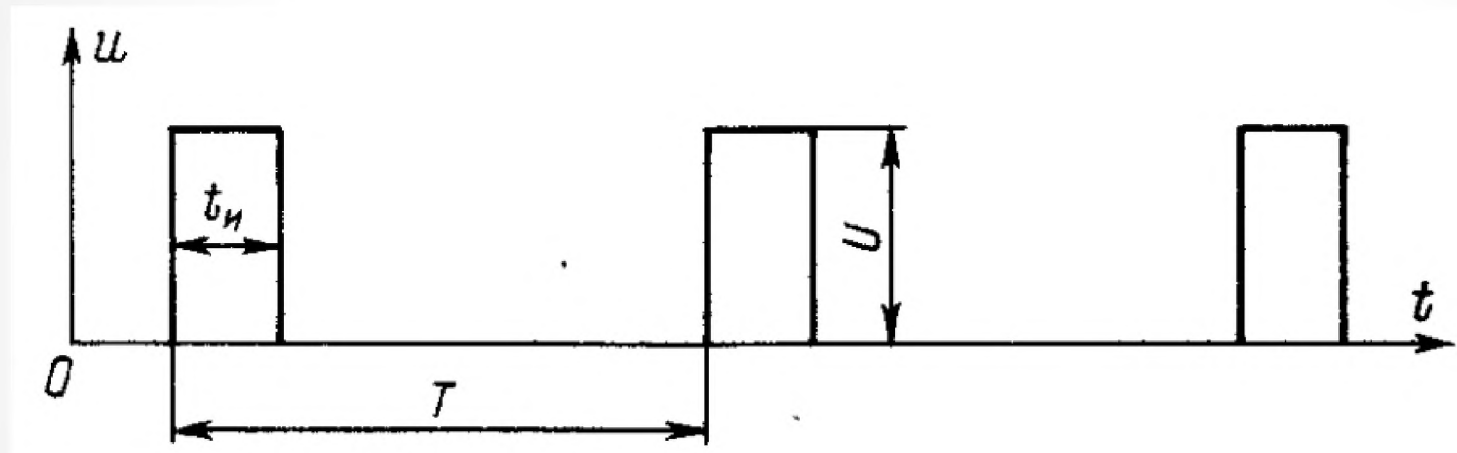


Примеры



Импульсный режим

Импульсный режим в мощных системах характеризуется большими значениями скважности импульсов.



$$q = \frac{T}{t_{и}} \text{ - скважность от } 10 \text{ до } 1000$$

$t_{и}$ - длительность импульса от 10^{-9} до 10^{-4} сек.

