

УДК 621.314.2

АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ СВОЙСТВ ПО ПУЛЬСАЦИЯМ НАПРЯЖЕНИЙ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С СИЛОВЫМИ КАНАЛАМИ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ТИПА

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

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
kaferda.tec@onat.edu.ua*

АЛГОРИТМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРУЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗА ПУЛЬСАЦІЯМИ НАПРУГИ В ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ З СИЛОВИМИ КАНАЛАМИ ІНВЕРТУЮЧОГО ТИПУ

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

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.
kaferda.tec@onat.edu.ua*

ALGORITHMS FOR MODELING AND RESEARCH OF FILTERING PROPERTIES MODULAR DC-DC CONVERTER WITH POWER CHANNELS OF THE BACK-BOOST TYPE

Kadatskyy A.F., Rusu A.P., Erykalina T.N., Maystrenko O.V., 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 показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям 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 алгоритмы моделирования показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям напряжений в преобразователях электрической энергии модульной структуры инвертирующего типа с граничным режимом функционирования при однофазном и многофазном принципах преобразования.

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

Анотація. Наведено математичні моделі показників якості фільтруючих властивостей за пульсаціями напруг у вхідних і вихідних колах імпульсних перетворювачів постійної напруги модульної структури з силовими каналами інвертуючого типу, з граничним режимом функціонування, з однофазним і багатофазним принципами перетворення. Представлені алгоритми моделювання показників якості фільтруючих властивостей за пульсаціями напруг у перетворювачах електричної енергії модульної структури інвертуючого типу з граничним режимом функціонування при однофазному і багатофазному принципах перетворення.

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

Abstract. Mathematical models of quality indicators filtering properties of the ripple voltage at the 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. The algorithms of modeling parameters of quality filtering properties ripple voltage converters of electric energy of the modular structure of the inverting type with single-phase and multiphase conversion principle with the boundary mode operation.

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.

Одним из обязательных условий нормальной работы современных радиотехнических и телекоммуникационных систем является обеспечение их электрической энергией требуемого качества.

Преобразователи электрической энергии в значительной степени определяют массогабаритные показатели, энергопотребление, надежность, время готовности к работе телекоммуникационных систем [1...3]. Совершенствование преобразователей постоянного напряжения (ППН), которые входят в состав системы электропитания телекоммуникационных систем, является актуальной задачей.

Использование импульсного принципа преобразования и регулирования электрической энергии обеспечивает повышение эффективности и надежности, снижение веса и габаритов ППН [1...4]. При этом, одним из перспективных направлений дальнейшего совершенствования ППН является функционирование силовой части преобразователя в граничном режиме, что позволяет уменьшить потери при переключении силовых коммутирующих элементов, повысить КПД, полностью использовать энергию, накопленную в дросселе, улучшить динамические характеристики [5, 6].

Определение величины пульсаций напряжения во входных и выходных цепях ППН является важной практической задачей, поскольку от их величины напрямую зависят массогабаритные и стоимостные показатели ППН. Модульный принцип построения ППН в совокупности с многофазным принципом преобразования позволяет уменьшить величину пульсаций напряжений.

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

В работах [7...9] большое внимание уделяется математическим моделям, принципам и алгоритмам исследования показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям токов в отдельно взятых силовых каналах СК и в преобразователях модульной структуры построения с однофазным и многофазным принципами преобразования с силовыми каналами инвертирующего типа. Однако, алгоритмы моделирования и исследования показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям напряжений в импульсных преобразователях постоянного напряжения модульной структуры с силовыми каналами инвертирующего типа отсутствуют. Это сдерживает их широкое применение на практике.

Цель статьи – разработка алгоритмов моделирования и исследования показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям напряжений во входных и выходных цепях преобразователей электрической энергии модульной структуры инвертирующего типа с граничным режимом функционирования при однофазном и многофазном принципах преобразования.

На рис. 1 дана 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 работе, приведены 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).

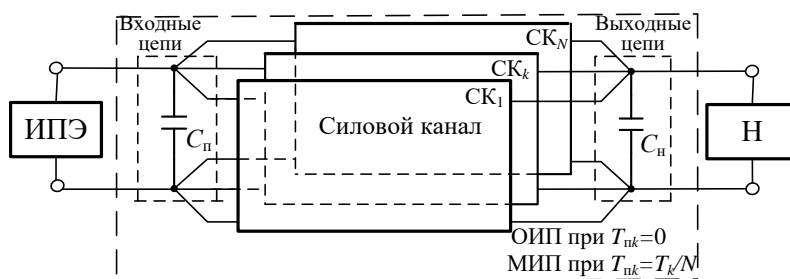


Рисунок 1 – Структурная схема ППН модульной структуры с однофазным ОИП и многофазным МИП принципами преобразования

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 $T_{пк}$ между электрическими процессами в отдельно взятых модулях (в k -х силовых каналах $СК_k$) отсутствует ($T_{пк} = 0$), силовые каналы $СК$ работают синхронно и синфазно.

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

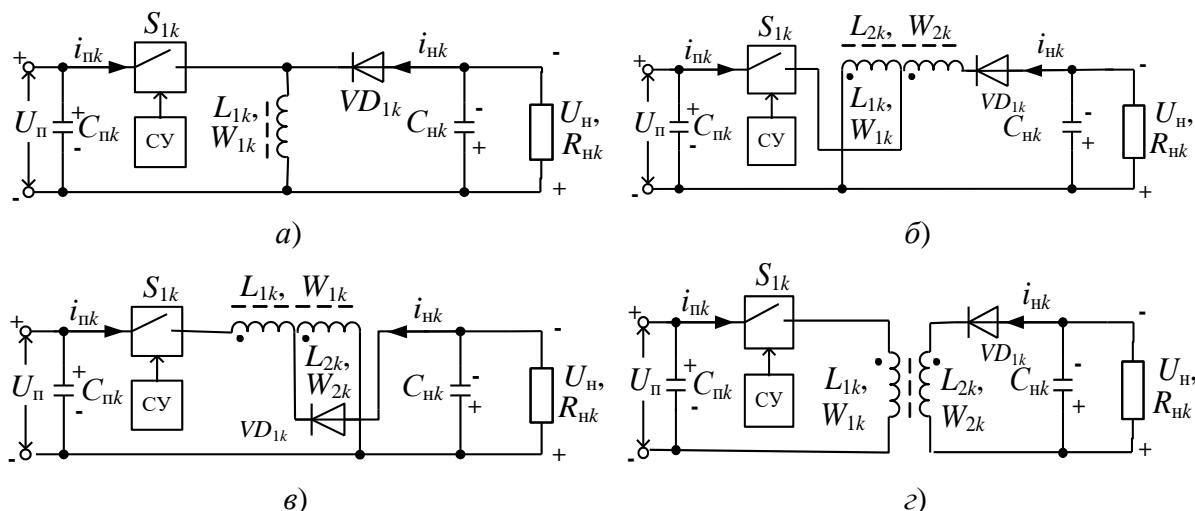


Рисунок 2 – Силовые каналы инвертирующего типа с включением дросселя: автотрансформаторным при $n_{21} = 1$ (а); $n_{21} > 1$ (б); $n_{21} < 1$ (в) и трансформаторным (г)

На практике для решения широкого круга задач (расчета, исследования, анализа, синтеза и т.п.), возникающих при проектировании импульсных преобразователей постоянного напряжения, необходимо определить влияние показателей качества фильтрующих свойств пульсаций напряжений на работу импульсных ППН модульной структуры. При моделировании и исследовании показателей качества фильтрующих свойств пульсаций напряжений в импульсных преобразователях модульной структуры необходимо определение пульсаций входных и выходных напряжений. Математическая модель для расчета напряжений и их пульсаций во входных и выходных цепях табл. 1 дана в работе [10].

