

**А.В.БОРЦОВ**, НТУ «ХПИ»

## **УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ КОММУТАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ НА ФОРМУ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА НАГРУЗКЕ ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРНОГО ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ**

Розглянуто вплив часу комутації напівпровідникових приладів на форму, амплітудні і часові параметри імпульсів напруги на навантаженні трансформаторного джерела. Встановлена залежність тривалості фронту імпульсу від власних параметрів джерела і часу комутації напівпровідникових приладів.

Influence of time of commutation of semiconductor devices is considered on a form, peak and temporal parameters of pulses of voltage in a load of transformer source. Dependence of duration of pulse front is set on the own parameters of source and time of commutation of semiconductor devices.

**Постановка задачи.** Импульсный высоковольтный трансформаторный источник для электрофизических установок содержит следующие узлы (рис. 1): источник энергии – однофазная или трехфазная сеть, сетевой выпрямитель, сглаживающий фильтр, однотактный или двухтактный инвертор напряжения, импульсный трансформатор, системы управления и измерений, нагрузка.

Сетевой выпрямитель, как правило, выполняется по мостовым схемам выпрямления – схема Грета для однофазной сети, схема Ларионова для трехфазной сети. В качестве выпрямителей можно использовать регулируемые одно – и трехфазные выпрямители.

Основными узлами силового контура импульсного трансформаторного источника являются: инвертор напряжения, преобразующий постоянное напряжение в импульсное и импульсный трансформатор, обеспечивающий в нагрузке требуемые параметры импульсов тока и напряжения.

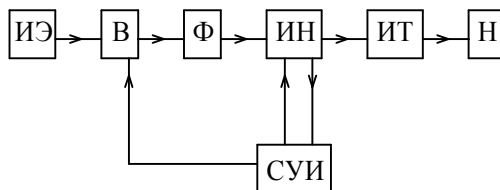


Рисунок 1 – Блок – схема импульсного трансформаторного источника:  
 ИЭ – источник энергии; В – сетевой выпрямитель; Ф – сглаживающий фильтр;  
 ИН – инвертор напряжения; ИТ – импульсный трансформатор; Н – нагрузка;  
 СУИ – системы управления и измерений

Для новых электрофизических установок, таких как высоковольтные генераторы импульсных напряжений с субнаносекундной длительностью фронта импульса, высокочастотные установки на основе импульсного коронного разряда предъявляются достаточно жесткие требования к собственным параметрам силового контура импульсного трансформаторного источника – минимальные значения активного сопротивления, собственной индуктивности и паразитной емкости. Разработка и широкое внедрение новых ферромагнитных материалов позволило существенно снизить указанные параметры и актуальным становится учет влияния времени коммутации полупроводниковых приборов на форму, амплитудные и временные характеристики импульсов напряжения в нагрузке.

Схема замещения силового контура импульсного трансформаторного источника отличается от известных [1] тем, что в ней наряду с параметрами схемы замещения импульсного трансформатора учитывается время включения и выключения полупроводникового ключа (рис. 2).

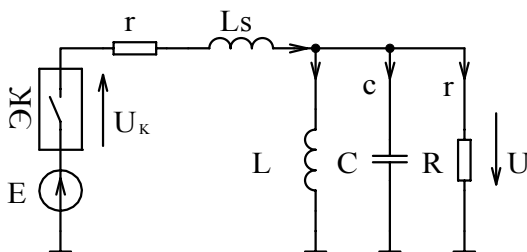


Рисунок 2 – Схема замещения силового контура импульсного трансформаторного источника:  $E$  – напряжение источника энергии; ЭК – полупроводниковый ключ (тиристор, транзистор);  $U_k$  – напряжение на ключе;  $r = r_1 + r_n + r'_2$ ,  $r_1$  – активное сопротивление первичной обмотки ИТ,  $r_n$  – сопротивление соединительных проводов,  $r'_2$  – приведенное к первичной обмотке активное сопротивление вторичной обмотки;  $L_S = L_{S1} + L_n + L'_{S2}$ ,  $L_{S1}$  – индуктивность рассеивания первичной обмотки,  $L_n$  – индуктивность соединительных проводов,  $L'_{S2}$  – приведенная к первичной обмотке индуктивность рассеивания вторичной обмотки;  $L_\mu$  – индуктивность намагничивания ИТ;  $C = C_1 + C'_2 + C_T + C'_H$ ,  $C_1$  – емкость первичной обмотки ИТ,  $C'_2$  – приведенная к первичной обмотке емкость вторичной обмотки ИТ,  $C_T$  – межобмоточная емкость ИТ,  $C'_H$  – приведенная к первичной обмотке емкость нагрузки;  $R$  – приведенное к первичной обмотке сопротивление нагрузки;  $U$  – приведенное к первичной обмотке напряжение на нагрузке