Схемотехника

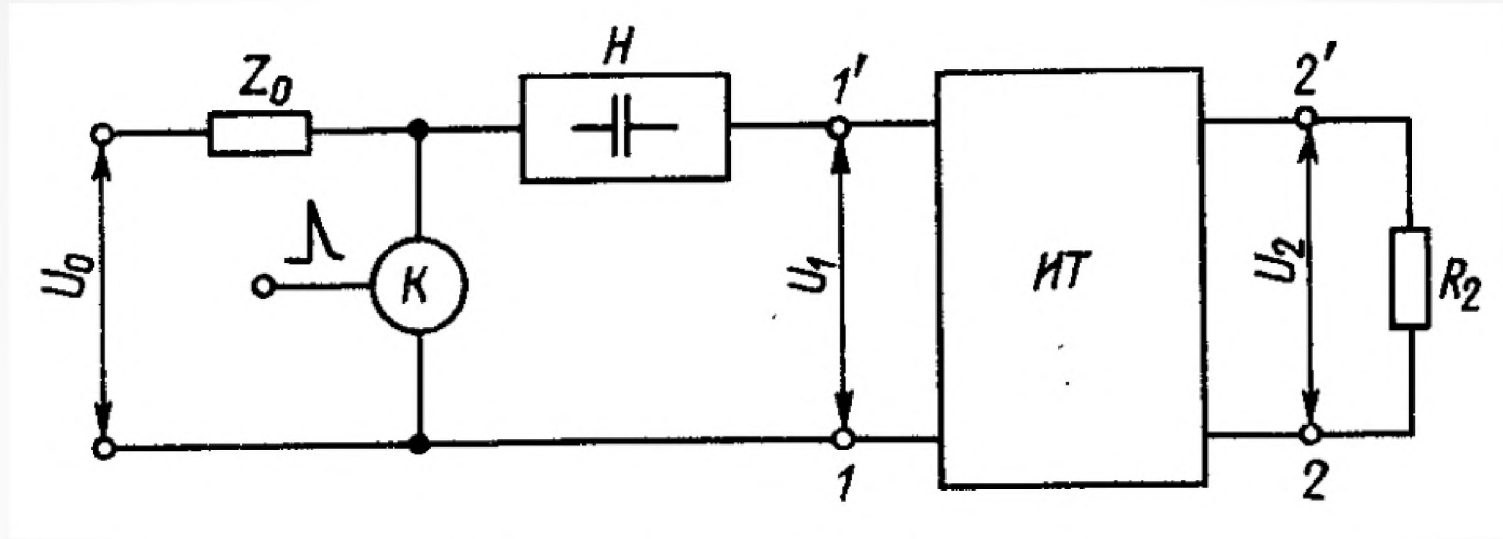


Схема генератора с импульсным трансформатором

$$q = \frac{T}{t_{\text{и}}} \quad - \text{скважность от } 10 \text{ до } 1000$$

$t_{\text{и}}$ - длительность импульса от 10^{-9} до 10^{-4} сек.

Схемотехника

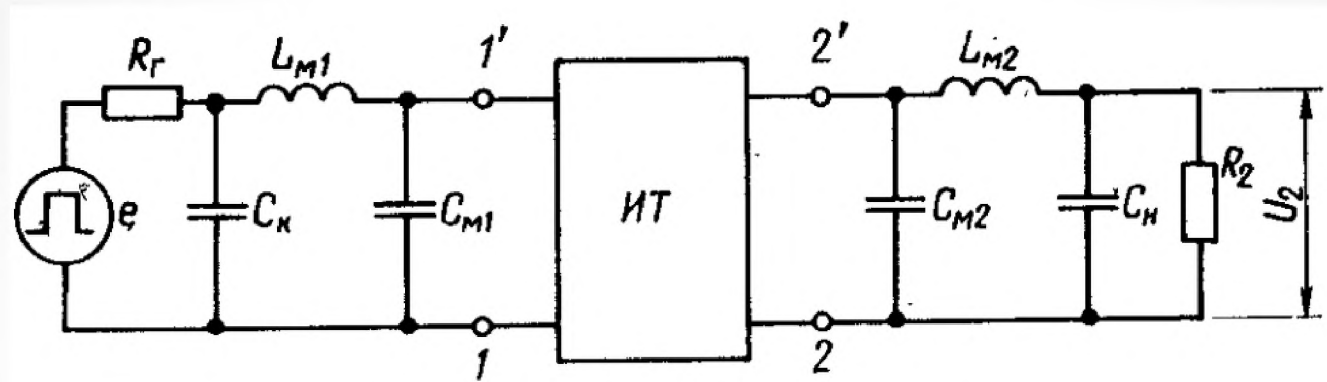


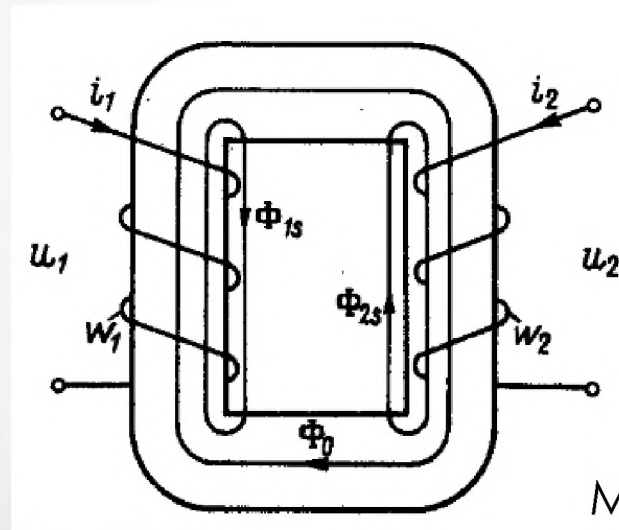
Схема замещения трансформаторной цепи

- C_k – ёмкость коммутатора;
- C_{M1}, C_{M2} – ёмкости монтажа;
- C_H – ёмкость нагрузки;
- L_{M1}, L_{M2} – индуктивность нагрузки;

Электромагнитные процессы

Общие сведения

Трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, имеющее две или более индуктивно связанные обмотки, предназначенное для преобразования посредством магнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока. Если **ТОКИ** имеют **ВИД ИМПУЛЬСОВ** – трансформатор называют **ИМПУЛЬСНЫМ**.

