

УДК 621.314.2

ПРИНЦИПЫ, АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С СИЛОВЫМИ КАНАЛАМИ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ТИПА

Кадацкий А.Ф., Русу А.П., Ерыкалина Т.Н., Криль А.С.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.*

kaferda.tec@onat.edu.ua

ПРИНЦИПИ, АЛГОРИТМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ В ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З СИЛОВИМИ КАНАЛАМИ ІНВЕРТУВАЛЬНОГО ТИПУ

Кадацький А.Ф., Русу О.П., Єрикаліна Т.М., Криль О.С.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.*

kaferda.tec@onat.edu.ua

PRINCIPLES AND ALGORITHMS OF MODELING AND RESEARCH OF THE PULSATIONS IN A DC-DC CONVERTERS WITH BUCK-BOOST TYPE CHANNELS

Kadatskyy A.F., Rusu A.P., Erykalina T.N., Kril A.S.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kovalska St., Odessa, 65029, Ukraine*

kaferda.tec@onat.edu.ua

Аннотация. Приведены математические модели пульсаций токов и напряжений во входных и выходных цепях импульсных преобразователей постоянного напряжения модульной структуры с силовыми каналами инвертирующего типа с граничным режимом функционирования с однофазным и многофазным принципами преобразования. Представлены принципы, алгоритмы и результаты моделирования и исследования пульсаций токов и напряжений в преобразователях электрической энергии модульной структуры инвертирующего типа при однофазном и многофазном принципах преобразования с граничным режимом функционирования.

Ключевые слова: импульсный преобразователь напряжения, многофазный, однофазный принципы преобразования, модульная структура преобразователя, силовой канал, граничный режим функционирования, математическая модель.

Анотація. Наведено математичні моделі пульсацій струмів і напруг у вхідних і вихідних колах імпульсних перетворювачів постійної напруги модульної структури з силовими каналами інвертувального типу з граничним режимом функціонування з однофазним і багатофазним принципами перетворення. Представлені принципи, алгоритми і результати моделювання і дослідження пульсацій струмів і напруг у перетворювачах електричної енергії модульної структури інвертувального типу при однофазному і багатофазному принципах перетворення з граничним режимом функціонування.

Ключові слова: імпульсний перетворювач напруги, багатофазний, однофазний принципи перетворення, модульна структура перетворювача, силовий канал, граничний режим функціонування, математична модель.

Abstract. Mathematical models ripple currents and voltages in input and output circuits of pulse converters DC modular structure with power channels of the inverting type with the boundary mode operation with single-phase and multiphase transformation principles are submitted. The principles, algorithms and results of simulation studies and ripple currents and voltages in electrical power converters modular structure of the inverting type for single phase and multiphase conversion principle with the boundary mode operation are presented.

Key words: Switching voltage converter, single-phase, single-phase conversion principles, the modular structure of the converter, the power channel, the boundary mode operation, the mathematical model.

Технико-экономические показатели (надежность, энергопотребление, объём, масса) радиотехнических и телекоммуникационных устройств и систем неразрывно связаны с характеристиками устройств и систем электропитания, которые представляют собой совокупность преобразователей электрической энергии постоянного и переменного напряжения.

Использование импульсного метода преобразования и регулирования электрической энергии позволяет создавать устройства и системы с более высокой удельной мощностью и характеристиками, недостижимыми при использовании других методов. Поэтому совершенствование импульсных преобразователей электрической энергии является актуальным.

В преобразовательной технике широко используется параллельное и (или) последовательное подключение как отдельных элементов (транзисторов, диодов, дросселей, и др.), так и устройств преобразования и регулирования электрической энергии. Модульная структура построения импульсных преобразователей постоянного напряжения – ППН из N однотипных силовых каналов (СК – взаимозаменяемых преобразователей меньшей мощности) обладает рядом положительных свойств [1]. Например, способствует повышению коэффициента полезного действия, надежности, нагрузочной способности силовых коммутирующих элементов и ППН в целом.

Однако наличие реактивных элементов, функционально необходимых при импульсном преобразовании, затрудняет миниатюризацию импульсных преобразователей. Уменьшение массы и объёма реактивных элементов достигается повышением частоты преобразования, но это приводит к увеличению частотных потерь, что также препятствует миниатюризации ППН.

Дальнейшее развитие методов миниатюризации импульсных преобразователей модульной структуры достигается переходом к многофазному принципу преобразования электрической энергии, когда электрические процессы (токи, напряжения) в отдельно взятых СК сдвигаются во времени относительно друг друга, что позволяет уменьшить размеры входного и выходного силовых сглаживающих фильтров.

Автоматизированное моделирование, исследование и проектирование ППН играет важную роль при выборе оптимальных вариантов схемотехнической реализации преобразователей и выявлении особенностей режимов их функционирования.

В работах [2...4] приведены математические модели преобразователей модульной структуры для исследования фильтрующих свойств по **току** при однофазном и многофазном принципах преобразования с СК понижающего, повышающего и инвертирующего типа. В работе [3] были представлены алгоритмы построения временных зависимостей **токов** в отдельно взятых силовых каналах СК и в преобразователях модульной структуры построения с однофазным и многофазным принципами преобразования. Однако математические модели и алгоритмы моделирования и исследования пульсаций **напряжений** в импульсных преобразователях ППН модульной структуры с однофазным и многофазным принципами преобразования отсутствуют. Это сдерживает их широкое использование на практике.

Цели и задачи исследования – разработка принципов, алгоритмов моделирования и исследования пульсаций токов и напряжений в преобразователях электрической энергии модульной структуры с силовыми каналами инвертирующего типа при однофазном и многофазном принципах преобразования с граничным режимом функционирования.

На рис. 1 приведена структурная схема преобразователя постоянного напряжения ППН модульной структуры из N параллельно включённых силовых каналов СК. Варианты схемотехнической реализации силовых каналов инвертирующего типа, рассматриваемых в

данной статье, показаны на рис. 2 (силовые каналы инвертирующего типа с автотрансформаторным при $n_{21} = 1$ (а), $n_{21} > 1$ (б), $n_{21} < 1$ (в) и трансформаторным (г) включением дросселя).

На базе ППН модульной структуры (рис. 1) может быть реализован однофазный импульсный преобразователь (ОИП) и многофазный импульсный преобразователь (МИП).

В однофазном импульсном преобразователе ОИП (рис. 1) обеспечивается однофазный принцип преобразования электрической энергии, если временной сдвиг T_{pk} между электрическими процессами в отдельно взятых модулях (в k -х силовых каналах СК $_k$) отсутствует ($T_{pk} = 0$), силовые каналы СК работают синхронно и синфазно.

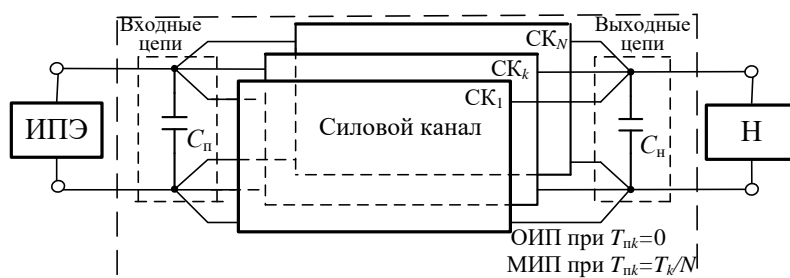


Рисунок 1 – Структурная схема ППН модульной структуры с однофазным ОИП и многофазным при $T_{pk} = T_k / N$ МИП принципами преобразования

В многофазном импульсном преобразователе МИП (рис. 1) обеспечивается многофазный принцип преобразования, если электрические процессы (токи, напряжения) в отдельно взятых СК сдвигаются равномерно относительно друг друга на время $T_{pk} > 0$, силовые каналы СК работают синхронно с равномерным сдвигом во времени электрических процессов относительно друг друга на время, равное $T_{pk} = T_k / N$.

Дроссели в k -х силовых каналах выполнены в виде двух полуобмоток – первичной, с числом витков W_{1k} и индуктивностью L_{1k} , и вторичной – W_{2k} , L_{2k} . В данной статье приняты используемые в [3] и обозначения, и условия идентичности параметров элементов в отдельно взятых силовых каналах СК: $W_{1k} = W_1$, $L_{1k} = L_1$ и $W_{2k} = W_2$, $L_{2k} = L_2$, $n_{21k} = n_{21} = W_2/W_1$.