Время включения и выключения полупроводникового ключа будем учитывать заданием закона изменения напряжения на ключе:

$$U_k(t) = \begin{cases} E, t < 0; \\ E(1 - \frac{t}{t_{\text{вкл}}}), 0 < t < t_{\text{вкл}}; \\ 0, t_{\text{вкл}} < t < T_{\text{И}} - t_{\text{выкл}}; \\ E(1 - \frac{T_{\text{И}} - t}{t_{\text{выкл}}}), T_{\text{И}} - t_{\text{выкл}} < t < T_{\text{И}}; \\ E, t > T_{\text{И}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t_{\text{вкл}}$ ,  $t_{\text{выкл}}$  – время включения и выключения полупроводникового ключа;  
 $T_{\text{И}}$  – длительность импульса.

Осциллограмма изменения во времени напряжения на ключе имеет вид (рис. 3).

Переходной процесс в силовом контуре импульсного трансформаторного источника описывается системой интегро-дифференциальных уравнений [2]:

$$\begin{cases} ri(t) + L_S \frac{di(t)}{dt} + u(t) = f(t); \\ i(t) = i_{\mu}(t) + i_c(t) + i_r(t); \\ i_{\mu}(t) = \frac{1}{L_{\mu}} \int_0^t u(t) dt + i_{\mu}(0); \\ i_c(t) = C \frac{du(t)}{dt}; \\ i_r(t) = \frac{u(t)}{R}, \end{cases} \quad (2)$$

и начальными условиями

$$\begin{cases} u(0) = 0; \\ i(0) = 0; \\ i_{\mu}(0) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$f(t) = \begin{cases} 0, t < 0; \\ \frac{E}{t_{\text{вкл}}} t, 0 < t < t_{\text{вкл}}; \\ E, t_{\text{вкл}} < t < T_{\text{И}} - t_{\text{выкл}}; \\ \frac{E}{t_{\text{выкл}}} (T_{\text{И}} - t), t > T_{\text{И}}. \end{cases} \quad (4)$$

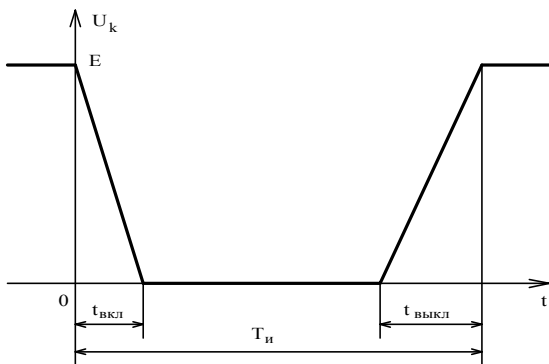


Рисунок 3 – Закон изменения во времени напряжения на ключе

Из (2) и (3) несложно получить дифференциальное уравнение и начальные условия для напряжения на нагрузке

$$\frac{d^3 u}{d\tau^3} + 2\xi \frac{d^2 u}{d\tau^2} + [1 + k_R(k_L - 1)] \frac{du}{d\tau} + \eta u = k_R \frac{df}{d\tau}; \quad (5)$$

$$u(0) = \frac{du(0)}{d\tau} = \frac{d^2 u(0)}{d\tau^2} = 0, \quad (6)$$

где  $k_R = \frac{R}{r + R}$  – коэффициент передачи напряжения по сопротивлениям;

$k_L = \frac{L_\mu}{L_\mu + L_S}$  – коэффициент передачи напряжения по индуктивностям;

$\xi = \frac{\sqrt{k_R}}{2} \left( \frac{r}{\rho} + \frac{\rho}{R} \right)$  – коэффициент затухания контура;