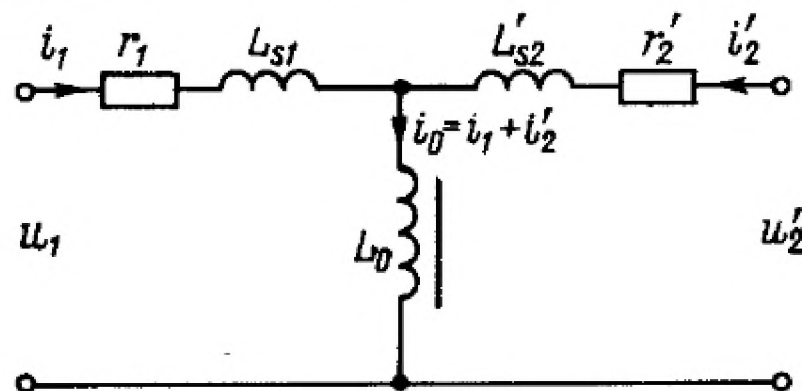


$$\frac{U_2}{U_1} \approx n \approx \frac{N_2}{N_1}$$

- Φ_0 – основной, рабочий магнитный поток
- Φ_{1s} – магнитный поток рассеяния обмотки 1
- Φ_{2s} – магнитный поток рассеяния обмотки 2

МДС – магнитодвижущая сила $F = \sum i_i \cdot w_i$

Схема замещения

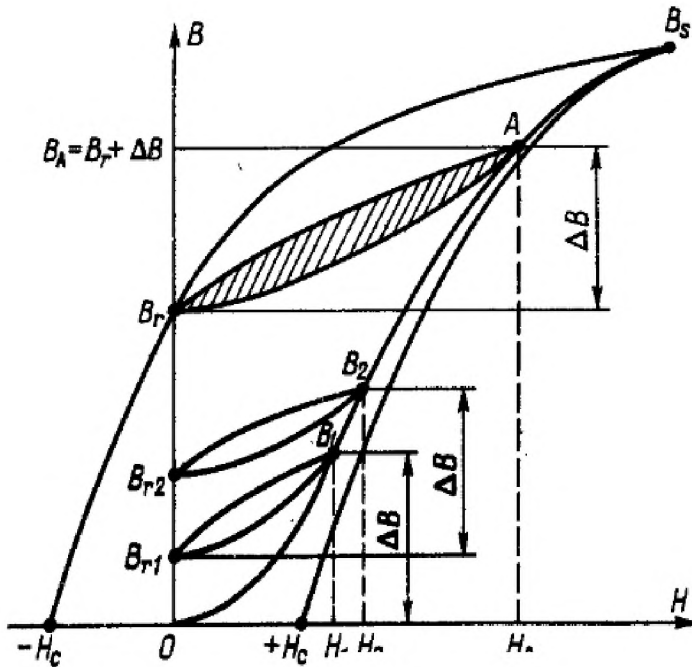


L_{s1}, L_{s2} – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмотки;
 $L_0 = w_1 \cdot \Phi_0 / i_0$ – нелинейная индуктивность, показывающая связь обмоток;
 r_1, r_2 – сопротивления обмоток.

Для практического применения данной схемы замещения (удобства расчетов) используется операция приведения числа витков в обмотках к одному значению (безразлично – к первичной или вторичной), аналогично как для обычных трансформаторов.

При этом ИТ характеризуются малыми временами протекания переходных процессов, примерно на 5 порядков меньше чем в трансформаторах на 50 Гц.