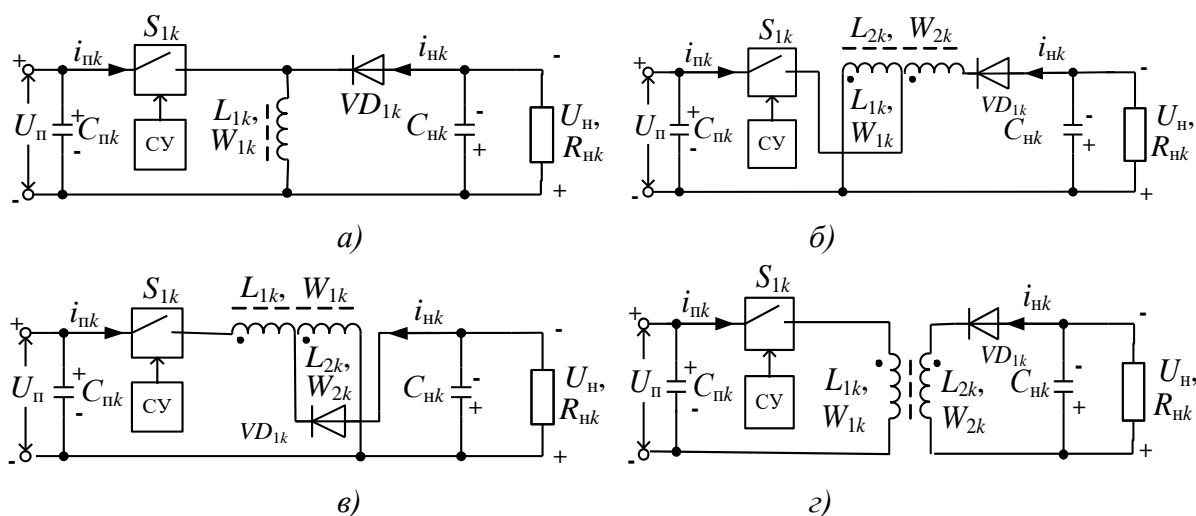


Рисунок 2 – Силовые каналы инвертирующего типа с включением дросселя: автотрансформаторным при $n_{21} = 1$ (а); $n_{21} > 1$ (б); $n_{21} < 1$ (в) и трансформаторным (г)

При моделировании и исследовании пульсаций токов и напряжений в импульсных преобразователях модульной структуры в качестве базовых выбраны параметры тока $i_{Lk}(t)$ и время t_k k -го силового канала СК [3]:

$$i_{Lk}(t) = \begin{cases} i_{Lhk}(t) & \text{при } (0 + t_{ck}) \leq t \leq (t_{hk} + t_{ck}); \\ i_{Lbk}(t) & \text{при } (t_{hk} + t_{ck}) < t \leq (t_{ck} + T_k), \end{cases} \quad (1)$$

$$i_{Lhk}(t) = \begin{cases} I_{m1k} \frac{t_k}{t_{hk}} & \text{при } (0 + t_{ck}) \leq t \leq (t_{hk} + t_{ck}); \\ 0 & \text{при } (t_{hk} + t_{ck}) < t \leq (t_{ck} + T_k), \end{cases} \quad (2)$$

$$i_{Lbk}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } (0 + t_{ck}) \leq t \leq (t_{hk} + t_{ck}); \\ I_{m2k} \left(1 + \frac{t_{hk} - t_k}{t_{bk}} \right) & \text{при } (t_{hk} + t_{ck}) < t \leq (t_{ck} + T_k), \end{cases} \quad (3)$$

$$t_k = \begin{cases} t - t_{ck} + T_k & \text{при } t < 0; \\ t - t_{ck} & \text{при } 0 \leq t < T_k; \\ t - t_{ck} - T_k & \text{при } t > T_k, \end{cases} \quad (4)$$

$$t_{ck} = \begin{cases} T_k(k-1)/N & \text{для МИП;} \\ 0 & \text{для ОИП,} \end{cases} \quad (5)$$

где I_{m1k} и I_{m2k} – размахи пульсаций токов $i_{Lhk}(t)$ и $i_{Lbk}(t)$ соответственно в обмотке с числом витков W_{1k} (на интервале времени t_{hk} накопления) и в обмотке с числом витков W_{2k} (на интервале времени t_{bk} возврата) силового дросселя выходного сглаживающего фильтра k -го СК; T_k – период электрических процессов в k -м СК, t_k – текущее время k -го СК.

В табл. 1 даны основные базовые параметры k -го силового канала СК: (коэффициент накопления κ_{hk} , напряжение нагрузки U_{hk} , относительное напряжение нагрузки \bar{U}_{hk} ; сопротивление нагрузки R_{hk} ; коэффициент возврата κ_{bk} ; частота преобразования $f_k = 1/T_k$; длительность интервала времени накопления t_{hk} в обмотке с числом витков W_{1k} , длительность интервала времени возврата t_{bk} в обмотке с числом витков W_{2k} ; размах I_{m1k} пульсации тока первичной обмотки, размах I_{m2k} пульсации тока вторичной обмотки; среднее значение тока нагрузки I_{hk} , среднее значение тока потребления I_{pk} . При симметрии электрических процессов $U_{pk} = U_{п}$; $U_{hk} = U_{п}$; $f_k = f$; $T_k = T = 1/f$; $\kappa_{hk} = \kappa_{п}$; $W_{1k} = W_1$; $W_{2k} = W_2$; $t_{hk} = t_{п}$; $I_{hk} = I_{п}/N$; $I_{pk} = I_{п}/N$.

Характер входного тока $i_{пk}(t)$, потребляемого k -м СК от источника первичного электропитания, определяется током $i_{Lk}(t)$ дросселя силового сглаживающего фильтра на интервале накопления t_{hk} (рис. 3, а):

$$i_{пk}(t) = i_{Lhk}(t). \quad (6)$$

Пульсацию (мгновенное значение $\Delta i_{пk}(t)$ – рис. 3, б) тока $i_{пk}(t)$ во входной цепи k -го силового канала СК определим в виде

$$\Delta i_{пk}(t) = i_{пk}(t) - I_{пk}. \quad (7)$$

Характер выходных токов $i_{hk}(t)$ – токов нагрузки k -х СК (соответственно и токов $i_{VD1k}(t)$ диодов VD_{1k}) определяется токами дросселей $i_{Lk}(t)$ на интервалах возврата (рис. 3, д):

$$i_{hk}(t) = i_{Lbk}(t). \quad (8)$$

Пульсацию $\Delta i_{пk}(t)$ (рис. 3, е) тока $i_{пk}(t)$ в выходной цепи k -го силового канала СК определим как

$$\Delta i_{нк}(t) = i_{нк}(t) - I_{нк} \quad (9)$$

Таблица 1 – Расчётные соотношения базовых параметров электрических процессов СК

Параметр	Режим	
	слежения	стабилизации
$K_{нк}$	$K_{нк}$ (1.1)	$U_{нк} / U_{нк} + U_{пк} n_{21}$ (1.2)
$U_{нк}$	$U_{пк} K_{нк} n_{21} / (1 - K_{нк})$ (1.3)	$U_{нк}$ (1.4)
$\bar{U}_{нк}$	$U_{нк} / U_{пк}$ (1.5)	
$R_{нк}$	$U_{нк} / I_{нк}$ (1.6)	
$K_{вк}$	$1 - K_{нк}$ (1.7)	
f_k	$(U_{пк}^2 R_{нк} U_{нк} - U_{пк}^2) / 2L_{1k} (U_{пк} (n_{21k} - 1) + U_{нк})^2$ (1.8)	
$t_{нк}$	$K_{нк} T$ (1.9)	
$t_{вк}$	$K_{вк} T$ (1.10)	
I_{m1k}	$U_{пк} t_{нк} / L_{1k}$ (1.11)	
I_{m2k}	$U_{пк} t_{нк} / L_{1k} n_{21k}$ (1.12)	
$I_{нк}$	$K_{вк} U_{пк} t_{нк} / 2L_{1k} n_{21k}$ (1.13)	
$I_{пк}$	$K_{н} U_{пк} t_{нк} / 2L_{1k}$ (1.14)	

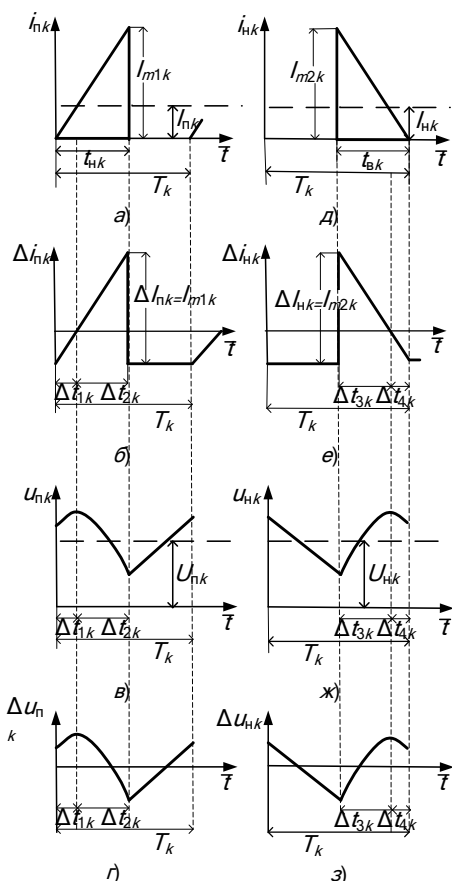


Рисунок 3 – Временные диаграммы k -го ($k = 1$) СК: токов $i_{пк}(t)$ (а); $i_{нк}(t)$ (д) и их пульсаций $\Delta i_{пк}(t)$ (б); $\Delta i_{нк}(t)$ (е) на входе и выходе, и напряжений $u_{пк}(t)$ (в); $u_{нк}(t)$ (ж) и их пульсаций $\Delta u_{пк}(t)$ (г); $\Delta u_{нк}(t)$ (з) соответственно на входе и выходе

С использованием соотношений (1)...(9) и (1.1)...(1.14) табл. 1 на рис. 3 приведены временные диаграммы токов в цепях питания $i_{пк}(t)$ (рис. 3, а), $\Delta i_{пк}(t)$ (рис. 3, б) и нагрузки $i_{нк}(t)$ (рис. 3, д), $\Delta i_{нк}(t)$ (рис. 3, е) при $n_{21} = 1$ отдельно взятого автономно функционирующего вне преобразователя k -го ($k = 1$) силового канала инвертирующего типа.

