

## **АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ТИПА**

**Кадацкий Анатолий Федорович,**

доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедрой автоматизации, робототехники и электропитания  
Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, Одесса,  
Украина

**Русу Александр Петрович**

кандидат технических наук,  
ст. преп. кафедры автоматизации, робототехники и электропитания  
Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, Одесса,  
Украина

**Ерыкалина Татьяна Николаевна**

преп. кафедры автоматизации, робототехники и электропитания  
Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, Одесса,  
Украина

Технико-экономические показатели (надежность, энергопотребление, объём, масса) радиотехнических и телекоммуникационных устройств и систем неразрывно связаны с характеристиками устройств и систем электропитания, в состав которых входят преобразователи постоянного напряжения (ППН).

Уменьшению массы и габаритов ППН, при одновременном увеличении их КПД, способствует использование автотрансформаторного включения дросселя и функционирование силовой части ППН в граничном режиме [1]. Это позволяет перераспределить максимальные и действующие значения токов силовых коммутирующих элементов и уменьшить энергетические потери.

Автоматизированное моделирование, исследование и проектирование ППН играет важную роль при выборе оптимальных вариантов схмотехнической реализации и выявлении их особенностей. Широкое использование автоматизированного моделирования для исследования и проектирования ППН предполагает наличие математических моделей, адекватно описывающих протекающие процессы в элементах и цепях ППН.

В работе использованы математические модели для расчета импульсных преобразователей постоянного напряжения инвертирующего типа с граничным режимом функционирования [1]. В табл. 1, 2 приведены основные расчетные соотношения этих моделей с использованием следующих обозначений:  $U_{\text{н}}$  и  $U_{\text{н}}$  – напряжения источника первичного электропитания и в цепи нагрузки;  $i_{L_{\text{н}}}(t)$ ,  $i_{L_{\text{в}}}(t)$  и  $u_{L_{\text{в}}}(t)$  – токи и напряжения, приложенные к накопительному дросселю на интервалах, соответственно, накопления  $t_{\text{н}}$  и возврата  $t_{\text{в}}$ ;  $L_1$ ,  $L_2$  – индуктивности обмоток накопительного дросселя с числом витков, соответственно  $W1$  и  $W2$ ;  $n_{21}$

– коэффициент трансформации накопительного дросселя;  $u_{w1}(t)$ ,  $u_{w2}(t)$  – мгновенные значения напряжений;  $I_{m1}$ ,  $I_{m2}$ ,  $i_{w1}(t)$ ,  $i_{w2}(t)$  – размахи пульсаций и мгновенные значения токов этих обмоток.

Таблица 1.

Уравнения токов и напряжений элементов в силовой части преобразователя

Элемент	Интервал периода	
	$0 < t \leq t_H$	$t_B < t \leq T$
$u_L(t)$	$U_{LH} = U_{\Pi}$	$U_{LB} = U_H$
$i_{w1}(t)$	$I_{m1}t/t_H$	0
$i_{w2}(t)$	0	$I_{m2}[1 + (t_H - t)/t_B]$
$i_L(t), i_{w12}(t)$	$i_{LH} = I_{m1}t/t_H$	$i_{LB} = I_{m2}[1 + (t_H - t)/t_B]$
$i_{S1}(t)$	$n_{21}[I_{m1}t/t_H]$	0
$i_{VD1}(t)$	0	$I_{m2}[1 + (t_H - t)/t_B]$
$i_{\Pi}(t)$	$n_{21}[I_{m1}t/t_H]$	0
$i_H(t)$	0	$I_{m2}[1 + (t_H - t)/t_B]$
$u_{w1}(t)$	$U_{\Pi}$	$-U_H/n_{21}$
$u_{w2}(t)$	$U_{\Pi}n_{21}$	$-U_H$
$u_{w12}(t)$	$U_{\Pi}$ (при $n_{21} \geq 1$ ), $n_{21}U_{\Pi}$ (при $n_{21} < 1$ )	$-U_H/n_{21}$ (при $n_{21} \geq 1$ ), $-U_H$ (при $n_{21} < 1$ )

Таблица 2.

