

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)  
*Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)*

**Н.И. Кузбных**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

*Руководство к лабораторной работе для студентов специальности  
211000 Конструирование и технология электронных средств*

**2014**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1 Введение.....</b>	<b>3</b>
<b>2 Краткие теоретические сведения .....</b>	<b>3</b>
2.1 Принцип функционирования импульсного трансформатора.....	3
2.2 Искажения выходных импульсов .....	8
2.2.1 Постановка задачи .....	8
2.2.2 Формирование переднего фронта выходного импульса .....	10
2.2.3 Формирование вершины выходного импульса .....	12
2.2.4 Формирование среза выходного импульса .....	13
2.3 Требования к параметрам и конструктивные особенности импульсных трансформаторов.....	14
<b>3 Описание лабораторной установки.....</b>	<b>15</b>
<b>4 Методические указания по проведению исследований .....</b>	<b>17</b>
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований ТИ.....	17
4.2 Аналитический расчет параметров, характеризующих искажения выходного импульса ТИ .....	19
4.3 Обработка и анализ результатов исследований .....	19
<b>5 Контрольные вопросы для самопроверки.....</b>	<b>20</b>
<b>Рекомендуемая литература.....</b>	<b>20</b>

## 1 ВВЕДЕНИЕ

*Импульсный трансформатор (ТИ) – это статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования по амплитуде кратковременных импульсов напряжения (тока) и передачи их из источников импульсных сигналов в нагрузку.* ТИ также используется для согласования и гальванической развязки источника сигнала и нагрузки. Импульсные трансформаторы применяются в радиолокационной, телевизионной и измерительной технике, в источниках вторичного электропитания с преобразованием частоты, в импульсных усилителях и других импульсных устройствах.

*Основным требованием к ТИ является обеспечение минимальных искажений передаваемого импульса от источника сигнала в нагрузку.*

Конструктивно ТИ состоит из катушки, магнитопровода и элементов стяжки сердечника и крепления трансформатора в аппаратуре. Внешне ТИ ничем не отличаются от трансформаторов питания (ТП). Однако указанные выше требования минимальных искажений достигаются путем минимизации паразитных параметров – индуктивности рассеяния и собственной емкости и обеспечения максимальной величины индуктивности первичной обмотки. Уменьшение паразитных параметров достигается существенным изменением конструкции катушки, по сравнению с трансформатором питания. Катушка секционирована, используются экраны между первичной и вторичной обмотками, между обмотками и сердечником и т.д. Так как магнитопровод в ТИ работает с существенным подмагничиванием, то для обеспечения максимальной индуктивности первичной обмотки в магнитопровод вводится оптимальный немагнитный зазор, тогда как в трансформаторах питания немагнитный зазор крайне не желательный.

Принцип функционирования ТИ так же существенно отличается от принципа функционирования ТП.

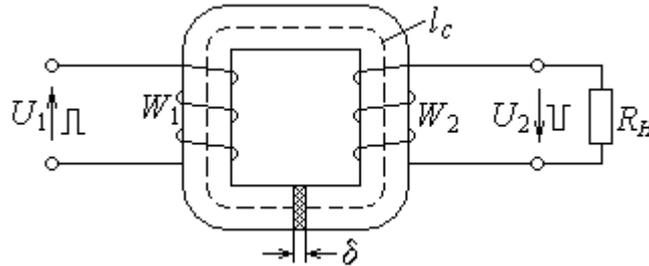
В цель данной работы ставится:

- а) изучение теоретических основ функционирования импульсного трансформатора;
- б) экспериментальные исследования влияния параметров ТИ, источника сигнала и нагрузки на искажения передаваемого импульса;
- в) теоретические исследования влияния параметров ТИ на искажения передаваемого импульса.

## 2 КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

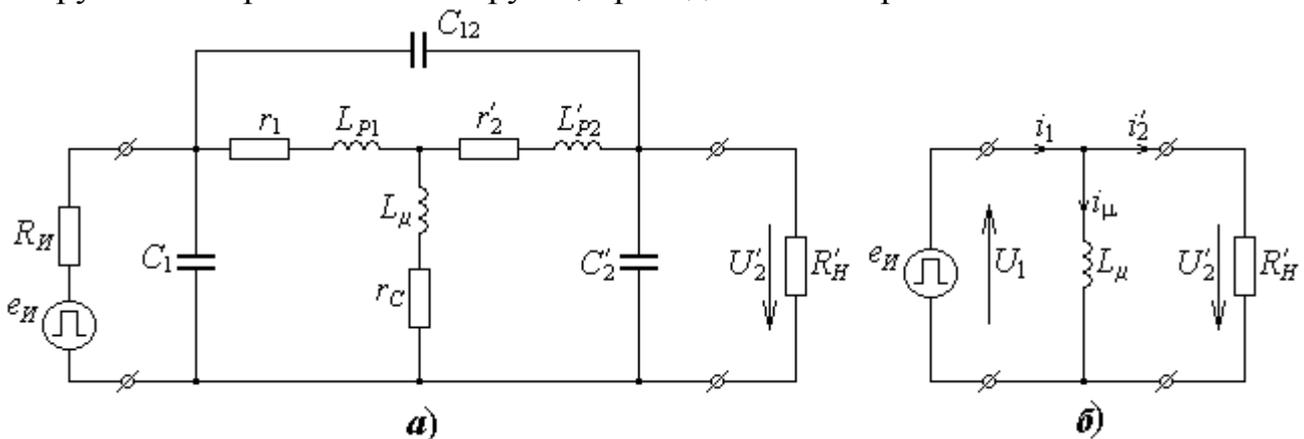
### 2.1 Электромагнитная схема и электрическая схема замещения ТИ

Электромагнитная схема простейшего двухобмоточного ТИ представлена на рисунке 2.1, где введены следующие условные обозначения:  $U_1$  – входное импульсное напряжение;  $U_2$  – напряжение на нагрузке;  $W_1, W_2$  – число витков первичной и вторичной обмоток;  $l_c$  – средняя силовая линия магнитного потока в сердечнике;  $\delta$  – величина немагнитного зазора.



**Рисунок 2.1 - Электромагнитная схема двухобмоточного импульсного трансформатора**

Так как токи и напряжения ТИ несинусоидальные и содержат высокочастотные составляющие, то в электрической схеме замещения ТИ, в отличие от ТП, необходимо учитывать все паразитные параметры – индуктивности рассеяния и паразитные емкости обмоток и нагрузки. Полная электрическая схема замещения ТИ представлена на рисунке 2.2,а. В ней введены условные обозначения:  $e_H, R_H$  – эдс и внутреннее сопротивление импульсного источника;  $r_1, L_{P1}, C_1$  – активное сопротивление, индуктивность рассеяния и собственная емкость первичной обмотки;  $r'_2, L'_{P2}, C'_2$  – активное сопротивление, индуктивность рассеяния и собственная емкость вторичной обмотки (включая емкость нагрузки), приведенные к первичной обмотке;  $L_\mu$  – индуктивность первичной обмотки;  $r_c$  – сопротивление, эквивалентное активным потерям в сердечнике;  $C_{12}$  – емкость между первичной и вторичной обмотками;  $R'_H$  и  $U'_2$  – сопротивление нагрузки и напряжение на нагрузке, приведенные к первичной обмотке.



