

ИМПУЛЬСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Назначение импульсных трансформаторов, как и трансформаторов синусоидальных сигналов, состоит в преобразовании тока и напряжения сигнала, поданного на его первичную обмотку.

Принцип действия и устройство импульсного трансформатора

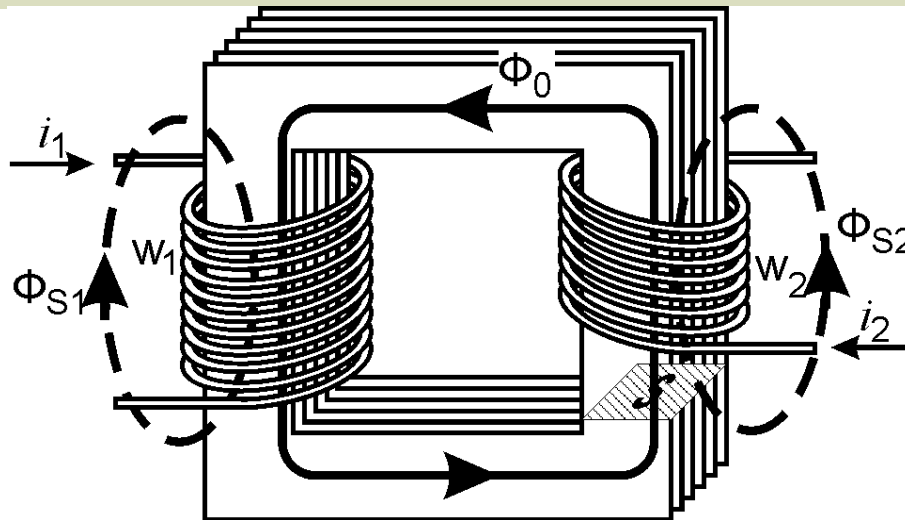


Рис. 2

Отношение э.д.с., наводимых в обмотках трансформатора потоком намагничивания Φ_0 , определяется отношением чисел витков первичной и вторичной обмоток, называемым коэффициентом трансформации

Основные уравнения трансформатора

Коэффициент трансформации

$$n = \frac{w_2}{w_1} = \frac{u_2(t)}{u_1(t)} \approx \frac{i_1(t)}{i_2(t)}$$

Приведенное сопротивление нагрузки

$$R'_2 = \frac{u_1(t)}{i_1(t)} = \frac{R_2}{n^2}, \quad R_2 = \frac{u_2(t)}{i_2(t)}.$$

Эквивалентная схема трансформатора

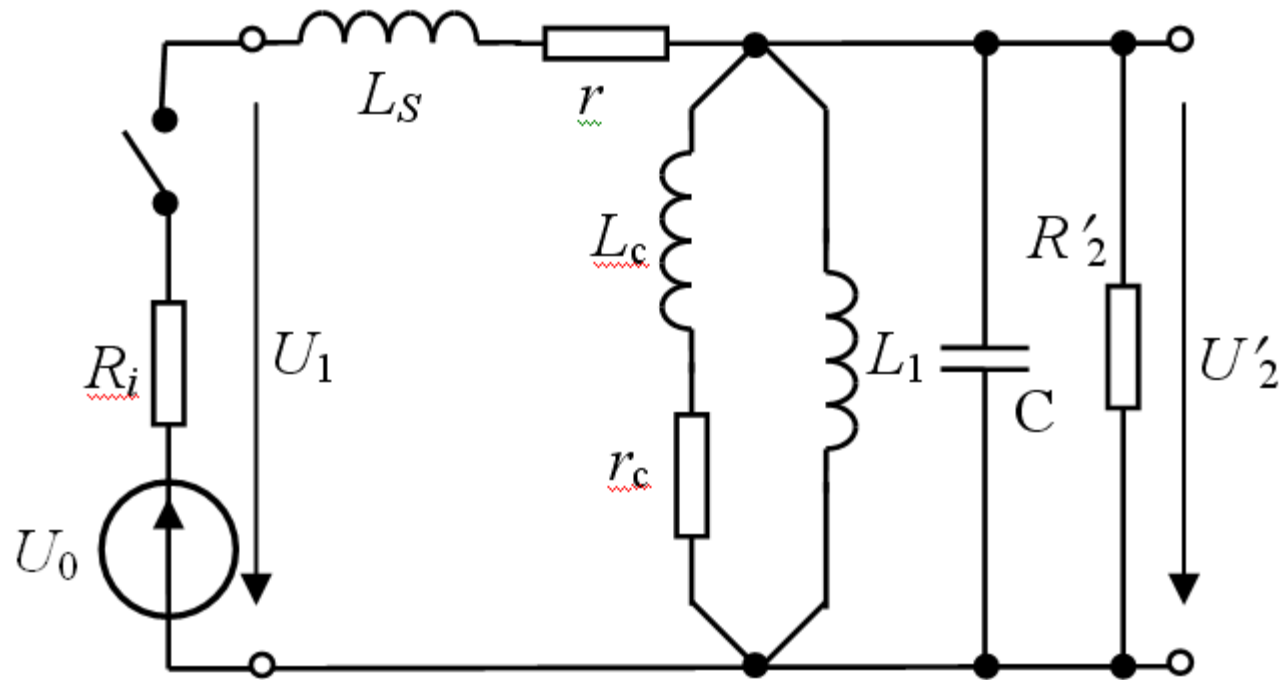


Рис. 3

$r_c = U^2 / P_{x.x.}$ - сопротивление потерь в стали из-за вихревых токов и гистерезиса;