$\rho = \sqrt{\frac{L_S}{C}}$  – характеристическое сопротивление контура;

$\theta_\theta = \sqrt{(k_R L_S C)}$  – высокочастотная постоянная времени контура;

$\tau = \frac{t}{\theta_\theta}$  – безразмерное время;

$\theta_\eta = L_\mu \frac{r + R}{rR}$  – низкочастотная постоянная времени контура;

$\eta = \frac{\theta_\theta}{\theta_\eta}$ ;

$$\frac{df}{d\tau} = \begin{cases} 0, \tau < 0; \\ \frac{E}{\tau_{вкл}}, 0 < \tau < \tau_{вкл}; \\ 0, \tau_{вкл} < \tau < \tau_{II} - \tau_{выкл}; \\ -\frac{E}{\tau_{выкл}}, \tau_{II} - \tau_{выкл} < \tau < \tau_{II}; \\ 0, \tau > \tau_{II}. \end{cases} \quad (7)$$

При решении уравнения (5) используем пакет прикладных программ *Electronics Work Bench Pro* [3]. Для удобства вычислений при использовании пакета *Electronics Work Bench Pro* понизим порядок уравнения (5) и введем безразмерное напряжение на нагрузке  $v(\tau) = \frac{u(\tau)}{k_R E}$ . В результате получим

безразмерное интегро-дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 v}{d\tau^2} + 2\xi \frac{dv}{d\tau} + [1 + k_R(k_L - 1)]v + \eta \int_0^{\tau} v d\tau = g, \quad (8)$$

с начальными условиями

$$v(0) = \frac{dv(0)}{d\tau} = 0, \quad (9)$$

где

$$g(\tau) = \begin{cases} 0, \tau < 0; \\ \frac{\tau}{\tau_{вкл}}, 0 < \tau < \tau_{вкл}; \\ 1, \tau_{вкл} < \tau < \tau_{II} - \tau_{вкл}; \\ \frac{\tau_{II} - \tau}{\tau_{вкл}}, \tau_{II} - \tau_{вкл} < \tau < \tau_{II}; \\ 0, \tau > \tau_{II}. \end{cases} \quad (10)$$

В среде *Electronics Work Bench Pro* уравнению (8) с начальными условиями (9) соответствует расчетная модель (рис. 4). Расчетная модель (рис. 4) позволяет с минимальными затратами времени исследовать влияние параметров полупроводникового ключа и импульсного трансформатора на переходной процесс в силовом контуре высоковольтного импульсного источника.

Для важного на практике случая  $L_S / L_\mu \ll 1$ , что соответствует случаю правильно спроектированного и изготовленного импульсного трансформатора, с помощью расчетной модели (8) исследована зависимость длительности фронта импульса напряжения на нагрузке  $T_\phi$  от времени включения полупроводникового ключа  $T_{вкл}$  и коэффициента затухания контура  $\xi$  (рис. 5). В

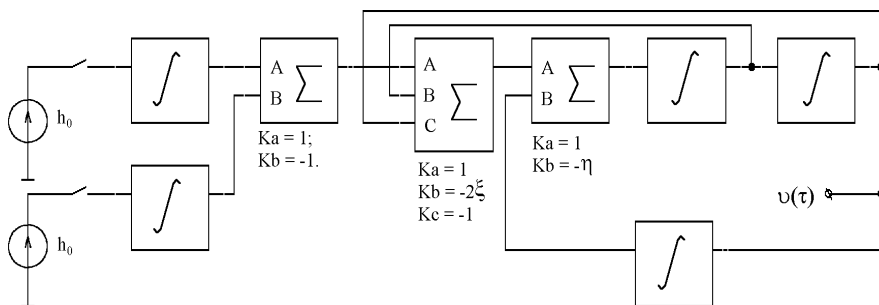


Рисунок 4 – Расчетная модель уравнения (8):  $\Sigma$  – суммирующий блок;  $\int$  – интегрирующий блок;  $k_a, k_b, k_c$  – масштабирующие множители.