Таблица 1 – Расчётные соотношения временных зависимостей пульсаций напряжений

Элемент	Параметр	Расчётные соотношения	
ППН	t_k	$t_k = \begin{cases} t - t_{ck} + T_k & \text{при } t < 0, \\ t - t_{ck} & \text{при } 0 \leq t < T_k, \\ t - t_{ck} - T_k & \text{при } t > T_k \end{cases}$	(1.1)
ППН	t_{ck}	$t_{ck} = \begin{cases} T_k(k-1)/N & \text{для МИП,} \\ 0 & \text{для ОИП} \end{cases}$	(1.2)
$C_{пк}$	$q_{пк}(t)$	$q_{пк}(t) = \begin{cases} q_{п0к} - I_{пк} \left(t_k - \frac{t_k^2}{2\Delta t_{1к}} \right) & \text{при } (0 + t_{ck}) \leq t_k \leq (\Delta t_{1к} + t_{ck}), \\ q_{п1к} + \left(I_{м1к} - I_{пк} \right) \frac{(t_k^2 - \Delta t_{1к})^2}{2\Delta t_{2к}} & \text{при } (\Delta t_{1к} + t_{ck}) \leq t_k \leq (t_{пк} + t_{ck}), \\ q_{п2к} - I_{пк}(t_k - t_{пк}) & \text{при } (t_{пк} + t_{ck}) < t_k \leq (T_k + t_{ck}) \end{cases}$	(1.3)
$C_{нк}$	$q_{нк}(t)$	$q_{нк}(t) = \begin{cases} q_{н0к} - I_{нк} t_k & \text{при } (0 + t_{ck}) \leq t_k \leq (t_{пк} + t_{ck}), \\ q_{н1к} + (I_{м2к} - I_{нк}) \left(t_k - t_{пк} - \frac{(t_k - t_{пк})^2}{2\Delta t_{3к}} \right) & \text{при } (t_{пк} + t_{ck}) < t_k \leq (t_{пк} + \Delta t_{3к}), \\ q_{н2к} - \left(\frac{I_{нк}(t_k - t_{пк} - \Delta t_{3к})^2}{2\Delta t_{4к}} \right) & \text{при } (t_{пк} + \Delta t_{3к}) < t_k \leq (T_k + t_{ck}) \end{cases}$	(1.4)
$C_{пк}$	$u_{пк}(t)$	$u_{пк}(t) = U_{п} - q_{пк}(t)/C_{пк}$	(1.5)
$C_{нк}$	$u_{нк}(t)$	$u_{нк}(t) = U_{н} + q_{нк}(t)/C_{нк}$	(1.6)
$C_{п}$	$u_{п}(t),$ $u_{пк}^{ппп}(t)$	$u_{п}(t) = u_{пк}^{ппп}(t) = U_{п} - \sum_{k=1}^N q_{пк}(t)/C_{п}$	(1.7)
$C_{н}$	$u_{н}(t),$ $u_{нк}^{ппп}(t)$	$u_{н}(t) = u_{нк}^{ппп}(t) = U_{н} + \sum_{k=1}^N q_{нк}(t)/C_{н}$	(1.8)

С использованием соотношений табл. 1 на рис. 3 показаны временные диаграммы напряжений отдельно взятого (вне ППН) k -го ($k = 1$) силового канала и преобразователя ППН инвертирующего типа при многофазном принципе преобразования соответственно в цепях питания $u_{пк}(t)$ (рис. 3, а), $u_{мп}(t)$ (рис. 3, в) и нагрузки $u_{нк}(t)$ (рис. 3, б), $u_{нн}(t)$ (рис. 3, г) при $n_{21} = 1$.

На входе и выходе отдельно взятого, функционирующего вне ППН, k -го силового канала СК размахи пульсаций напряжений соответственно $\Delta U_{пк}$ и $\Delta U_{нк}$ определяются разностью максимальных $U_{пк \max}$, $U_{нк \max}$ и минимальных $U_{пк \min}$, $U_{нк \min}$ значений напряжений соответственно $u_{пк}(t)$ и $u_{нк}(t)$ (рис. 3):

$$\begin{aligned} \Delta U_{пк} &= U_{пк \max} - U_{пк \min}, & \Delta U_{нк} &= U_{нк \max} - U_{нк \min}; \\ U_{пк \min} &= \min_{\max} [u_{пк}(t)], & U_{нк \min} &= \min_{\max} [u_{нк}(t)]. \end{aligned} \quad (1)$$

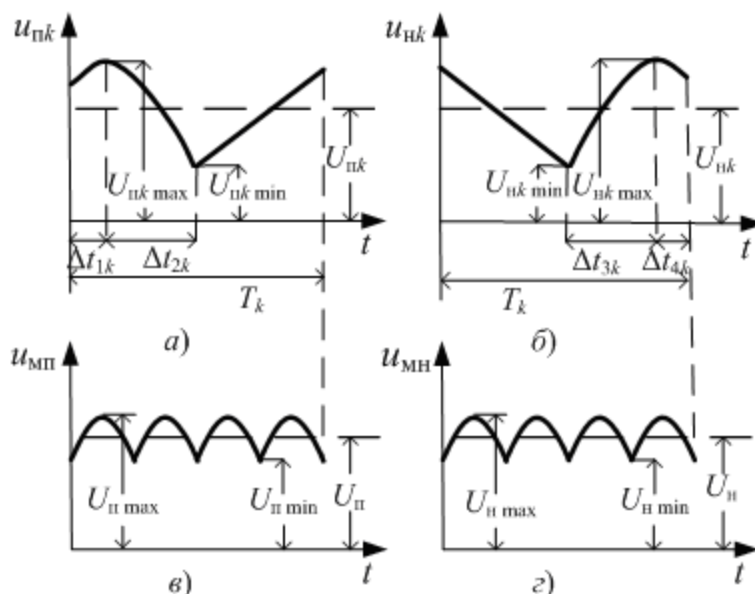


Рисунок 3 – Временные диаграммы напряжений $u_{пк}(t)$, а и $u_{нк}(t)$, б k -го ($k = 1$) СК и $u_{мп}(t)$, в и $u_{мн}(t)$, г ППН при многофазном принципе преобразования соответственно на входе и выходе

Во входных и выходных цепях преобразователей модульной структуры размахи пульсаций напряжений потребления $\Delta U_{п}$ и нагрузки $\Delta U_{н}$ определяются разностью максимальных $U_{п \max}$, $U_{н \max}$ и минимальных $U_{п \min}$, $U_{н \min}$ значений напряжений соответственно $u_{оп}(t)$, $u_{мп}(t)$ и $u_{он}(t)$, $u_{мн}(t)$:

$$\Delta U_{п} = U_{п \max} - U_{п \min}, \quad \Delta U_{н} = U_{н \max} - U_{н \min};$$

$$U_{п \min} = \min_{\max} [u_{п}(t)], \quad U_{н \min} = \min_{\max} [u_{н}(t)]. \quad (2)$$