L_1 - индуктивность намагничивания;

$C = C_1 + C_2 n^2 + C_n n^2$ - суммарная емкость двух обмоток и нагрузки;

$R'_2 = R_2 / n^2$ - приведенное сопротивление нагрузки;

U_0, R_i - параметры источника сигнала;

$L_S = L_{S1} + L_{S2} / n^2$ - индуктивность рассеяния

Переходный процесс формирования импульса

1. Формирование фронта (быстрый)
2. Формирование полочки (медл.)
3. Формирование среза (быстрый)

ФОРМИРОВАНИЕ ФРОНТА ИМПУЛЬСА (экв. схема и уравнения)

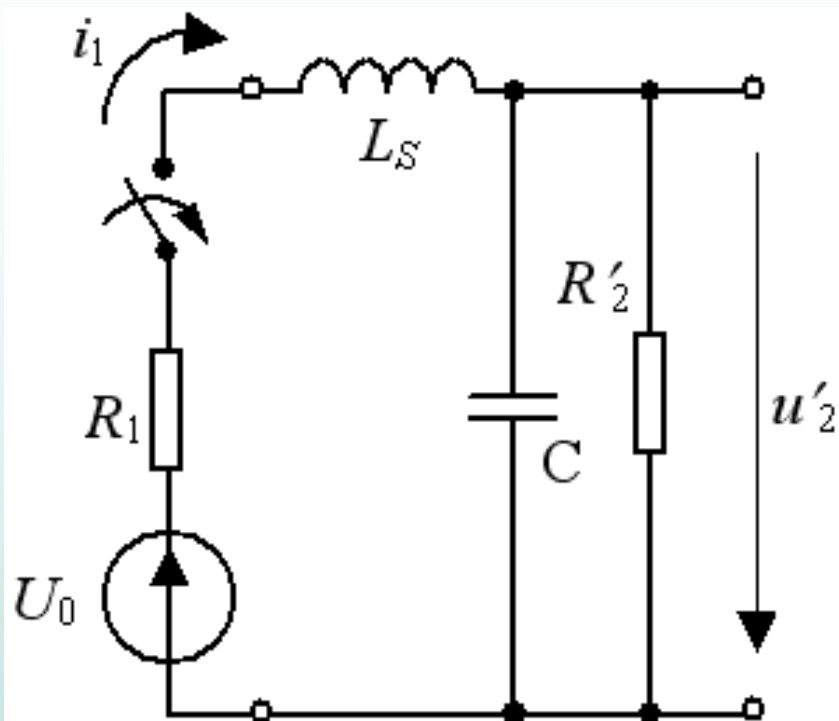


Рис. 4

$$U'_{2\text{ном}} = U_0 \frac{R'_2}{R_1 + R'_2}.$$

$$\begin{cases} R_1 i_1 + L_S \frac{di_1}{dt} + u'_2 = U_0; \\ i_1 = C \frac{du'_2}{dt} + \frac{u'_2}{R'_2}. \end{cases}$$

$$\frac{d^2 u'_2}{dt^2} + \left(\frac{R_1}{L_S} + \frac{1}{R'_2 C} \right) \frac{du'_2}{dt} + \frac{R_1 + R'_2}{R'_2} \cdot \frac{1}{L_S C} \cdot u'_2 = \frac{U_0}{L_S C}$$

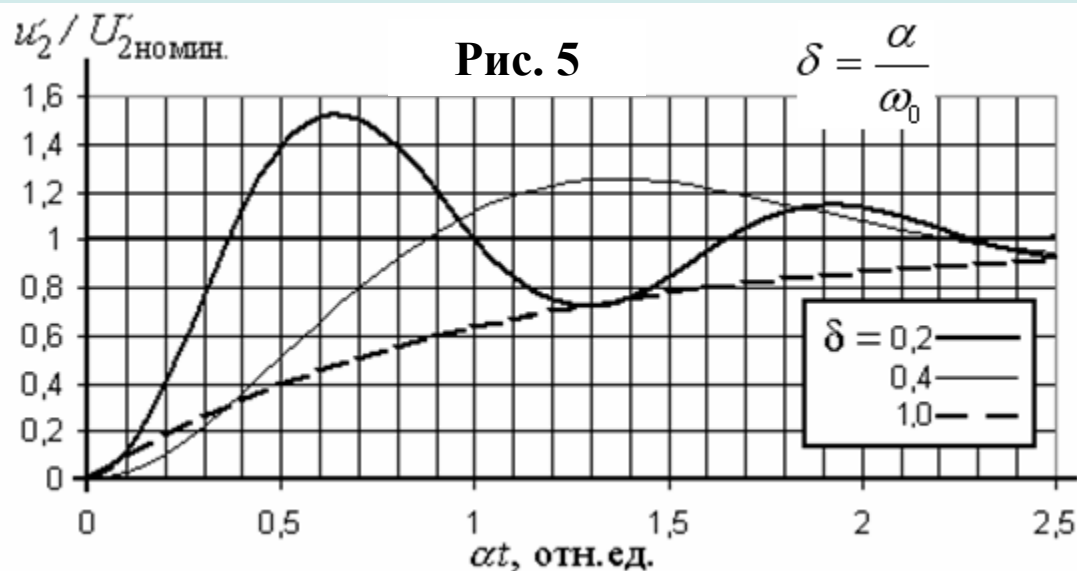
$$(t = 0) \text{ условиями } u'_2 = 0, \frac{du'_2}{dt} = 0.$$

ФОРМИРОВАНИЕ ФРОНТА ИМПУЛЬСА (решения)

При малых $\left(\frac{R_1}{L_S} + \frac{1}{R_2' C} \right)$ решение имеет вид затухающих колебаний:

$$u_2' = U_{2\text{НОМ}}' \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) \right],$$

где $\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R_1}{L_S} + \frac{1}{R_2' C} \right)$, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$, $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_S C} \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right)}$.



