

УДК 621.362.2

**ПРИНЦИПЫ, АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ  
ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ**

*Кадацкий А.Ф., Русу А.П., Ерыкалина Т.Н., Майстренко О.В., Кочетков А.В.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,*

*65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1*

*[kaferda.tec@onat.edu.ua](mailto:kaferda.tec@onat.edu.ua)*

**ПРИНЦИПИ, АЛГОРИТМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ  
ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ПОСТІЙНОЇ  
НАПРУГИ МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ**

*Кадацький А.Ф., Русу О.П., Єрикаліна Т.М., Майстренко О.В., Кочетков О.В.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,*

*65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1*

*[kaferda.tec@onat.edu.ua](mailto:kaferda.tec@onat.edu.ua)*

**THE PRINCIPLES, ALGORITHMS FOR MODELING AND RESEARCH OF ENERGY  
PROCESSES IN SWITCHED-MODE MODULAR DC-DC CONVERTERS**

*Kadatskyy A.F., Rusu A.P., Erykalina T.N., Maystrenko O.V., Kochetkov A.V.*

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,*

*1 Kovalska St., Odessa, Ukraine, 65029*

*[kaferda.tec@onat.edu.ua](mailto:kaferda.tec@onat.edu.ua)*

**Аннотация.** Предложены принципы и разработаны алгоритмы моделирования и исследования энергетических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения модульной структуры с однофазным и многофазным принципами преобразования с граничным режимом функционирования для восьми вариантов широко используемых типов схемотехнической реализации силовых каналов (понижающий, повышающий, инвертирующий, с прямым включением диода, с обратным включением диода, с выводом средней точки трансформатора, мостовой и полумостовой). Предложены систематизированные математические модели (обобщенные к типам силовых каналов, к однофазному и многофазному принципу преобразования) электрических и энергетических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения модульной структуры для режимов стабилизации и слежения с граничными токами дросселей сглаживающих фильтров силовых каналов, составляющие вычислительную основу предложенных принципов моделирования энергетических процессов, используемые для решения задач исследования и проектирования. Предложены принципы и разработаны алгоритмы программных модулей для решения отдельно взятых задач (расчета при моделировании и исследовании действующих токов, мощности энергетических потерь, коэффициентов полезного действия), так и многофункционального программного модуля с расширенными функциональными возможностями.

**Ключевые слова:** импульсный преобразователь напряжения, многофазный и однофазный принципы преобразования, модульная структура преобразователя, силовой канал, граничный режим функционирования, математическая модель, расчет: действующих токов, мощности энергетических потерь, коэффициентов полезного действия, принципы и алгоритмы моделирования.

**Анотація.** Запропоновані принципи і розроблені алгоритми моделювання та дослідження енергетичних процесів в імпульсних перетворювачах постійної напруги модульної структури з однофазним і багатофазним принципами перетворення з граничним режимом функціонування для восьми варіантів типів схемотехнічної реалізації силових каналів (знижувального, підвищувального, інвертуючого, з прямим включенням діода, зі зворотним включенням діода, з виводом середньої точки трансформатора, мостової і напівмостової), які широко використовуються. Запропоновані систематизовані математичні моделі (узагальнені до типів силових каналів, до однофазного і багатофазного принципів перетворення) електричних та енергетичних процесів в імпульсних

перетворювачах постійної напруги модульної структури для режимів стабілізації та стеження з граничними струмами дроселів згладжувальних фільтрів силових каналів, які складають обчислювальну основу запропонованих принципів моделювання енергетичних процесів для використання та розв'язання завдань дослідження і проектування. Запропоновані принципи і розроблені алгоритми програмних модулів для розв'язання окремо взятих завдань (розрахунку при моделюванні і дослідженні діючих струмів, потужності енергетичних втрат, коефіцієнтів корисної дії), так і багатofункціонального програмного модуля з розширеними функціональними можливостями.

**Ключові слова:** імпульсний перетворювач напруги, багатофазний та однофазний принципи перетворення, модульна структура перетворювача, силовий канал, граничний режим функціонування, математична модель, розрахунок: діючих струмів, потужності енергетичних втрат, коефіцієнтів корисної дії, принципи і алгоритми моделювання.

**Abstract.** The principles and algorithms are proposed for modeling and research of energy processes in pulsed DC converter module structure with single-phase and multi-phase conversion with boundary mode operation for the eight options of widely used types of circuit implementation of the power channels (decreased, increased, inverting, with direct switching diode, with reverse switching diode, with the withdrawal of the transformer mid-point, bridge and half-bridge). Systematic mathematical models are proposed (generalized to the types of power channels and the principle of single-phase and multiphase transformation) of electric and energy processes in pulsed DC converter module structure for stabilization and tracking modes of boundary inductive currents of smoothing filters in power channels that lie in the base of computational modeling of the proposed principles of energy processes used to solve problems of research and design. The principles and the algorithms of software modules for the solution individual problems (operating current, power, energy losses, the efficiency), and multifunction module software with enhanced functionality are proposed.

**Key words:** pulse voltage converter, multi-phase and single-phase conversion principles, the modular structure of the converter, power channel, limit-discontinuous mode, mathematical model, calculating: operating current, energy losses in the elements, the efficiency of the converter, the principles and algorithms for simulation.

Технико-экономические показатели (надежность, энергопотребление, объем, масса) систем электропитания радиотехнических устройств и систем, телекоммуникационного оборудования неразрывно связаны с характеристиками преобразователей постоянного напряжения.

При создании современных преобразователей постоянного и переменного напряжения широко используется импульсный метод преобразования и регулирования электрической энергии, позволяющий создавать устройства и системы с более высокой удельной мощностью и характеристиками, недостижимыми при использовании других методов.

Достижения в области микроэлектроники, непрерывное совершенствование силовых полупроводниковых приборов и средств реализации импульсных методов преобразования (выявление новых структур построения, создание эффективных схемотехнических решений устройств и систем) позволяют максимально использовать потенциальные возможности импульсных методов преобразования и регулирования электрической энергии в силовой преобразовательной технике.

Импульсные преобразователи постоянного напряжения модульной структуры (ППН) из  $N$  однотипных взаимозаменяемых преобразователей меньшей мощности – силовых каналов (СК) обладают рядом положительных свойств: высоким коэффициентом полезного действия, уровнем унификации и стандартизации, надежностью, технологичностью.

Повышение частоты преобразования способствует уменьшению массогабаритных показателей ППН. Однако повышение частоты приводит к увеличению частотных потерь и снижению КПД, увеличению тепловыделения и, как следствие, к увеличению объема и массы [1...11].

Разрешение указанного противоречия достигается переходом к многофазному принципу преобразования электроэнергии, когда электрические процессы (токи, напряжения) в отдельно взятых СК сдвигаются во времени относительно друг друга и суммируются в общих цепях их протекания [12, 13].

В преобразуемом таким образом многофазном импульсном преобразователе (МИП) введение временного сдвига между электрическими процессами СК позволяет уменьшить размеры входного и выходного сглаживающих фильтров по сравнению с однофазным импульсным преобразователем (ОИП) модульной структуры, в котором временной сдвиг между электрическими процессами СК отсутствует (равен нулю).

Несмотря на то, что силовая преобразовательная техника, связанная с импульсным преобразованием электрической энергии в электрическую является динамичным научно-техническим направлением существуют еще ряд факторов, сдерживающих широкое использование импульсных преобразователей электрической энергии с многофазным принципом преобразования.

В известных работах большое внимание уделяется математическим моделям [1...11, 14...16], принципам и алгоритмам исследования *электрических* процессов импульсных преобразователей постоянного напряжения модульной структуры [12, 13]. В литературе не достаточно отражены вопросы, посвященные принципам, алгоритмам моделирования и исследования энергетических процессов в импульсных преобразователях модульной структуры с однофазным и многофазным принципом преобразования электрической энергии

**Цель статьи** – разработка принципов, алгоритмов моделирования и исследования энергетических процессов в импульсных преобразователях электрической энергии модульной структуры с однофазным и многофазным принципами преобразования с граничным режимом функционирования.

