

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕРДЕЧНИКА НА РАБОТУ ТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНОЙ НАГРУЗКИ

Д. И. АНДЕРМАН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических станций и электрических сетей и систем)

В некоторых схемах электропитания электронных ускорительных устройств трансформаторы работают в режиме импульсной нагрузки, когда на первичную обмотку подается синусоидальное напряжение промышленной частоты, а ток в нагрузке протекает незначительную часть периода [1]. Напряжение переходного режима, возникающего при включении нагрузки, при соответствующем подборе параметров трансформатора и достаточной емкости вторичной обмотки относительно земли сохраняется постоянным по величине с определенной степенью точности в течение некоторого времени. Чем меньше предъявляемые требования к стабильности напряжения, тем больше возможная длительность импульса. В [2] приводятся результаты исследования влияния параметров трансформатора на максимально возможную длительность импульса при заданной стабильности напряжения.

В [1] и [2] магнитная проницаемость сердечника μ принималась равной бесконечности. В действительности μ имеет конечную величину и изменяется во времени в функции напряженности магнитного поля. В предлагаемой статье приведено сравнение результатов исследования влияния параметров трансформатора на максимально возможную длительность импульса с учетом и без учета ветви намагничивания.

Схема замещения с сосредоточенными параметрами трансформатора с импульсной нагрузкой при учете ветви намагничивания может быть представлена рис. 1.

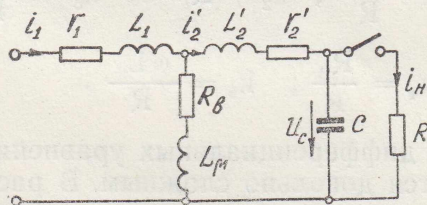


Рис. 1

Здесь

- r_1 и L_1 — активное сопротивление и индуктивность рассеяния первичной обмотки;
- r_2' и L_2' — приведенные к числу витков первичной обмотки соответственно активное сопротивление и индуктивность рассеяния вторичной обмотки;

C — приведенная величина выходной емкости, включающая в себя емкость вторичной обмотки относительно земли и дополнительно включенную емкость на выходе трансформатора;

R — приведенная величина сопротивления нагрузки;

L_{μ} и R_B — индуктивность ветви намагничивания и активное сопротивление, учитывающее потери на вихревые токи и перемагничивание сердечника.

R_B , как и L_{μ} , является функцией напряженности магнитного поля и потому изменяется во времени.

Уравнения электрического равновесия схемы рис. 1 в дифференциальной форме:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= -i_1 \frac{R_B L'_2 + r_1 L_{\mu} + r_1 L'_2}{L_{\mu} L'_2 + L_1 L_{\mu} + L_1 L'_2} + i'_2 \frac{L'_2 R_B - r'_2 L_{\mu}}{L_{\mu} L'_2 + L_1 L_{\mu} + L_1 L'_2} - \\ &\quad - u_C \frac{L_{\mu}}{L_{\mu} L'_2 + L_1 L_{\mu} + L_1 L'_2} + u_1 \frac{L_1 + L_{\mu}}{L_{\mu} L'_2 + L_1 L_{\mu} + L_1 L'_2}; \\ \frac{di_2}{dt} &= i_1 \frac{R_B L_1 - r_1 L_{\mu}}{L_{\mu} L'_2 + L_1 L_{\mu} + L_1 L'_2} - i'_2 \frac{r'_2 L_{\mu} + R_B L_1 + r'_2 L_1}{L_{\mu} L'_2 + L_1 L_{\mu} + L_1 L'_2} - \\ &\quad - u_C \frac{L_1 + L_{\mu}}{L_{\mu} L'_2 + L_1 L_{\mu} + L_1 L'_2} + u_1 \frac{L_{\mu}}{L_{\mu} L'_2 + L_1 L_{\mu} + L_1 L'_2}; \\ \frac{du_C}{dt} &= i'_2 \frac{1}{C} - u_C \frac{1}{RC}. \end{aligned} \quad (1)$$

Начальные значения функций i_{10} , i_{20} , u_{C0} зависят от параметров схемы замещения, от величины и фазы первичного напряжения:

$$\begin{aligned} i'_{10} &= \varphi_1(L_1, r_1, L'_2, r'_2, L_{\mu}, R_B, C, U_{1m}, \psi_1), \\ i'_{20} &= \varphi_2(L_1, r_1, L'_2, r'_2, L_{\mu}, R_B, C, U_{1m}, \psi_1), \\ u_{C0} &= \varphi_3(L_1, r_1, L'_2, r'_2, L_{\mu}, R_B, C, U_{1m}, \psi_1). \end{aligned} \quad (2)$$

Приняты допущения:

$$r_1 = r'_2 = \frac{r_K}{2}, \quad (3); \quad L_1 = L'_2 = \frac{L_S}{2}. \quad (4)$$