**Рисунок 2.2 - Полная (а) и идеализированная (б) электрические схемы замещения двухобмоточного импульсного трансформатора**

## 2.2 Принцип функционирования импульсного трансформатора

### 2.1.1 Принцип функционирования идеализированного ТИ

Принцип функционирования ТИ, как и в ТП, заключается в передаче энергии электрического сигнала из первичной цепи во вторичную с помощью электромагнитного потока  $\Phi$ , создаваемого первичной обмоткой в магнитопроводе. Однако, электромагнитные процессы, происходящие в магнитопроводе ТИ, существенно отличаются от процессов в ТП. Рассмотрим вначале электромагнитные процессы, происходящие в *идеализированном* ТИ, для чего *пренебрегаем* следующими параметрами (см. рисунок 2.2,б):

- активными сопротивлениями источника сигнала  $R_H$  и обмоток ТИ  $r_1$  и  $r'_2$ ;
- паразитными параметрами ТИ – индуктивностями рассеяния  $L_{P1}$ ,  $L'_{P2}$  и собственными емкостями  $C_1$ ,  $C'_2$  и  $C_{12}$ ;
- активными потерями в сердечнике  $r_C$  и принимаем кривую намагничивания сердечника в рабочей области *линейной*.

Подадим на вход трансформатора импульсный сигнал прямоугольной формы с амплитудой  $U_1$  и длительностью  $t_H$ , которая должна быть много меньше периода их повторения  $T$ . Согласно закону электромагнитной индукции напряжение, приложенное к первичной обмотке  $W_1$ , должно уравновешиваться противоэдс  $e_1$ , индуктированной в этой обмотке, т.е.

$$U_1 = -e_1(t) = -W_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -W_1 \cdot Q_C \cdot \frac{dB}{dt}, \quad (2.1)$$

где  $\Phi$  и  $B$  – магнитный поток и магнитная индукция в сердечнике;  
 $Q_C$  – сечение сердечника.

Проинтегрировав уравнение (2.1), получим зависимость индукции от времени

$$B(t) = B(0) + \frac{1}{W_1 \cdot Q_C} \cdot \int_0^t u_1(t) \cdot dt, \quad (2.2)$$

где  $B(0)$  – начальное значение индукции в момент  $t = 0$ .

Мгновенное значение приращения индукции, которое и характеризует работу трансформатора, будет равно

$$\Delta B(t) = B(t) - B(0) = \frac{1}{W_1 \cdot Q_C} \cdot \int_0^t u_1(t) \cdot dt = \frac{U_1 \cdot t}{W_1 \cdot Q_C}, \quad (2.3)$$

то есть индукция в сердечнике изменяется во времени линейно (см. рисунок 2.3, в). К концу действия импульса –  $t = t_H$ , а значение  $\Delta B$  достигает максимального значения

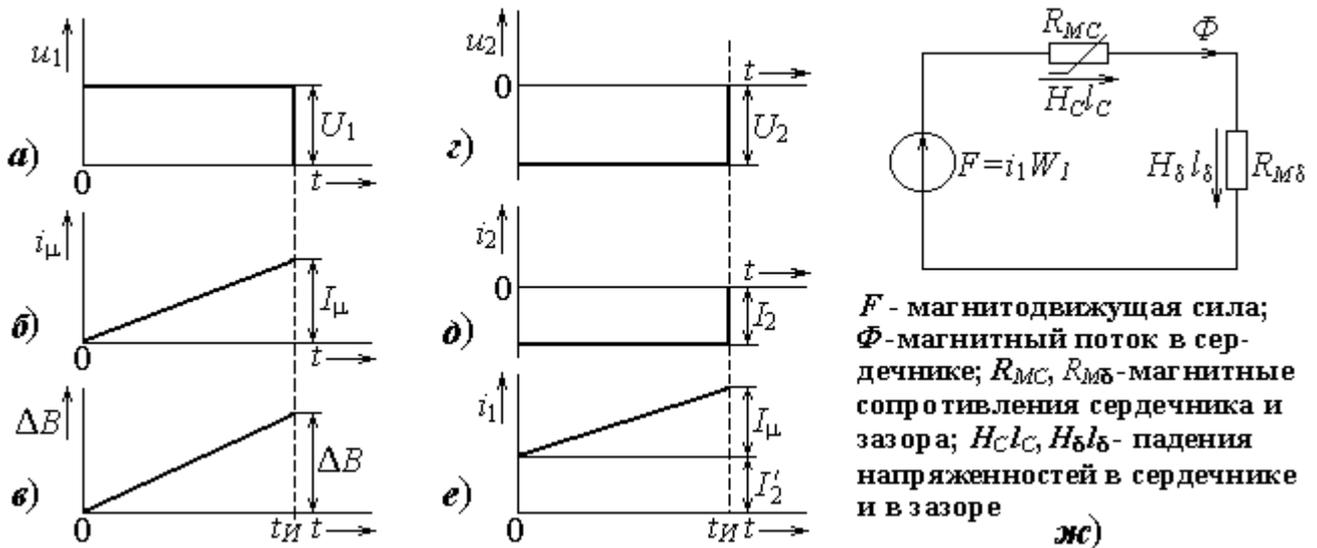
$$\Delta B(t) = B(t_H) = \frac{U_1 \cdot t_H}{W_1 \cdot Q_C}. \quad (2.4)$$

Из выражения (2.4) следует, что изменение индукции  $\Delta B$  не зависит от магнитных свойств сердечника, а определяется амплитудой  $U_1$  и длительностью  $t_H$  входного импульса (рисунок 2.3, а) и параметрами ТИ –  $W_1$  и  $Q_C$  (см.

рисунок 2.1). Но магнитные свойства сердечника влияют на величину тока намагничивания  $i_\mu$ , которая необходима для создания приращения индукции в сердечнике  $\Delta B$ . На основании второго закона Кирхгофа для магнитной цепи (рисунок 2.3, ж), согласно закону полного тока, намагничивающий ток  $i_\mu$  будет равен

$$i_\mu(t) = \Delta H \cdot l_C / W_1, \quad (2.5)$$

где  $\Delta H$  – приращение напряженности магнитного поля в сердечнике;  
 $l_C$  – средняя силовая линия магнитного поля в сердечнике.



**Рисунок 2.3 – Временные диаграммы электромагнитных процессов в идеализированном ТИ (а-е) и схема замещения магнитной цепи (ж)**

Так как  $\Delta B = \mu_0 \cdot \mu_C \Delta H$ , (2.6)  
 то с учетом выражения (2.3) получим

$$i_\mu(t) = \frac{\Delta B \cdot l_C}{\mu_0 \cdot \mu_C \cdot W_1} = \frac{U_1 \cdot t \cdot l_C}{\mu_0 \cdot \mu_C \cdot W_1^2 \cdot Q_C} = \frac{U_1 \cdot t}{L_\mu}, \quad (2.7)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная проницаемость вакуума (воздуха);

$\mu_C$  – относительная магнитная проницаемость материала сердечника;

$L_\mu$  – индуктивность цепи намагничивания (первичной обмотки), которая в общем случае может быть определена по формуле

$$L_\mu = \frac{\mu_0 \cdot \mu_\Delta \cdot W_1^2 \cdot Q_C}{l_C}, \quad (2.8)$$

где  $\mu_\Delta$  – эквивалентная магнитная проницаемость сердечника на частном цикле перемагничивания. Для катушки с магнитным сердечником, имеющим немагнитный зазор  $\delta$ , в общем случае

$$\mu_\Delta = \frac{1}{1/\mu_C + \delta/l_C}. \quad (2.9)$$

В частном случае при отсутствии немагнитного зазора – при  $\delta = 0$   $\mu_\Delta = \mu_0$ .