Математические модели параметров электрических процессов

Параметр	Режим стабилизации	Режим слежения
Коэффициент накопления $\kappa_H = t_H/T$	$U_H/(U_{\Pi}n_{21} + U_H)$	$\kappa_H$
Коэффициент возврата $\kappa_B = t_B/T$	$n_{21}U_{\Pi}/(U_H + n_{21}U_{\Pi})$	$1 - \kappa_H$
Норм. напряжение нагрузки $\bar{U}_H$	$U_H/U_{\Pi}$	$\kappa_H n_{21}/(1 - \kappa_H)$
Норм. напряжение нагрузки $\bar{U}_{\Pi}$	$U_{\Pi}/U_H$	$(1 - \kappa_H)/\kappa_H n_{21}$
Частота преобразования $f_{гр}$	$R_H U_{\Pi}^2 / 2L_1 [U_{\Pi}n_{21} + U_H]^2$	$R_H (1 - \kappa_H)^2 / 2L_1 n_{21}^2$
Период преобразования $T_{гр}$	$2L_1 [U_{\Pi}n_{21} + U_H]^2 / R_H U_{\Pi}^2$	$2L_1 n_{21}^2 / R_H (1 - \kappa_H)^2$
Индуктивность дросселя $L_{1гр}$	$R_H U_{\Pi}^2 / 2f [U_{\Pi}n_{21} + U_H]^2$	$R_H T (1 - \kappa_H)^2 / 2n_{21}^2$
Сопротивление нагрузки $R_{H гр}$	$2L_1 [U_{\Pi}n_{21} + U_H]^2 / T U_{\Pi}^2$	$2L_1 n_{21}^2 / T (1 - \kappa_H)^2$
Размах пульс. тока $I_{m1}$ в обм. $W_1$ дросселя $L_1$	$U_{\Pi} T U_H / L_1 (U_{\Pi}n_{21} + U_H)$	$U_{\Pi} \kappa_H T / L_1$
Размах пульс. тока $I_{m2}$ в обм. $W_2$ дросселя $L_1$	$U_{\Pi} T U_H / n_{21} L_1 (U_{\Pi}n_{21} + U_H)$	$U_{\Pi} \kappa_H T / n_{21} L_1$
Средн. знач. тока, потребл. от ист. электропит. $I_{\Pi}$	$U_H^2 U_{\Pi} T / [U_{\Pi}n_{21} + U_H]^2 2L_1$	$\kappa_H^2 U_{\Pi} T / 2L_1$
Среднее знач. тока нагрузки $I_H$	$U_H U_{\Pi}^2 T / (U_{\Pi}n_{21} + U_H)^2 2L_1$	$(1 - \kappa_H) U_{\Pi} \kappa_H T / 2n_{21} L_1$
Средние знач. токов $I_{S1} = I_{W1}$	$U_H^2 U_{\Pi} T / [U_{\Pi}n_{21} + U_H]^2 2L_1$	$\kappa_H^2 U_{\Pi} T / 2L_1$
Средние знач. токов $I_{VD1} = I_{W2}$	$U_H U_{\Pi}^2 T / (U_{\Pi}n_{21} + U_H)^2 2L_1$	$(1 - \kappa_H) U_H \kappa_H T / 2n_{21} L_1$
Среднее знач. тока $I_{W12}$	$U_H U_{\Pi} T (U_H + U_{\Pi}) / (U_{\Pi}n_{21} + U_H)^2 2L_1$	$U_H \kappa_H T (1 - \kappa_H + \kappa_H n_{21}) / 2n_{21}$
Макс. токи $I_{S1 \max}, I_{W1 \max}, I_{\Pi \max}$	$U_{\Pi} \kappa_H T / L_1$	$U_{\Pi} T U_H / L_1 (U_{\Pi}n_{21} + U_H)$
Макс. токи $I_{S2 \max}, I_{W2 \max}, I_{H \max}$	$U_{\Pi} \kappa_H T / n_{21} L_1$	$U_{\Pi} T U_H / n_{21} L_1 (U_{\Pi}n_{21} + U_H)$
Макс. ток $I_{W12 \max}$	$U_{\Pi} T U_H / L_1 (U_{\Pi}n_{21} + U_H)$ при $n_{21} \geq 1$ $U_{\Pi} T U_H / n_{21} L_1 (U_{\Pi}n_{21} + U_H)$ при $n_{21} < 1$	$U_{\Pi} \kappa_H T / L_1$ при $n_{21} \geq 1$ $U_{\Pi} \kappa_H T / n_{21} L_1$ при $n_{21} < 1$
Макс. напряжение $U_{S1 \max}$	$U_{\Pi} + U_H / n_{21}$	$U_{\Pi} + U_{\Pi} \kappa_H n_{21}^2 / (1 - \kappa_H)$