Расчет проводился в относительных единицах, где за базовые величины принято сопротивление нагрузки в течение импульса тока R , угловая частота первичного напряжения ω . Амплитуда подведенного первичного напряжения принята равной единице. Параметры трансформатора в относительных единицах определяются:

$$\begin{aligned} k_1 &= \frac{\omega L_S}{R}, \quad k_2 = R \omega C, \quad k_3 = \frac{r_K}{R}, \\ k_4 &= \frac{R_B}{R}, \quad k_5 = \frac{\omega L_{\mu}}{R}. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение системы дифференциальных уравнений (1) с учетом нелинейности представляется довольно сложным. В рассматриваемом режиме время включения нагрузки значительно меньше периода тока, что позволяет принять индуктивность ветви намагничивания постоянной. Включение нагрузки происходит в момент, близкий к моменту прохождения напряжения через максимум. При этом индукция в сердечнике близка к нулю, и магнитная проницаемость сердечника $\mu = \frac{dB}{dH}$ близка к своему максимальному значению.

Индуктивность ветви намагничивания может быть определена по

известным размерам магнитопровода и магнитной проницаемости. Так, например, для одного из изготовленных нами опытных образцов при относительной величине максимальной магнитной проницаемости $\mu_a = 6000$ отношение индуктивности ветви намагничивания к индуктивности рассеяния $\frac{L_{\mu}}{L_S} = 300$.

Активное сопротивление ветви намагничивания может быть принято равным его статической величине:

$$R_B = \frac{P_c}{I_0^2}, \quad (6)$$

где

P_c — потери в стали, *вт*;

I_a — ток холостого хода, *а*.

У обычных силовых трансформаторов отношение активного сопротивления ветви намагничивания к входному сопротивлению трансформатора

$$Z_{BX} = \frac{U_1}{I_1}$$

$$\frac{R_B}{Z_{BX}} = \frac{P_c I_1}{I_0^2 U_1} = \frac{P_c}{i_0^2 S} \quad (7)$$

находится в диапазоне $0,85 \div 2,0$ и уменьшается с уменьшением мощности трансформатора. Здесь $i_0 = \frac{I_0}{I_1}$ — относительная величина тока холостого хода, $S = U_1 I_1$ — мощность трансформатора, *ва*. Величину k_4 мы задавали в диапазоне $k_4 = 0,15 \div 2,0$.

Расчет проводился по алгоритму, аналогичному примененному при исследовании упрощенной схемы. В результате для каждого сочетания параметров выбранной эквивалентной схемы получена оптимальная фаза, при которой достигается максимальная продолжительность импульса τ , соответствующая заданной стабильности напряжения. Расчет предусматривает также получение численного значения напряжения на нагрузке в относительных единицах и времени τ . Для образца с параметрами схемы замещения $k_1 = 0,06$, $k_2 = 2,0$, $k_3 = 0,015$ при частоте $f = 50$ *гц* и $\varepsilon = 0,1\%$ при расчете без учета ветви намагничивания максимально возможная длительность импульса получилась 295 *мксек* при $\psi_1 = -116^\circ$. С учетом параметров ветви намагничивания $k_5 = 300$, $k_1, k_4 = 0,15; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$, $\tau = 315$ *мксек* при том же значении оптимальной фазы включения $\psi_1 = -116^\circ$.

Так как оптимальная фаза включения значительно отличается от момента прохождения напряжения через максимальное значение, мгновенное значение индуктивности ветви намагничивания может значительно отличаться от максимального. Были найдены значения τ для схемы с ветвью намагничивания при $k_5 = (7 \div 300) k_1$ и $k_4 = 0,15 \div 2,0$ и различных сочетаниях k_1, k_2, k_3 .

Сравнение полученных значений максимально возможной длительности импульса с учетом ветви намагничивания и без учета приведено на рис. 2. Пунктирной линией показана максимально возможная длительность импульса без учета ветви намагничивания. При $k_5 \geq 30k_1$ кривая переходного напряжения с учетом и без учета ветви намагничивания получается примерно одинаковой, следовательно, максимально возможная длительность импульса отличается незначительно. Изменение k_4 в указанных пределах почти не влияет на исследуемые процессы.