Согласно (2.7) ток намагничивания  $i_\mu$  нарастает по линейному закону (см. рисунок 2.3, б), а максимальная величина его  $I_\mu$  в конце импульса будет равна

$$I_\mu = i_\mu(t_H) = U \cdot t_H / L_\mu . \quad (2.10)$$

Очевидно, что магнитная индукция  $B$  будет изменяться также по линейному закону (2.3) – рисунок 2.3, в. Соответственно, линейно будет нарастать и магнитный поток в сердечнике –  $\Phi = B \cdot Q_C$ , который, в свою очередь, будет индуцировать во вторичной обмотке э.д.с.  $e_2$ . Так как для идеализированного трансформатора  $u_2(t) = e_2(t)$ , то согласно (2.1)

$$u_2(t) = e_2(t) = -W_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -W_2 \cdot \frac{U_1}{W_1} = -n \cdot U_1 , \quad (2.11)$$

где  $n = W_2 / W_1$  – коэффициент трансформации.

Следовательно, при отсутствии нагрузки на выходе трансформатора будем иметь постоянное напряжение (рисунок 2.3, з). Если к вторичной обмотке подключить сопротивление  $R_H$ , то через него во время действия импульса потечет ток  $i_2$  (см. рисунок 2.3, д)

$$i_2(t) = u_2(t) / R_H = -n \cdot U_1 / R_H = -I_2 = const. \quad (2.12)$$

При протекании тока  $i_2$  во вторичной обмотке возникает магнитодвижущая сила (м.д.с.)  $F_2 = i_2 \cdot W_2$ , направленная навстречу м.д.с. первичной обмотки  $F_1 = i_1 \cdot W_1$ . Результирующая м.д.с.  $F$  будет равна их векторной сумме

$$\bar{F} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 = i_\mu \cdot W_1 = i_1 \cdot W_1 + i_2 \cdot W_2 . \quad (2.13)$$

Из выражения (2.13) следует, что ток первичной обмотки (рисунок 2.3, е) с учетом выражения (2.12) будет равен

$$i_1 = i_\mu - i_2 \cdot W_2 / W_1 = i_\mu - i_2 \cdot n = i_\mu - i'_2 , \quad (2.14)$$

где  $i'_2$  – ток вторичной обмотки, приведенный к первичной цепи.

В реальном трансформаторе за счет падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника и на сопротивлении первичной обмотки напряжение на выходе трансформатора  $u_2(t)$  будет монотонно уменьшаться до нуля.

### 2.2.2 Влияние гистерезиса на процесс намагничивания сердечника

Реальная характеристика намагничивания сердечника существенно отличается от идеальной, прежде всего, наличием гистерезиса. На рисунке 2.4 представлены реальные характеристики намагничивания: *основная кривая намагничивания* (ОКН) - 1 и *кривая предельного симметричного цикла перемагничивания* - 2 по, которой определяются основные характеристики материала сердечника:

$B_r$  - остаточная индукция в сердечнике;

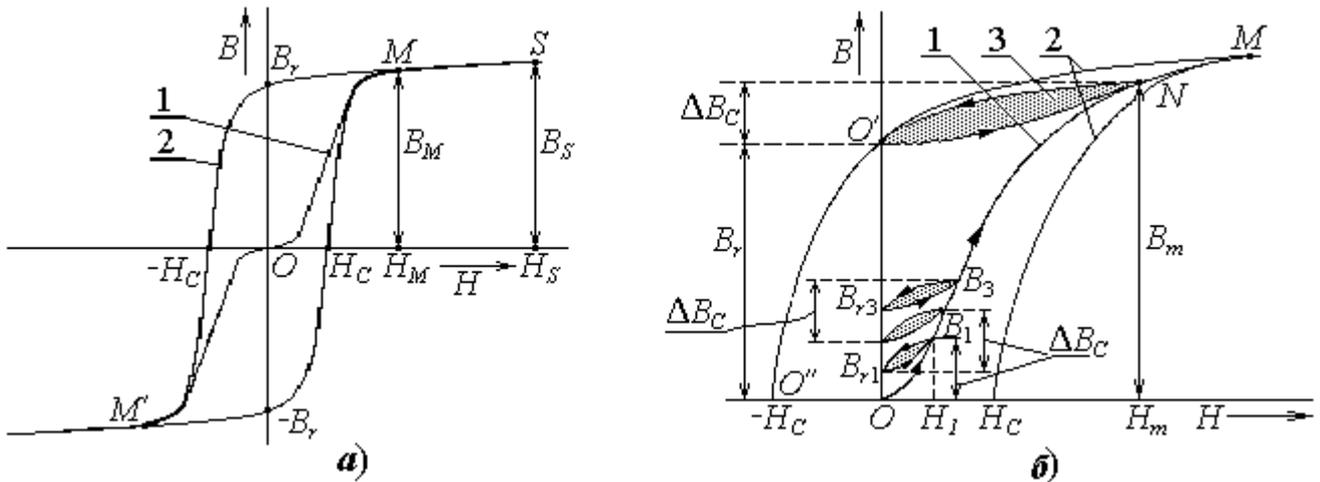
$H_C$  - коэрцитивная сила;

$B_S$  - индукция насыщения.

Пусть на первичную обмотку действует напряжение в виде периодически повторяющихся положительных импульсов с достаточно большой скважно-

стью (период следования импульсов  $T$  много больше их длительности  $T \gg t_{II}$ ). Полагаем, что в начальный момент сердечник был размагничен ( $B = 0$ ,  $H = 0$ ).

При воздействии первого импульса точка, изображающая магнитное состояние сердечника (*изображающая точка*), перемещается по ОКН от точки  $O$  до точки с индукцией  $B_1 = \Delta B_C$  (рисунок 2.4, б), которая согласно (2.4) определяется площадью импульса  $U_1 \cdot t_{II}$ . При этом намагничивающий ток  $i_\mu$  достигает значения, определяемого напряженностью  $H_1$  (2.5). После окончания действия импульса ток постепенно снижается до нуля ( $H=0$ ). Однако из-за гистерезиса изображающая точка перемещается уже по другой кривой размагничивания ( $B_1-B_{r1}$ ) и достигает точки  $B_{r1}$ , определяемой остаточной индукцией.



1 – основная кривая намагничивания; 2 – предельный симметричный цикл;  
3 – предельный частный цикл намагничивания

**Рисунок 2.4 – Петля гистерезиса предельного цикла (а) и процесс намагничивания сердечника в импульсном трансформаторе (б)**

Под воздействием второго импульса индукция в сердечнике согласно (2.4) получает то же самое приращение  $\Delta B_C$ . При этом изображающая точка будет перемещаться сначала по некоторой восходящей ветви до точки  $B_1$ , а затем по ОКН достигнет точки  $B_2 = B_{r1} + \Delta B_C$ . После окончания второго импульса напряженность опять падает до нуля, а индукция становится равной  $B_{r2} > B_{r1}$  (точки  $B_2$  и  $B_{r2}$  на рисунке не обозначены).