Импульсный характер входного тока $i_{пк}(t)$ (рис. 3, а), потребляемого k -м СК от источника первичного питания с напряжением $U_{пк} = U_{п}$ приводит к появлению и переменной составляющей – пульсации (мгновенное значение $\Delta u_{пк}(t)$ – рис. 3, в) напряжения $u_{пк}(t)$ отдельно взятого (автономно функционирующего вне ППН) k -го силового канала СК [5]:

$$u_{пк}(t) = U_{пк} - \Delta u_{пк}(t); \quad (10)$$

$$\Delta u_{пк}(t) = q_{пк}(t) / C_{пк}; \quad (11)$$

$$q_{пк}(t) = \begin{cases} q_{п0к} - I_{пк} \left(t_k - \frac{t_k^2}{2\Delta t_{1к}} \right) & \text{при } (0 + t_{ск}) \leq t_k \leq (\Delta t_{1к} + t_{ск}); \\ q_{п1к} + \left(I_{m1к} - I_{пк} \right) \frac{(t_k - \Delta t_{1к})^2}{2\Delta t_{2к}} & \text{при } (\Delta t_{1к} + t_{ск}) \leq t_k \leq (t_{пк} + t_{ск}); \\ q_{п2к} - I_{пк} (t_k - t_{пк}) & \text{при } (t_{пк} + t_{ск}) < t_k \leq (T_k + t_{ск}), \end{cases} \quad (12)$$

где $q_{пк}(t)$ – мгновенное значение электрического заряда входного конденсатора $C_{пк}$ k -го СК; $q_{п0к}$, $q_{п1к}$, $q_{п2к}$ (табл. 2) – значения электрических зарядов конденсатора $C_{пк}$ k -го СК соответственно в моменты времени $t = 0 + t_{ск}$, $t = \Delta t_{1к} + t_{ск}$, $t = \Delta t_{2к} + t_{ск}$ (табл. 2).

Таблица 2 – Расчетные соотношения базовых параметров

Элемент	Параметр	Расчетное соотношение	
$C_{пк}$	$q_{п1к}$	$-\frac{2I_{пк}\Delta t_{1к}^2}{6T_k} - \frac{(I_{m1к} - I_{пк})\Delta t_{2к}^2}{6T_k} - \frac{t_{вк}(I_{m1к} - I_{пк})\Delta t_{2к}}{2T_k} + \frac{I_{пк}t_{вк}^2}{2T_k}$	(2.1)
	$q_{п2к}$	$\frac{(I_{m1к} - I_{пк})\Delta t_{2к}}{2} - \frac{2I_{пк}\Delta t_{1к}^2}{6T_k} - \frac{(I_{m1к} - I_{пк})\Delta t_{2к}^2}{6T_k} - \frac{t_{вк}(I_{m1к} - I_{пк})\Delta t_{2к}}{2T_k} + \frac{I_{пк}t_{вк}^2}{2T_k}$	(2.2)
	$q_{п0к}$	$\frac{I_{пк}\Delta t_{1к}}{2} - \frac{2I_{пк}\Delta t_{1к}^2}{6T_k} - \frac{(I_{m1к} - I_{пк})\Delta t_{2к}^2}{6T_k} - \frac{t_{вк}(I_{m1к} - I_{пк})\Delta t_{2к}}{2T_k} + \frac{I_{пк}t_{вк}^2}{2T_k}$	(2.3)
$C_{пк}$	$q_{п1к}$	$-\frac{(I_{m2к} - I_{пк})\Delta t_{3к}^2}{3T_k} + \frac{I_{пк}t_{пк}^2}{2T_k} + \frac{I_{пк}\Delta t_{4к}^2}{6T_k} - \frac{I_{пк}t_{пк}^2}{T_k} - \frac{\Delta t_{3к}(I_{m1к} - I_{пк})\Delta t_{4к}}{2T_k}$	(2.4)
	$q_{п2к}$	$\frac{(I_{m2к} - I_{пк})\Delta t_{3к}}{2} - \frac{(I_{m2к} - I_{пк})\Delta t_{3к}^2}{3T_k} + \frac{I_{пк}t_{пк}^2}{2T_k} + \frac{I_{пк}\Delta t_{4к}^2}{6T_k} - \frac{I_{пк}t_{пк}^2}{T_k} - \frac{\Delta t_{3к}(I_{m1к} - I_{пк})\Delta t_{4к}}{2T_k}$	(2.5)
	$q_{п0к}$	$I_{пк}t_{пк} - \frac{(I_{m2к} - I_{пк})\Delta t_{3к}^2}{3T_k} + \frac{I_{пк}t_{пк}^2}{2T_k} + \frac{I_{пк}\Delta t_{4к}^2}{6T_k} - \frac{I_{пк}t_{пк}^2}{T_k} - \frac{\Delta t_{3к}(I_{m1к} - I_{пк})\Delta t_{4к}}{2T_k}$	(2.6)
	$\Delta t_{1к}$	$I_{пк}t_{пк} / I_{m1к}$	(2.7)
	$\Delta t_{2к}$	$t_{пк}(I_{m1к} - I_{пк}) / I_{m1к}$	(2.8)
	$\Delta t_{3к}$	$t_{вк}(I_{m2к} - I_{пк}) / I_{m2к}$	(2.9)
	$\Delta t_{4к}$	$t_{вк}I_{пк} / I_{m2к}$	(2.10)

Импульсный характер выходного тока $i_{пк}(t)$ (рис. 3, δ) – тока нагрузки k -го СК приводит к появлению переменной составляющей – пульсации (мгновенное значение $\Delta u_{пк}(t)$ – рис. 3, ε) напряжения $u_{пк}(t)$ (рис. 3, ε) в цепи нагрузки отдельно взятого k -го силового канала СК [5]:

$$u_{пк}(t) = U_{пк} + \Delta u_{пк}(t); \quad (13)$$

$$\Delta u_{пк}(t) = q_{пк}(t) / C_{пк}; \quad (14)$$

$$q_{пк}(t) = \begin{cases} q_{п0к} - I_{пк}t_k & \text{при } (0 + t_{ск}) \leq t_k \leq (t_{пк} + t_{ск}); \\ q_{п1к} + (I_{m2к} - I_{пк}) \left(t_k - t_{пк} - \frac{(t_k - t_{пк})^2}{2\Delta t_{3к}} \right) & \text{при } (t_{пк} + t_{ск}) < t_k \leq (t_{пк} + \Delta t_{3к}); \\ q_{п2к} - \left(\frac{I_{пк}(t_k - t_{пк} - \Delta t_{3к})^2}{2\Delta t_{4к}} \right) & \text{при } (t_{пк} + \Delta t_{3к}) < t_k \leq (T_k + t_{ск}), \end{cases} \quad (15)$$

где $q_{пк}(t)$ – мгновенное значение электрического заряда выходного конденсатора $C_{пк}$ k -го СК; $q_{п0к}$, $q_{п1к}$, $q_{п2к}$ (табл. 2) – значения электрических зарядов конденсатора $C_{пк}$ в моменты

времени соответственно $t = 0 + t_{ck}$, $t = t_{nk} + t_{ck}$, $t = t_{nk} + \Delta t_{3k}$ (табл. 2).

В преобразователях модульной структуры во входных и выходных цепях протекают токи соответственно $i_{п}(t) = i_{п\Sigma}(t)$ и $i_{н}(t) = i_{н\Sigma}(t)$, являющиеся суммами токов соответственно потребления $i_{пк}(t)$ и нагрузки $i_{нк}(t)$ k -х силовых каналов [4]:

$$i_{п}(t) = i_{п\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^N i_{пк}(t) = \begin{cases} i_{оп}(t) & \text{при } T_{п} = 0 \quad (\text{ОИП}); \\ i_{мп}(t) & \text{при } T_{п} = T/N \quad (\text{МИП}), \end{cases} \quad (16)$$

$$i_{н}(t) = i_{н\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^N i_{нк}(t) = \begin{cases} i_{он}(t) & \text{при } T_{п} = 0 \quad (\text{ОИП}); \\ i_{мн}(t) & \text{при } T_{п} = T/N \quad (\text{МИП}). \end{cases} \quad (17)$$

Пульсации токов в преобразователях модульной структуры во входных цепях – цепях потребления и выходных цепях – цепях нагрузки определим с учетом (16), (17) и (1) ... (3) в виде

во входных цепях:

$$\Delta i_{п}(t) = \Delta i_{п\Sigma}(t) = i_{п}(t) - I_{п}; \quad (18)$$

в выходных цепях:

$$\Delta i_{н}(t) = \Delta i_{н\Sigma}(t) = i_{н}(t) - I_{н}, \quad (19)$$

где $I_{п}$ и $I_{н}$ – средние значения; $\Delta i_{п}(t)$ и $\Delta i_{н}(t)$ – мгновенные значения пульсаций соответственно токов питания $i_{п}(t)$ и нагрузки $i_{н}(t)$ преобразователей модульной структуры.