Приращение индукции



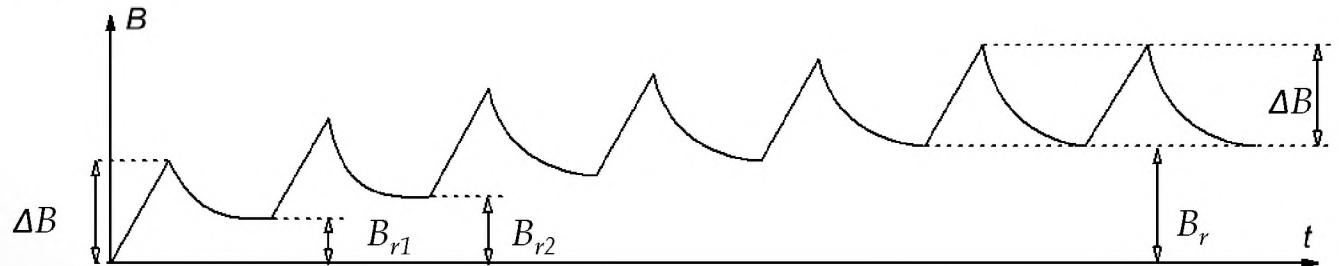
$$U_1 = w_1 \cdot \frac{d\Phi_0}{dt} = w_1 \cdot S_a \cdot \frac{dB}{dt}$$

$$B(t) = \frac{1}{W_1 S_a} \cdot \int_0^t U_1 dt + B(0)$$

$$\Delta B(t) = B(t) - B(0) = \frac{1}{W_1 S_a} \cdot \int_0^t U_1 dt$$

При $U_1 = \text{const}$

$$\Delta B(t_{\text{и}}) = \frac{U_1 t_{\text{и}}}{W_1 S_a}$$



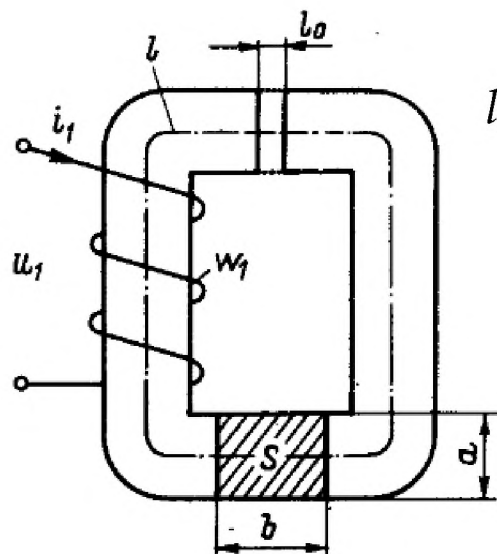
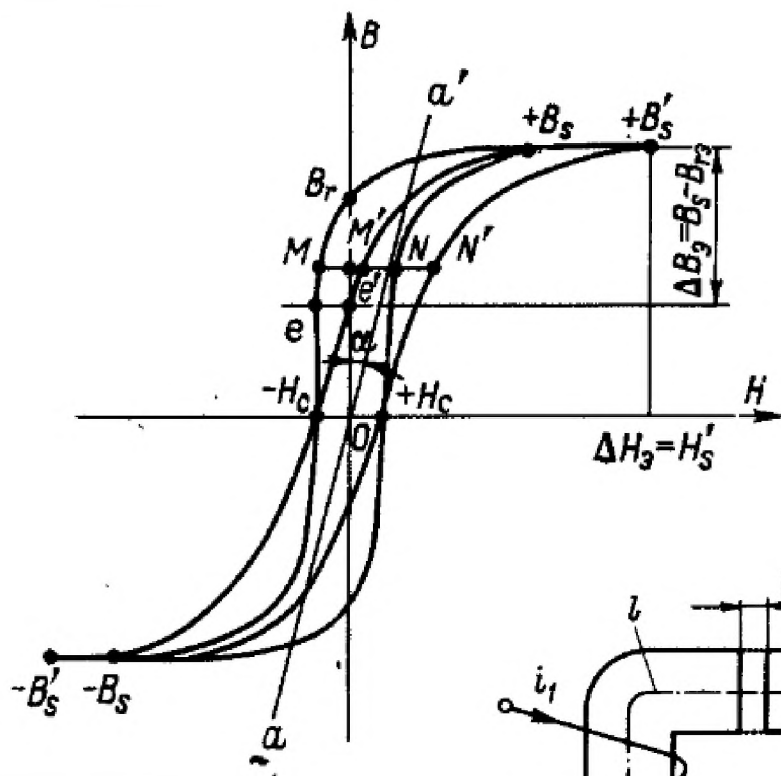
B_r – остаточная индукция;

B_r, A – предельный частный гистерезисный цикл;

$\frac{\Delta B}{\Delta H} = \mu_{\text{и}}$ – импульсная магнитная проницаемость $< \mu$.