Важным функциональным требованием, предъявляемым к импульсным преобразователям электрической энергии, является обеспечение малых требуемых уровней переменных составляющих токов и напряжений во входных и выходных цепях. Выполнение этих требований характеризуется коэффициентами пульсаций, отражающими степень содержания переменных составляющих. Коэффициенты пульсаций напряжений на входе $K_{пк}^u$ и выходе $K_{нк}^u$ k -х силовых каналов СК определим как:

$$K_{пк}^u = \Delta U_{пк} / 2U_{п}, \quad K_{нк}^u = \Delta U_{нк} / 2U_{н}. \quad (3)$$

Коэффициенты пульсаций напряжений на входе $K_{пп}^u$ и выходе $K_{пн}^u$ ППН модульной структуры определим в виде:

$$K_{пп}^u = \Delta U_{п} / 2U_{п}, \quad K_{пн}^u = \Delta U_{мн} / 2U_{н}. \quad (4)$$

Для характеристики эффективности подавления переменных составляющих во входных и выходных цепях преобразователей модульной структуры используются в качестве показателей качества коэффициенты сглаживания структуры преобразователя по напряжению на входе $S_{п}^u$ и выходе $S_{н}^u$ преобразователя:

$$S_{п}^u = K_{пср}^u / K_{пп}^u, \quad S_{н}^u = K_{пср}^u / K_{пн}^u; \quad (5)$$

$$K_{пср}^u = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N K_{пк}^u, \quad K_{пср}^u = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N K_{нк}^u, \quad (6)$$

где $K_{пк}^u, K_{нк}^u$ – коэффициенты пульсаций напряжений соответственно на входе и выходе

отдельно взятого (функционирующего вне ППН) k -го СК; $K_{\text{пер}}^u, K_{\text{нсп}}^u$ – средние значения коэффициентов пульсаций напряжений на входе и выходе преобразователя модульной структуры.

Полученная математическая модель является обобщенной к однофазному и многофазному принципам преобразования, к трансформаторному, автотрансформаторному и бестрансформаторному исполнению дросселей в k -х силовых каналах.

Математическую модель (1)...(6) для расчёта: размахов пульсаций $\Delta U_{pk}, \Delta U_{nk}, \Delta U_{п}, \Delta U_{н}$; коэффициентов пульсаций $K_{\text{пнк}}^u, K_{\text{пнк}}^u, K_{\text{пн}}^u, K_{\text{пн}}^u$, коэффициентов сглаживания $S_{п}^u, S_{н}^u$ напряжений преобразователей модульной структуры во входных и выходных цепях ППН представим в виде расчётных соотношений табл. 2.

Таблица 2 – Расчётные соотношения показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям напряжений преобразователей модульной структуры

Наименования параметров	Расчётные соотношения			
	Входные цепи		Выходные цепи	
Размахи пульсаций напряжений k -го СК	$\Delta U_{pk} = U_{pk \max} - U_{pk \min}$	(2.1)	$\Delta U_{nk} = U_{nk \max} - U_{nk \min}$	(2.2)
Размахи пульсаций напряжений преобразователя ППН	$\Delta U_{п} = U_{п \max} - U_{п \min}$	(2.3)	$\Delta U_{н} = U_{н \max} - U_{н \min}$	(2.4)
Минимальные $U_{п \min}, U_{н \min}$ (максимальные $U_{п \max}, U_{н \max}$) значения напряжений ППН	$U_{п \max}^{\min} = \min_{\max} [u_{п}(t)]$	(2.5)	$U_{н \max}^{\min} = \min_{\max} [u_{н}(t)]$	(2.6)
Коэффициенты пульсаций напряжений k -го СК	$K_{\text{пнк}}^u = \Delta U_{pk} / 2U_{п}$	(2.7)	$K_{\text{пнк}}^u = \Delta U_{nk} / 2U_{н}$	(2.8)
Коэффициенты пульсаций напряжений ППН	$K_{\text{пн}}^u = \Delta U_{п} / 2U_{п}$	(2.9)	$K_{\text{пн}}^u = \Delta U_{н} / 2U_{н}$	(2.10)
Коэффициенты сглаживания структуры преобразователя по напряжению	$S_{п}^u = K_{\text{пер}}^u / K_{\text{пн}}^u$	(2.11)	$S_{н}^u = K_{\text{нсп}}^u / K_{\text{пн}}^u$	(2.12)
Средние значения коэффициентов пульсаций напряжений эквивалентного СК	$K_{\text{пнсп}}^u = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N K_{\text{пнк}}^u$	(2.13)	$K_{\text{пер}}^u = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N K_{\text{пнк}}^u$	(2.14)

Математические модели для расчета параметров электрических процессов: мгновенных значений входных и выходных напряжений (табл. 1), размахов пульсаций, коэффициентов пульсаций, коэффициентов сглаживания структуры преобразователя по напряжению (табл. 2) 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 показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям напряжений импульсных преобразователей модульной структуры с однофазным и многофазным принципом преобразования.

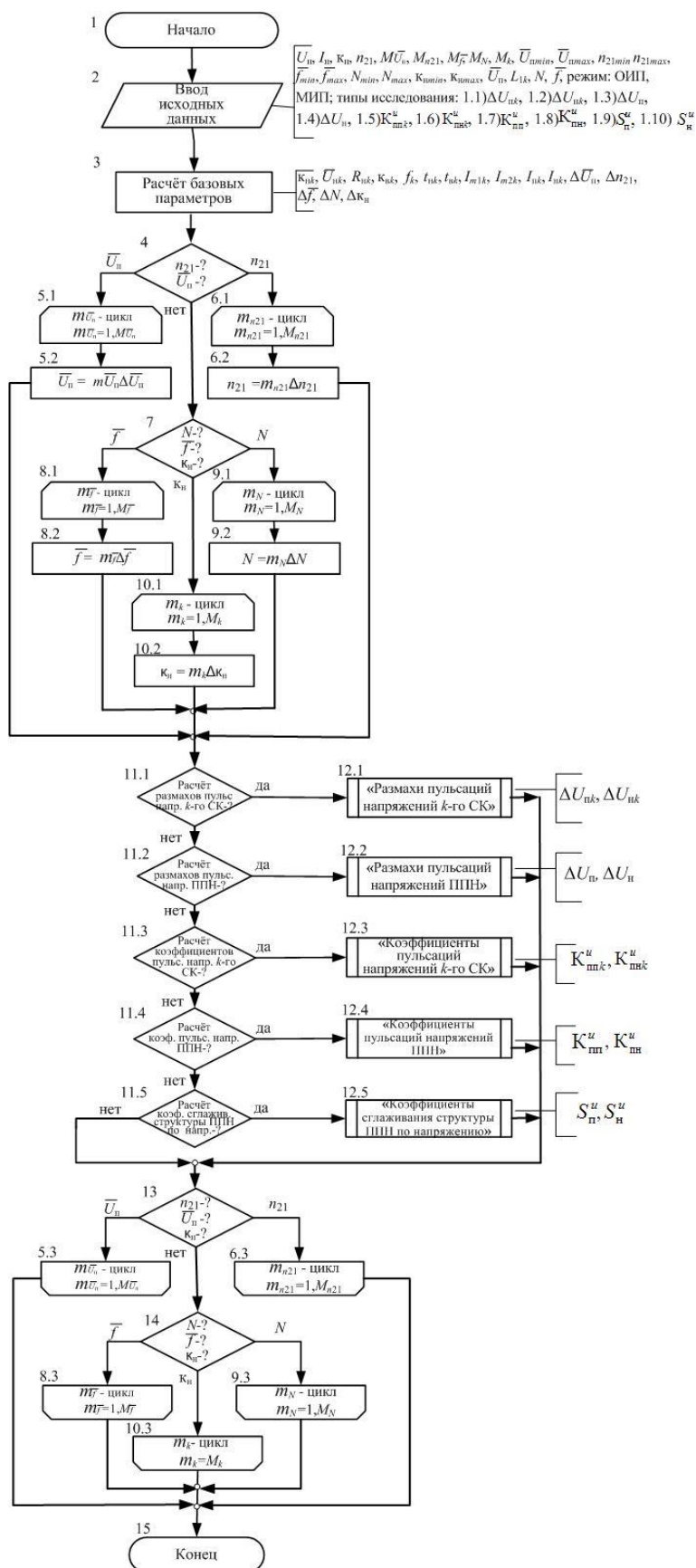


Рисунок 4 – Алгоритм программы для расчета показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям напряжений