при $\delta = 0,7 \div 0,8$

$$t_{\Phi} \approx 3 \sqrt{L_S C} \sqrt{\frac{R_2'}{R_2' + R_1}}$$

при $R_1 = R_2'$

$$t_{\Phi} = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{L_S C} \approx 2 \sqrt{L_S C}$$

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛОЧКИ ИМПУЛЬСА

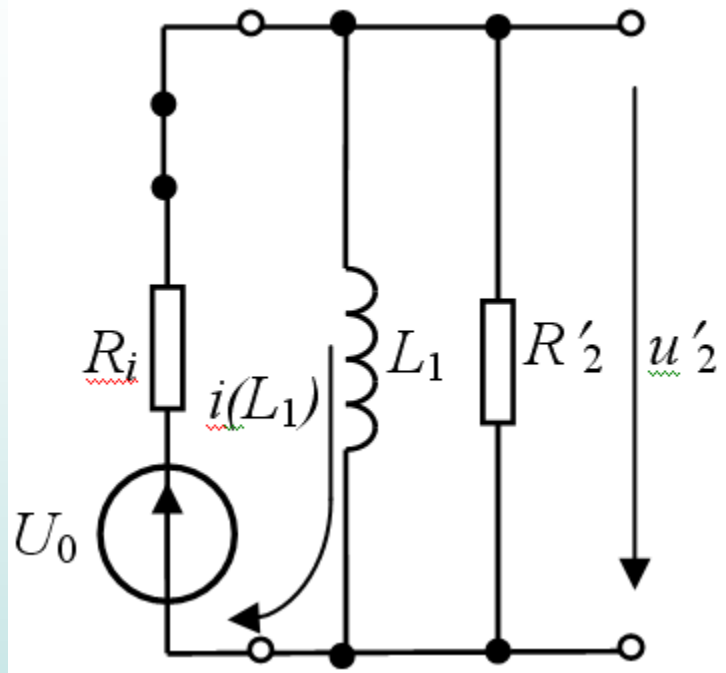


Рис. 6

единственный реактивный элемент (L_1),
 дифф. уравнение цепи имеет первый порядок.
 спад плоской вершины

$$\Delta = \frac{\Delta u'_2}{u'_2} = \frac{\Delta u_2}{u_2} = \frac{t_u}{\tau},$$

$$\tau = \frac{L}{R_3}, \quad R_3 = R_1 \parallel R'_2 = \frac{R_1 R'_2}{R_1 + R'_2}.$$

Если $R_1 = R'_2 = \rho$, то выбирать L_1 следует из $L_1 \geq \frac{t_u \cdot \rho}{2\Delta_{\text{доп}}}$.

ФОРМИРОВАНИЕ СРЕЗА ИМПУЛЬСА

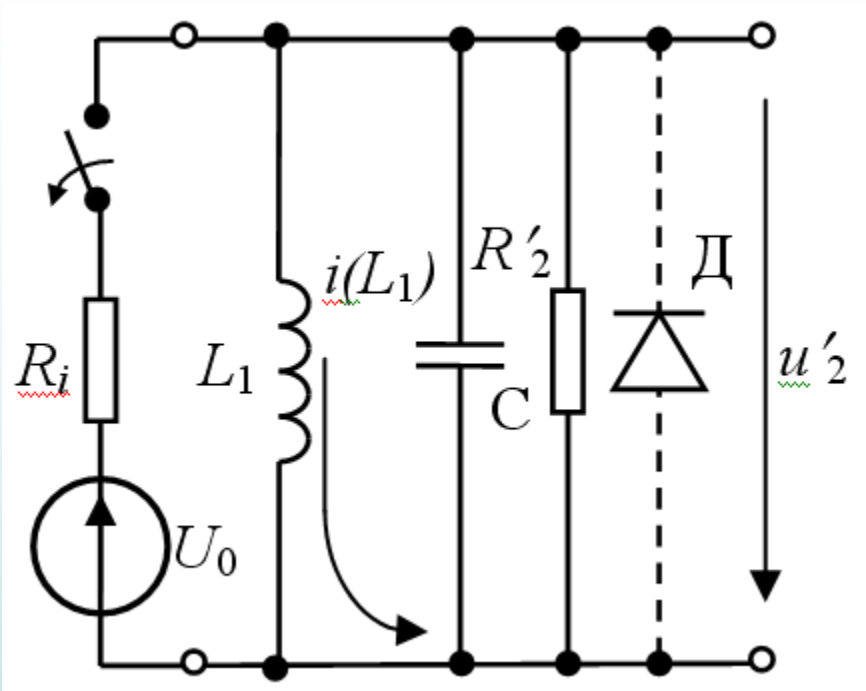


Рис. 7

В схеме с диодом практически вся энергия, запасенная в сердечнике, рассеивается внутри диода в виде тепла