На рис. 1 показана структурная схема ППН модульной структуры из  $N$  параллельно включенных (по входу и по выходу) силовых каналов СК<sub>1</sub>, ..., СК<sub>N</sub>.

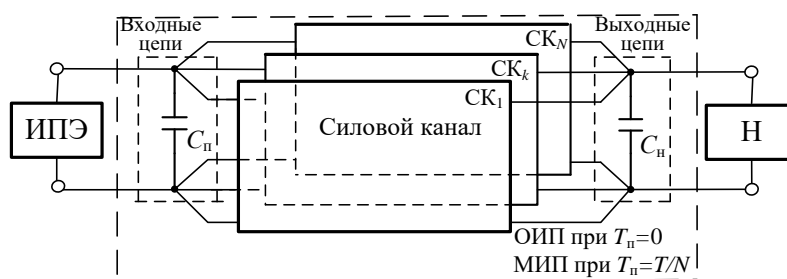


Рисунок 1 – Структурная схема ППН модульной структуры с однофазным ОИП и многофазным МИП принципами преобразования

К входным цепям ППН подключен источник первичного электропитания (ИПЭ), к выходным цепям – нагрузка (Н).

В общем случае в ППН модульной структуры (рис. 1) могут быть использованы однотипные СК различных вариантов схемотехнической реализации преобразователей постоянного напряжения традиционного типа и с ШИМ регулированием, и с граничным режимом функционирования (например, широко используемые (рис. 2) с гальванической связью источника ИПЭ и нагрузки Н), с использованием резонанса силовых каналов и т.д.

Рассмотрим принципы (и алгоритмы) исследования и моделирования энергетических процессов импульсных преобразователей модульной структуры для восьми типов широко используемых СК с граничным режимом функционирования: понижающий  $y = 1$  (рис. 2, а, б, в), повышающий  $y = 2$  (рис. 2, г, д, е), инвертирующий  $y = 3$  (рис. 2, ж, з, и), с прямым включением диода  $y = 4$ , с обратным включением диода  $y = 5$ , с выводом средней точки трансформатора  $y = 6$ , мостовой  $y = 7$  и полумостовой  $y = 8$ .

Энергетическая эффективность функционирования преобразователя электрической энергии характеризуется коэффициентом полезного действия – КПД:

$$\eta_{\text{ППН}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{ППН}}}; \quad (1)$$

$$\Delta P_{\text{ППН}} = \sum_{k=1}^N \Delta P_k + P_{\text{СУ}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{н}} = U_{\text{н}} I_{\text{н}}$  – активная (полезная) мощность в цепи нагрузки ППН ( $U_{\text{н}}$ ,  $I_{\text{н}}$  – средние значения соответственно напряжения и тока в цепи нагрузки ППН);  $P_{\text{СУ}}$  – мощность, потребляемая схемой управления (СУ);  $\Delta P_k$ ,  $\Delta P_{\text{ППН}}$  – мощности энергетических потерь соответственно в  $k$ -м канале СК и ППН.

Энергетические потери  $\Delta P$  в элементах и цепях преобразователя ППН являются функциями, зависящими от их действующих токов  $I_{\text{д}}$  (табл. 1) и активных сопротивлений  $r$ :

$$\Delta P = I_{\text{д}}^2 r. \quad (3)$$

С учетом (3) и табл. 1 в табл. 2 приведены энергетические потери: в обмотках  $W_{1k}$  и  $W_{2k}$   $k$ -го СК соответственно  $\Delta P_{W_{1k}}$  (2.1) и  $\Delta P_{W_{2k}}$  (2.1); потери в проводящем состоянии (статические потери) ключей  $S_{1k}$  и  $VD_{1k}$   $k$ -го СК соответственно  $\Delta P_{S_{1k \text{ CT } k}}$  (2.3) и  $\Delta P_{VD_{1k \text{ CT } k}}$  (2.6); в конденсаторах  $C_{\text{пк}}$  и  $C_{\text{нк}}$   $k$ -го СК соответственно  $\Delta P_{C_{\text{пк}}}$  (2.9) и  $\Delta P_{C_{\text{нк}}}$  (2.10); в конденсаторах  $C_{\text{п}}$  и  $C_{\text{н}}$  входных и выходных цепей ППН соответственно  $\Delta P_{C_{\text{п}}}$  (2.11) и  $\Delta P_{C_{\text{н}}}$  (2.12).

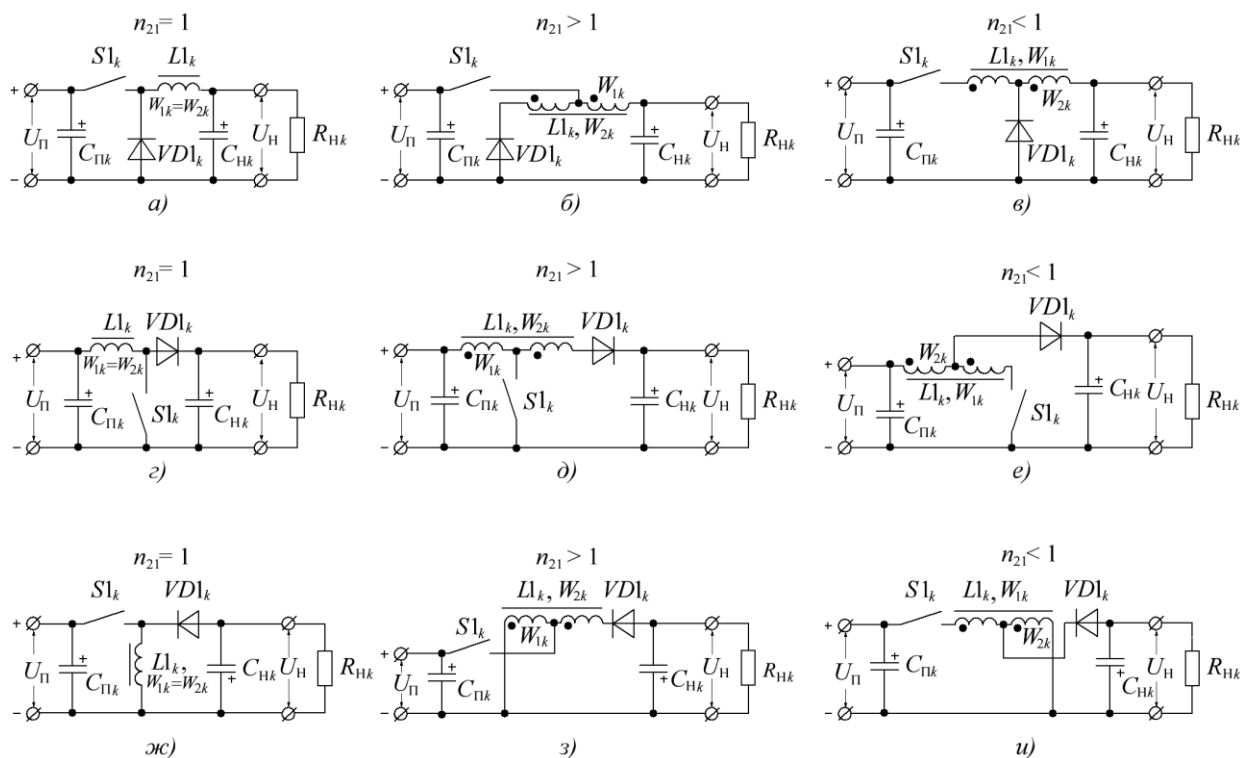


Рисунок 2 – Силовые каналы СК импульсных ППН модульной структуры: понижающий  $y = 1$  (а, б, в), повышающий  $y = 2$  (з, д, е), инвертирующий  $y = 3$  (ж, з, и)

Расчетные соотношения для определения действующих значений токов в элементах и цепях  $k$ -го СК, во входных и выходных цепях ППН представлены [11...13] в табл. 1, мощности энергетических потерь и КПД – в табл. 2 (где  $n_{21}$  – коэффициент трансформации

дресселя;  $I_{m1}, I_{m2}$  – размахи пульсаций токов соответственно в первичной обмотке с числом витков  $W_{1k}$  и во вторичной обмотке  $W_{2k}$   $k$ -го силового дросселя;  $F_H, F_B$  – коэффициенты топологии схем СК [11...13]).