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 ($k = 1, 2, \dots, N$); $C_{\Pi} = C_{\Pi 1} + C_{\Pi 2} + \dots + C_{\Pi N}$ и $C_{\Sigma} = C_{\Sigma 1} + C_{\Sigma 2} + \dots + C_{\Sigma N}$ – емкости входного и выходного конденсаторов, количество интервалов $M_{\bar{U}_{\Pi}}$, M_k , $M_{n_{21}}$, $M_{\bar{f}}$, M_N на которые разбиваются соответственно диапазоны изменения: относительного напряжения питания $\bar{U}_{\Pi} = U_{\Pi} / U_{\Pi \text{ном}}$ ($\bar{U}_{\Pi \text{min}} \leq \bar{U}_{\Pi} < \bar{U}_{\Pi \text{max}}$); коэффициента накопления K_{nk} ($K_{nk \text{min}} \leq K_{nk} < K_{nk \text{max}}$); коэффициента трансформации n_{21} ($n_{21 \text{min}} \leq n_{21} < n_{21 \text{max}}$); относительной частоты \bar{f} ($\bar{f}_{\text{min}} \leq \bar{f} < \bar{f}_{\text{max}}$); минимальное $\bar{U}_{\Pi \text{min}} = U_{\Pi} / U_{\Pi \text{min}}$, максимальное $\bar{U}_{\Pi \text{max}} = U_{\Pi} / U_{\Pi \text{max}}$ и фиксированное значение \bar{U}_{Π} (при $\bar{U}_{\Pi} = \text{const}$) относительного напряжения питания; минимальное $K_{nk \text{min}}$, максимальное $K_{nk \text{max}}$ и фиксированное значение K_{nk} (при $K_{nk} = \text{const}$) коэффициента накопления; минимальное $n_{21 \text{min}}$, максимальное $n_{21 \text{max}}$ и фиксированное значение n_{21} (при $n_{21} = \text{const}$) коэффициента трансформации; минимальное \bar{f}_{min} , максимальное \bar{f}_{max} и фиксированное значение \bar{f} (при $\bar{f} = \text{const}$) относительной частоты преобразования; минимальное N_{min} , максимальное N_{max} и фиксированное значение N (при $N = \text{const}$) количество силовых каналов; принцип преобразования (однофазный – ОИП или многофазный – МИП); типы исследования:

1.1 $\Delta U_{\Pi k}$; 1.2 ΔU_{nk} ; 1.3 ΔU_{Π} (ОИП: $\Delta U_{\text{оп}}$, МИП: $\Delta U_{\text{мп}}$); 1.4 ΔU_n (ОИП: $\Delta U_{\text{он}}$, МИП: $\Delta U_{\text{мн}}$); 1.5 $K''_{\Pi k}$; 1.6 K''_{nk} ; 1.7 K''_{Π} (ОИП: $K''_{\text{поп}}$, МИП: $K''_{\text{мпп}}$); 1.8 $K''_{\Pi n}$ (ОИП: $K''_{\text{пон}}$, МИП: $K''_{\text{пмн}}$); 1.9 S''_{Π} (ОИП: $S''_{\text{по}}$, МИП: $S''_{\text{пм}}$); 1.10 S''_n (ОИП: $S''_{\text{но}}$, МИП: $S''_{\text{нм}}$).

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

В табл. 3 представлены основные базовые параметры k -го силового канала СК: (коэффициент накопления K_{nk} , напряжение нагрузки U_{nk} , относительное напряжение нагрузки \bar{U}_{nk} , сопротивление нагрузки R_{nk} , коэффициент возврата K_{bk} , частота преобразования $f_k = 1/T_k$, длительность интервала времени накопления t_{nk} 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_{nk} , среднее значение тока потребления I_{pk} . При симметрии электрических процессов $U_{pk} = U_{\Pi}$; $U_{nk} = U_n$; $f_k = f$; $T_k = T = 1/f$; $K_{nk} = K_n$; $W_{1k} = W_1$; $W_{2k} = W_2$; $t_{nk} = t_n$; $I_{pk} = I_{\Pi}/N$; $I_{nk} = I_n/N$.

Размахи пульсаций, коэффициенты пульсаций, коэффициенты сглаживания напряжений k -х силовых каналов СК и ППН преобразователей модульной структуры являются функциями: $F(\bar{U}_{\Pi})$, $F(n_{21})$, $F(\bar{f})$, $F(N)$, $F(K_n)$, зависящими соответственно от \bar{U}_{Π} , n_{21} , \bar{f} , N , K_n .

Точность расчета этих функций зависит от величин интервалов соответственно $\Delta \bar{U}_{\Pi} = (\bar{U}_{\Pi \text{max}} - \bar{U}_{\Pi \text{min}}) / M_{\bar{U}_{\Pi}}$, $\Delta n_{21} = (n_{21 \text{max}} - n_{21 \text{min}}) / Mn_{21}$, $\Delta \bar{f} = (\bar{f}_{\text{max}} - \bar{f}_{\text{min}}) / M_{\bar{f}}$, $\Delta N = (N_{\text{max}} - N_{\text{min}}) / MN$, $\Delta K_n = (K_n \text{max} - K_n \text{min}) / M_k$.

Видим, что значения чисел $M_{\bar{U}_{\Pi}}$, Mn_{21} , $M_{\bar{f}}$, M_N , M_k определяют величины интервалов (шагов) соответственно $\Delta \bar{U}_{\Pi}$, Δn_{21} , $\Delta \bar{f}$, ΔN , ΔK_n при организации циклов $m_{\bar{U}_{\Pi}}$, mn_{21} , $m_{\bar{f}}$, m_N , m_k .