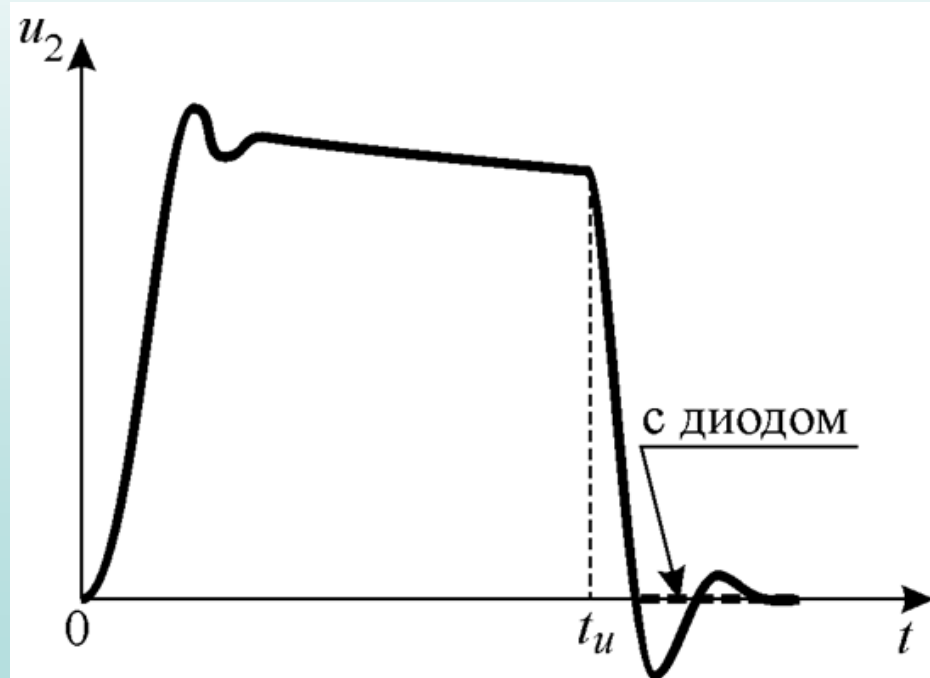
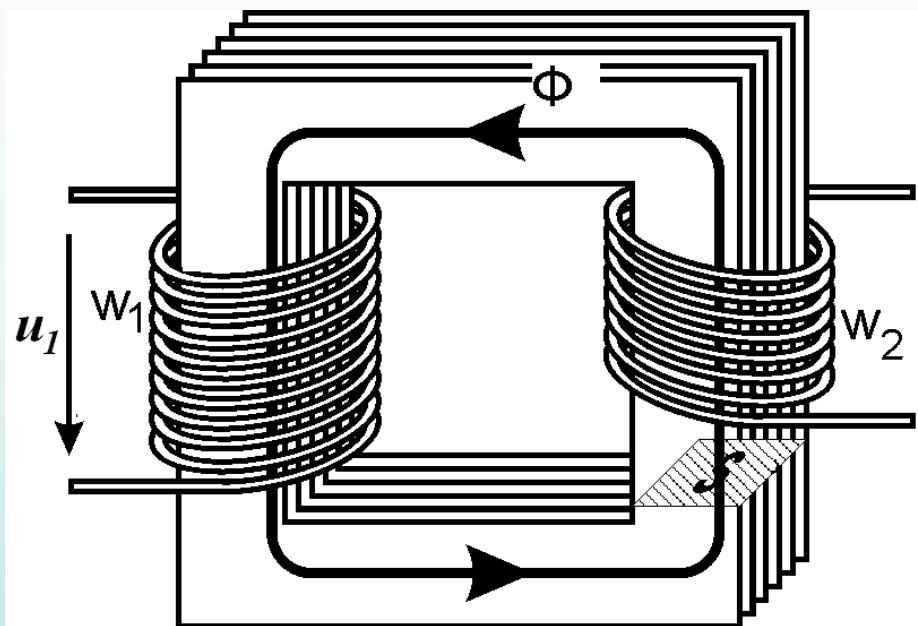


Рис. 8

ПРОЦЕССЫ В СЕРДЕЧНИКАХ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ



$$u_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad \Phi = B \cdot S$$



$$u_1 = w_1 S \frac{dB}{dt}$$

$$u_1 = \text{const} = U_1$$



$$\Delta B = \frac{1}{w_1 S} \int_0^{t_u} u_1 dt = \frac{U_1 \cdot t_u}{w_1 S}$$

ПРОЦЕССЫ В СЕРДЕЧНИКАХ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ (2)