Таблица 1 – Действующие значения токов

Элемент	Параметр	Соотношение	
$L_{1k}, W_{1k}$	$I_{дw1k}$	$n_{21k} \sqrt{\kappa_{нк} (I_{m2k}^2 / 3)}$	(1.1)
$S_{1k}$	$I_{дS1k}$		
$L_{1k}, W_{2k}, VD_{1k}$	$I_{дw2k}, I_{дVD1k}$	$\sqrt{\kappa_{вк} (I_{m2k}^2 / 3)}$	(1.2)
$C_{пк}$	$I_{дCпк}$	$I_{дCпк} = I_{дCп} / N$	(1.3)
$C_{нк}$	$I_{дCнк}$	$I_{дCнк} = I_{дCн} / N$	(1.4)
$C_{п}$	$I_{дCп}$	ОИП: $N \left( \sqrt{\kappa_{нк} \left[ \frac{I_{m1k}^2}{3} - I_{m1k} I_{нк} + I_{нк}^2 \right]} + \kappa_{вк} \left[ \left( I_{пк} - \frac{I_{m2k} F_B}{\kappa_{вк}} \right)^2 + I_{m2k} F_B \left( I_{пк} - \frac{I_{m2k} F_B}{\kappa_{вк}} \right) + \frac{I_{m2k}^2 F_B}{3} \right] \right)$ МИП: $\Delta I_{мп} / 2\sqrt{3}$	(1.5)
$C_{н}$	$I_{дCн}$	ОИП: $N \left( \sqrt{\kappa_{н} \left[ \frac{F_H I_{m1k}^2}{3} - F_H I_{m1k} I_{нк} + I_{нк}^2 \right]} + \kappa_{вк} \left[ \left( \frac{I_{m2k}}{\kappa_{вк}} - I_{нк} \right)^2 - \left( \frac{I_{m2k}}{\kappa_{вк}} - I_{нк} \right) I_{m2k} + \frac{I_{m2k}^2}{3} \right] \right)$ МИП: $\Delta I_{мп} / 2\sqrt{3}$	(1.6)

Таблица 2 – Мощности энергетических потерь и КПД

Элемент	Параметр	Соотношения	
$L_{1k}$	$\Delta P_{W1k}$	$I_{дW1k}^2 r_{W1k}$	(2.1)
	$\Delta P_{W2k}$	$I_{дW2k}^2 r_{W2k}$	(2.2)
$S_{1k}$	$\Delta P_{S1 CT k}$	$I_{дS1k}^2 r_{S1k}$	(2.3)
	$\Delta P_{S1 ДИН k}$	$(U_{пк} ((n_{21k} - F_B) / n_{21k}) + U_{нк} ((1 - F_H n_{21k}) / n_{21k})) I_{m1k} t_{S1кпер} / 2$	(2.4)
	$\Delta P_{S1k}$	$\Delta P_{S1 CT k} + \Delta P_{S1 ДИН k}$	(2.5)
$VD_{1k}$	$\Delta P_{VD1 CT k}$	$I_{дVD1k}^2 r_{VD1k}$	(2.6)
	$\Delta P_{VD1 ДИН k}$	$(U_{пк} (n_{21k} - F_B) + U_{нк} (1 - F_H n_{21k})) I_{m2k} t_{VD1кпер} / 2$	(2.7)
	$\Delta P_{VD1k}$	$\Delta P_{VD1 CT k} + \Delta P_{VD1 ДИН k}$	(2.8)
$C_{пк}$	$\Delta P_{Cпк}$	$I_{дCпк}^2 r_{Cпк}$	(2.9)
$C_{нк}$	$\Delta P_{Cнк}$	$I_{дCнк}^2 r_{Cнк}$	(2.10)
$C_{п}$	$\Delta P_{Cп}$	$I_{дCп}^2 r_{Cп}$	(2.11)
$C_{н}$	$\Delta P_{Cн}$	$I_{дCн}^2 r_{Cн}$	(2.12)
СК	$\Delta P_k$	$\Delta P_{W1k} + \Delta P_{W2k} + \Delta P_{S1k} + \Delta P_{VD1k} + \Delta P_{Cпк} + \Delta P_{Cнк}$	(2.13)
ППН	$\Delta P_{ППН}$	$\sum_{k=1}^N \Delta P_k + P_{CY}$	(2.14)
СК	$\eta_k$	$P_{нк} / (P_{нк} + \Delta P_k)$	(2.15)
ППН	$\eta_{ППН}$	$P_H / (P_H + \Delta P_{ППН})$	(2.16)

Математические модели расчета действующих значений токов (табл. 1), мощности энергетических потерь и КПД преобразователя (табл. 2) позволяют разрабатывать как отдельные (рис. 3), так и многофункциональные программные модули (ПМ) (рис. 5) для решения широкого круга задач для исследования и проектирования импульсных преобразователей постоянного напряжения.

Программные модули ПМ1 – расчета действующих значений токов; ПМ2 – расчета мощности энергетических потерь и ПМ3 – расчета КПД выполнены по алгоритмам рис. 3.

Программные модули рис. 3 отличаются различным исполнением двух блоков (блок 2 (2.1, 2.2, 2.3) и блок 11 (11.1, 11.2, 11.3)).

Блок 2 (Исходные данные) выполняется в виде трех модификаций: 2.1 (ПМ1) – исходные данные для расчета действующих значений токов; 2.2 (ПМ2) – исходные данные для расчета мощности энергетических потерь и 2.3 (ПМ3) – исходные данные для расчета коэффициентов полезного действия  $k$ -х силовых каналов СК и ППН.

Блоки 2.1, 2.2, и 2.3 отличаются друг от друга возможностью выбора типа исследования энергетических параметров.

При этом блоки 2.1, 2.2 и 2.3 имеют и общие 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  $U_{nk} = U_n K_{Bx}$  источника питания (где  $K_{Bx}$  – коэффициент трансформации трансформатора  $TV1$ : при  $y = 1, 2, 3 - K_{Bx} = 1$ , при  $y = 4, 5, 6, 7, 8$   $K_{Bx}$  может быть, как равным 1 ( $K_{Bx} = 1$ ), так и не равным ( $K_{Bx} < 1$ ,  $K_{Bx} > 1$ ));
- коэффициент трансформации  $n_{21k} = n_{21}$ ;
- индуктивность  $L_{1k} = L_1$ ;
- номер  $k$ -го силового канала ( $k = 1, 2, \dots, N$ );
- количество интервалов  $M_{\bar{U}_n}$ ,  $M_k$ ,  $M_{n_{21}}$ ,  $M_{\bar{f}}$ ,  $M_N$  на которые разбиваются соответственно диапазоны изменения: относительного напряжения питания  $\bar{U}_n$  ( $\bar{U}_{n \min} \leq \bar{U}_n < \bar{U}_{n \max}$ ); коэффициента накопления  $K_{nk}$  ( $K_{nk \min} \leq K_{nk} < K_{nk \max}$ ); коэффициента трансформации  $n_{21}$  ( $n_{21 \min} \leq n_{21} < n_{21 \max}$ ); относительной частоты  $\bar{f}$  ( $\bar{f}_{\min} \leq \bar{f} < \bar{f}_{\max}$ );
- минимальное  $\bar{U}_{n \min}$ , максимальное  $\bar{U}_{n \max}$  и фиксированное значение  $\bar{U}_n$  (при  $\bar{U}_n = \text{const}$ ) относительного напряжения питания;
- минимальное  $K_{nk \min}$ , максимальное  $K_{nk \max}$  и фиксированное значение  $K_{nk}$  (при  $K_{nk} = \text{const}$ ) коэффициента накопления;
- минимальное  $n_{21 \min}$ , максимальное  $n_{21 \max}$  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);

– тип СК: понижающий ( $y = 1: F_H = 1, F_B = 0$ ); повышающий ( $y = 2: F_H = 0, F_B = 1$ ); инвертирующий ( $y = 3: F_H = 0, F_B = 0$ ); с прямым включением диода ( $y = 4: F_H = 1, F_B = 0$ ); с обратным включением диода ( $y = 5: F_H = 0, F_B = 0$ ); с выводом средней точки трансформатора ( $y = 6: F_H = 1, F_B = 0$ ); мостовой ( $y = 7: F_H = 1, F_B = 0$ ); полумостовой ( $y = 8: F_H = 1, F_B = 0$ ).