Таким образом переходный процесс будет продолжаться до тех пор, пока изображающая точка не достигнет точки  $O'$ , соответствующей остаточной индукции  $B_r$  предельного цикла (рисунок 2.4, б, кривая 2). Теперь под воздействием очередного импульса индукция достигает наибольшей (при заданном приращении  $\Delta B_C$ ) величины  $B_m = B_r + \Delta B_C$  (рисунок 2.4, б, точка  $N$ ), а после его окончания изображающая точка возвратится опять в точку  $O'$ , так как за границы *предельного симметричного цикла* она выйти не может. То есть, при дальнейших воздействиях импульсов изображающая точка будет перемещаться по ветвям петли  $O'NO'$  (рисунок 2.4, б, позиция 3). Эта петля перемагничивания сердечника получила название *предельной петли частного несимметричного цикла* или *предельного частного цикла перемагничивания*.

Магнитная проницаемость в этом режиме определяется как *средняя импульсная магнитная проницаемость*  $\mu_{И}$  на частном цикле

$$\mu_{И} = \Delta B / \Delta H, \quad (2.15)$$

где  $\Delta B$  и  $\Delta H$  – изменения индукции и напряженности в сердечнике на предельном частном цикле перемагничивания.

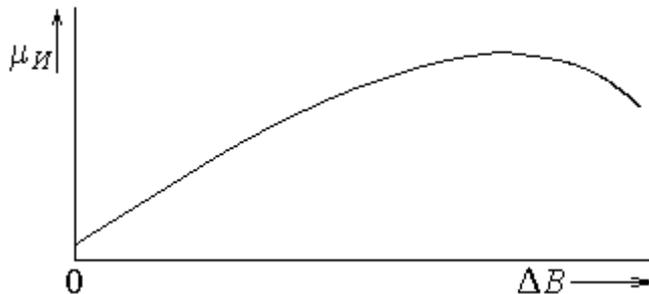
Очевидно, что импульсная магнитная проницаемость  $\mu_{И}$  значительно меньше *нормальной* магнитной проницаемости на симметричном цикле перемагничивания  $\mu_{Н}$

$$\mu_{Н} = B_m / H_m. \quad (2.16)$$

При изменении амплитуды или длительности импульса будет изменяться и величина  $\Delta B$ . На рисунке 2.5 приведен вид зависимости  $\mu_{И}$  от  $\Delta B$ . Нетрудно доказать, что максимальное значение  $\mu_{И}$  будет соответствовать амплитуде входного импульса, при котором точка перехода  $N$  (рисунок 2.4, б) будет совпадать с вершиной предельной петли гистерезиса  $M$ . С другой стороны величина  $\Delta B$  ограничена соотношением

$$\Delta B \leq B_S - B_r, \quad (2.17)$$

где  $B_S$  – предельно допустимая рабочая индукция (индукция насыщения), соответствующая точке  $M$  (рисунок 2.4, б);  $B_r$  – остаточная индукция.



**Рисунок 2.5 - Зависимость импульсной магнитной проницаемости от изменения приращения индукции**

Из анализа приведенных соотношений следует, что для реализации импульсных трансформаторов необходимо использовать магнитные материалы, обладающие наиболее низкой остаточной индукцией  $B_r$  и высокой индукцией насыщения  $B_S$ , то есть, большой импульсной магнитной проницаемостью  $\mu_{И}$ . К таким материалам относятся никелевые сплавы (пермаллой), холоднокатаные текстурованные стали и специальные марки ферритов – марганец-цинковые. На практике для увеличения импульсной магнитной проницаемости в сердечник вводится оптимальный немагнитный зазор  $\delta_{опт}$ .

### 2.2.3 Влияние вихревых токов на намагничивание сердечника

Влияние вихревых токов на намагничивание сердечника проявляется: во-первых, в кажущемся увеличении тока намагничивания за счет размагничи-

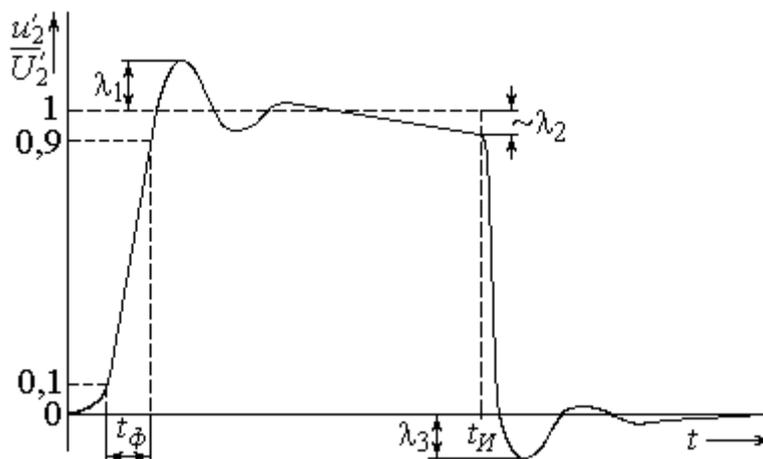
вающего действия вихревых токов; во-вторых, происходит вытеснение магнитного потока на поверхность ленты или пластины, из которых изготовлен сердечник.

Это может привести к насыщению поверхностных слоев ленты (пластины) и, как следствие, к ухудшению магнитных свойств сердечника. Для учета этих явлений при расчете ТИ вводится понятие *кажущейся магнитной проницаемости*  $\mu_K$ , которая меньше  $\mu_H$ . Уменьшение  $\mu_K$  относительно  $\mu_H$  определяется толщиной ленты (пластины) сердечника, удельным электрическим сопротивлением материала и длительностью импульсов. Уменьшение магнитной проницаемости, в свою очередь, ведет к уменьшению индуктивности первичной обмотки  $L_\mu$ , что в конечном итоге приводит к увеличению искажений выходных импульсов. Для уменьшения влияния вихревых токов выбирают материалы с большим удельным электрическим сопротивлением и малой толщиной ленты.

## 2.2 Искажения выходных импульсов

### 2.2.1 Постановка задачи

Искажения, вносимые ТИ при передаче прямоугольного импульса, оцениваются следующими параметрами (рисунок 2.6):  $t_\phi$  - длительностью переднего фронта;  $\lambda_1$  - относительным положительным выбросом;  $\lambda_2$  - относительным спадом вершины импульса;  $\lambda_3$  - относительным отрицательным выбросом.



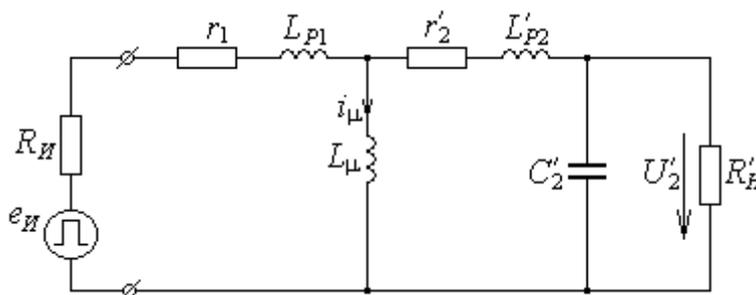
**Рисунок 2.6 – Искажения, вносимые ТИ при передаче прямоугольного импульса**

Для анализа искажений, вносимых ТИ при передаче импульсов от источника в нагрузку, удобнее всего воспользоваться электрической схемой замещения (рисунок 2.2,а). Однако описать зависимость напряжения на нагрузке  $u'_2(t)$  в общем виде для данной схемы не представляется возможным, так как переходный процесс описывается дифференциальным уравнением шестого порядка (по числу реактивных элементов). Известно, что простому решению в

общем виде поддаются лишь дифференциальные уравнения не выше второго порядка. Поэтому для понижения порядка дифференциального уравнения прибегают к искусственному приему: во-первых, пренебрегают некоторыми реактивными паразитными параметрами, несущественно влияющими на искажения выходного импульса; во-вторых, упрощают схему замещения, разделяя формирование выходного импульса на три этапа:

- 1) формирование переднего фронта;
- 2) формирование вершины импульса;
- 3) формирование среза выходного импульса.