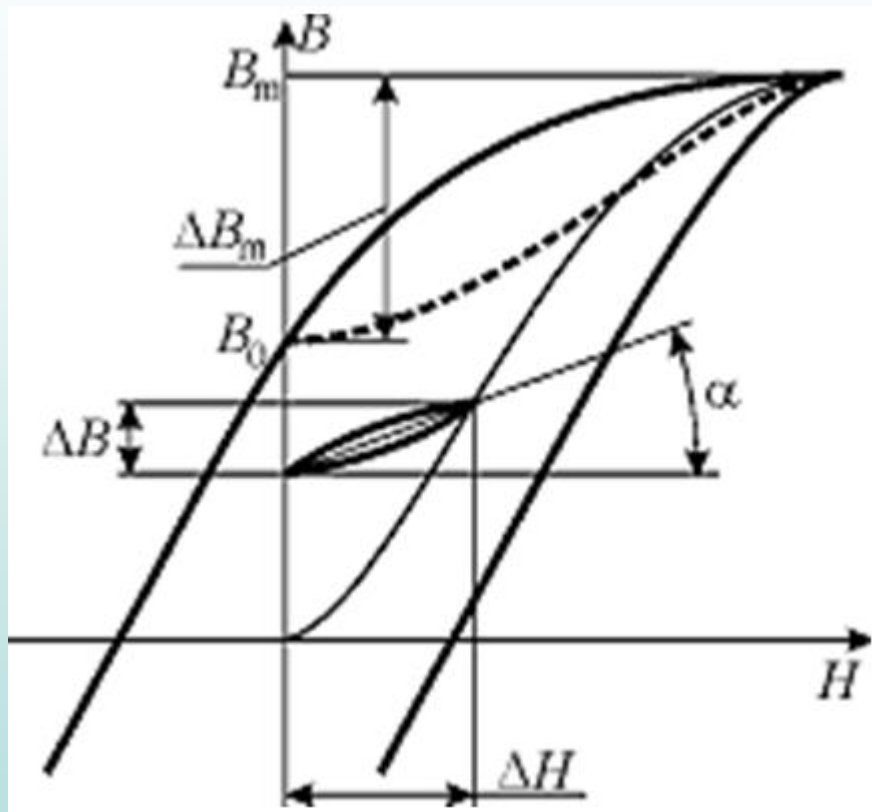


Рис. 9

$$\Delta B \leq \Delta B_m$$

Неполное использование ферромагнетика в импульсном трансформаторе может быть скомпенсировано лишь увеличением площади сечения, а значит, массы сердечника трансформатора

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \operatorname{tg} \alpha$$

ПРОЦЕССЫ В СЕРДЕЧНИКАХ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ (3)

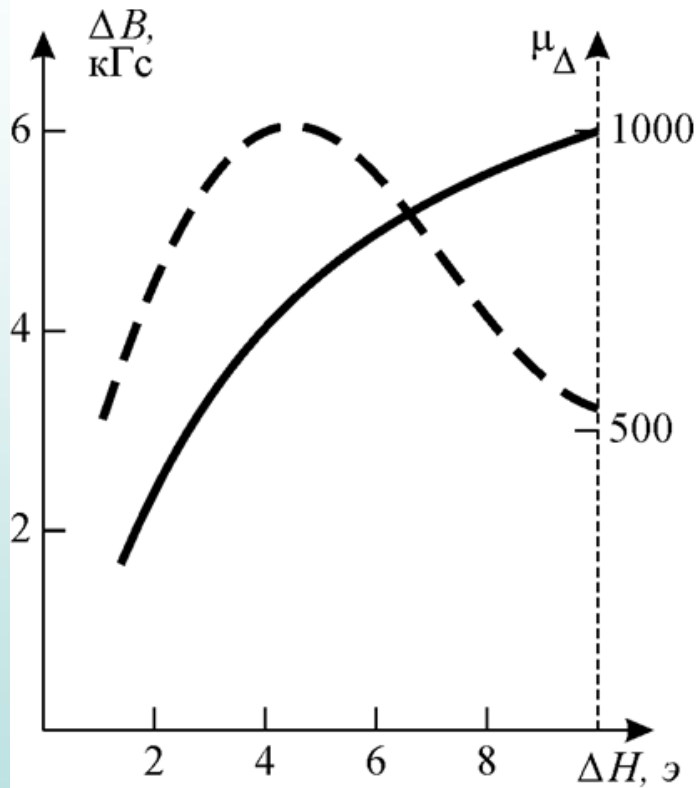
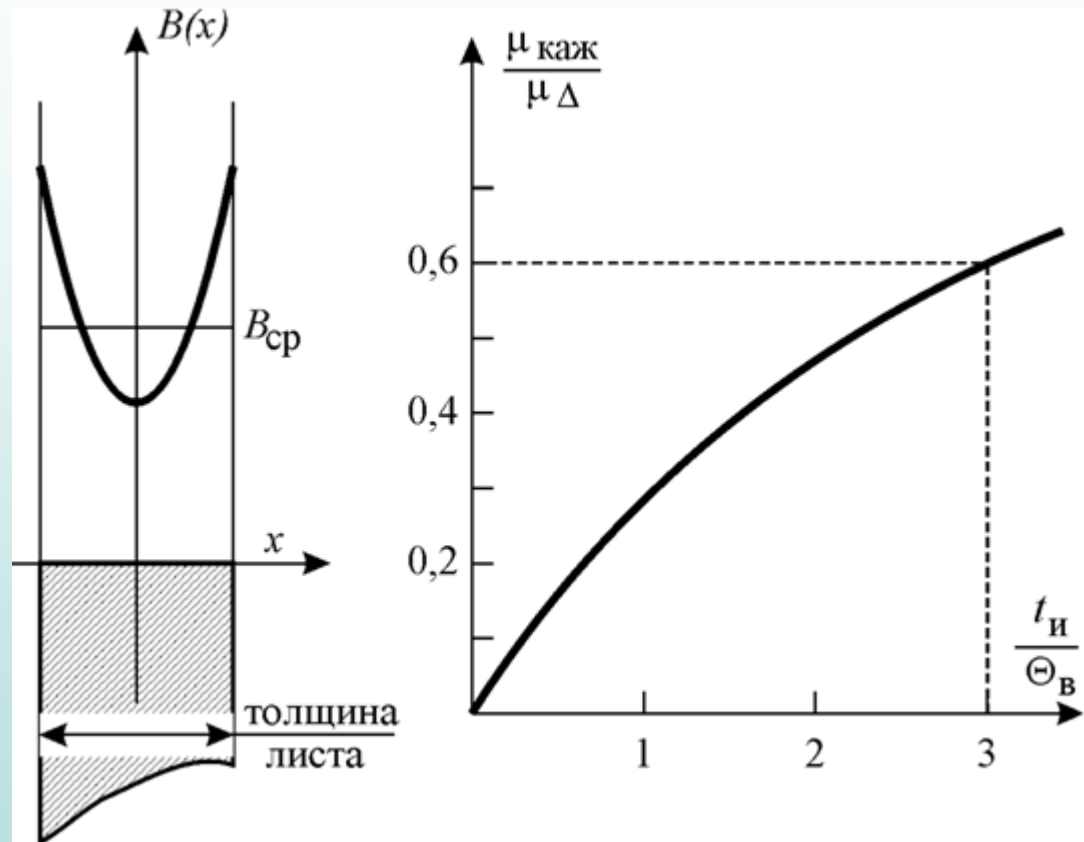


