

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОФАЗНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ  
ПРИ ГРАНИЧНЫХ ТОКАХ ДРОССЕЛЕЙ**

**АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БАГАТОФАЗНИХ ІМПУЛЬСНИХ  
ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ  
ПРИ ГРАНИЧНИХ СТРУМАХ ДРОСЕЛІВ**

**ANALYSIS OF ELECTRICAL PROCESSES IN MULTIPHASE PULSE CONVERTERS  
OF CONSTANT VOLTAGE WITH LIMIT – DISCONTINUOUS  
CURRENTS OF CHOKES**

**Аннотация.** Выполнен анализ электрических процессов многофазных импульсных преобразователей при граничном режиме работы силовых каналов. Разработана математическая модель, обобщенная относительно типа силовых каналов.

**Анотація.** Виконаний аналіз електричних процесів багатofазних імпульсних перетворювачів при граничному режимі роботи силових каналів. Розроблена математична модель, узагальнена відносно типу силових каналів.

**Summary.** The analysis of electric processes of multiphase pulse converters at a limit-discontinuous operating mode of power channels is executed. The mathematical model generalized concerning type of the power channel is developed.

Составной частью средств электропитания телекоммуникационных систем являются импульсные преобразователи постоянного напряжения (ППН) модульной структуры, выполненные из параллельно включенных  $N$  однотипных взаимозаменяемых силовых каналов (СК). Улучшение технико-экономических показателей импульсных ППН является актуальной проблемой [1].

Модульная структура импульсных ППН обладает рядом положительных свойств [2]: повышенной нагрузочной способностью силовых коммутирующих элементов (и ППН в целом), повышенным КПД (коэффициентом полезного действия), повышенной надежностью, повышенной технологичностью.

Дальнейшим развитием импульсных ППН модульной структуры, выполненных из  $N$  СК, является переход к многофазной структуре МИП – многофазным импульсным преобразователям. Использование многофазного принципа преобразования и регулирования электрической энергии позволяет уменьшить уровень пульсаций токов и напряжений на входе и выходе ППН, уменьшить массогабаритные показатели реактивных элементов входных и выходных сглаживающих фильтров, а, значит и телекоммуникационной системы в целом [2].

Наиболее изучены МИП с ШИМ - регулированием, СК которых работают в разрывном или безразрывном режимах. В работах [2, 3] получены математические модели электрических процессов, соответствующие результатам исследования, разработаны методики исследования и проектирования многофазных импульсных преобразователей.

Граничный режим позволяет уменьшить потери при переключении силовых коммутирующих элементов, повысить КПД., улучшить динамические характеристики [4].

Однако отсутствие результатов исследования электрических процессов основных структур построения МИП, силовые каналы которых работают в граничном режиме с автотрансформаторным включением дросселя, сдерживает широкое использование таких преобразователей из-за сложности количественной оценки параметров используемых элементов и обоснованности использования того или иного схмотехнического решения.

Цель работы – анализ электрических процессов МИП с СК понижающего, повышающего и инвертирующего типов с автотрансформаторным включением дросселей и получение математической модели электрических процессов МИП при граничном режиме работы силовых каналов.

Рассмотрим, принимая допущения, принятые в [4], электрические процессы в импульсных ППН модульной структуры построения с автотрансформаторным включением дросселей при гранич-

ном режиме работы для трёх основных типов ( $y$ ) схем силовой части –СК ППН (понижающий –  $y = 1$ , повышающий –  $y=2$  и полярно-инвертирующий –  $y = 3$ ).

Силовые каналы МИП могут быть выполнены по любой из известных схем однофазных импульсных преобразователей (ОИП). Исполнение обмотки дросселя в виде двух частей и включение их по автотрансформаторной схеме позволяет или уменьшить (рис. 1, *a, в, д*) или увеличить (рис. 1, *б, з, e*) напряжение на силовом коммутирующем транзисторе по сравнению с простейшими типами силовых каналов с однообмоточным дросселем [4].