Учитывая, что паразитные емкости  $C_1$  и  $C_{12}$  (рисунок 2.2,а) обычно значительно меньше емкости  $C'_2$ , включающей в себя емкость вторичной обмотки, нагрузки и электро монтажа, и не оказывают существенного влияния на формирование выходного импульса, то ими пренебрегаем. Также пренебрегаем активными потерями в сердечнике ( $r_C = 0$ ). Тогда схема замещения ТИ принимает вид, представленный на рисунок 2.7.



**Рисунок 2.7 – Упрощенная электрическая схема замещения ТИ**

Рассмотрим кратко каждый из выделенных выше этапов формирования выходного импульса, предварительно приняв, что:

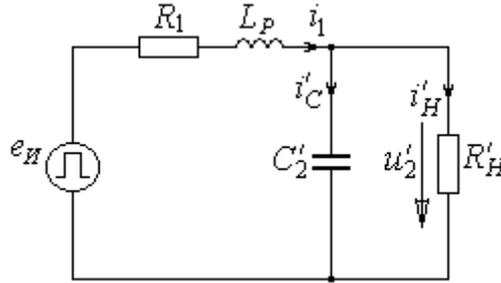
- на входе ТИ действуют импульсы напряжения прямоугольной формы;
- длительность импульса  $t_H$  больше времени переходного процесса формирования переднего фронта и вершины импульса;
- пауза между импульсами значительно больше времени восстановления отрицательного выброса, когда намагничивающий ток  $i_\mu \rightarrow 0$  и изображающая точка возвращается в точку  $O'$  (рисунок 2.4, б).

### 2.2.2 Формирование переднего фронта выходного импульса

Исследование искажений, вносимых ТИ при формировании переднего фронта выходного импульса, при принятых выше условиях сводится к анализу переходной характеристики системы источник – ТИ – нагрузка, то есть к анализу зависимости напряжения на нагрузке  $u'_2(t)$  при воздействии на вход ТИ скачка эдс источника  $E_H$ .

Очевидно, что данный процесс следует отнести к разряду *быстрых*. Так как  $L_\mu \gg (L_{P1} + L'_{P2})$ , то за время формирования переднего фронта ток

намагничивания  $i_{\mu}$  не может существенно возрасти. Поэтому цепью намагничивания в данном случае можно пренебречь. Тогда схему замещения ТИ можно привести к виду (рисунок 2.8).



**Рисунок 2.8 - Схема замещения ТИ при формировании переднего фронта**

Переходные процессы в приведенной схеме будут описываться следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} i_1 \cdot R_1 + L_P \cdot \frac{di_1}{dt} + u'_2 &= E_H, \\ i_1 = i'_C + i'_H &= C'_2 \cdot \frac{du'_2}{dt} + \frac{u'_2}{R'_H}, \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

где  $E_H$  – амплитуда входного импульса;  $R_1 = R_H + r_1 + r'_2$ ,  $L_P = L_{P1} + L_{P2}$ .

Систему (2.18) несложно привести к дифференциальному уравнению второго порядка вида

$$(T_1^2 \cdot p^2 + 2\delta \cdot T_1 \cdot p + 1) \cdot u'_2(t) = U'_2, \quad (2.19)$$

где  $T_1$  – постоянная времени при формировании переднего фронта;  $p = d/dt$  – символ дифференцирования;  $\delta$  – коэффициент затухания;  $U'_2$  – амплитуда выходного напряжения, приведенная к первичной обмотке.

$$T_1 = \sqrt{L_P \cdot C'_2 \cdot K_H}, \quad (2.20)$$

$$\delta = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{K_H} \cdot \left( \frac{\rho}{R'_H} + \frac{R_1}{\rho} \right), \quad (2.21)$$

$$U'_2 = K_H \cdot E_H, \quad (2.22)$$

$$K_H = \frac{R'_H}{R'_H + R_1}, \quad \rho = \sqrt{\frac{L_P}{C'_2}}. \quad (2.23)$$

Здесь  $K_H$  – коэффициент нагрузки ТИ;  $\rho$  – волновое сопротивление ТИ.

Известно, что переходный процесс может быть *апериодический* или *колебательный*. В уравнении (2.19) граничным между этими процессами будет значение  $\delta = 1$  – при  $\delta < 1$  – колебательный, а при  $\delta \geq 1$  – апериодический.

При апериодическом процессе положительных выбросов выходного напряжения  $u'_2(t)$  не будет, но длительность переднего фронта  $t_{\phi}$  будет очень велика, что не допустимо. Поэтому нет смысла его рассматривать. Рассмотрим лишь формирование выходного импульса при колебательном процессе.



Для уменьшения постоянной времени  $T_1$  необходимо уменьшать паразитные параметры  $L_p$  и  $C'_2$  (см. формулу (2.20)).

### 2.4.3 Формирование вершины выходного импульса

При формировании вершины выходного импульса на вход ТИ действует постоянное напряжение, определяемое амплитудой входного импульса  $E_{II}$ , т.е. будем иметь дело с *медленными* процессами. Следовательно, индуктивные сопротивления в последовательной цепи, определяемые индуктивностями рассеяния  $L_{p1}$  и  $L'_{p2}$ , будут много меньше активных сопротивлений обмоток  $r_1$  и  $r'_2$ , а емкость  $C'_2$  не будет шунтировать нагрузку  $R'_H$ . Поэтому параметрами  $L_{p1}$ ,  $L'_{p2}$  и  $C'_2$  в схеме замещения (рисунок 2.7) можно пренебречь. Тогда схема замещения при формировании вершины импульса принимает вид, приведенный на рисунке 2.10,а.

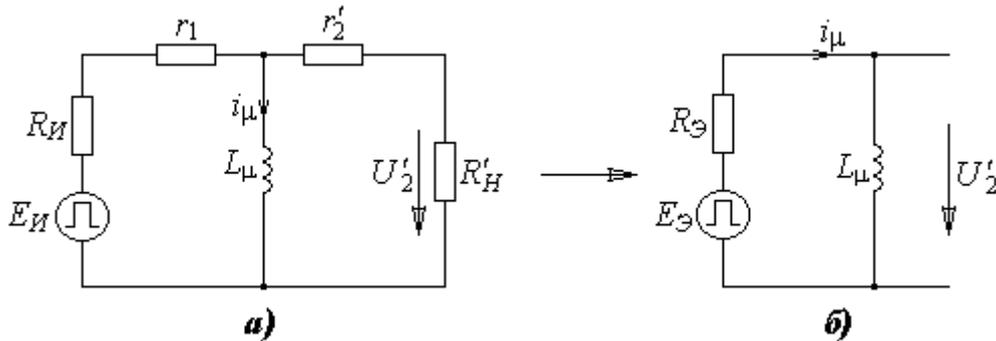


Рисунок 2.10 – Схема замещения ТИ при формировании вершины импульса

На основании теоремы об эквивалентном генераторе с учетом того, что  $R'_H \gg r'_2$ , исходную схему можно привести к виду, представленному на рисунке 2.10,б, где  $R_Э$  и  $U_Э$  – сопротивление и напряжение эквивалентного генератора, которые с учетом принятых допущений будут равны:

$$R_Э = \frac{(R_{II} + r_1) \cdot (r'_2 + R'_H)}{R_{II} + r_1 + r'_2 + R'_H} \approx \frac{R_1 \cdot R'_H}{R_1 + R'_H} = R_1 \cdot K_H, \quad (2.29)$$

$$U_Э = \frac{E_{II} \cdot (r'_2 + R'_H)}{R_{II} + r_1 + r'_2 + R'_H} \approx \frac{E_{II} \cdot R'_H}{R_1 + R'_H} = E_{II} \cdot K_H = U'_2. \quad (2.30)$$

Ток  $i_\mu$  будет увеличиваться, а напряжение  $u'_2$  уменьшаться по экспоненте

$$i_\mu(t) = \frac{U'_2}{R_Э} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right], \quad (2.31)$$

$$u'_2(t) = L_\mu \cdot \frac{di_\mu}{dt} = U'_2 \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right), \quad (2.32)$$

где  $T_2 = L_\mu / R_Э$  – постоянная времени формирования вершины импульса.