Рис. 10. Характеристики стали
Э310



$$L_1 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu_{\Delta} \cdot \frac{w_1^2 \cdot S}{l}$$

Паразитные параметры трансформаторов РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЙЯНИЯ

контур № 0 $\oint_{\text{№0}} \vec{H} d\vec{l} = 0$

контур № 1 $\oint_{\text{№1}} \vec{H} d\vec{l} = i_1 w_1 \cdot \frac{x}{d_1}$

$\mu_{\Delta} \gg 1 \quad H_{\text{слева}} \ll H_{\text{справа}}$



$$H_1 = \frac{i_1 w_1}{h} \cdot \frac{x}{d_1} = \frac{i_2 w_2}{h} \cdot \frac{x}{d_1}$$

контур № 3 $H_{12} = \frac{i_2 w_2}{h}$

контур № 4 $H_2 = \frac{i_2 w_2}{h} \cdot \left(1 - \frac{x - d_1 - \Delta_{12}}{d_2} \right)$

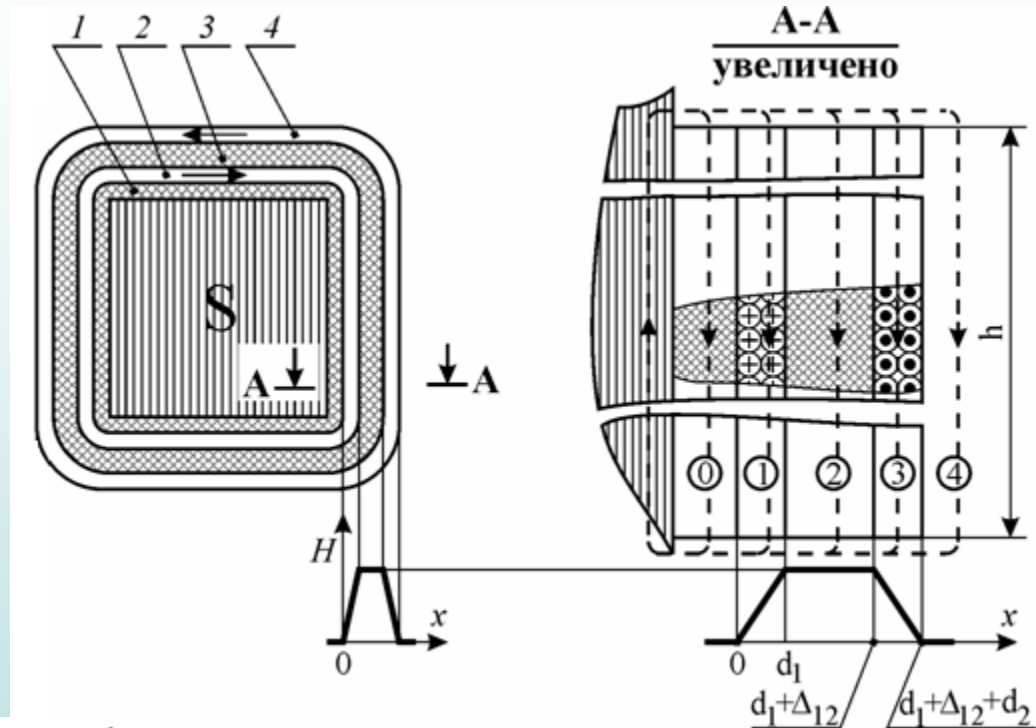
$$dW_M \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right] = \frac{H \cdot B}{2} = \mu \mu_0 \frac{H^2}{2} \approx \mu_0 \frac{H^2}{2}$$

$$W_M = \frac{\mu_0 i_2^2 w_2^2 p}{2h} \left(\Delta_{12} + \frac{d_1 + d_2}{3} \right)$$

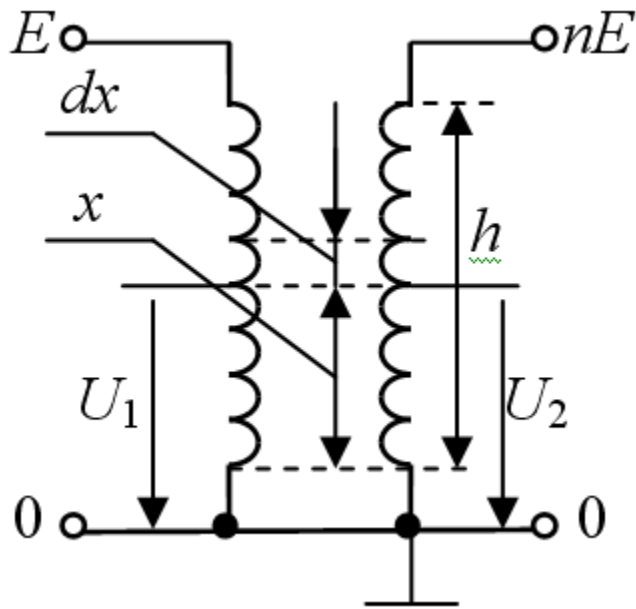
$$W_M = L \frac{i^2}{2}$$



$$L'_S = \frac{\mu_0 w_1^2 p n^2}{h} \left(\Delta_{12} + \frac{d_1 + d_2}{3} \right)$$



Паразитные параметры трансформаторов РАСЧЕТ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЕМКОСТИ



При $h, p \gg \Delta_{12}$
Статическая емкость между обмотками $C_{12} = \epsilon\epsilon_0 \frac{np}{\Delta_{12}}$

В сечении x : $U_1 = E \frac{x}{h}$.
 $U_x = U_2 - U_1 = E \frac{x}{h} (n-1)$.