Дополнительно, в блоках 2.1, 2.2 и 2.3 обеспечивается выбор исследования:

- в блоке 2.1 (программного модуля ПМ1) – расчет действующих значений токов:
  - 1)  $I_{дСп}$  – конденсатора  $C_{п}$ ; 2)  $I_{дСн}$  – конденсатора  $C_{н}$ ; 3)  $I_{дСпк}$  – конденсатора  $C_{пк}$ ; 4)  $I_{дСнк}$  – конденсатора  $C_{нк}$ ; 5)  $I_{дS1k}$  – ключа  $S1_k$ ; 6)  $I_{дVD1k}$  – диода  $VD1_k$ ; 7)  $I_{дW1k}$  – обмотки  $W1_k$ ; 8)  $I_{дW2k}$  – обмотки  $W2_k$ ;
- в блоке 2.2 (программного модуля ПМ2) – расчет мощности энергетических потерь:
  - 1)  $\Delta P_{S1 CTk}$  – ключа  $S1_k$  (статические потери); 2)  $\Delta P_{S1 ДИН k}$  – ключа  $S1_k$  (динамические потери); 3)  $\Delta P_{S1k}$  – ключа  $S1_k$ ; 4)  $\Delta P_{VD1 CTk}$  – диода  $VD1_k$  (статические потери); 5)  $\Delta P_{VD1 ДИН k}$  – диода  $VD1_k$  (динамические потери); 6)  $\Delta P_{VD1k}$  – диода  $VD1_k$ ; 7)  $\Delta P_{W1k}$  – в обмотке  $W1_k$ ; 8)  $\Delta P_{W2k}$  – в обмотке  $W2_k$ ; 9)  $\Delta P_{Cпк}$  – в конденсаторе  $C_{пк}$ ; 10)  $\Delta P_{Cнк}$  – в конденсаторе  $C_{нк}$ ; 11)  $\Delta P_k$  – в  $k$ -м канале СК; 12)  $\Delta P_{Сп}$  – в конденсаторе  $C_{п}$ ; 13)  $\Delta P_{Сн}$  – в конденсаторе  $C_{н}$ ; 14)  $\Delta P_{ППН}$  – в преобразователе ППН;
- в блоке 2.3 (программного модуля ПМ3) – расчет коэффициента полезного действия: 1)  $\eta_k$  –  $k$ -го канала СК, 2)  $\eta_{ППН}$  – преобразователя ППН.

В блоке 3 программных модулей рис. 3 с использованием расчётных соотношений табл. 3 [15] рассчитываются (в зависимости от конкретного назначения преобразователь может работать в режиме стабилизации или слежения) базовые параметры преобразователей модульной структуры.

Таблица 3 – Расчётные соотношения базовых параметров электрических процессов СК

Параметр	Режим			
	Слежения		Стабилизации	
$K_{Hk}$	$K_{Hk}$	(3.1)	$\frac{U_{Hk} - F_B U_{пк} K_{Bx}}{U_{Hk} (1 - F_H n_{21k}) - U_{пк} (F_B - n_{21k}) K_{Bx}}$	(3.2)
$U_{Hk}$	$K_{Bx} U_{пк} \frac{F_B + K_{пк} (n_{21k} - F_B)}{K_{Hk} (F_H n_{21k} - 1)}$	(3.3)	$U_{Hk}$	(3.4)
$\bar{U}_{Hk}$	$U_{Hk} / U_{пк} K_{Bx}$			(3.5)
$R_{Hk}$	$U_{пк} / I_{Hk}$			(3.6)
$K_{Bk}$	$1 - K_{Hk}$			(3.7)
$f_k$	$(K_{Bx} U_{пк}^2 R_{Hk} U_{Hk} - K_{Bx}^2 U_{пк}^2) / 2L1_k (K_{Bx} U_{пк} (n_{21k} - 1) + U_{Hk})^2$			(3.8)
$t_{Hk}$	$K_{Hk} T_k$			(3.9)
$t_{Bk}$	$K_{Bk} T_k$			(3.10)
$I_{m1k}$	$(K_{Bx} U_{пк} - F_H U_{пк}) K_{Hk} T_k / L1_k$			(3.11)
$I_{m2k}$	$I_{m1k} / n_{21k}$			(3.12)
$I_{Hk}$	$0,5 I_{m2k} [K_{пк} (F_H n_{21k} - 1)]$			(3.13)
$I_{пк}$	$K_{Hk} I_{m1k} / 2$			(3.14)

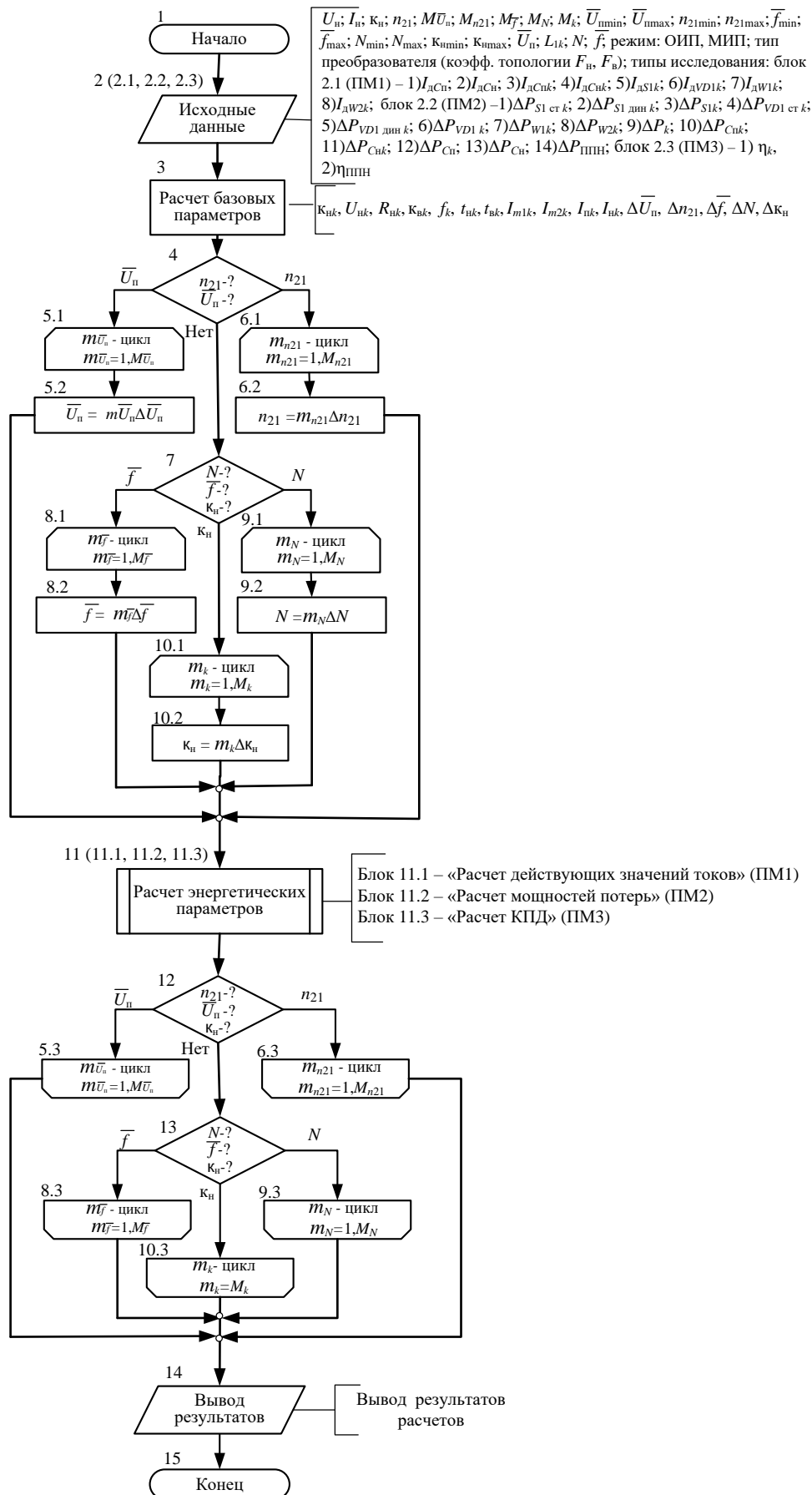


Рисунок 3 – Алгоритмы программных модулей ПМ1, ПМ2, ПМ3 для расчета энергетических параметров ПШН



Действующие значения токов, мощности энергетических потерь и коэффициенты полезного действия  $k$ -х силовых каналов СК и ППН преобразователей модульной структуры являются функциями:  $F(\bar{U}_{\Pi})$ ,  $F(n_{21})$ ,  $F(\bar{f})$ ,  $F(N)$ ,  $F(\kappa_{\text{H}})$ , зависящими соответственно от  $\bar{U}_{\Pi}$ ,  $n_{21}$ ,  $\bar{f}$ ,  $N$ ,  $\kappa_{\text{H}}$ .