Таблица 3 – Расчётные соотношения базовых параметров электрических процессов СК

Параметр	Режим			
	Слежения		Стабилизации	
$K_{нк}$	$K_{нк}$	(3.1)	$U_{нк} / U_{нк} + U_{пк} n_{21}$	(3.2)
$U_{нк}$	$U_{пк} K_{нк} n_{21} / (1 - K_{нк})$	(3.3)	$U_{нк}$	(3.4)
$\bar{U}_{нк}$	$U_{нк} / U_{пк}$			(3.5)
$R_{нк}$	$U_{нк} / I_{нк}$			(3.6)
$K_{вк}$	$1 - K_{нк}$			(3.7)
f_k	$(U_{пк}^2 R_{нк} U_{нк} - U_{пк}^2) / 2L_{1k} (U_{пк} (n_{21k} - 1) + U_{нк})^2$			(3.8)
$t_{нк}$	$K_{нк} T$			(3.9)
$t_{вк}$	$K_{вк} T$			(3.10)
I_{m1k}	$U_{пк} t_{нк} / L_{1k}$			(3.11)
I_{m2k}	$U_{пк} t_{нк} / L_{1k} n_{21k}$			(3.12)
$I_{нк}$	$K_{вк} U_{пк} t_{нк} / 2L_{1k} n_{21k}$			(3.13)
$I_{пк}$	$K_{н} U_{пк} t_{нк} / 2L_{1k}$			(3.14)

В блоках 4 и 7 (рис. 4) производится выбор одного из следующих циклов:

– в блоках 5.1 (начало $m_{\bar{U}_{п}}$ – цикла) и 5.3 (конец $m_{\bar{U}_{п}}$ – цикла) организуется $m_{\bar{U}_{п}}$ – цикл: $m_{\bar{U}_{п}} = 1, 2, \dots, M_{\bar{U}_{п}}$. Текущее значение относительного напряжения питания $\bar{U}_{п}$ определяется в блоке 5.2 дискретно с шагом $\Delta \bar{U}_{п} = (\bar{U}_{п \max} - \bar{U}_{п \min}) / M_{\bar{U}_{п}}$ от $(\bar{U}_{п \min} + \Delta \bar{U}_{п})$ до $\bar{U}_{п \max}$;

– в блоках 6.1 (начало mn_{21} – цикла) и 6.3 (конец mn_{21} – цикла) организуется mn_{21} – цикл: $n_{21} = 1, 2, \dots, Mn_{21}$. Текущее значение коэффициента трансформации n_{21} определяется в блоке 6.2 дискретно с шагом $\Delta n_{21} = (n_{21 \max} - n_{21 \min}) / Mn_{21}$ от $(n_{21 \min} + \Delta n_{21})$ до $n_{21 \max}$;

– в блоках 8.1 (начало $m_{\bar{f}}$ – цикла) и 8.2 (конец $m_{\bar{f}}$ – цикла) организуется $m_{\bar{f}}$ – цикл: $m_{\bar{f}} = 1, 2, \dots, M_{\bar{f}}$. Текущее значение относительной частоты \bar{f} определяется в блоке 8.3 дискретно с шагом $\Delta \bar{f} = (\bar{f}_{\max} - \bar{f}_{\min}) / M_{\bar{f}}$ от $(\bar{f}_{\min} + \Delta \bar{f})$ до \bar{f}_{\max} ;

– в блоках 9.1 (начало m_N – цикла) и 9.3 (конец m_N – цикла) организуется m_N – цикл: $m_N = 1, 2, \dots, M_N$. Текущее значение числа силовых каналов N определяется в блоке 9.2 дискретно с шагом $\Delta N = (N_{\max} - N_{\min}) / M_N$ от $(N_{\min} + \Delta N)$ до N_{\max} ;

– в блоках 10.1 (начало m_k – цикла) и 10.3 (конец m_k – цикла) организуется m_k – цикл: $m_k = 1, 2, \dots, M_k$. Текущее значение коэффициента накопления $K_{н}$ определяется в блоке 10.2 дискретно с шагом $\Delta K_{н} = (K_{н \max} - K_{н \min}) / M_k$ от $(K_{н \min} + \Delta K_{н})$ до $K_{н \max}$.

В блоках 11 (11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5) и 12 (12.1, 12.2, 12.3, 12.4, 12.5) реализуется выполнение заданного типа исследования во входных и выходных цепях преобразователей модульной структуры с однофазным и многофазным принципами преобразования: размахов пульсаций напряжений $\Delta U_{пк}$, $\Delta U_{нк}$ k -го СК (блоки 11.1 и 12.1); размахов пульсаций напряжений $\Delta U_{п}$, $\Delta U_{н}$ преобразователя (блоки 11.2 и 12.2); коэффициентов пульсаций напряжений $K_{ппк}^u$, $K_{пнк}^u$ k -го силового канала СК (блоки 11.3 и 12.3); коэффициентов

пульсаций напряжений $K_{\text{пн}}^u$, $K_{\text{пн}}^u$ преобразователя (блоки 11.4 и 12.4); коэффициентов $S_{\text{п}}^u$, $S_{\text{н}}^u$ сглаживания структуры преобразователей по напряжению (блоки 11.5 и 12.5).

На рис. 5 и 6 даны алгоритмы подпрограмм «Размахи пульсаций напряжения k -го СК» и «Коэффициенты пульсаций напряжения k -го СК» для расчета размахов пульсаций и коэффициентов пульсаций напряжения СК на входе $\Delta U_{\text{пк}}$, $K_{\text{пнк}}^u$ и выходе $\Delta U_{\text{нк}}$, $K_{\text{пнк}}^u$ k -х силовых каналов.