Энергия электрического поля в объеме $dx \cdot p \cdot \Delta_{12}$:

$$dW_{эл12} = C_{12} \cdot \frac{dx}{h} \cdot \frac{U_x^2}{2}$$

Энергия электрического поля в межобмоточной изоляции

$$W_{эл12} = \frac{1}{6} C_{12} E^2 (n-1)^2 = C_0 \frac{E^2}{2}$$



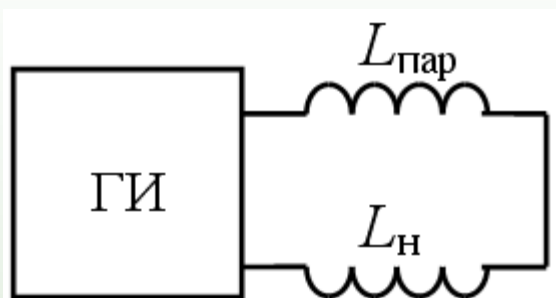
$$C_0 = \frac{1}{3} C_{12} (n-1)^2$$



РАЗДЕЛЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ:

- *Последовательность расчета импульсных трансформаторов* – АГП, МИТ, с. 30-31
- *Трансформаторы на линиях с переменным волновым сопротивлением*– АГП, МИТ, с. 50-53
- *Трансформаторы на отрезках линий*– АГП, МИТ, с. 53-57

ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БОЛЬШИХ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ



$$\eta = \frac{L_{\text{Н}}}{L_{\text{Н}} + L_{\text{пар}}}$$

Через понижающий трансформатор

$$\eta = \frac{L_{\text{Н}}/n^2}{L_{\text{Н}}/n^2 + L_{\text{пар}}}$$

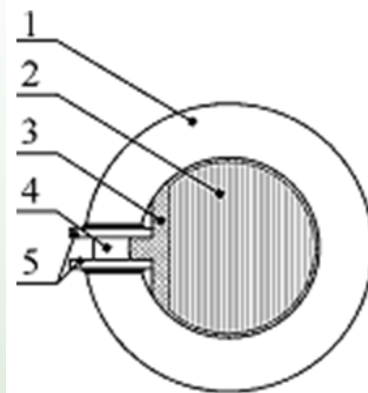
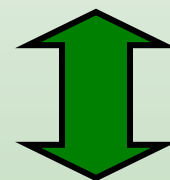
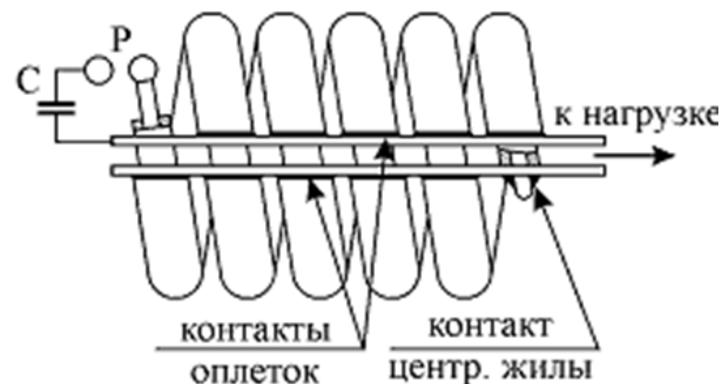


Рис. 16



$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{n+1} < 1.$$

НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Эксплуатационные характеристики:

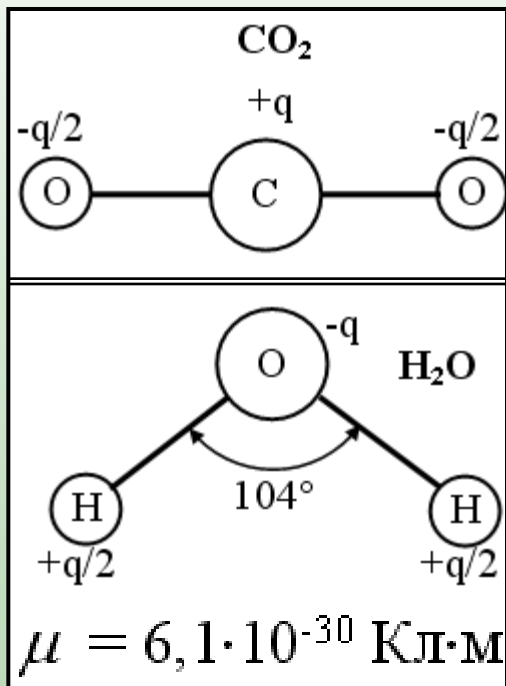
- предельная плотности запасенной энергии;
- к.п.д.;
- время хранения и вывода энергии

Классификация:

- емкостные;
- индуктивные;
- отрезки линий передачи или искусственные цепочечные линии;
- Механические.