При  $T_2 \gg t_{II}$  экспоненту (2.32) в пределах  $t_{II}$  можно линеаризовать

$$u'_2(t) \approx U'_2 \cdot (-t/T_2). \quad (2.33)$$

Тогда спад вершины импульса можно представить выражением

$$\Delta u'_{2C} = U'_2 - u'_2(t_H) \approx U'_2(t_H/T_2), \quad (2.34)$$

а относительный спад вершины импульса будет равен

$$\lambda_2 = \Delta u'_{2C} / U'_2 \approx t_H / T_2 = t_H R_{Э} / L_{\mu}. \quad (2.35)$$

Следовательно, спад вершины импульса  $\lambda_2$  будет тем меньше, чем больше индуктивность цепи намагничивания  $L_{\mu}$  и чем меньше длительность импульса  $t_H$ .

#### 2.4.4 Формирование среза выходного импульса

В момент прекращения действия входного импульса напряжения ( $t = t_H$ ) ток намагничивания  $i_{\mu}$  достигает максимального значения  $I_{\mu}$  и согласно (2.31) с учетом условия ( $T_2 \gg t_H$ ) будет равен

$$I_{\mu} = \frac{U'_2 \cdot t_H}{R_{Э} \cdot T_2} = U'_2 \cdot \frac{t_H}{L_{\mu}}. \quad (2.36)$$

На данном этапе происходит рассеяние энергии, запасенной индуктивностью  $L_{\mu}$ , через сопротивления нагрузки  $R'_H$  и источника  $R_{ИП}$  – сопротивление источника во время паузы. Так как обычно  $L_{\mu} \gg L_{P1}$  и  $L'_{P2}$ , а  $R'_H \gg r_1$  и  $r'_2$ , то параметрами обмоток ( $r_1, r'_2, L_{P1}, L'_{P2}$ ) можно пренебречь. Пренебрегаем так же потерями в сердечнике ( $r_C$ ). Тогда схема замещения ТИ принимает вид, приведенный на рисунке 2.11.

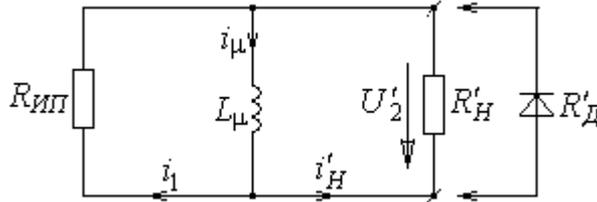


Рисунок 2.11 – Схема замещения ТИ при формировании среза импульса

Ток и напряжение нагрузки во время паузы будут изменяться по законам

$$i'_H = I_{\mu} \cdot \frac{R_{ИП}}{R_{ИП} + R'_H} \cdot \exp(-t/T_3), \quad (2.37)$$

$$u'_2 = -i'_H \cdot R'_H = -L_{\mu} \cdot R_{ЭП} \cdot \exp\left(\frac{t}{T_3}\right), \quad (2.38)$$

где  $T_3$  – постоянная времени при формировании среза импульса;  $R_{ЭП}$  – эквивалентное сопротивление схемы замещения во время паузы.

$$R_{ЭП} = \frac{R_{ИП} \cdot R'_H}{R_{ИП} + R'_H}, \quad T_3 = \frac{L_{\mu}}{R_{ЭП}}. \quad (2.39)$$

Очевидно, что максимальное значение отрицательного выброса выходного напряжения  $\Delta u'_{20}$  согласно (2.38) будет иметь место при  $t = 0$ , абсолютное значение которого будет равно

$$\Delta u'_{20} = u'_2(0) = I_{\mu} \cdot R_{ЭП} = \frac{U'_2 \cdot t_{И} \cdot R_{ЭП}}{L_{\mu}}. \quad (2.40)$$

Соответственно, относительная величина отрицательного выброса  $\lambda_3$  будет равна

$$\lambda_3 = \frac{\Delta u'_{20}}{U'_2} = \frac{t_{И} \cdot R_{ЭП}}{L_{\mu}} = \frac{t_{И}}{T_3}. \quad (2.41)$$

Анализ полученных соотношений показывает, что:

- 1) отрицательный выброс  $\lambda_3$  тем больше, чем больше  $R_{ЭП}$ ;
- 2) в свою очередь, при разрыве цепи источника в период паузы ( $R_{ИП} \rightarrow \infty$ )  $R_{ЭП} \rightarrow R'_H$ , а  $\lambda_3$ , при прочих равных условиях, будет максимальной;
- 3) при неизменном сопротивлении цепи источника в период импульса и паузы ( $R_{ИП} = R_{И}$ )  $R_{ЭП} = R_{Э}$  и  $\lambda_3 = \lambda_1$ .

В реальных ТИ при наличии паразитных параметров  $L_P$  и  $C'_2$  процесс будет иметь колебательный характер (см. рисунок 2.6).

Для уменьшения отрицательного выброса  $\lambda_3$  и времени затухания отрицательного импульса (*времени восстановления*) нагрузку  $R'_H$  шунтируют диодом в обратном направлении прямому току нагрузки  $i'_H$  (см. рисунок 2.11). При этом  $R'_H \rightarrow R'_D \ll R_{ИП}$ , что согласно (2.39) приводит к существенному уменьшению сопротивления  $R_{ЭП}$  и к увеличению постоянной времени  $T_3$ . Соответственно, снижается отрицательный выброс  $\lambda_3$  и происходит быстрое затухание переходного процесса.

### 3 ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из лабораторного макета, генератора прямоугольных импульсов и осциллографа. Лабораторный макет включает в себя блок исследуемых импульсных трансформаторов, блок коммутации и соединители для осуществления внешней коммутации макета с генератором и осциллографом. Конструктивно лабораторный макет выполнен в виде автономного блока. Структурная схема лабораторной установки представлена на рисунке 3.1, а электрическая схема лабораторного макета приведена на рисунке 3.2.



*Рисунок 3.1 Структурная схема лабораторной установки*

Соединители X1 и X2 служат для подключения лабораторного макета к генератору прямоугольных импульсов и к осциллографу.

Переключатель S1 позволяет последовательно подключать исследуемые ТИ Т1-Т5 к генератору прямоугольных импульсов G и к осциллографу N. Резисторы  $R_H$  являются нагрузочными сопротивлениями. Изменить нагрузку исследуемого ТИ можно с помощью переключателя S4. В положении 1 переключателя S4  $R_H = \infty$ , то есть нагрузка отсутствует.