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

Видим, что значения чисел  $M_{\bar{U}_{\Pi}}$ ,  $Mn_{21}$ ,  $M_{\bar{f}}$ ,  $MN$ ,  $M_k$  определяют величины интервалов (шагов) соответственно  $\Delta\bar{U}_{\Pi}$ ,  $\Delta n_{21}$ ,  $\Delta\bar{f}$ ,  $\Delta N$ ,  $\Delta\kappa_{\text{H}}$  при организации циклов  $m_{\bar{U}_{\Pi}}$ ,  $m_{n_{21}}$ ,  $m_{\bar{f}}$ ,  $m_N$ ,  $m_k$ .

В блоках 4 и 12 (рис. 3) производится выбор одного из следующих циклов:

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

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

– 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  $\Delta\bar{f} = (\bar{f}_{\text{ max}} - \bar{f}_{\text{ min}}) / M_{\bar{f}}$  от  $(\bar{f}_{\text{ min}} + \Delta\bar{f})$  до  $\bar{f}_{\text{ max}}$ ;

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

– 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  $\kappa_{\text{H}}$  определяется в блоке 10.2 дискретно с шагом  $\Delta\kappa_{\text{H}} = (\kappa_{\text{H max}} - \kappa_{\text{H min}}) / M_k$  от  $(\kappa_{\text{H min}} + \Delta\kappa_{\text{H}})$  до  $\kappa_{\text{H max}}$ ;

Блок 11 рис. 3 (подпрограмма «Расчет энергетических параметров») выполняется в виде трех модификаций: 11.1 (программный модуль ПМ1) – подпрограмма «Расчет действующих значений токов» (рис. 4, а); 11.2 (программный модуль ПМ2) – подпрограмма «Расчет мощности потерь» (рис. 4, б); 11.3 (программный модуль ПМ3) – подпрограмма «Расчет КПД» (рис. 4, в).

На рис. 4, а с использованием соотношений табл. 1 приведен алгоритм подпрограммы «Расчет действующих значений токов», предназначенной для расчета действующих значений токов в элементах  $k$ -х силовых каналов СК, во входных и выходных цепях ППН.

В блоке 2 обеспечивается учет принципа преобразования (однофазный – ОИП или многофазный – МИП). Далее рассчитываются действующие значения токов конденсаторов  $C_{\Pi}$   $C_{\text{H}}$  ППН при однофазном (блок 4) и многофазном (блоки 3 и 5) принципах преобразования. В блоке 3 вызывается подпрограмма «Размахи пульсаций токов ППН» для исследования абсолютных пульсаций токов во входных  $\Delta I_{\Pi}$  и выходных  $\Delta I_{\text{H}}$  цепях преобразователя модульной структуры с многофазным принципом преобразования, описание которой подробно рассмотрено в [15].

В блоке 4 с использованием соотношений (1.5), (1.6) табл. 1 рассчитываются действующие значения токов  $I_{дСп}$ ,  $I_{дСн}$  в конденсаторах  $C_p$ ,  $C_n$  при однофазном принципе преобразования.

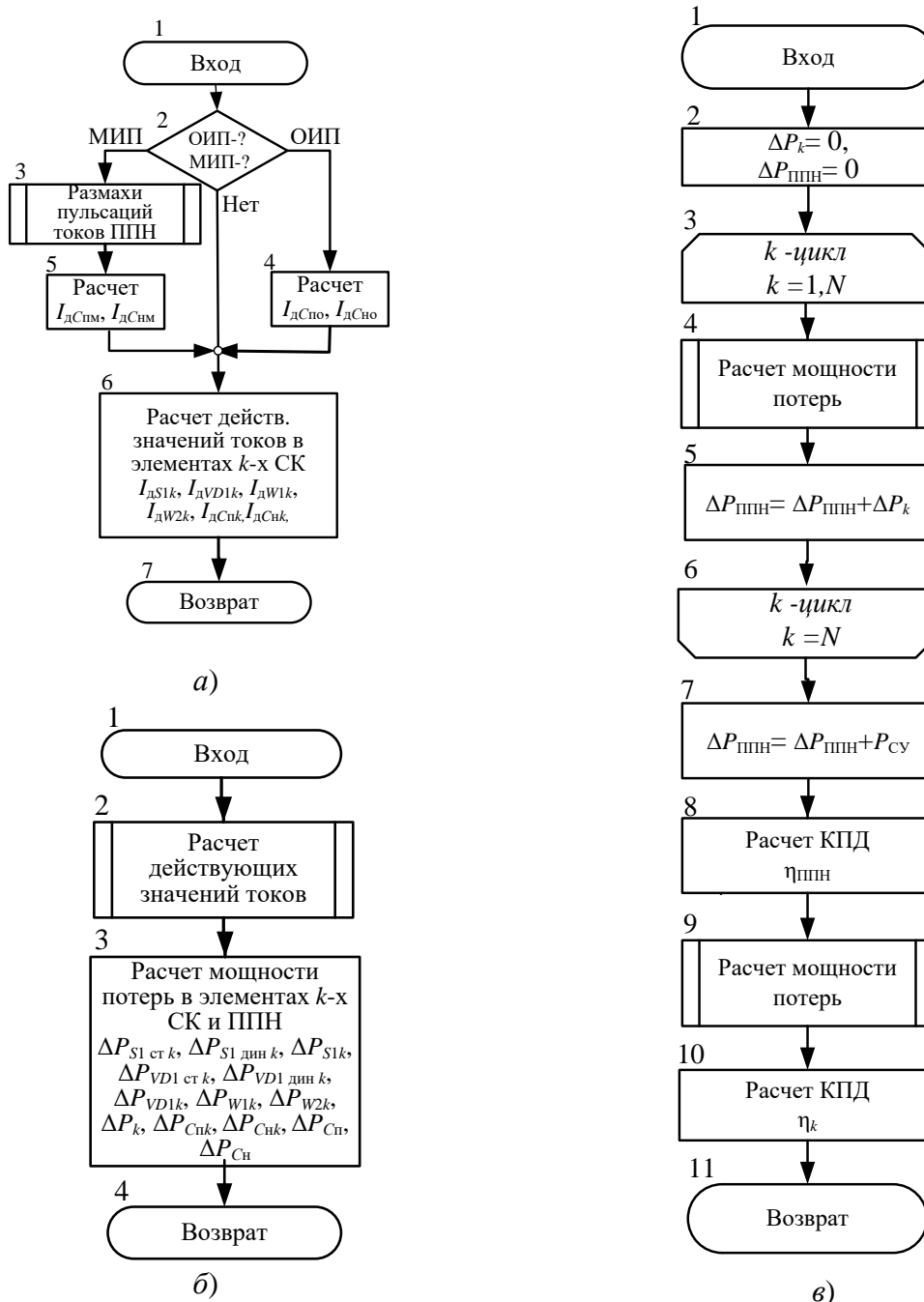


Рисунок 4 – Алгоритмы подпрограмм «Расчет действующих значений токов» (а); «Расчет мощности потерь» (б); «Расчет КПД» (в)

В блоке 6 с использованием соотношений (1.1)...(1.4) табл. 1 выполняется расчет действующих значений токов соответственно  $I_{дW1k}$ ,  $I_{дS1k}$ ,  $I_{дW2k}$ ,  $I_{дVD1k}$ ,  $I_{дСпк}$ ,  $I_{дСнк}$ .