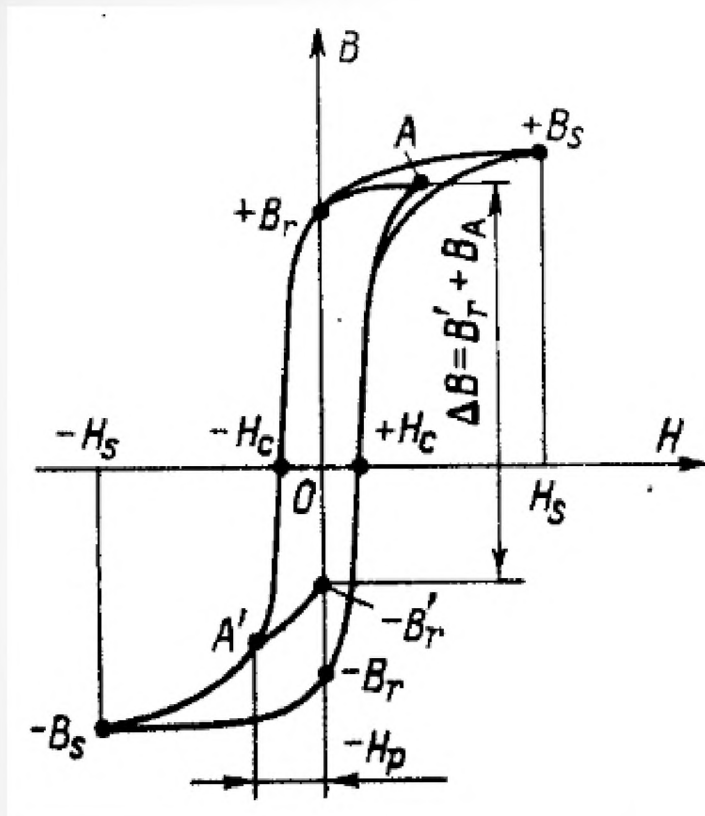
Снижение остаточной индукции

Введение в МС воздушного зазора в доли миллиметра по пути магнитного потока позволяет «наклонить» гистерезисный цикл, уменьшив тем самым остаточную индукцию и увеличив предельный частный гистерезисный цикл.