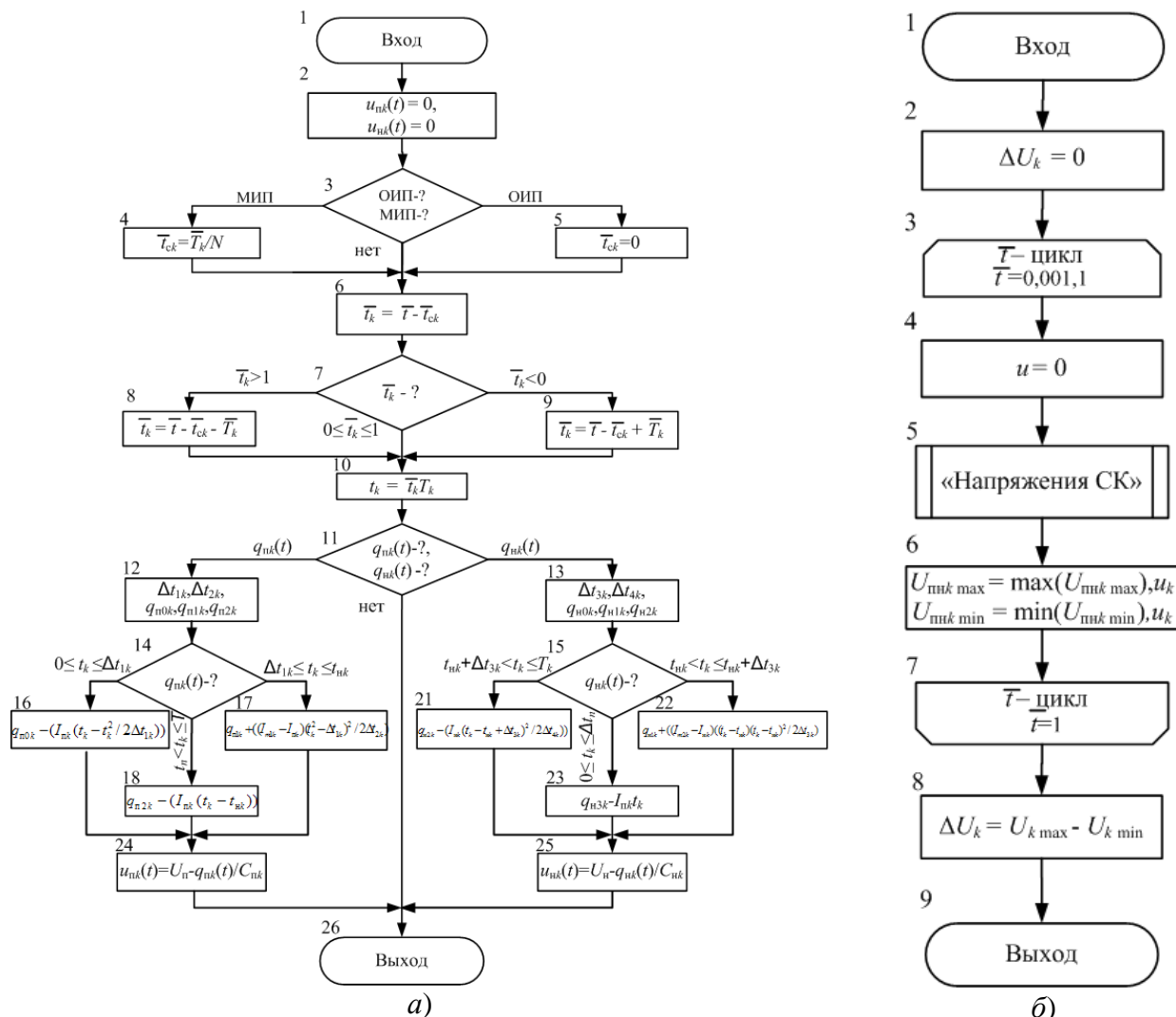


Рисунок 5 – Алгоритмы подпрограмм «Напряжения СК» (а) и «Размахи пульсаций напряжений k -го СК» (б) расчёта пульсаций напряжений и размахов пульсаций напряжений k -го силового канала СК

Подпрограмма «Напряжения СК» - исследования временных зависимостей напряжений $u_{\text{пнк}}(t)$ и $u_{\text{нк}}(t)$ выполнена (рис. 5, а) с использованием соотношений табл. 1. Режимы однофазный – ОИП или многофазный – МИП учитывают блоки 3, 4 и 5 (соотн. 1.2, табл. 1). Текущее относительное время \bar{t}_k k -го СК определяется в блоках 6...9 с учетом соотношений 1.1 табл. 1. 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 $q_{\text{пнк}}(t)$ конденсатора $C_{\text{пк}}$ и выходе $q_{\text{нк}}(t)$ конденсатора $C_{\text{нк}}$ определяются соответственно блоками 14, 16...18 и

блоками 15, 21 ... 23 с использованием соотношений 1.3, 1.4 табл.1. Мгновенные значения напряжения или $u_{пк}(t)$, или $u_{нк}(t)$ k -го СК определяются соответственно в блоках 24 и 25 с использованием соотношений 1.5, 1.6 табл. 1.

Подпрограмма «Размахи пульсаций напряжений k -го СК» (рис. 5, б) – исследование размахов пульсаций напряжений $\Delta U_{пк}$ и $\Delta U_{нк}$ во входных и выходных цепях отдельно взятого k -го силового канала СК с использованием соотношений табл. 2. В блоках с 3 (начало \bar{t} – цикла) по 7 (конец \bar{t} – цикла) организуется \bar{t} – цикл по времени $\bar{t} = t/T$ с шагом $\Delta \bar{t} = 0,001$: $t = 0,001, \dots, 1$. В результате для каждого момента времени \bar{t} обеспечивается в подпрограмме «Напряжения k -го СК» (блок 5) определение пульсаций напряжений $u_{пк}(t)$ или $u_{нк}(t)$ с учетом соотношений 1.5, 1.6 табл. 1 (рис.5, а). В блоке 6 определяются минимальные $U_{пк \min}$ (или $U_{нк \min}$) и максимальные $U_{пк \max}$ (или $U_{нк \max}$) значения напряжений соответственно на входе и выходе преобразователя модульной структуры. Абсолютные пульсации напряжений k -го СК определяются в блоке 8 с учетом соотношений 2.1, 2.2 табл. 2.



Рисунок 6 – Алгоритм подпрограммы «Коэффициенты пульсаций напряжения k -го СК расчёта коэффициентов пульсаций напряжений k -го силового канала СК

Подпрограмма «Коэффициенты пульсаций напряжений k -го СК» (рис. 6) – входных $K_{пнк}^u$ и выходных $K_{пнк}^u$ цепей отдельно взятого k -го силового канала СК (с использованием соотношений табл. 2). В блоке 3 (подпрограмма «Размахи пульсаций напряжений k -го СК») (рис. 5, б) рассчитываются $\Delta U_{пк}$ (или $\Delta U_{нк}$). В блоке 4 рассчитываются коэффициенты пульсаций напряжений на входе $K_{пнк}^u$ и выходе $K_{пнк}^u$ k -го силового канала СК с учетом соотношений 2.7, 2.8 табл. 2.

На рис. 7 даны алгоритмы подпрограмм «Размахи пульсаций напряжения ППН», «Коэффициенты пульсаций напряжения ППН» и «Коэффициенты сглаживания структуры ППН по напряжению» для расчета размахов пульсаций, коэффициентов пульсаций, коэффициентов сглаживания структуры по напряжению на входе $\Delta U_{пн}$, $K_{пн}^u$ и $S_{пн}^u$ и выходе $\Delta U_{нк}$, $K_{пн}^u$ и $S_{пн}^u$ преобразователя.

Подпрограмма «Размахи пульсаций напряжений ППН» (рис. 7, а) – исследование размахов пульсаций напряжений $\Delta U_{пн}$ и $\Delta U_{нк}$ во входных и выходных цепях с однофазным $\Delta U_{оп}$, $\Delta U_{он}$ и многофазным $\Delta U_{мп}$, $\Delta U_{мн}$ принципами преобразования с учетом соотношений табл. 2. В блоках с 3 (начало \bar{t} – цикла) по 10 (конец \bar{t} – цикла) организуется \bar{t} – цикл по времени $\bar{t} = t/T$ с шагом $\Delta \bar{t} = 0,001$: $t = 0,001, \dots, 1$. В блоках с 5 (начало k -цикла) по 8 (конец k -цикла) организуется k -цикл: $k = 1, 2, \dots, N$. В результате для каждого момента времени \bar{t} обеспечивается в подпрограмме «Напряжения k -го СК» (блок 6) определение пульсаций напряжений $u_{пк}(t)$ или $u_{нк}(t)$ с учетом соотношений 1.7, 1.8 табл. 1 (рис. 5, а). Также в блоке 6 учитываются режимы однофазный – ОИП или многофазный – МИП в соответствии с соотношениями (1.2) табл. 1. В блоке 7 обеспечивается суммирование напряжений или $u_{пк}(t)$, или $u_{нк}(t)$. В блоке 9 определяются минимальные $U_{п \min}$ (или $U_{н \min}$) и максимальные $U_{п \max}$ (или $U_{н \max}$) значения напряжений соответственно на входе и выходе преобразователя модульной структуры. Абсолютные пульсации напряжения определяются в блоке 11 с использованием соотношений 2.3, 2.4 табл. 2.

Подпрограмма «Коэффициенты пульсаций напряжения» (рис. 7, б) – исследование коэффициентов пульсаций напряжений преобразователей модульной структуры во входных $K_{\text{пн}}^u$ и выходных $K_{\text{пн}}^u$ цепях с однофазным $K_{\text{поп}}^u$, $K_{\text{пон}}^u$ и многофазным $K_{\text{мпп}}^u$, $K_{\text{пмн}}^u$ принципами преобразования (с использованием соотношений табл. 2). В блоке 3 (подпрограмма «Размахи пульсаций напряжений ППН») (рис. 7, а) рассчитываются $\Delta U_{\text{п}}$ (или $\Delta U_{\text{н}}$). В блоке 4 рассчитываются коэффициенты пульсаций напряжений на входе $K_{\text{пн}}^u$ и выходе $K_{\text{пн}}^u$ ППН с учетом соотношений 2.9, 2.10 табл. 2.