Параметр	Режим стабилизации	Режим слежения
Макс. напряжение $U_{S2 \max}$	$U_{\text{н}} + U_{\text{н}} n_{21}$	$U_{\text{н}} n_{21} + U_{\text{н}} n_{21} k_{\text{н}} / (1 - k_{\text{н}})$
Макс. напряжение $U_{W1 \max}$	$\max(U_{\text{н}}, U_{\text{н}} / n_{21})$	$\max(U_{\text{н}}, U_{\text{н}} k_{\text{н}} / (1 - k_{\text{н}}))$
Макс. напряжение $U_{W2 \max}$	$\max(U_{\text{н}} n_{21}, U_{\text{н}})$	$\max(U_{\text{н}} n_{21}, U_{\text{н}} k_{\text{н}} n_{21} / (1 - k_{\text{н}}))$
Макс. напряжение $U_{W12 \max}$	$\max(U_{\text{н}}, U_{\text{н}} / n_{21})$ при $n_{21} \geq 1$ $\max(U_{\text{н}} n_{21}, U_{\text{н}})$ при $n_{21} < 1$	$\max(U_{\text{н}}, U_{\text{н}} k_{\text{н}} / (1 - k_{\text{н}}))$ $\max(U_{\text{н}} n_{21}, U_{\text{н}} k_{\text{н}} n_{21} / (1 - k_{\text{н}}))$

На рис. 1 приведён алгоритм программы для расчёта по полученным математическим моделям параметров электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения инвертирующего типа. В блоке 2 задаются исходные данные, необходимые для расчета. В зависимости вида исследований используются функции от коэффициента накопления (блоки 3.1 и 4.1), относительного напряжения питания (блоки 3.2 и 4.2), коэффициента трансформации (блоки 3.3 и 4.3) или другого параметра.

На рис. 3 показаны зависимости, построенные по алгоритмам (рис. 1), частоты  $f$  (рис. 2, а) и максимальных значений напряжений  $U_{S1 \max}$ ,  $U_{S2 \max}$  на ключах  $S_1$ ,  $S_2$  (рис. 2, б) от относительного напряжения питания.

По результатам данной статьи можно сделать следующие выводы.

1. Предложены алгоритмы для моделирования параметров электрических процессов преобразователей постоянного напряжения инвертирующего типа с граничным режимом функционирования для режимов слежения и стабилизации.

2. Алгоритмы позволяют моделировать электрические процессы в преобразователях постоянного напряжения инвертирующего типа с граничным режимом функционирования, исследовать и устанавливать влияние параметров элементов на характер электрических процессов.

3. Предложенные алгоритмы моделирования электрических процессов являются основой для решения задач исследования и проектирования импульсных преобразователей постоянного напряжения инвертирующего типа с граничным режимом функционирования.