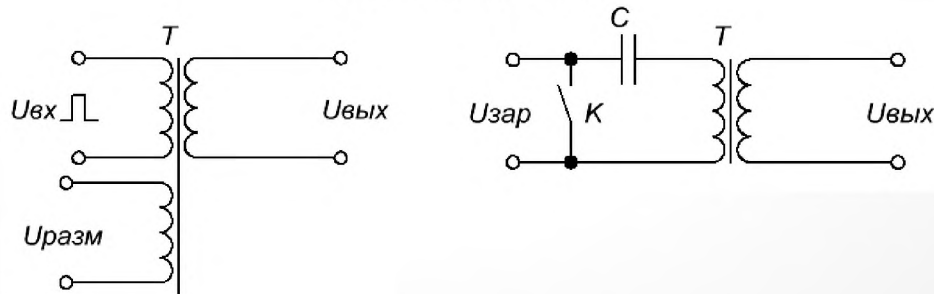
l_0 – длина воздушного зазора

Снижение остаточной индукции

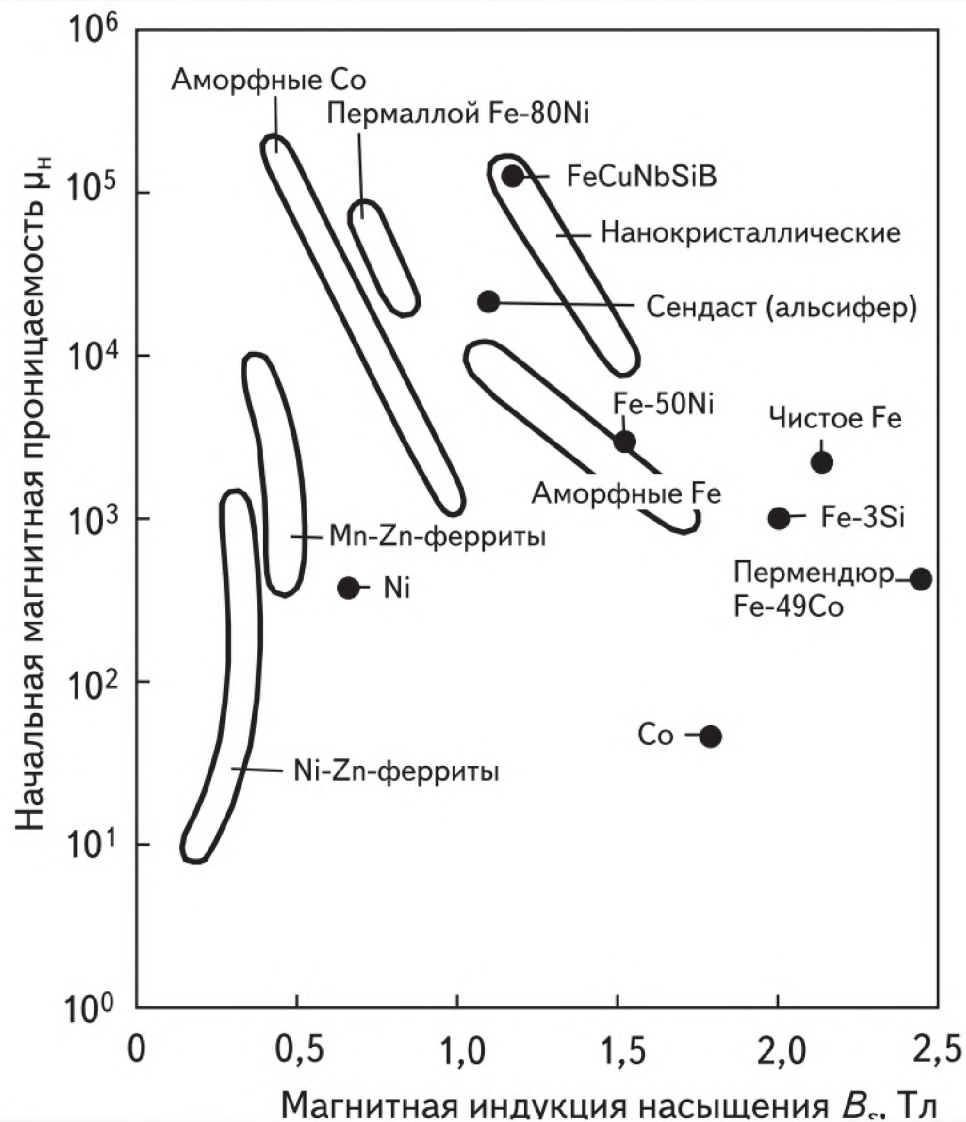


Введение в ИТ дополнительных размагничивающих обмоток или построение схемы с включением накопительного конденсатора последовательно с первичной обмоткой, так чтобы зарядный ток был противоположен зарядному.

Это позволяет получить значительно большее приращение индукции ΔB , используя обе ветви гистерезисного цикла, чем при введении воздушного зазора или без такового.