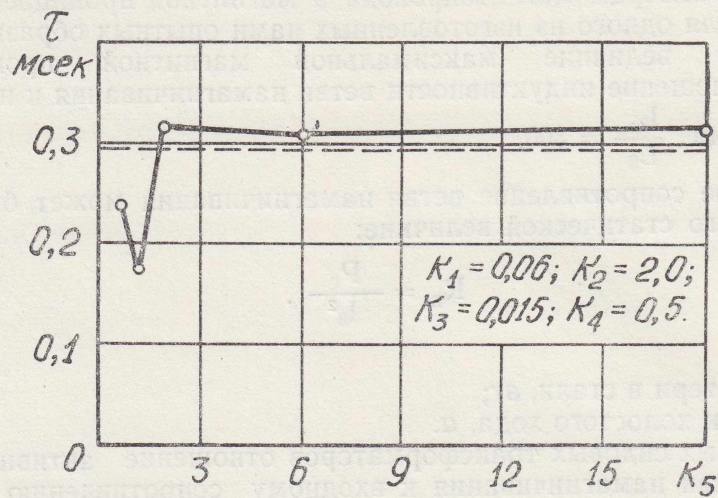


Рис. 2

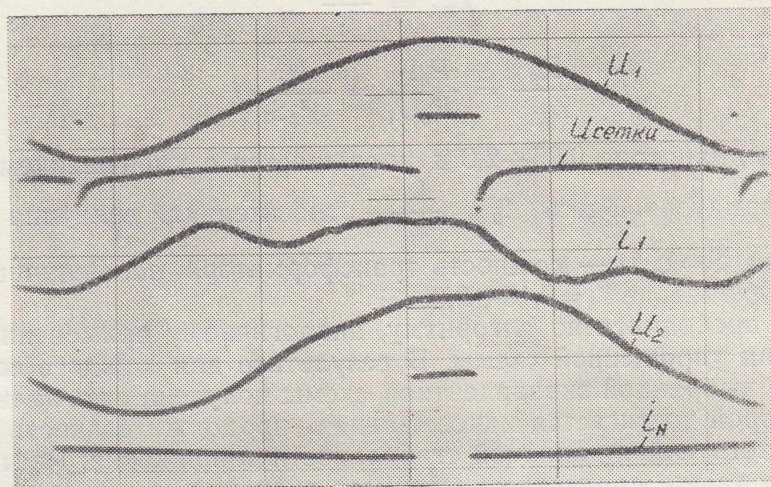


Рис. 3, а.

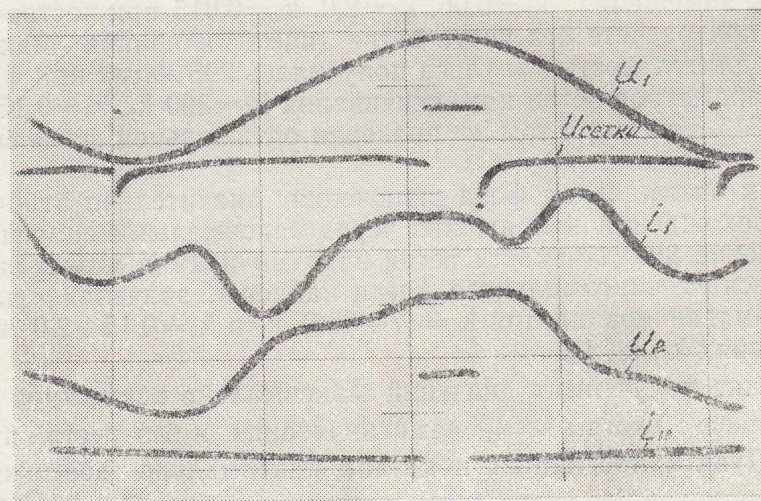


Рис. 3, б. Осциллограммы (сверху вниз) первичного напряжения, отпирающего сигнала, тока первичной обмотки, вторичного напряжения и тока в нагрузке для случаев, когда индукция в сердечнике а) $B=1,3$ тл, б) $B=1,73$ тл.

Аналогичные результаты получились в случаях повышенной емкости ($k_1=0,06$; $k_2=3,0$; $k_3=0,015$), повышенного активного сопротивления обмоток ($k_1=0,05$; $k_2=2,0$; $k_3=0,05$), повышенной индуктивности рассеяния обмоток ($k_1=0,1$; $k_2=2,0$; $k_3=0,01$).

Можно полагать, что при оптимальных фазах включения мгновенное значение индуктивности ветви намагничивания отличается от индуктивности рассеяния не менее, чем в 30 раз. Это позволяет не включать в схему замещения ветвь намагничивания.

С целью проверки правильности полученных теоретических результатов был проведен эксперимент. В макетном образце трансформатора, импульсный режим которого создавался путем подачи отпирающего сигнала на сетку триода, служившего нагрузкой, были сняты осциллограммы переходного напряжения при индукции в сердечнике 1,3 тл (рис. 3, а) и при уменьшенном сечении сердечника, индукция $B=1,73$ тл (рис. 3, б).

Во втором случае значительно увеличился ток намагничивания, вторичное напряжение стало несинусоидальным, а переходное напряжение при включении нагрузки осталось неизменным по сравнению с первым случаем.

Вывод

Исследование переходных процессов в трансформаторах, возникающих при включении нагрузки на незначительную часть периода, можно проводить по эквивалентной схеме, учитывающей индуктивность рассеяния обмоток, их активное сопротивление и емкость вторичной обмотки относительно земли. Введение в схему ветви намагничивания, учитывающей параметры сердечника, усложняя расчет, мало влияет на конечные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. И. Андерман, И. Д. Кутявин. О возможности использования высоковольтных трансформаторов в качестве источника электропитания электронных ускорительных трубок. Изв. ТПИ, т. 211, Томск, изд. ТГУ, 1970.
2. Д. И. Андерман, И. Д. Кутявин. О соотношении параметров трансформаторов, включенных на импульсную нагрузку. Там же.