В преобразователях модульной структуры во входных и выходных цепях мгновенные значения электрических зарядов $q_{п}(t)$ конденсатора $C_{п}$ во входной цепи (цепи питания) и $q_{н}(t)$ конденсатора $C_{н}$ в выходной цепи (цепи нагрузки) являются суммами электрических зарядов во входной цепи $q_{пк}(t)$ и в выходной цепи $q_{нк}(t)$ k -х СК:

$$q_{п}(t) = \sum_{k=1}^N q_{пк}(t); \quad (20)$$

$$q_{н}(t) = \sum_{k=1}^N q_{нк}(t). \quad (21)$$

Характер процессов зависит от принципа преобразования электрической энергии. При однофазном принципе преобразования электрической энергии процессы в k -х силовых каналах СК синхронны, но синфазны (не смещены относительно друг друга, $T_{пк} = 0$), а при многофазном – синхронны и равномерно смещены, $T_{пк} = T_k / N$.

С учетом (20), (21) мгновенные значения напряжений и их пульсаций во входных цепях $u_{п}(t)$ и $\Delta u_{п}(t)$, в выходных цепях $u_{н}(t)$ и $\Delta u_{н}(t)$ преобразователей модульной структуры (рис. 1) определим как

$$u_{п}(t) = U_{п} - \Delta u_{п}(t) = \begin{cases} u_{оп}(t) & \text{при } T_{пк} = 0 \quad (\text{ОИП}), \\ u_{мп}(t) & \text{при } T_{пк} = T_k / N \quad (\text{МИП}); \end{cases} \quad (22)$$

$$u_{н}(t) = U_{н} + \Delta u_{н}(t) = \begin{cases} u_{он}(t) & \text{при } T_{пк} = 0 \quad (\text{ОИП}), \\ u_{мн}(t) & \text{при } T_{пк} = T_k / N \quad (\text{МИП}); \end{cases} \quad (23)$$

$$\Delta u_{п}(t) = q_{п}(t) / C_{п} = \begin{cases} \Delta u_{оп}(t) & \text{при } T_{пк} = 0 \quad (\text{ОИП}), \\ \Delta u_{мп}(t) & \text{при } T_{пк} = T_k / N \quad (\text{МИП}); \end{cases} \quad (24)$$

$$\Delta u_{н}(t) = q_{н}(t) / C_{н} = \begin{cases} \Delta u_{он}(t) & \text{при } T_{пк} = 0 \quad (\text{ОИП}), \\ \Delta u_{мн}(t) & \text{при } T_{пк} = T_k / N \quad (\text{МИП}). \end{cases} \quad (25)$$

Видим (рис. 1), что входные цепи ППН – это параллельное соединение входных цепей k -х СК, выходные цепи – это параллельное соединение выходных цепей k -х СК, поэтому

мгновенные значения напряжений и их пульсаций k -х силовых каналов во входных цепях $u_{пк}^{ппп}(t)$ и $\Delta u_{пк}^{ппп}(t)$, в выходных цепях $u_{нк}^{ппп}(t)$ и $\Delta u_{нк}^{ппп}(t)$ определяются в виде

$$u_{пк}^{ппп}(t) = u_{п}(t), \quad \Delta u_{пк}^{ппп}(t) = \Delta u_{п}(t); \quad (26)$$

$$u_{нк}^{ппп}(t) = u_{н}(t), \quad \Delta u_{нк}^{ппп}(t) = \Delta u_{н}(t). \quad (27)$$

Математическую модель (14)...(27) для расчёта: напряжений $u_{пк}(t)$, $u_{нк}(t)$ и $u_{п}(t)$, $u_{н}(t)$, пульсаций напряжений $\Delta u_{пк}(t)$, $\Delta u_{нк}(t)$ и $\Delta u_{п}(t)$, $\Delta u_{н}(t)$ преобразователей модульной структуры во входных и выходных цепях ППН представим в виде расчётных соотношений временных зависимостей (табл. 3).

Таблица 3 – Расчётные соотношения временных зависимостей напряжений

Элемент	Параметр	Расчётные соотношения	
ППН	t_k	$t_k = \begin{cases} t - t_{ck} + T_k & \text{при } t < 0, \\ t - t_{ck} & \text{при } 0 \leq t < T_k, \\ t - t_{ck} - T_k & \text{при } t > T_k \end{cases}$	(3.1)
ППН	t_{ck}	$t_{ck} = \begin{cases} T_k(k-1)/N & \text{для МИП,} \\ 0 & \text{для ОИП.} \end{cases}$	(3.2)
$C_{пк}$	$q_{пк}(t)$	$q_{пк}(t) = \begin{cases} q_{п0к} - I_{пк} \left(t_k - \frac{t_k^2}{2\Delta t_{1к}} \right) & \text{при } (0 + t_{ck}) \leq t_k \leq (\Delta t_{1к} + t_{ck}), \\ q_{п1к} + \left(I_{м1к} - I_{пк} \right) \frac{(t_k - \Delta t_{1к})^2}{2\Delta t_{2к}} & \text{при } (\Delta t_{1к} + t_{ck}) \leq t_k \leq (t_{пк} + t_{ck}), \\ q_{п2к} - I_{пк}(t_k - t_{пк}) & \text{при } (t_{пк} + t_{ck}) < t_k \leq (T_k + t_{ck}) \end{cases}$	(3.3)
$C_{нк}$	$q_{нк}(t)$	$q_{нк}(t) = \begin{cases} q_{н0к} - I_{пк} t_k & \text{при } (0 + t_{ck}) \leq t_k \leq (t_{пк} + t_{ck}), \\ q_{н1к} + (I_{м2к} - I_{пк}) \left(t_k - t_{пк} - \frac{(t_k - t_{пк})^2}{2\Delta t_{3к}} \right) & \text{при } (t_{пк} + t_{ck}) < t_k \leq (t_{пк} + \Delta t_{3к}), \\ q_{н2к} - \left(\frac{I_{пк}(t_k - t_{пк} - \Delta t_{3к})^2}{2\Delta t_{4к}} \right) & \text{при } (t_{пк} + \Delta t_{3к}) < t_k \leq (T_k + t_{ck}) \end{cases}$	(3.4)
$C_{пк}$	$\Delta u_{пк}(t)$	$\Delta u_{пк}(t) = q_{пк}(t) / C_{пк}$	(3.5)
$C_{нк}$	$\Delta u_{нк}(t)$	$\Delta u_{нк}(t) = q_{нк}(t) / C_{нк}$	(3.6)
$C_{пк}$	$u_{пк}(t)$	$u_{пк}(t) = U_{п} - \Delta u_{пк}(t)$	(3.7)
$C_{нк}$	$u_{нк}(t)$	$u_{нк}(t) = U_{н} + \Delta u_{нк}(t)$	(3.8)
$C_{п}$	$q_{п}(t)$	$q_{п}(t) = \sum_{k=1}^N q_{пк}(t)$	(3.9)
$C_{н}$	$q_{н}(t)$	$q_{н}(t) = \sum_{k=1}^N q_{нк}(t)$	(3.10)
$C_{п}$	$\Delta u_{п}(t), \Delta u_{пк}^{ппп}(t)$	$\Delta u_{п}(t) = \Delta u_{пк}^{ппп}(t) = q_{п}(t) / C_{п}$	(3.11)
$C_{н}$	$\Delta u_{н}(t), \Delta u_{нк}^{ппп}(t)$	$\Delta u_{н}(t) = \Delta u_{нк}^{ппп}(t) = q_{н}(t) / C_{н}$	(3.12)
$C_{п}$	$u_{п}(t), u_{пк}^{ппп}(t)$	$u_{п}(t) = u_{пк}^{ппп}(t) = U_{п} - \Delta u_{п}(t)$	(3.13)
$C_{н}$	$u_{н}(t), u_{нк}^{ппп}(t)$	$u_{н}(t) = u_{нк}^{ппп}(t) = U_{н} + \Delta u_{н}(t)$	(3.14)

Математические модели для расчета базовых параметров (табл. 1); электрических процессов: мгновенных значений входных и выходных напряжений (табл. 3) в k -х силовых каналах СК и преобразователе ППН позволяют формировать отдельные функционально законченные (по решаемым задачам) блоки, и на их основе строить программные модули для решения широкого круга задач, возникающих при проектировании импульсных преобразователей постоянного напряжения: расчета, исследования, анализа, синтеза и т.п.

На рис. 4 приведён алгоритм программы для расчёта электрических процессов импульсных преобразователей модульной структуры с однофазным и многофазным принципом преобразования.