Материалы для МС

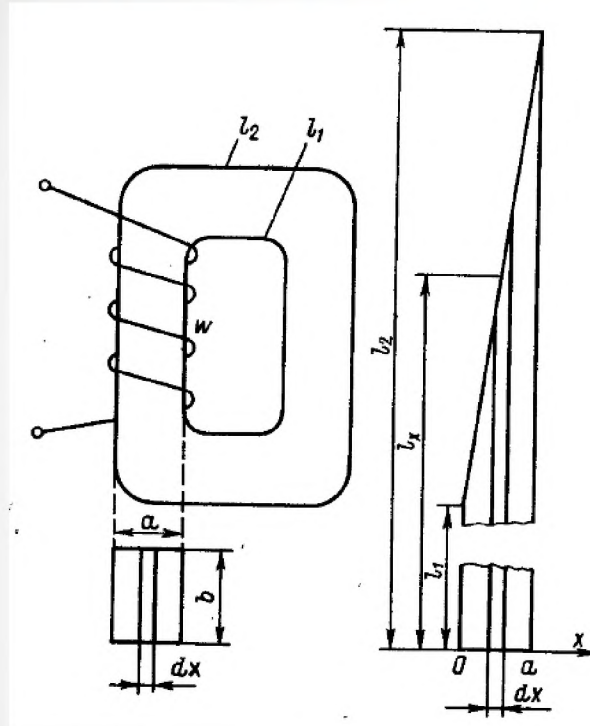


Потери в ИТ

Потери в ИТ складываются из потерь на перемагничивание МС, вихревые токи, магнитную вязкость, потери в междулистовой изоляции. Точный аналитический учет значительно затруднен из-за многофакторности влияний на указанные потери. Поэтому на практике после грубого расчета они определяются экспериментально.

Параметры обмоток

ИНДУКТИВНОСТЬ НАМАГНИЧИВАНИЯ.



$\int_l H dl = w_1 i_1$ - закон полного тока

$H_x = \frac{i_1 w_1}{l_x}$ - напряженность магнитного поля

$d\Phi_x = \mu \mu_0 H_x b k_a dx$ - магнитный поток

$$L_1 = \frac{w_1 \Phi_0}{i_1} = \frac{w_1}{i_1} \int_0^a d\Phi_x = \frac{\mu \mu_0 w_1^2 a b k_a}{l_2 - l_1} \ln \frac{l_2}{l_1}$$

при $\frac{l_2}{l_1} < 2$, что обычно для практики

$$L_1 = \frac{\mu \mu_0 w_1^2 S k_a}{l}$$

$k_a = \frac{S_a}{S}$ - коэффициент заполнения МС
сталью, для ИТ обычно принимается 0,7

Параметры обмоток

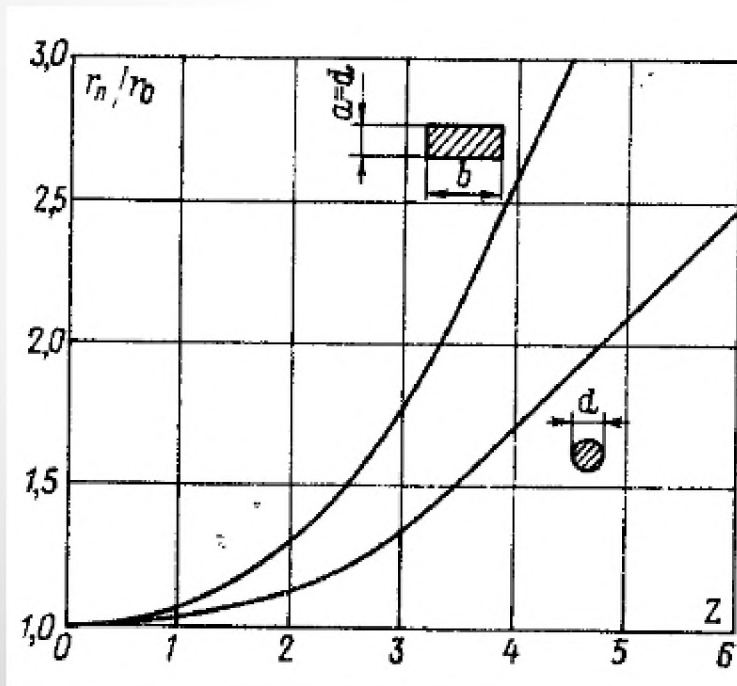
Сопротивление.

$$r_0 = \rho_{\theta} \frac{l}{S_M} - \text{сопротивление провода}$$

Учет скин-эффекта*

$Z = 1,4 d \sqrt{f/\rho}$ - функция Бесселя для синусоидального сигнала

$Z = 6d/\sqrt{t_{\text{и}}}$ - функция Бесселя для импульсного сигнала при $t=75^{\circ}\text{C}$



* Ицхоки Я. Импульсные трансформаторы. М.: Сов. радио 1949