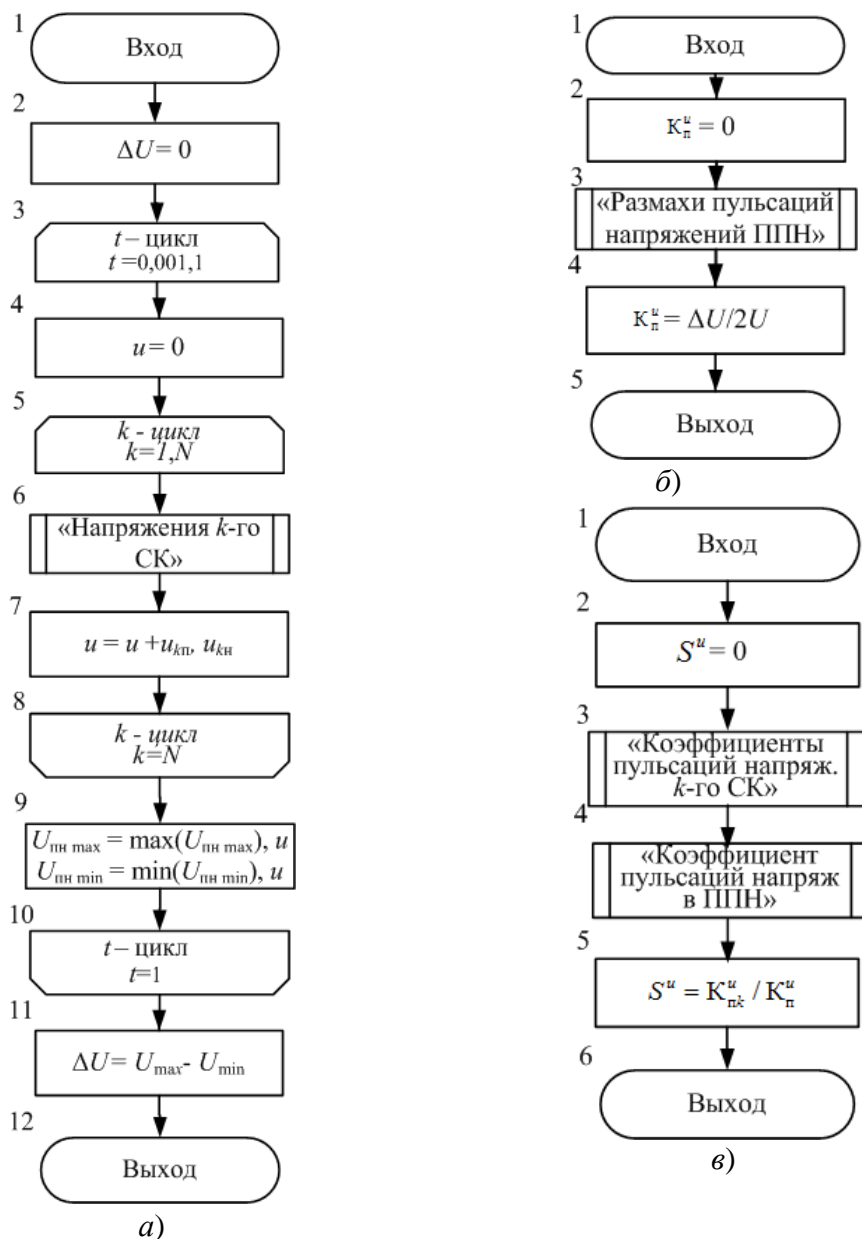


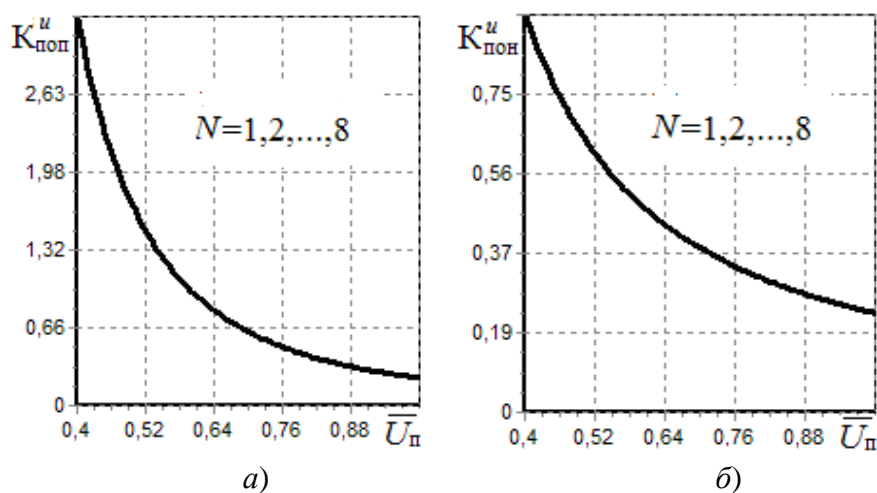
Рисунок 7 – Алгоритмы подпрограмм расчёта пульсаций «Размахи пульсаций напряжений ППН» (а); коэффициентов пульсаций «Коэффициенты пульсаций напряжения» (б); коэффициентов сглаживания напряжений «Коэффициенты сглаживания структуры ППН по напряжению» (в) преобразователей модульной структуры

Подпрограмма «Коэффициенты сглаживания структуры ППН по напряжению» (рис. 7, в) – исследование коэффициента сглаживания структуры по напряжению во входных S_n'' и выходных S_n'' цепях ППН (с использованием соотношений табл. 2). В блоке 3 (подпрограмма «Коэффициент пульсаций напряжения») (рис. 7, б) рассчитываются $K_{\text{пн}}''$ (или $K_{\text{пн}}''$). В блоке 4 рассчитываются средние значения коэффициента пульсаций на входе $K_{\text{нсп}}''$ и выходе $K_{\text{нсп}}''$ с учетом соотношений 2.13, 2.14 табл. 2. В блоке 5 рассчитываются коэффициенты сглаживания структуры по напряжению на входе S_n'' и выходе S_n'' ППН с учетом соотношений 2.11, 2.12 табл. 2.

Полученные математические модели и алгоритмы расчёта позволяют моделировать электрические процессы в импульсных преобразователях модульной структуры: размах пульсаций напряжений k -го СК $\Delta U_{\text{пк}}$, $\Delta U_{\text{нк}}$ и преобразователя в целом $\Delta U_{\text{п}}$, $\Delta U_{\text{н}}$; коэффициенты пульсаций в k -м канале $K_{\text{пнк}}''$, $K_{\text{пнк}}''$ и в ППН $K_{\text{пн}}''$, $K_{\text{пн}}''$, коэффициенты сглаживания S_n'' , S_n'' структуры по напряжению во входных и выходных цепях ППН модульной структуры. Это позволяет определить влияние показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям напряжений на работу преобразователя при различных режимах функционирования при однофазном и многофазном принципах преобразования и обеспечить требуемые показатели преобразователя при минимальных массогабаритных и стоимостных показателях.