В блоке 2 («Исходные данные» – рис. 4) задаются исходные данные: напряжение U_n ($U_{nk} = U_n$) нагрузки и ток I_n ($I_{nk} = I_n / N$) нагрузки преобразователя; коэффициент накопления $K_{nk} = K_n$ (или напряжение $U_{nk} = U_n$); коэффициент трансформации $n_{21k} = n_{21}$; индуктивность $L_{1k} = L_1$; номер k -го силового канала ($k = 1, 2, \dots, N$); $C_p = C_{p1} + C_{p2} + \dots + C_{pN}$ и $C_n = C_{n1} + C_{n2} + \dots + C_{nN}$ – емкости входного и выходного конденсаторов, количество интервалов M_t , на которые разбивается диапазон изменения периода $T_k = T$ электрических процессов; N – количество силовых каналов; принцип преобразования (однофазный – ОИП или многофазный – МИП); типы исследования:

1.1 $i_{pk}(t)$; 1.2 $i_{nk}(t)$; 1.3 $i_p(t)$ (ОИП: $i_{оп}(t)$, МИП: $i_{мп}(t)$); 1.4 $i_n(t)$ (ОИП: $i_{он}(t)$, МИП: $i_{мн}(t)$); 1.5 $\Delta i_{pk}(t)$; 1.6 $\Delta i_{nk}(t)$; 1.7 $\Delta i_p(t)$ (ОИП: $\Delta i_{оп}(t)$, МИП: $\Delta i_{мп}(t)$); 1.8 $\Delta i_n(t)$ (ОИП: $\Delta i_{он}(t)$, МИП: $\Delta i_{мн}(t)$);

2.1 u_{pk} ; 2.2 u_{nk} ; 2.3 $u_{pk}^{ппп}$; 2.4 $u_{nk}^{ппп}$; 2.5 u_p (ОИП: $u_{оп}$, МИП: $u_{мп}$); 2.6 u_n (ОИП: $u_{он}$, МИП: $u_{мн}$); 2.7 Δu_{pk} ; 2.8 Δu_{nk} ; 2.9 $\Delta u_{pk}^{ппп}$; 2.10 $\Delta u_{nk}^{ппп}$; 2.11 Δu_p (ОИП: $\Delta u_{оп}$, МИП: $\Delta u_{мп}$); 2.12 Δu_n (ОИП: $\Delta u_{он}$, МИП: $\Delta u_{мн}$).

В блоке 3 (Расчет базовых параметров – рис. 4) с использованием расчётных соотношений табл. 1 рассчитываются базовые параметры преобразователей модульной структуры.

Моделируемые напряжения и их пульсации в отдельно взятых СК и преобразователях в целом являются функциями времени. Расчет мгновенных значений напряжений на входе и выходе ППН выполняется на интервале периода преобразования T в дискретных точках с шагом $\Delta t = T / M_t$, где M_t – число временных интервалов. Очевидно, что с увеличением M_t увеличивается как точность построения диаграмм, так и время моделирования. Для практических расчетов достаточно $M_t > 100$. Цикл для определения моментов расчета значений напряжения реализован в блоках 4 и 8.

В блоке 5 определяется относительное время периода $\bar{t} = t / T$.

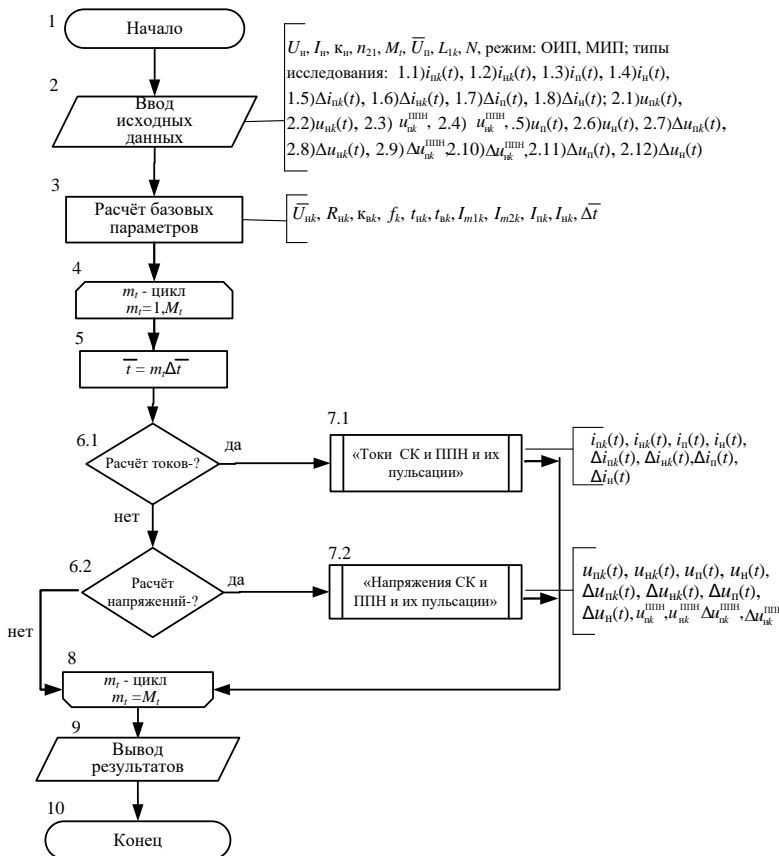


Рисунок 4 – Алгоритм расчёта электрических процессов ППН

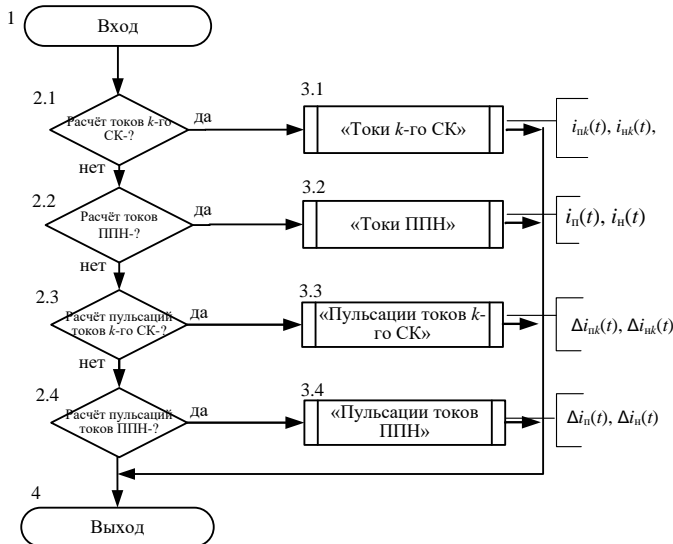


Рисунок 6 – Алгоритм расчёта подпрограммы «Токи СК и ППН и их пульсации»

В блоках 6 (6.1, 6.2) и 7 (7.1, 7.2) (рис.4) реализуется выполнение заданного типа исследования:

1. Расчет токов силовых каналов и ППН и их пульсаций (блоки 6.1 и 7.1, рис. 4) 1.1...1.9 – определение мгновенных значений токов $i_{nk}(t)$ или $i_n(t)$ k -го СК (блоки 2.1 и 3.1, рис. 5), токов $i_{п}(t)$ или $i_n(t)$ преобразователя (блоки 2.2 и 3.2, рис. 5), пульсаций токов $\Delta i_{nk}(t)$ или $\Delta i_n(t)$ k -го силового канала СК (блоки 2.3 и 3.3, рис. 5), пульсаций токов $\Delta i_{п}(t)$ или $\Delta i_n(t)$ ППН (блоки 2.4 и 3.4, рис. 5);

2. Расчет напряжений силовых каналов и ППН и их пульсаций (блоки 6.2 и 7.2, рис.4) 2.1...2.12 – мгновенных значений напряжений $u_{nk}(t)$ или $u_n(t)$ k -го СК (блоки 2.1 и 3.1, рис. 6); напряжений $u_{п}(t)$, $u_{nk}^{ППН}(t)$ или $u_n(t)$, $u_{nk}^{ППН}(t)$ преобразователя (блоки 2.2 и 3.2, рис. 6); пульсаций напряжений $\Delta u_{nk}(t)$ или $\Delta u_n(t)$ k -го силового канала СК (блоки 2.3 и 3.3, рис. 6); пульсаций напряжений $\Delta u_{п}(t)$, $\Delta u_{nk}^{ППН}(t)$ или $\Delta u_n(t)$, $\Delta u_{nk}^{ППН}(t)$ преобразователя модульной структуры (блоки 2.4 и 3.4, рис. 6).

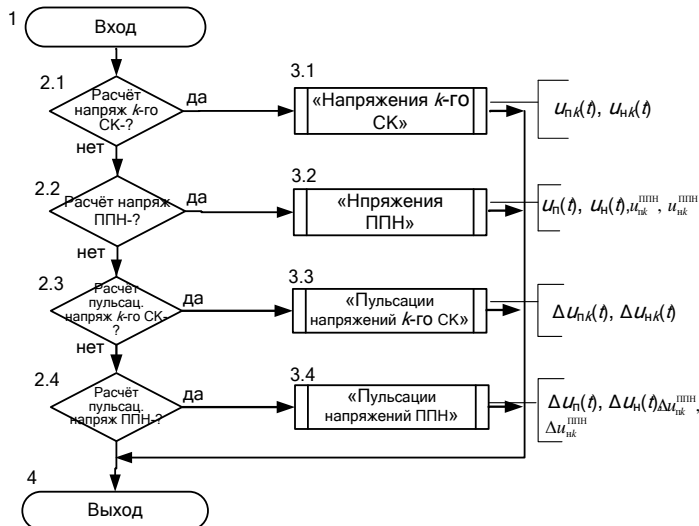


Рисунок 6 – Алгоритм расчёта подпрограммы «Напряжения СК и ППН и их пульсации»

Алгоритмы подпрограмм «Токи k-го СК» (блок 3.1 – рис. 5) и «Пульсации токов k-го СК» (блок 3.3 – рис. 5); «Токи ППН» (блок 3.2 – рис. 5) и «Пульсации токов ППН» (блок 3.4 – рис. 5) для расчета мгновенных значений токов и их пульсаций во входных $i_{пк}(t), \Delta i_{пк}(t)$ и выходных $i_{нк}(t), \Delta i_{нк}(t)$ цепях k-го силового канала СК и токов и их пульсаций на входе $i_{пн}(t), \Delta i_{пн}(t)$ и выходе $i_{нн}(t), \Delta i_{нн}(t)$ преобразователя рассмотрены в работе [3].