На рис. 4, б с использованием соотношений табл. 1 и 2 приведен алгоритм подпрограммы «Расчет мощности потерь», предназначенной для расчета мощности энергетических потерь в элементах  $k$ -х СК и ППН. В блоке 2 вызывается подпрограмма «Расчет действующих значений токов» (рис. 4, а) для расчёта действующих значений токов в элементах  $k$ -х силовых каналов СК и преобразователе ППН.

В блоке 3 с использованием соотношений (2.1)...(2.13) табл. 2 определяются мощности энергетических потерь соответственно  $\Delta P_{W1k}$ ,  $\Delta P_{W2k}$ ,  $\Delta P_{S1 \text{ ст } k}$ ,  $\Delta P_{S1 \text{ дин } k}$ ,  $\Delta P_{S1k}$ ,  $\Delta P_{VD1 \text{ ст } k}$ ,  $\Delta P_{VD1 \text{ дин } k}$ ,  $\Delta P_{VD1k}$ ,  $\Delta P_{Cпk}$ ,  $\Delta P_{Cнk}$ ,  $\Delta P_{Cп}$ ,  $\Delta P_{Cн}$ ,  $\Delta P_k$ .

На рис. 4, в с использованием соотношений табл. 2 приведен алгоритм подпрограммы «Расчет КПД» для исследования коэффициента полезного действия в  $k$ -м СК и ППН.

В блоках с 3-го (начало  $k$ -цикла) и по 6-й (конец  $k$ -цикла) организуется  $k$ -цикл:  $k = 1, 2, \dots, N$ . В блоке 4 вызывается подпрограмма «Расчет мощности потерь» (рис. 4, б) для расчета мощности энергетических потерь в элементах  $k$ -х силовых каналов СК. В блоке 5 суммируются мощности энергетических потерь  $\Delta P_k$  при  $k = 1, 2, \dots, N$ .

В блоке 7 реализуется в соответствии с соотношением (2.14) табл. 2 расчёт мощности энергетических потерь ППН  $\Delta P_{ППН}$ . Коэффициент полезного действия ППН  $\eta_{ППН}$  рассчитывается в блоке 8 с использованием соотношения (2.16) табл. 2.

В блоке 9 вызывается подпрограмма «Расчет мощности потерь» (рис. 4, б) для расчета мощности энергетических потерь в элементах  $k$ -х силовых каналов СК. Коэффициент полезного действия  $k$ -го силового канала СК  $\eta_k$  рассчитывается в блоке 10 с использованием соотношения (2.15) табл. 2.

На практике появляется необходимость в разработке программного обеспечения (многофункциональных программных модулей, программных комплексов) для решения задач, возникающих при исследованиях и проектировании импульсных преобразователей модульной структуры с однофазным и многофазным принципом преобразования.

На рис. 5 приведен алгоритм программы для расчета энергетических параметров ППН, который позволяет функционально в одном многофункциональном программном модуле решить весь круг задач решаемый тремя программными модулями ПМ1, ПМ2 и ПМ3 (рис. 3).

В отличие от блока 2 алгоритма рис. 3 в блоке 2 алгоритма рис. 5 задаются общие исходные данные для трех типов исследований: расчет действующих значений токов – 1.1)  $I_{дCп}$ , 1.2)  $I_{дCн}$ , 1.3)  $I_{дW1k}$ , 1.4)  $I_{дS1k}$ , 1.5)  $I_{дW2k}$ , 1.6)  $I_{дVD1k}$ , 1.7)  $I_{дCнk}$ , 1.8)  $I_{дCнk}$ ; определение мощности энергетических потерь – 2.1)  $\Delta P_{S1 \text{ ст } k}$ , 2.2)  $\Delta P_{S1 \text{ дин } k}$ , 2.3)  $\Delta P_{S1k}$ , 2.4)  $\Delta P_{VD1 \text{ ст } k}$ , 2.5)  $\Delta P_{VD1 \text{ дин } k}$ , 2.6)  $\Delta P_{VD1k}$ , 2.7)  $\Delta P_{W1k}$ , 2.8)  $\Delta P_{W2k}$ , 2.9)  $\Delta P_k$ , 2.10)  $\Delta P_{Cпk}$ , 2.11)  $\Delta P_{Cнk}$ , 2.12)  $\Delta P_{Cп}$ , 2.13)  $\Delta P_{Cн}$ , 2.14)  $\Delta P_{ППН}$  и коэффициент полезного действия 3.1)  $\eta_k$ , 3.2)  $\eta_{ППН}$  соответственно  $k$ -го силового канала и преобразователя модульной структуры.

В блоках 5, 6 и блоках 8...10 рис. 5 как и в аналогичных блоках рис. 3 организуются циклы по относительному напряжению питания  $\bar{U}_п$   $m_{\bar{U}_п}$  – цикл (блоки 5.1...5.3), коэффициенту трансформации  $n_{21}$   $m_{n_{21}}$  – цикл (блоки 6.1...6.3), относительной частоте преобразования  $\bar{f}$   $m_{\bar{f}}$  – цикл (блоки 8.1...8.3), числу силовых каналов  $N$   $m_N$  – цикл (блоки 9.1 –9.3) и коэффициенту накопления  $k_н$   $m_k$  – цикл (блоки 10.1...10.3).

В отличие от блока 11, алгоритма рис.3, где в каждом программном модуле ПМ (ПМ1, ПМ 2, ПМ3) задается один тип исследования, в блоках 11, 12 (рис. 5) реализуется на выбор выполнение одного из трех заданных типов исследований:

1. При определении действующих значений токов (блок 11.1), вызывается (блок 12.1) подпрограмма «Расчет действующих значений токов» (рис. 4, а).

2. При определении мощности энергетических потерь (блоки 11.2 и 12.2), вызывается подпрограмма «Расчет мощности потерь» (рис. 4, б).

3. При определении коэффициента полезного действия (блоки 11.3 и 12.3) вызывается подпрограмма «Расчет КПД» (рис. 4, в).

На рис. 6, 7 с использованием математических моделей табл. 1 – табл. 3 и алгоритмов рис. 3...5 приведены в качестве иллюстрации результаты моделирования на ЭВМ зависимостей относительных действующих значений токов  $I_{дS1k} / I_{нk}$  управляемого ключа  $S1$  и  $I_{дVD1k} / I_{нk}$  – неуправляемого ключа  $VD1$  в зависимости от  $k_н$ (рис. 6, а) и от  $U_п / U_н$  (рис. 6, б) и от  $n_{21}$  (рис. 7).