С использованием математических моделей табл. 1...3 и алгоритмов (рис. 4...7) в качестве примера на рис. 8 приведены результаты моделирования зависимостей коэффициентов пульсаций напряжений на входе $K_{\text{пн}}''$ и выходе $K_{\text{пн}}''$ ППН соответственно при однофазном $K_{\text{поп}}''$ – (а), $K_{\text{пон}}''$ – (б) и многофазном $K_{\text{пмп}}''$ – (в), $K_{\text{пмн}}''$ – (г) принципах преобразования от относительного напряжения питания $\bar{U}_{\text{п}}$ при числе силовых каналов СК: $N = 1$ ($P_{\text{нк}} = 200$ Вт); $N = 2$ ($P_{\text{нк}} = 400$ Вт); $N = 4$ ($P_{\text{нк}} = 800$ Вт) и $N = 8$ ($P_{\text{нк}} = 1600$ Вт).

Из рис. 8 видим, что при обеспечении $P_{\text{нк}} = \text{const}$ коэффициенты пульсации напряжений на входе $K_{\text{пн}}''$ и выходе $K_{\text{пн}}''$ ППН при однофазном принципе преобразования соответственно $K_{\text{поп}}''$ (а), $K_{\text{пон}}''$ (б) больше, чем при многофазном принципе преобразования соответственно $K_{\text{пмп}}''$ (в), $K_{\text{пмн}}''$ (г). При этом при увеличении числа силовых каналов N при $P_{\text{нк}} = \text{const}$ при многофазном принципе преобразования коэффициенты пульсации напряжений уменьшаются как на входе $K_{\text{пмп}}''$ (в), так и на выходе $K_{\text{пмн}}''$ (г), а при однофазном принципе преобразования число силовых каналов N не оказывает влияние на величины коэффициентов пульсаций $K_{\text{поп}}''$ (а), $K_{\text{пон}}''$ (б).



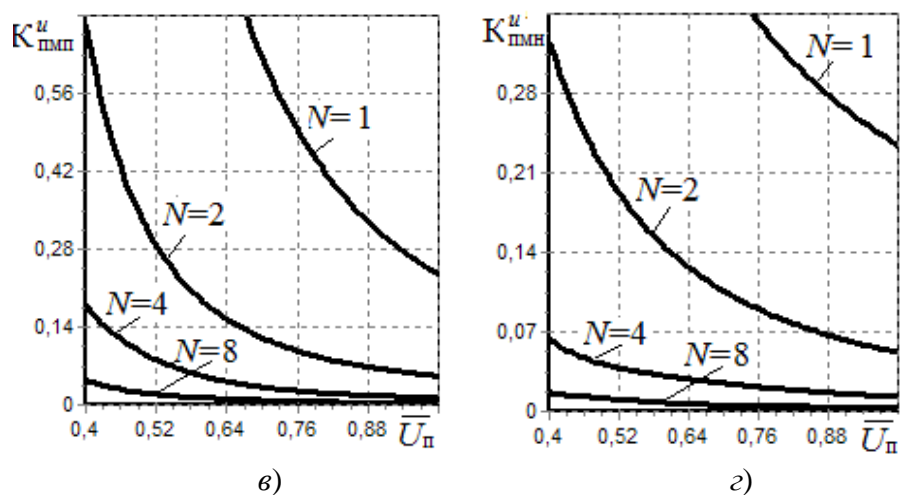


Рисунок 8 – Зависимости коэффициентов пульсаций напряжений на входе $K_{\text{пмп}}''$ и выходе $K_{\text{поп}}''$ соответственно в ОИП: $K_{\text{поп}}''$ – (а); $K_{\text{поп}}''$ – (б) и МИП: $K_{\text{пмп}}''$ – (в); $K_{\text{пмп}}''$ – (г) от относительного напряжения питания $\bar{U}_{\text{п}}$ при $C_{\text{п}} = C_{\text{н}} = 30$, мкФ, $n_{21} = 1$

По результатам данной статьи можно сделать следующие выводы.

1. Предложены математические модели показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям 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.

2. С использованием предложенной математической модели разработаны алгоритмы моделирования и исследования показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям напряжений во входных и выходных цепях преобразователей электрической энергии модульной структуры инвертирующего типа с граничным режимом функционирования при однофазном и многофазном принципах преобразования.

3. Математические модели и алгоритмы позволяют моделировать, исследовать и устанавливать влияние параметров элементов на показатели качества фильтрующих свойств по пульсациям напряжений импульсных преобразователей модульной структуры: размахи пульсаций, коэффициенты пульсаций и сглаживания структуры преобразователя по напряжению во входных и выходных цепях.

4. Предложенная математическая модель и алгоритмы моделирования показателей качества фильтрующих свойств по пульсациям напряжений являются основой для решения задач исследования и проектирования импульсных преобразователей модульной структуры, с граничным режимом функционирования, с однофазным и многофазным принципами преобразования, с силовыми каналами инвертирующего типа.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи / Моин В.С. – М.: Энергоатомиздат, 1986.– 367 с.
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника / Мелешин В.И. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
3. Гельман М.В. Преобразовательная техника / Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. – Челябинск: ЮУрГУ, 2009.– 416 с.
4. Мэк Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению; пер. с англ. / Мэк Р. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 272 с.

5. 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.
6. 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.
7. Кадацкий А.Ф. Алгоритмы моделирования электрических процессов 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. – 2013. – № 1. – С. 88 – 98.
8. 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.
9. Кадацкий А. Ф. Пульсации токов импульсных преобразователей постоянного напряжения модульной структуры с граничным режимом функционирования с силовыми каналами инвертирующего типа / А. Ф. Кадацкий, А. П. Русу, Т. Н. Ерыкалина // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2013. – № 2. – С. 47 – 61.
10. 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. Moin V.S. Stabilizirovannyye tranzistornyye preobrazovateli / V.S. Moin. – Moskva: Energoatomizdat, 1986.– 367 p.
2. Meleshin V.I. Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika / V.I. Meleshin. – Moskva: Texnosfera, 2005. – 632 p.
3. Gelman M.V. Preobrazovatel'naya tekhnika / M.V. Gelman, M.M. Dudkin, K.A. Preobrazhenskij – Chelyabinsk: Yuurgu, 2009.– 416 p.
4. Mek R. Impulsnyye istochniki pitaniya. teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu; per. s angl. / R. Mek – M. : Izdatelskij dom «Dodeka-xxi», 2008. – 272 p.
5. Kadatskij, A. F., Maljvin, I. P., Kochetkov, A. V., Shvec, O. V. (2010). Analiz elektricheskix processov v MIP postojnogo naprjgenij pri granichnux tokax drosselej. Naykovi praci ONAZ im. O. S. Popova, 1, 20–30
6. Kadatskij, I. P., Shvec, O. V., Kochetkov, A. V., Erykalina, T. N. (2012). Elektricheskie processu impylsnux preobrazovatelej modylnoj stryctyru s silovymi kanalami povushayschego tipa. Vostochno Evropejskij gyrnal peredovux texnologij, 4/9(58), 10–16.
7. Kadatskij, I. P., Rysy, A. P., Erykalina, T. N. (2013). Algoritmy modelirovaniya elektricheskix processov v impulsnyx preobrazovatelyax postoyannogo napryazheniya modulnoj stryctyru s silovymi kanalami invertiruyushhego tipa. Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – № 1. – P. 88 – 98.
8. 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.
9. Kadatskij, I. P., Rysy, A. P., Erykalina, T. N. (2013). Pylsacii tokov impylsnux preobrazovatelej postojnogo naprjgenij modylnoj stryctyru s granichnum rejimom fyncionirovanij s silovymi kanalami invertiruyushhego tipa. Naykovi praci ONAZ im. O. S. Popova, 2, 47–61.
10. 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 proszvodstva, 4/1 (24), 29–35.