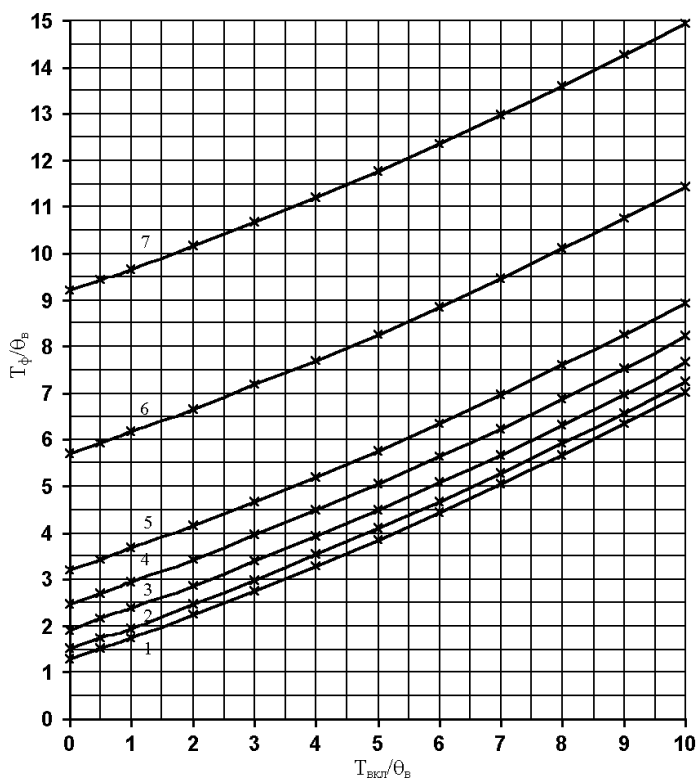


Рисунок 5 – Зависимость длительности фронта  $T_\phi$  от времени включения полупроводникового ключа  $T_{вкл}$  и коэффициента затухания  $\xi$  (в единицах высокочастотной постоянной времени  $\theta_a$ ): 1 –  $\xi = 0,2$ ; 2 –  $\xi = 0,4$ ; 3 –  $\xi = 0,6$ ; 4 –  $\xi = 0,8$ ; 5 –  $\xi = 1,0$ ; 6 –  $\xi = 1,5$ ; 7 –  $\xi = 2,0$ .

случае  $T_{вкл} \ll \theta_v$  (для быстродействующих полупроводниковых ключей) зависимость  $T_{\phi}(T_{вкл}, \xi)$  совпадает с зависимостью  $T_{\phi}(\xi)$ , полученной в [4].

### **Выводы.**

1. В работе уточнена схема замещения импульсного трансформаторного источника. Для этого использована модель полупроводникового ключа с конечными временами включения и выключения.

2. Для уточненной схемы замещения получены интегро-дифференциальное уравнение для напряжения на нагрузке и расчетная модель в среде *Electronics Work Bench Pro*.

3. С помощью расчетной модели установлена зависимость длительности фронта импульса от коэффициента затухания и времени включения полупроводникового ключа.

**Список литературы:** 1. С.С.Водвин Проектирование импульсных трансформаторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. 2. Л.А.Бессонов Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп. Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. – М., Высшая школа, 1973. – 752с. 3. В.И.Карлачук. Электронная лаборатория на IBM PC. Издание 2-е, дополненное и переработанное. – М.: Солон-Р, 2001. – 726 с. 4. Я.С.Иццоки Импульсные устройства. – М.: Советское радио, 1959 – 728 с.

*Поступила в редколлегию 26.04.2008*

УДК 621.315

**В.С.БЫКОВ**; НТУ «ХПИ»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УСИЛЕНИЯ СВЯЗЕЙ СИСТЕМООБРАЗУЮЩЕЙ СЕТИ ЮЖНОЙ ЭЭС УКРАИНЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ УПРАВЛЯЕМЫХ САМОКОМПЕНСИРУЮЩИХСЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

В статті виконано розрахунки режимів роботи кільцевої мережі частини Південної ЕЕС з включенням електропередачі нового типу – УСВЛ, які показали доцільність їх застосування для посилення системоутворюючої мережі ОЕС України.

In given paper the calculations of modes of operations of a circle network of a part of Southern EES with inclusion of transmission line of a new type - USVL were executed which have shown expediency of their application for amplification of a system-forming network OES of Ukraine.

### **Введение и постановка задачи**

Системообразующие сети ОЭС Украины обеспечивают необходимое распределение потоков мощности и выдачу мощности генерирующих источ-