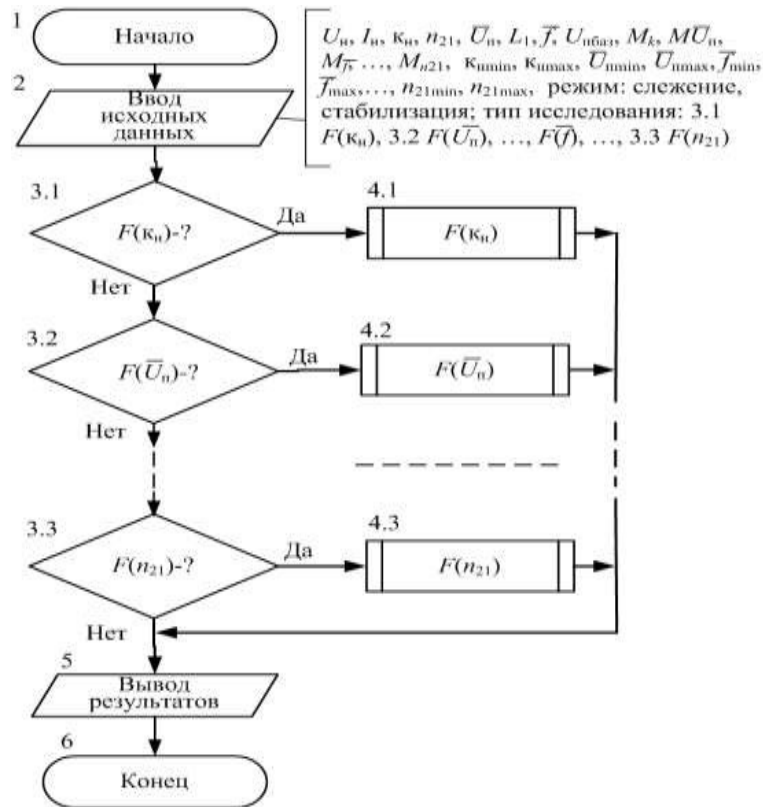


Рисунок 1. Алгоритм программы для расчета параметров электрических процессов преобразователей инвертирующего типа

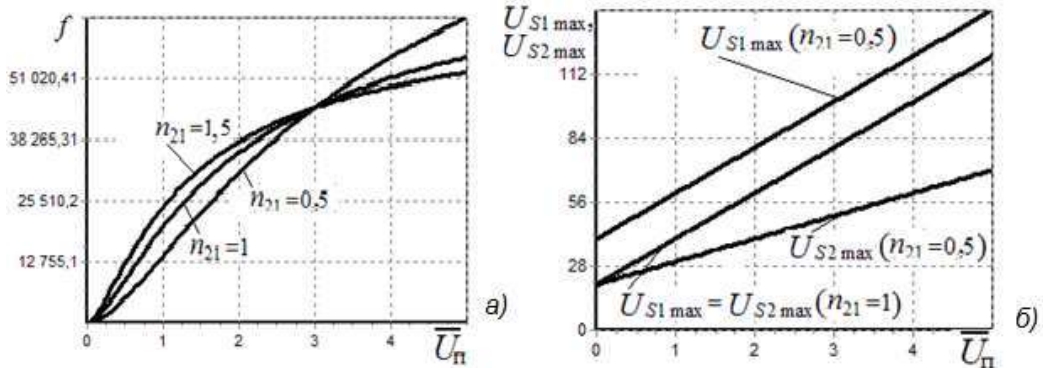


Рисунок 2. Зависимости частоты  $f(a)$ ; максимальных значений напряжений  $U_{S1 \max}, U_{S2 \max}$  на ключах  $S_1, S_2$  (б) от относительного напряжения питания  $\bar{U}_n$  при  $n_{21}=0,5, 1, 1,5$

### Список литературы

1. Кадацкий А.Ф. Математические модели параметров электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения инвертирующего типа с граничным режимом функционирования / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу, Т.Н. Ерыкалина, А.С. Криль // «Наукові праці ОНАЗ», – 2016. – № 1. – С. 55 – 72.