ЕМКОСТНЫЕ НАКОПИТЕЛИ

$$dW_E \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right] = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{E^2}{2}$$



Водяной накопитель

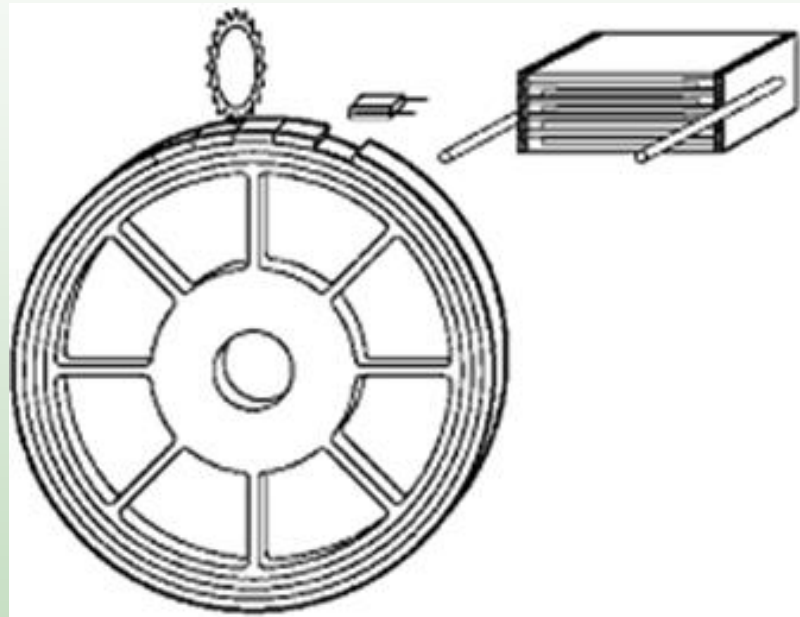
$$\varepsilon = 81. E_{\text{пр}} \approx 700 \text{ кВ} / \text{см.}$$

$$dW_E \approx 0,3 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

- Непрерывная очистка;
- Вакуумирование + избыточное давление;
- Время хранения 1÷2 мкс

ЕМКОСТНЫЕ НАКОПИТЕЛИ

Пленочные, металлопленочные конденсаторы

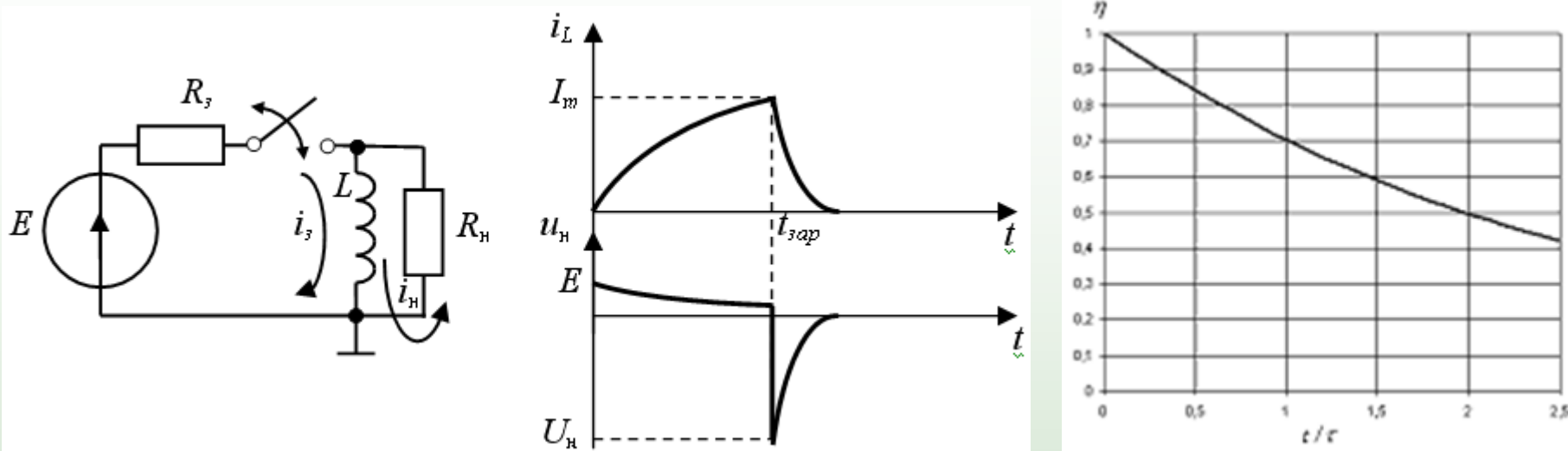


Механизм самозалечивания

РАЗДЕЛ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ:

- *Расчет допустимых амплитуд переменных составляющих напряжения на конденсаторах* – АГП, МИТ, с. 63-65

ИНДУКТИВНЫЕ НАКОПИТЕЛИ



Заряд от низковольтного источника ($R_H \gg R_3$)

$$\tau_3 = \frac{L}{R_3} \quad \tau_p = \frac{L}{R_H} \ll \tau_3 \quad dW_{\text{м}} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right] = \mu\mu_0 \frac{H^2}{2} \ll 40 \text{ Дж} / \text{см}^3$$

$$W_{\text{м}} = L \frac{i_L^2}{2} \quad W_{\text{ном}} = \int_0^t R \frac{i_L^2}{2} dt$$

РАЗДЕЛ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ:

- *Прочие виды накопителей*
– АГП, МИТ, с. 68-69