Алгоритмы подпрограмм «Напряжения k-го СК» (блок 3.1 – рис. 6) и «Пульсации токов k-го СК» (блок

3.3 – рис. 6) для расчета мгновенных значений напряжений и их пульсаций во входных $u_{пк}(t), \Delta u_{пк}(t)$ и выходных $u_{нк}(t), \Delta u_{нк}(t)$ цепях k-го силового канала СК приведены на рис. 7

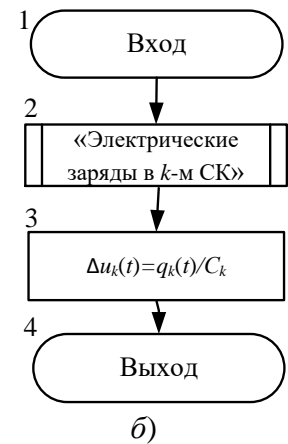
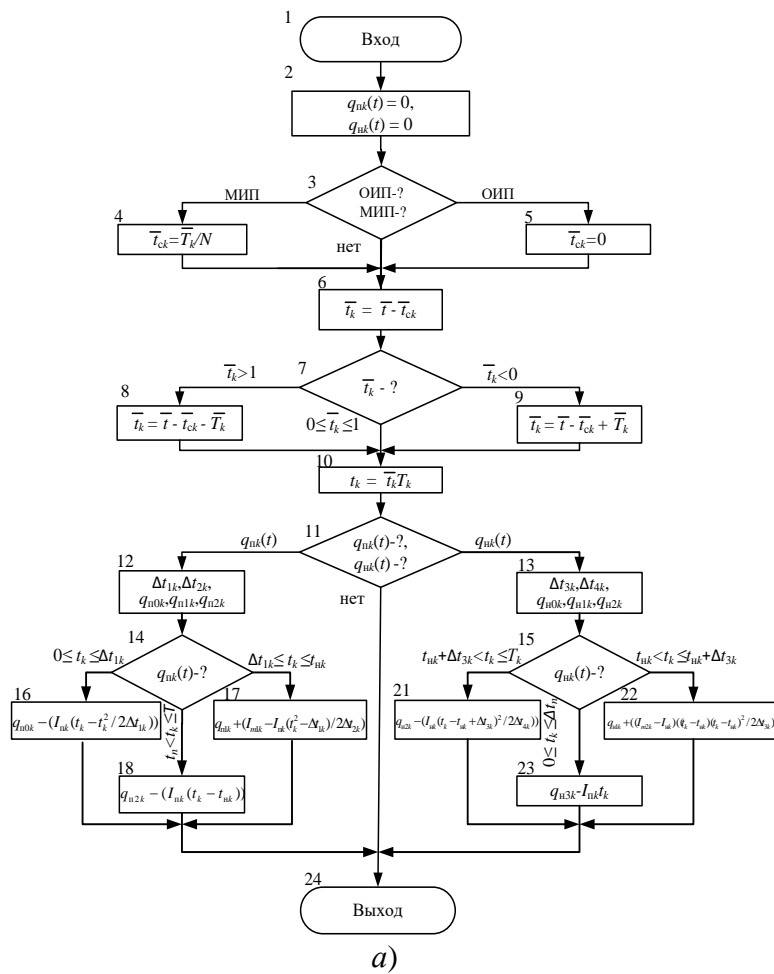


Рисунок 7 – Алгоритмы подпрограмм «Электрические заряды в k-м СК» (а) – расчета мгновенных значений электрических зарядов $q_{пк}(t)$ и $q_{нк}(t)$, «Пульсации напряжений k-го СК» (б) – расчета пульсаций напряжений – мгновенных значений $\Delta u_{пк}(t), \Delta u_{нк}(t)$ и «Напряжения k-го СК» (в) – расчета мгновенных значений напряжений $u_{пк}(t), u_{нк}(t)$ k-го СК

Подпрограмма «Электрические заряды в k -м СК» - исследования временных зависимостей электрических зарядов $q_{пк}(t)$ конденсатора $C_{пк}$ и $q_{нк}(t)$ конденсатора $C_{нк}$ k -го СК выполнена (рис. 7, а) с использованием соотношений табл. 3. Режимы однофазный – ОИП или многофазный – МИП учитывают блоки 3, 4 и 5 (соотн. 3.2, табл. 3). Текущее относительное время \bar{t}_k k -го СК определяется в блоках 6,...,9 с учетом соотношений 3.1 табл. 3. В блоке 10 осуществляется переход от относительного времени \bar{t}_k к абсолютному времени $t_k = \bar{t}_k T_k$. Электрические заряды k -го СК на входе $q_{пк}(t)$ и выходе $q_{нк}(t)$ определяются соответственно блоками 14, 16...18 и блоками 15, 21...23 с использованием соотношений 3.3; 3.4 табл. 3.

Подпрограмма «Пульсации напряжений k -го СК» - исследования временных зависимостей пульсаций напряжений в k -м силовом канале на входе $\Delta u_{пк}(t)$ и выходе $\Delta u_{нк}(t)$ преобразователя выполнена (рис. 7, б) с использованием соотношений табл. 3. В блоке 2 вызывается подпрограмма «Электрические заряды в k -м СК» в которой для каждого момента времени t обеспечивается с учетом соотношений 3.3; 3.4 табл.3 определение электрических зарядов конденсаторов $C_{пк}$ и $C_{нк}$ k -го силового канала СК $q_{пк}(t)$ или $q_{нк}(t)$ (рис. 7, а). Пульсации токов в k -м силовом канале на входе $\Delta u_{пк}(t)$ и выходе $\Delta u_{нк}(t)$ преобразователя рассчитываются в блоке 3 с использованием соотношений 3.5; 3.6 табл. 3.

Подпрограмма «Напряжения k -го СК» – исследования временных зависимостей напряжений $u_{пк}(t)$ и $u_{нк}(t)$ выполнена (рис. 7, в) с использованием соотношений табл. 3. В блоке 2 вызывается подпрограмма «Электрические заряды в k -м СК» расчета электрических зарядов конденсаторов $C_{пк}$ и $C_{нк}$ k -х силовых каналов СК (рис. 7, а). В блоке 3 вызывается подпрограмма «Пульсации напряжений k -го СК» (рис. 7, б) расчета мгновенных значений пульсаций напряжений в k -м СК преобразователя на входе $\Delta u_{пк}$ и выходе $\Delta u_{нк}$. Мгновенные значения напряжения или $u_{пк}(t)$, или $u_{нк}(t)$ k -го СК определяются в блоке 4 с использованием соотношений 3.7, 3.8 табл. 3.

Алгоритмы подпрограмм «Напряжения ППН» (блок 3.2 – рис. 6) и «Пульсации напряжений в ППН» (блок 3.4, рис. 6) для расчета мгновенных значений напряжений и их пульсаций во входных $u_{п}(t)$, $\Delta u_{п}(t)$ и выходных $u_{н}(t)$, $\Delta u_{н}(t)$ цепях преобразователя ППН приведены на рис. 8.

Подпрограмма «Электрические заряды в ППН» – исследования электрических зарядов конденсатора или $C_{п}$ или $C_{н}$ во входных $q_{п}(t)$ и выходных $q_{н}(t)$ цепях преобразователей выполнена (рис. 8, а) с использованием соотношений табл. 3.

В блоках 3 (начало k -цикла) и 6 (конец k -цикла) организуется k -цикл: $k = 1, 2, \dots, N$. В результате для каждого момента времени t обеспечивается (блок 4) определение электрических зарядов или $q_{пк}(t)$, или $q_{нк}(t)$ (подпрограмма «Электрические заряды в k -м СК» – рис. 7, а). В блоке 5 обеспечивается суммирование электрических зарядов конденсатора или $q_{пк}(t)$ или $q_{нк}(t)$ с использованием соотношений 3.9; 3.10 табл. 3.

Подпрограмма «Пульсации напряжений в ППН» - исследования временных зависимостей пульсаций напряжений на входе $\Delta u_{п}(t)$ и выходе $\Delta u_{н}(t)$ ППН выполнена (рис. 8, б) с использованием соотношений табл. 3. В блоке 2 вызывается подпрограмма «Электрические заряды конденсаторов в ППН» в которой обеспечивается суммирование зарядов конденсаторов $C_{п}$ на входе $q_{пк}(t)$ и $C_{н}$ выходе $q_{нк}(t)$ преобразователя (рис. 7, а). Пульсации напряжений ППН на входе $\Delta u_{п}(t)$ и выходе $\Delta u_{н}(t)$ преобразователя рассчитываются в блоке 3 с использованием соотношений 3.11; 3.12 табл. 3.