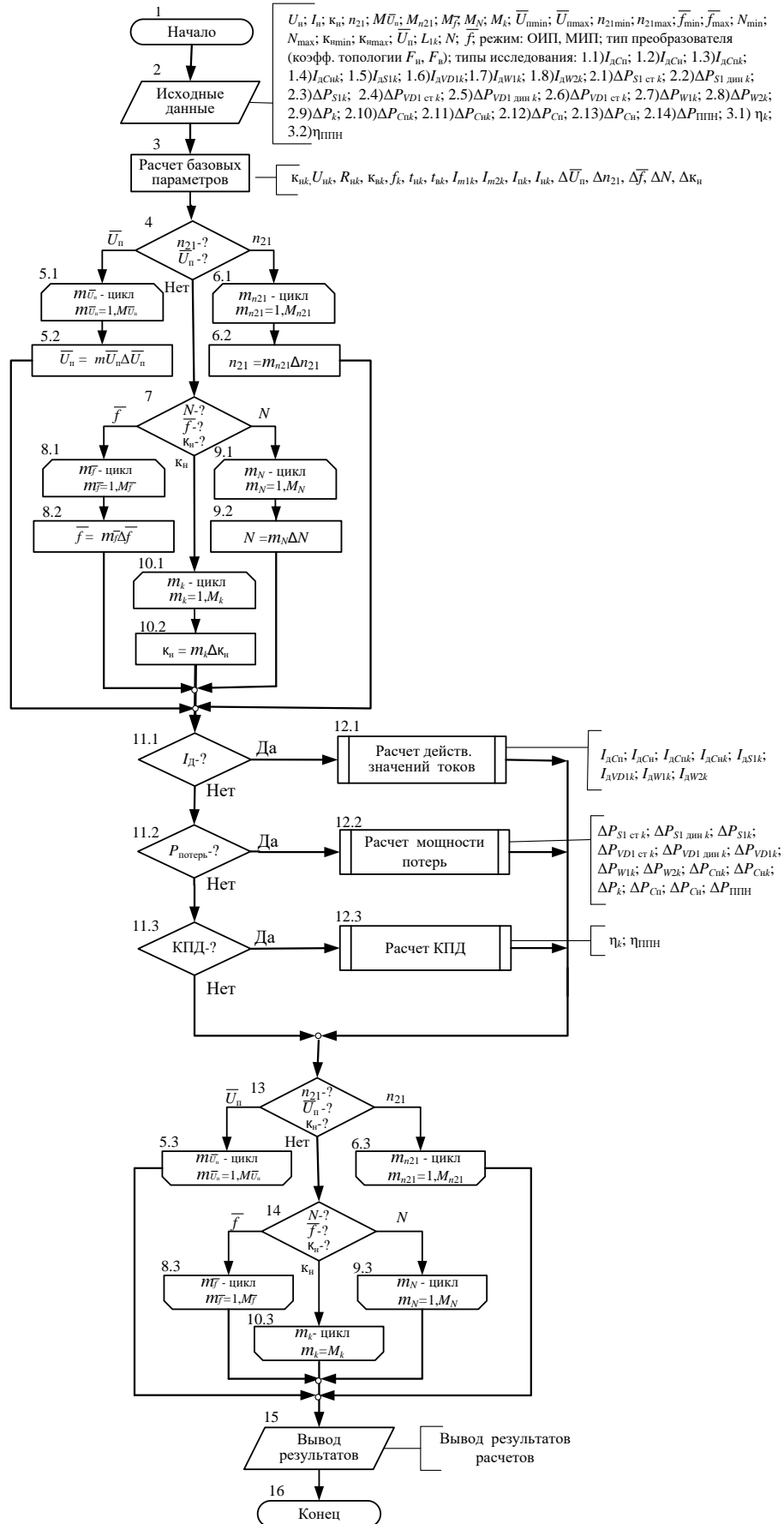


Рисунок 5 – Алгоритм расчета энергетических параметров ППН

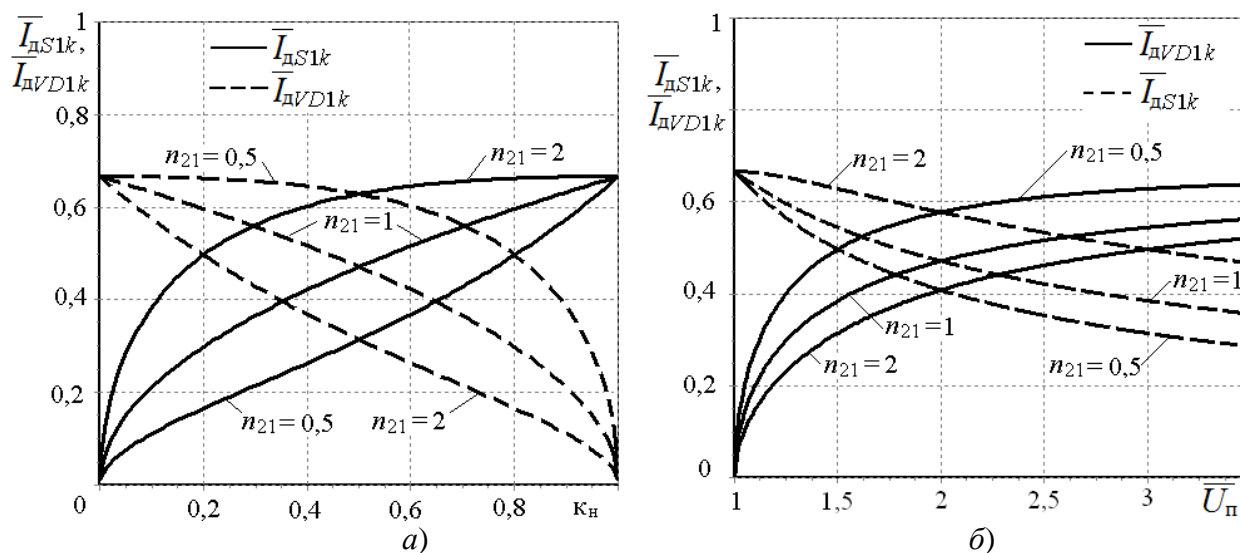


Рисунок 6 – Зависимости действующего значения токов ключей  $S1_k$  и  $VD1_k$  от  $k_H$  (а), и от  $\bar{U}_\pi$  (б) при различных значениях  $n_{21}$

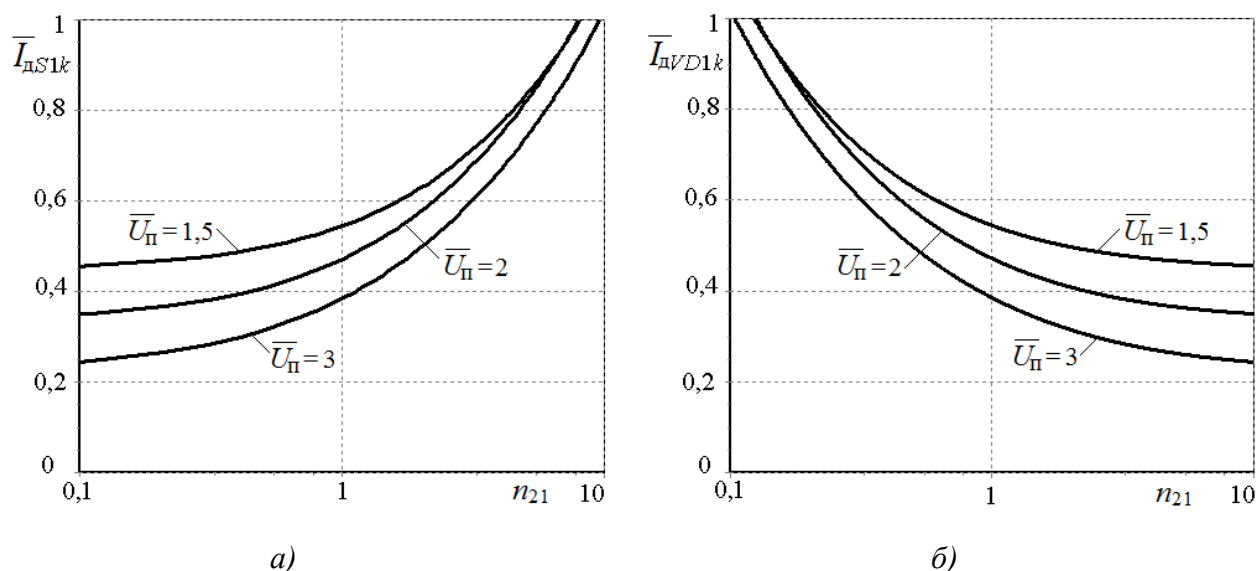


Рисунок 7 – Зависимость действующего значения токов ключей  $S1_k$  (а) и  $VD1_k$  (б), от  $n_{21}$  при различных значениях относительного напряжения питания  $\bar{U}_\pi$

По результатам данной статьи можно сделать следующие выводы:

1. Предложены систематизированные математические модели электрических и энергетических процессов импульсных преобразователей модульной структуры с граничным режимом функционирования, обобщенные к однофазному и многофазному принципам преобразования электрической энергии, к восьми типам силовых каналов, к коэффициенту трансформации дросселей силовых каналов.