Наборами катушек индуктивностей  $L_P$  и конденсаторов  $C_2$  имитируются паразитные параметры ТИ – индуктивность рассеяния и эквивалентная емкость (см. рисунки 2.7 и 2.8). Изменение их величин можно осуществить с помощью переключателей S2 и S6. Переключателем S2 в положении б шунтируется внешняя индуктивность, при этом индуктивность  $L_P$  будет равна индуктивности рассеяния ТИ. Тумблер S5 служит для подключения конденсаторов  $C_H$ . При включении S5 паразитная емкость  $C_2$  будет равна сумме собственной емкости ТИ, нагрузки и электро монтажа. Тумблер S3 позволяет подключить осциллограф либо к вторичной обмотке исследуемого ТИ, либо к генератору прямоугольных импульсов для контроля формы и искажений входных импульсов. Резистор R1 выполняет роль согласующего нагрузочного сопротивления между генератором и ТИ. Выходное сопротивление генератора  $R_H = 50 \text{ Ом}$ .

Технические характеристики исследуемых импульсных трансформаторов представлены в таблице 3.1.

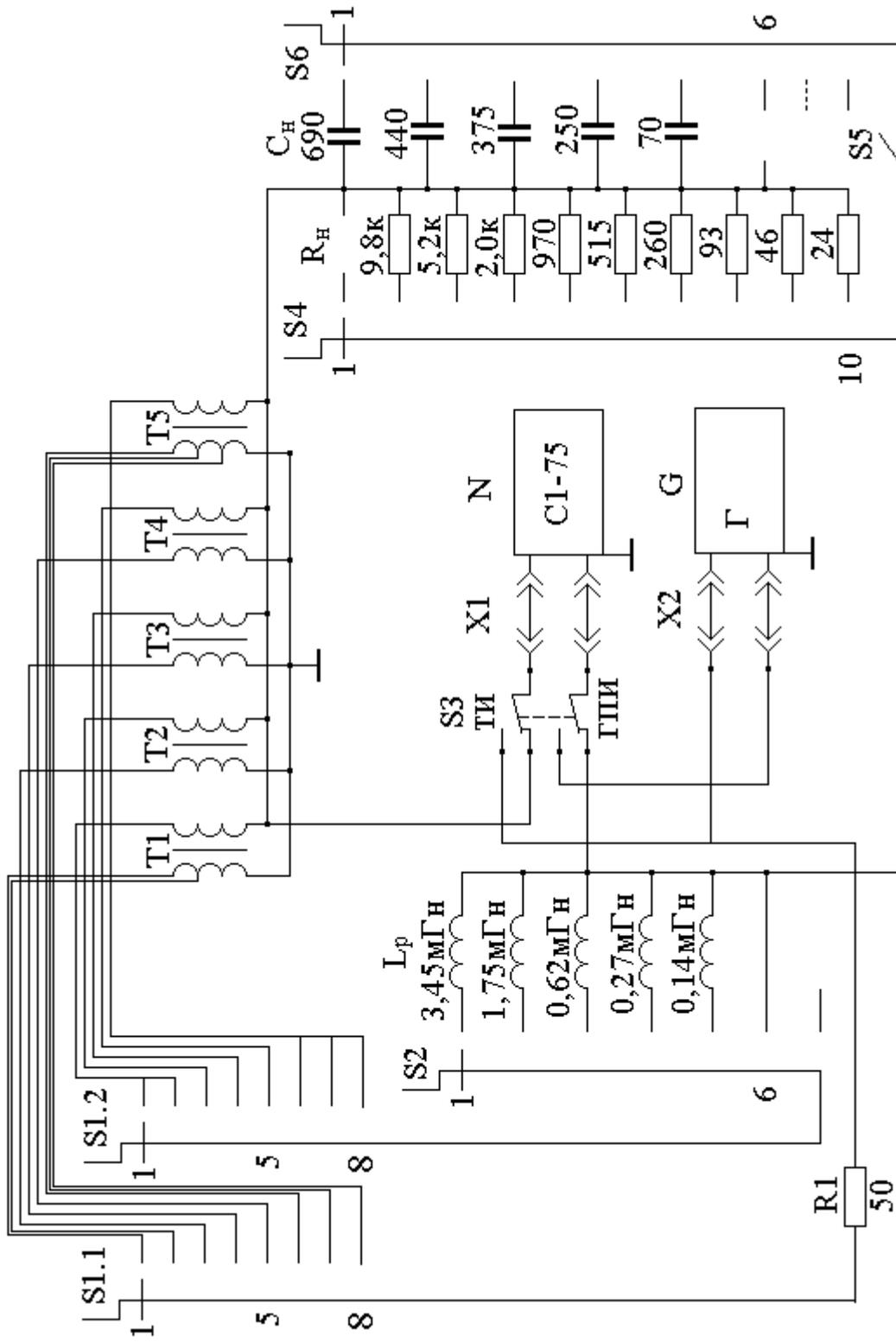


Рисунок 3.2 – Схема электрическая принципиальная лабораторной установки

Таблица 3.1 Технические характеристики импульсных трансформаторов

Поз. пер. S1	Но- мер ТИ	Параметры ТИ							Типоразмер и материал сердечника
		$W_1$	$W_2$	$r_1, Ом$	$r_2, Ом$	$d_1, мм$	$d_2, мм$	$L_{\mu}, мГн$	
1	1	566	400	30,0	26,2	0,10	0,10	20	К20×12×6,5 МО-пермаллой МП-160
2		400	400	21,5	26,2	0,10	0,10	10	
3	2	220	220	9,58	3,44	0,10	0,18	20,2	К16×10×4,5 Феррит 3000НМА
4	3	70	70	3,64	3,53	0,12	0,12	–	ОЛ28×20×6 Ст.3422
5	4	240	240	5,41	6,82	0,18	0,18	–	Ш6×8 -Пермал- лой 50 НХС
6	5	346	282	18,5	16,5	0,10	0,10	7,5	К20×12×6,5 МО-пермаллой МП-160
7		282		15,1				5,0	
8		200		10,4				2,5	

## 4 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1 Методика проведения экспериментальных исследований ТИ

4.1.1 Проверить правильность подключения импульсного генератора Г5-60, осциллографа С1-75 и лабораторного макета. Синхронизация развертки осциллографа осуществляется от импульсного генератора (внешняя синхронизация).

4.1.2 Предварительно получив разрешение от преподавателя, включить импульсный генератор и осциллограф для прогрева.

4.1.3 Настроить импульсный генератор: установить частоту следования импульсов  $f_{И} = 1 \text{ кГц}$  (период  $T_{И} = 1 \text{ мс}$ ), длительность импульсов  $t_{И} = 30 \text{ мкс}$  и амплитуду импульсов  $E_{И} = 3 \text{ В}$ .

4.1.4 Настроить осциллограф на четкое изображение импульса, предварительно установив выключатель S3 в положение ГПИ.

4.1.5 Установить выключатель S3 в положение ТИ (верхнее положение), переключатели S1, S2, S4 и S6 в крайнее левое положение, переключатель S5 в верхнее положение (включено). Переключатель S1, поворачивая вправо, последовательно подключать исследуемые трансформаторы Т1-Т5 к генератору прямоугольных импульсов G и к осциллографу N и наблюдать осциллограммы импульсов на выходах трансформаторов. Выбрать ТИ для исследований, согласовав с преподавателем.