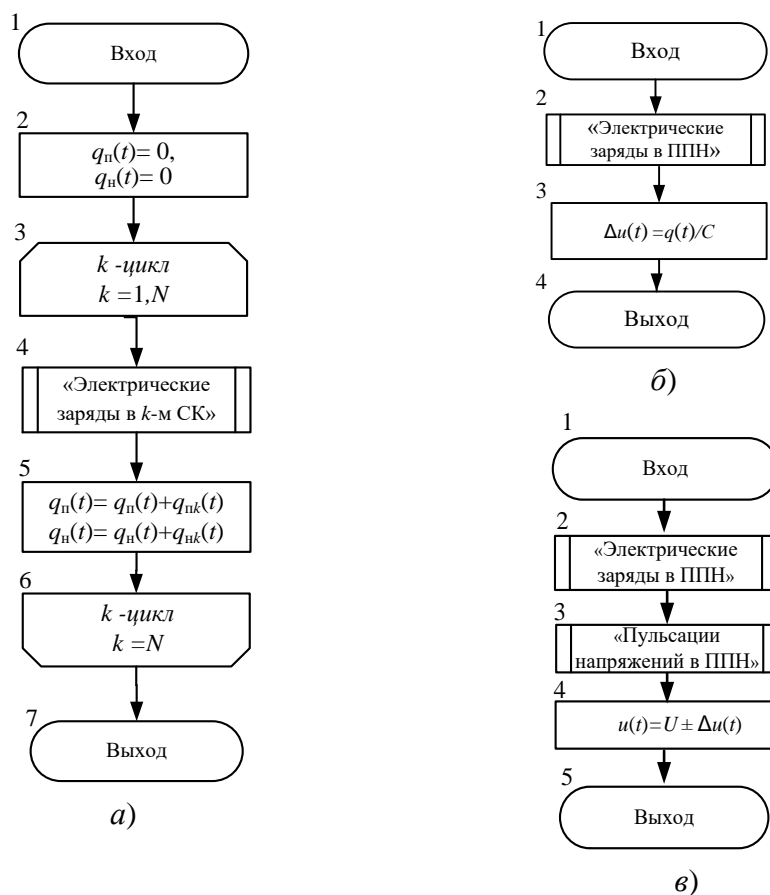


Рисунок 8 – Алгоритмы подпрограмм «Электрические заряды в ППН» (а) – расчета мгновенных значений электрических зарядов $q_n(t)$ и $q_n(t)$, «Пульсации напряжений в ППН» (б) – пульсаций напряжений – мгновенных значений $\Delta u_n(t)$, $\Delta u_{nk}^{ППН}(t)$, $\Delta u_n(t)$, $\Delta u_{nk}^{ППН}(t)$ и «Напряжения ППН» (в) – мгновенных значений напряжений $u_n(t)$, $u_{nk}^{ППН}(t)$, $u_n(t)$, $u_{nk}^{ППН}(t)$ ППН

Подпрограмма «Напряжения ППН» - исследования временных зависимостей напряжений $u_n(t)$ и $u_n(t)$ выполнена (рис. 8, в) с использованием соотношений табл. 3. В блоке 2 вызывается подпрограмма «Электрические заряды ППН» (рис. 8, а) расчёта электрических зарядов конденсаторов в преобразователе. В блоке 3 вызывается подпрограмма «Пульсации напряжений в ППН» (рис. 8, б) расчёта мгновенных значений пульсаций напряжений преобразователя на входе Δu_n и выходе Δu_n . Мгновенные значения напряжения $u_n(t)$ и $u_n(t)$ преобразователя определяются в блоке 4 с использованием соотношений 3.13; 3.14 табл. 3 .

Полученные математические модели и алгоритмы расчёта позволяют моделировать электрические процессы в импульсных преобразователях модульной структуры: временные зависимости напряжений $u_{nk}(t)$, $u_{nk}(t)$ и $u_n(t)$; $u_n(t)$; $u_{nk}^{ППН}(t)$; $u_{nk}^{ППН}(t)$ пульсаций напряжений $\Delta u_{nk}(t)$, $\Delta u_{nk}(t)$ и $\Delta u_n(t)$, $\Delta u_n(t)$, $\Delta u_{nk}^{ППН}(t)$, $\Delta u_{nk}^{ППН}(t)$ в k -м силовом канале и в ППН. Это позволяет определить влияние пульсаций напряжений на работу преобразователя при различных режимах функционирования и типах преобразования и обеспечить требуемые показатели преобразователя при минимальных массогабаритных и стоимостных показателях.

С использованием математических моделей табл.2, табл.3 и алгоритмов (рис. 4 – 8) на рис. 9 приведён пример моделирования временных зависимостей входных и выходных токов $i_n(t)$, $i_n(t)$ и напряжений $u_n(t)$, $u_n(t)$ преобразователя ППН при однофазном $i_{он}(t)$ – (а), $i_{он}(t)$ –

(в), $u_{оп}(t)$ – (д), $u_{он}(t)$ – (ж) и многофазном $i_{мп}(t)$ – (б), $i_{мн}(t)$ – (з), $u_{мп}(t)$ – (е), $u_{мн}(t)$ – (з) принципах преобразования.

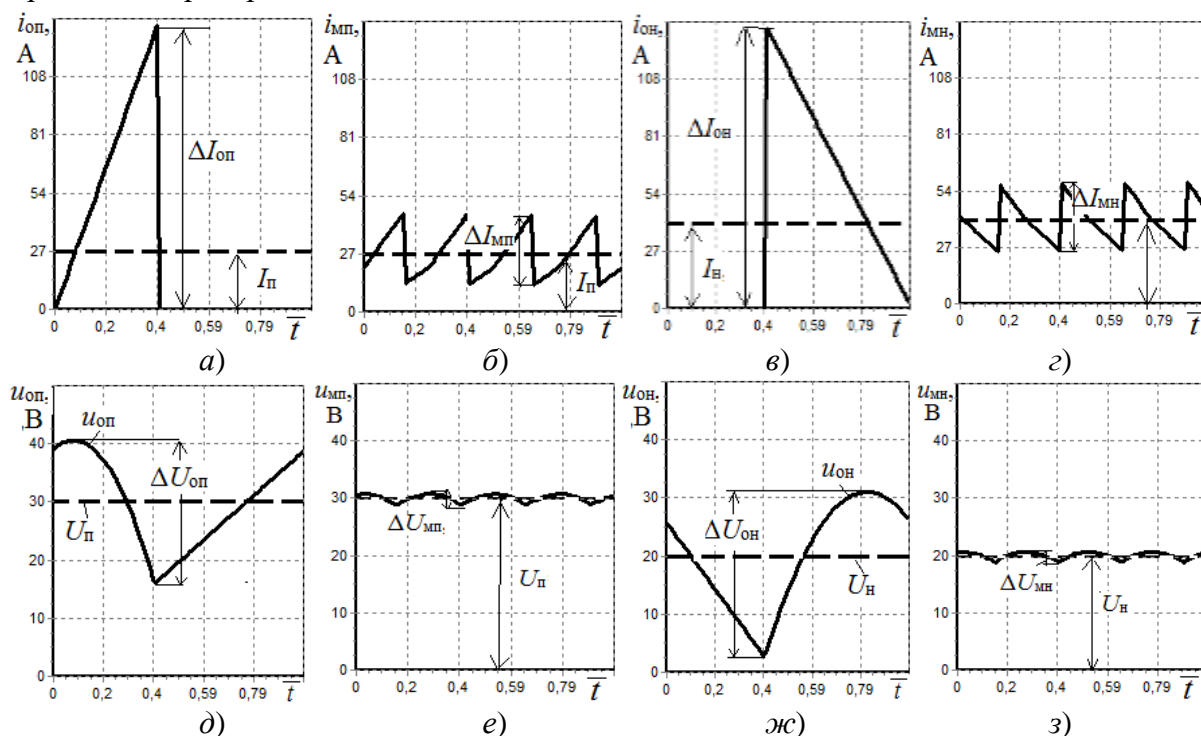


Рисунок 9 – Временные диаграммы во входных и выходных цепях ОИП: токов а) – $i_{оп}(t)$; б) – $i_{он}(t)$ и напряжений; д) – $u_{оп}(t)$; ж) – $u_{он}(t)$ и МИП: токов б) – $i_{мп}(t)$, з) – $i_{мн}(t)$ и напряжений; е) – $u_{мп}(t)$ (ж); з) – $u_{мн}(t)$ при $N = 4$; $C_{п} = C_{н} = 10 \text{ мкФ}$, $P_{н} = 800 \text{ Вт}$

Полученные математические модели и алгоритмы расчёта позволяют моделировать электрические процессы в импульсных преобразователях модульной структуры: временные зависимости напряжений $u_{пк}(t)$; $u_{пк}^{пнн}(t)$; $u_{нк}(t)$; $u_{нк}^{пнн}(t)$ и $u_{п}(t)$; $u_{н}(t)$ пульсаций напряжений $\Delta u_{пк}(t)$; $\Delta u_{пк}^{пнн}(t)$; $\Delta u_{нк}(t)$; $\Delta u_{нк}^{пнн}(t)$ и $\Delta u_{п}(t)$; $\Delta u_{н}(t)$ в k -м силовом канале и в ППН соответственно. Это позволяет определить влияние пульсаций напряжений на работу преобразователя при различных режимах функционирования и типах преобразования и обеспечить требуемые показатели преобразователя при минимальных массогабаритных и стоимостных показателях.