2. С использованием обобщенных математических моделей предложены принципы и разработаны алгоритмы для моделирования энергетических процессов преобразователей постоянного напряжения модульной структуры с однофазным и многофазным принципами преобразования с граничным режимом функционирования для восьми широко используемых типов схемотехнической реализации силовых каналов.

3. Предложенные математические модели и принципы, разработанные алгоритмы позволяют рассчитать действующие значения токов, мощности энергетических потерь и коэффициенты полезного действия отдельно взятых  $k$ -х силовых каналов и преобразователей

модульной структуры, исследовать и устанавливать влияние параметров элементов на характер энергетических процессов преобразователей модульной структуры с однофазным и многофазным принципом преобразования.

4. Предложенные математические модели и принципы, разработанные алгоритмы моделирования энергетических процессов являются основой для решения задач исследования и проектирования преобразователей модульной структуры с однофазным и многофазными принципами преобразования.

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. Кобзев А.В. Стабилизаторы переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием / [А.В. Кобзев, Ю.М. Лебедев, Г.Я. Михайличенко, В.Д. Семенов, И.Б. Сидонский, А.В. Тараскин]. – М.: Энергоатомиздат, 1986 – 152 с.
6. Bill Alexander. New Topology Cuts Size, Improves Performance Of PV Inverters. Inverters content from Power Electronics / Alexander Bill // [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://powerelectronics.com/inverters/new-topology-cuts-size-improves-performance-pv-inverters>
7. Jin Nan. Analysis and Control of Buck-Boost Chopper Type AC Voltage Regulator / Jin Nan, Tang Houjun, Liu Wei1, Ye Peng-sheng // Proceed. of IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2009). – China, Wuhan, 2009. – P. 1019 – 1023.
8. Obuhov Aleksey. Buck-boost AC-AC voltage controllers / Obuhov Aleksey, Otchenash Vladimir, Zinoviev Gennady // Proceed. of 9th International Conference on Power Electronics and Motion Control (EPE-PEMC 2000). – Slovak Republic, Košice, 2000. – P. 194 – 197.
9. Обухов А.Е. Бестрансформаторные повышающе-понижающие регуляторы переменного напряжения в электротехнических системах кондиционирования качества электрической энергии: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. „Электротехнические комплексы и системы” / А.Е. Обухов. – Новосибирск, 2003. – 20 с.
10. Xin Geng. Direct Buck-type AC-AC Converters using VSC Method / Xin Geng, Hou-Jun Tang, Nan Jin, Jian-Yu Lan // Przegląd Elektrotechniczny. – 2013. – N 01b. – P. 257 – 261.
11. Кадацкий А.Ф. Анализ электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения с широтно-импульсным регулированием / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу // Электричество. – 2005. – № 9. – С. 43 – 54.
12. 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.
13. 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.
14. Кадацкий А.Ф. Математическая модель электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения с широтно-импульсным методом регулирования / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2004. – № 3. – С. 10 – 16.
15. Кадацкий А.Ф. Действующие значения токов элементов силовых каналов импульсных преобразователей постоянного напряжения с широтно-импульсным методом регулирования. / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2005. – № 1. – С. 11 – 17.
16. Кадацкий А.Ф. Анализ энергетических процессов в импульсных преобразователях электрической энергии переменного тока / А.Ф. Кадацкий, А.П. Русу // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 1. – С. 22 – 32.

REFERENCES:

1. Moin V.S. Stabilizirovannyye tranzistornyye preobrazovateli / Moin V.S. – M.: Energoatomizdat, 1986.– 367 p.
2. Meleshin V.I. Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika / Meleshin V.I. – M.: Texnosfera, 2005. – 632 P.
3. Gelman M.V. Preobrazovatel'naya tekhnika / Gelman M.V., Dudkin M.M., Preobrazhenskij K.A. – Chelyabinsk: Yuurgu, 2009.– 416 p.
4. Mek R. Impulsnyye istochniki pitaniya. teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu; per. s angl. / Mek R. – M. : Izdatelskiy dom «Dodeka-xxi», 2008. – 272 p.
5. Kobzev A.V. Stabilizatory peremennogo napryazheniya s vysokochastotnym shirotno-impulsnym regulirovaniem / [A.V. Kobzev, Yu.M. Lebedev, G.Ya. Mixajlichenko, V.D. Semenov, I.B. Sidonskiy, A.V. Taraskin]. – M.: Energoatomizdat, 1986 – 152 c.
6. Bill Alexander. New topology cuts size, improves performance of pv inverters. inverters content from power electronics / Alexander Bill // [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa k resursu: <http://powerelectronics.com/inverters/new-topology-cuts-size-improves-performance-pv-inverters>
7. Jin Nan. Analysis and control of buck-boost chopper type ac voltage regulator / Jin Nan, Tang Hou-jun, Liu wei1, Ye Peng-sheng // Proceed. of IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control conference (IPEMC 2009). – China, Wuhan, 2009. – P. 1019 – 1023.
8. Obuhov Aleksey. Buck-boost AC-AC voltage controllers / Obuhov Aleksey, Otchenash Vladimir, Zinoviev Gennady // Proceed. of 9th International Conference On Power Electronics and Motion Control (Epe-Pemc 2000). – Slovak Republic, Košice, 2000. – P. 194 – 197.
9. Obuxov A.E. Bestransformatornyye povyshayushhe-ponizhayushhie regulatory peremennogo napryazheniya v elektrotekhnicheskix sistemax kondicionirovaniya kachestva elektricheskoy energii: avtoref. dis.na soiskanie uchonoj stepeni kand. texn. Nauk: spec. „Electrotehnicheskie komplekxy s sistemy“ / A.E. Obuxov– Novosibirsk, 2003. –20 p.
10. Xin Geng. Direct Buck-type AC-AC Converters using VSC Method / Xin Geng, Hou-Jun Tang, Nan Jin, Jian-Yu Lan // Przegląd Elektrotechniczny. – 2013. – N 01b. – P. 257 – 261.
11. Kadatskiy A.F. Analiz elektricheskix processov v impulsnyx preobrazovatelyax postoyannogo napryazheniya s shirotno-impulsnym regulirovaniem / A.F. Kadatskiy, A.P. Rusu // Elektrichestvo. – 2005. – № 9. – P. 43 – 54.
12. Kadatskiy A.F. Algoritmy modelirovaniya elektricheskix processov v impulsnyx preobrazovatelyax postoyannogo napryazheniya modulnoj struktury s silovymi kanalami invertiruyushhego tipa / A.F. Kadatskiy, A.P. Rusu, T.N. Erykalina // Naukovi pracj ONAZ im. O.S. Popova. – 2013. – № 1. – P. 88 – 98.
13. Kadatskiy A.F. Principy, algoritmy modelirovaniya i issledovaniya pulsacij tokov v impulsnyx preobrazovatelyax postoyannogo napryazheniya modulnoj struktury s silovymi kanalami invertiruyushhego tipa / A.F. Kadatskiy, A.P. Rusu, T.N. Erykalina // Naukovi pracj ONAZ im. O.S. Popova. – 2014. – № 2. – P. 34 – 50.
14. Kadatskiy A.F. Matematicheskaya model elektricheskix processov v impulsnyx preobrazovatelyax postoyannogo napryazheniya s shirotno-impulsnym metodom regulirovaniya / A.F. Kadatskiy, A.P. Rusu // Naukovi pracj ONAZ im. O.S. Popova. – 2004. – № 3. – P. 10 – 16.
15. Kadatskiy A.F. Dejstvuyushhie znacheniya tokov elementov silovyx kanalov impulsnyx preobrazovatelej postoyannogo napryazheniya s shirotno-impulsnym metodom regulirovaniya. / A.F. Kadatskiy, A.P. Rusu // Naukovi pracj ONAZ im. O.S. Popova. – 2005. – №. 1. – P. 11 – 17.
16. Kadatskiy A.F. Analiz energeticheskix processov v impulsnyx preobrazovatelyax elektricheskoy energii peremennogo toka / A.F. Kadatskiy, A.P. Rusu // Teknologiya i konstruirovaniye v elektronnoj apparature. – 2015. – № 1. – P. 22 – 32.