*Примечание:* В таблицах 4.1 и 4.2 введены следующие условные обозначения:

$U_2$  – напряжение вторичных обмоток ТИ (напряжение на нагрузке);

$E_H$  – амплитуда импульсов генератора;

$\Delta U_{21}, \Delta U_{23}, \Delta U_{22}$  – абсолютные значения положительного и отрицательного выбросов выходного импульса и спада вершины импульса;

$\lambda_1, \lambda_3, \lambda_2$  – относительные значения положительного и отрицательного выбросов выходного импульса и спада вершины импульса;

$t_\phi$  – длительность переднего фронта выходного импульса.

## 4.2 Аналитический расчет параметров, характеризующих искажения выходного импульса ТИ

4.2.1 По согласованию с преподавателем для характерных контрольных точек провести аналитические расчеты параметров выходных импульсов  $t_\phi, \lambda_1, \lambda_3, \lambda_2$  по методике, изложенной в разделе 2 ([1, подраздел 7.4 и 2, глава 5]).

4.2.2 Длительность нарастания переднего фронта выходного импульса  $t_\phi$  и относительная величина положительного выброса  $\lambda_1$  с достаточной степенью точности могут быть определены по следующим эмпирическим формулам:

$$t_\phi \approx (1,2 + 2 \cdot \delta^2) \cdot T_1, \quad (4.1)$$

$$\lambda_1 \approx \exp\left[-\pi \cdot \delta / \sqrt{1 - \delta^2}\right], \quad (4.2)$$

где  $\delta$  – коэффициент затухания;

$T_1$  – постоянная времени формирования переднего фронта.

4.2.3 Относительная величина спада вершины выходного импульса  $\lambda_2$  может быть определена по формуле

$$\lambda_2 \approx \frac{R_1 \cdot R'_H \cdot t_{II}}{L_\mu \cdot (R_1 + R'_H)}, \quad (4.3)$$

где  $R_1$  – эквивалентное выходное сопротивление источника во время импульса;  $R'_H$  – сопротивление нагрузки, приведенное к первичной обмотке.

4.2.4 Относительная величина отрицательного выброса  $\lambda_3$  приближенно рассчитывается по формуле

$$\lambda_3 \approx \frac{R_1 \cdot R'_H \cdot t_{II}}{L_\mu \cdot (R_{1II} + R'_H)}, \quad (4.4)$$

где  $R_{1II}$  – эквивалентное выходное сопротивление источника во время паузы.

4.2.5 Введенные выше физические величины можно рассчитать по формулам:

$$\delta = 0,5 \cdot \sqrt{K_H} \cdot \left( \frac{\rho}{R'_H} + \frac{R_1}{\rho} \right), \quad (4.5)$$

$$T_1 = \sqrt{K_H \cdot L_P \cdot C_2}, \quad (4.6)$$

$$R_1 = R_H + r_1 + R_{ДОБ}, \quad (4.7)$$

$$R_{1П} = R_{III} + r_1 + R_{ДОБ}, \quad (4.8)$$

$$R'_H = R_H \cdot (W_2 / W_1)^2, \quad (4.9)$$

$$\rho = \sqrt{L_P / C'_2}. \quad (4.11)$$

Здесь  $K_H$  – коэффициент нагрузки;

$R_{II}$  и  $R_{III}$  – выходное сопротивление генератора во время импульса и во время паузы, соответственно. Для генератора Г5-60  $R_{II} = R_{III} \approx 50 \text{ Ом}$ ;

$r_1$  - активное сопротивление первичной обмотки ТИ (см. таблицу 3.1);

$R_{ДОБ}$  – добавочное сопротивление ( $R_{ДОБ} = 50 \text{ Ом}$ );

$\rho$  - волновое сопротивление ТИ.

### 4.3 Обработка и анализ результатов исследований

4.3.1 По результатам экспериментальных исследований построить графики зависимостей показателей искажений переднего фронта  $t_\phi$  и  $\lambda_1$  и отрицательного выброса  $\lambda_3$  выходного импульса от параметров ТИ  $L_\mu$ ,  $C_2$ ,  $R_H$ .

4.3.2 Построить графики зависимостей спада вершины выходного импульса  $\lambda_2$  от параметров ТИ  $L_\mu$ ,  $R_H$  и от длительности импульсов  $t_{II}$ .

Графики построить в одних осях координат для каждой серии опытов:

- зависимости  $t_\phi$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$  от  $L_\mu$ ;
- зависимости  $t_\phi$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$  от  $C_2$ ;
- зависимости  $t_\phi$ ,  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$  от  $R_H$ ;
- зависимости  $\lambda_2$  от параметров  $L_\mu$ ,  $R_H$  и  $t_{II}$ .

Результаты аналитических расчетов также нанести на соответствующие графики.

4.3.2 Провести подробный анализ результатов исследований и объяснить физическую сущность полученных закономерностей. Если имеют место расхождения теории и эксперимента, то объяснить их причину. Выводы сделать отдельно по каждому пункту.

## 5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5.1 Назначение импульсных трансформаторов? Основные требования к ним?

5.2 Что понимается под идеализированным ТИ? Как происходит трансформация импульсов в нем?

5.3 Как происходит намагничивание сердечника в импульсном режиме с учетом гистерезиса?

5.4 Что понимается под частным и предельным циклами перемагничивания сердечника?

5.5 В чем отличие нормальной  $\mu_H$  и импульсной  $\mu_{II}$  магнитных проницаемостей?

5.6 Как зависит импульсная магнитная проницаемость  $\mu_I$  от приращения магнитной индукции  $\Delta B$ ?

5.7 Какие требования предъявляются к магнитным материалам, используемым в импульсных трансформаторах? Назовите материалы, соответствующие этим требованиям.

5.8 Как влияют вихревые токи в сердечнике трансформатора на форму выходного импульса?

5.9 Нарисуйте упрощенную эквивалентную электрическую схему ТИ.

5.10 Какими параметрами оцениваются искажения переднего фронта выходного импульса? Приведите схему замещения ТИ при формировании переднего фронта.

5.11 Какие параметры трансформатора оказывают преимущественное влияние на формирование переднего фронта выходного импульса?

5.12 Что понимается под коэффициентом затухания? От каких параметров ТИ он зависит?

5.13 Как зависят искажения переднего фронта выходного импульса от коэффициента затухания  $\delta$ ? Что такое критический переходный процесс и чему равно  $\delta_{кр}$ ?

5.14 От каких параметров преимущественно зависит величина спада вершины импульса? Приведите схему замещения ТИ при формировании вершины импульса.

5.15 Какие параметры трансформатора оказывают преимущественное влияние на величину отрицательного выброса выходного импульса? Приведите схему замещения ТИ при формировании среза импульса.

5.16 Какое влияние оказывают паразитные параметры  $L_p$  и  $C^-$  на формирование среза импульса?

5.17 Для какой цели нагрузку шунтируют обратным включением диода?

5.18 Каковы особенности выполнения обмоток импульсных трансформаторов?

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1 Кузбных Н.И. Перспективная элементная база радиоэлектронных средств. Ч.2. Функциональные устройства РЭС: Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, 2007. – 205 с. (Раздел 7).

2 Ицхоки Я.З., Овчинников Н.И. Импульсные устройства.- М.: Сов.радио, 1972.- 592 с.

3 Балбашова Н.Б. Миниатюрные импульсные трансформаторы на ферритовых сердечниках.- М.: Энергия, 1976.- 120 с.

4 Вдовин С.С. Проектирование импульсных трансформаторов.- Л.: Энергия, 1971.- 148 с.