На рис. 10 приведены диаграммы пульсаций напряжений $\Delta u_{н}(t)$ в цепи питания и нагрузки МИП при $N = 1$ (а), $N = 2$ (б), $N = 4$ (в), $N = 8$ (з).

Использование многофазного принципа преобразования приводит к уменьшению размахов пульсаций напряжений на входе $\Delta U_{мп}$ (рис. 9, е) и выходе $\Delta U_{мн}$ (рис. 9, з) преобразователя по сравнению с однофазным ($\Delta U_{оп}$ (рис. 9, д) и $\Delta U_{он}$ (рис. 9, ж)). При этом частота пульсаций увеличивается в N раз по сравнению с частотой преобразования $f_k = 1/T_k$ в отдельно взятом k -м силовом канале СК.

В отдельно взятом силовом канале при $N = 1$ ($P_{н} = P_{пк} = 200 \text{ Вт}$ – рис. 10, а); пульсация напряжения $\Delta u_{н}(t)$ существенно превышает $\Delta u_{н}(t)$ – пульсацию напряжения в цепях питания и нагрузки МИП при $N = 2$ ($P_{н} = 400 \text{ Вт}$ – рис. 10, б); $N=4$ ($P_{н} = 800 \text{ Вт}$ – рис. 10, в); $N=8$ ($P_{н} = 1600 \text{ Вт}$ – рис. 10, з).

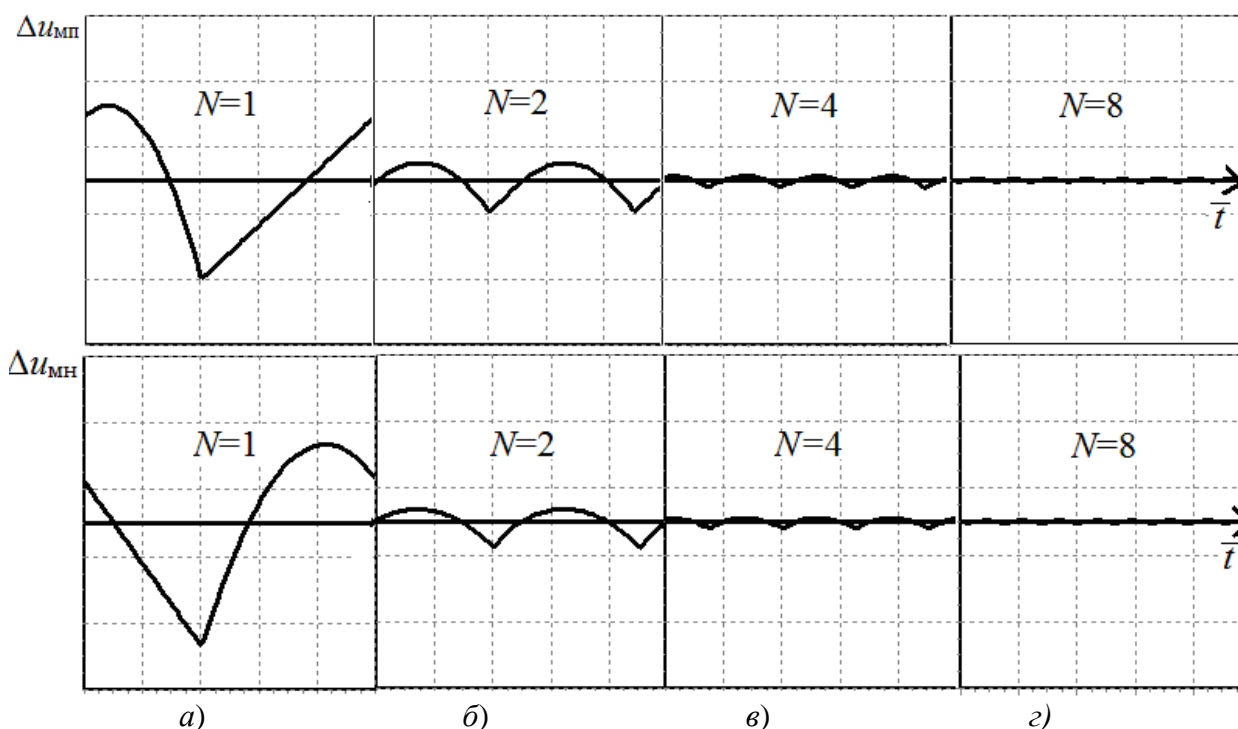


Рисунок 10 – Временные диаграммы пульсаций $\Delta u_{MП}(t)$ и для $\Delta u_{MН}(t)$ МИП при а) – $N=1$ ($P_H = 200$ Вт); б) – $N=2$ ($P_H = 400$ Вт); в) – $N=4$ ($P_H = 800$ Вт); г) – $N=8$ ($P_H = 1600$ Вт)

По результатам данной статьи можно сделать следующие выводы:

1. Предложены математические модели токов, напряжений и их пульсаций во входных и выходных цепях импульсных преобразователей модульной структуры с силовыми каналами инвертирующего типа с граничным режимом функционирования с однофазным и многофазным принципами преобразования.

2. С использованием предложенной математической модели разработаны алгоритмы для моделирования электрических процессов преобразователей постоянного напряжения модульной структуры.

3. Математические модели и алгоритмы позволяют моделировать мгновенные значения токов, напряжений и их пульсаций во входных и выходных цепях в отдельно взятых k -х силовых каналах СК и преобразователях модульной структуры в целом, позволяют исследовать и устанавливать влияние параметров элементов на характер электрических процессов силовой части и сигналов управления.

4. Предложенная математическая модель и алгоритмы моделирования электрических процессов являются основой для решения задач исследования и проектирования импульсных преобразователей модульной структуры с однофазным и многофазным принципами преобразования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кадацкий А. Ф. Анализ электрических процессов в МИП постоянного напряжения при граничных токах дросселей / [А. Ф. Кадацкий, И. П. Малявин, А. В. Кочетков, О. В. Швец] // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 1. – С. 20 – 30.

2. Кадацкий А. Ф. Электрические процессы импульсных преобразователей модульной структуры с силовыми каналами повышающего типа / [А. Ф. Кадацкий, О. В. Швец, А. В. Кочетков, Т. Н. Ерыкалина] // Восточно - Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 4/9(58). – С. 10 – 16.

3. Кадацкий А.Ф. Принципы, алгоритмы моделирования и исследования пульсаций токов в импульсных преобразователях постоянного напряжения модульной структуры с силовыми каналами инвертирующего типа / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу, Т.Н. Ерыкалина // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2014, № 2. – С. 34 – 50.

4. Кадацкий А. Ф. Пульсации токов импульсных преобразователей постоянного напряжения модульной структуры с граничным режимом функционирования с силовыми каналами инвертирующего типа // [Кадацкий А. Ф., Русу А. П., Ерыкалина Т. Н.] // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2013. – № 2. – С. 47 – 61.

5. Кадацкий А.Ф. Анализ пульсаций напряжения импульсных преобразователей инвертирующего типа модульной структуры/ А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу, Т.Н. Ерыкалина, А.С. Криль // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 4/1 (24). – С. 29 – 35.

REFERENCES

1. Kadatskij, A. F., Maljvin, I. P., Kochetkov, A. V., Shvec, O. V. (2010). Analiz elektricheskix processov v MIP postojnogo naprjgenij pri granichnix tokax drosselnej. Naykovi praci ONAZ im. O. S. Popova, 1, 20–30

2. Kadatskij, I. P., Shvec, O. V., Kochetkov, A. V., Erykalina, T. N. (2012). Elektricheskie processu impylsnux preobrazovatelej modylnoj stryctyru s silovumi kanalami povushayschego tipa. Vostochno Evropejskij gyrnal peredovux tehnologij, 4/9(58), 10–16.

3. Kadatskij, I. P., Rysy, A. P., Erykalina, T. N. (2014). Principy, algoritmy modelirovaniya i issledovaniya pulsacij tokov v impulsnyx preobrazovatelyax postoyannogo napryazheniya modulnoj stryctyru s silovymi kanalami invertiruyushhego tipa. Naykovi praci ONAZ im. O. S. Popova, 2, 34–50

4. Kadatskij, I. P., Rysy, A. P., Erykalina, T. N. (2013). Pylsacii tokov impylsnux preobrazovatelej postojnogo naprjgenij modylnoj stryctyru s granichnum rejimom fynrcionirovanij s silovymi kanalami invertiruyushhego tipa. Naykovi praci ONAZ im. O. S. Popova, 2, 47–61.

5. Kadatskij, I. P., Rysy, A. P., Erykalina, T. N., Kril A.S. (2015). Analiz pylsacii naprjgenii impylsnux preobrazovatelej invertiruyushhego tipa modylnoj stryctyru. Texnologicheskii aydit i rezervu prosvodstva, 4/1 (24), 29–35.