При граничном режиме функционирования для СК рассматриваемых типов ( $y = 1 \dots 3$ ) характер изменения тока  $i_{Lk}(t)$  и напряжения  $u_{Lk}(t)$  дросселя выходного сглаживающего фильтра  $k$ -го СК одинаков [4]:

$$i_{Lk}(t) = \begin{cases} i_{L_{Hk}}(t) = I_{m1k} \frac{t_k}{t_{Hk}}, & \text{при } 0 \leq t \leq t_{Hk}; \\ i_{L_{Bk}}(t) = I_{m2k} \left( 1 + \frac{t_{Hk} - t_k}{t_{Bk}} \right) & \text{при } t_{Hk} < t \leq t_{Hk} + t_{Bk}; \end{cases} \quad (1)$$

$$t_k = \begin{cases} t - t_{ck} + T & \text{при } t - t_{ck} < 0; \\ t - t_{ck} & \text{при } 0 \leq t - t_{ck} < T; \\ t - t_{ck} - T & \text{при } t - t_{ck} > T; \end{cases} \quad (2)$$

$$u_{Lk}(t) = \begin{cases} U_{L_{Hk}} = U_{B_{Xk}} - F_{H_{Y}} U_H & \text{при } 0 \leq t \leq t_{Hk}; \\ U_{L_{Bk}} = U_H - F_{B_{Y}} U_{B_{Xk}} & \text{при } t_{Hk} < t \leq t_{Hk} + t_{Bk}; \end{cases} \quad (3)$$

$$F_{H_{Y}} = \begin{cases} 1 & \text{при } y = 1; \\ 0 & \text{при } y = 2, 3; \end{cases} \quad (4)$$

$$F_{B_{Y}} = \begin{cases} 1 & \text{при } y = 2; \\ 0 & \text{при } y = 1, 3, \end{cases}$$

$$I_{m1k} = \begin{cases} (U_{Hk} - U_H) t_{Hk} / L_{1k} & \text{для } y = 1; \\ U_{Hk} t_{Hk} / L_{1k} & \text{для } y = 2, 3, \end{cases} \quad (5)$$

$$I_{m2k} = \begin{cases} U_H t_{Bk} / L_{2k} & \text{для } y = 1; \\ (U_{Hk} - U_{Hk}) t_{Bk} / L_{2k} & \text{для } y = 2; \\ U_H t_{Bk} / L_{2k} & \text{для } y = 3. \end{cases} \quad (6)$$

$$t_{ck} = \begin{cases} T(k-1) / N + \Delta t_{ck} & \text{для МИП;} \\ 0 + \Delta t_{ck} & \text{для ОИП.} \end{cases} \quad (7)$$

В (1) – (7):  $I_{m1k}, I_{m2k}$  – размахи пульсаций токов соответственно в индуктивности  $L_{1k}$  обмотки с числом витков  $W_{1k}$  и в индуктивности  $L_{2k}$  обмотки с числом витков  $W_{2k}$  силового дросселя;  $i_{L_{Hk}}(t)$  и  $U_{L_{Hk}}, i_{L_{Bk}}(t)$  и  $U_{L_{Bk}}$  – токи и напряжения обмоток дросселя выходного сглаживающего фильтра на интервалах времени соответственно накопления  $t_H$  и возврата  $t_B$ ;  $F_{H_{Y}}, F_{B_{Y}}$  – коэффициенты топологии схем СК, учитывающие конфигурацию рассматриваемых типов  $y$  СК на интервалах времени накопления и возврата;  $t_{ck}$  – временной сдвиг электрических процессов  $k$ -го СК относительно начала координат;  $t_k$  – текущее время  $k$ -го СК.

Через коэффициент автотрансформации  $n_{21k}$  связаны  $I_{m1k}, I_{m2k}$ , индуктивности  $L_{2k}$  и  $L_{1k}$ :

$$L_{2k} = L_{1k} n_{21k}^2; \quad n_{21k} = W_{2k} / W_{1k}; \quad I_{m1k} = n_{21k} I_{m2k}. \quad (8)$$

При параллельном соединении СК и по входу, и по выходу справедливо:

$$U_{L_{Hk}} = U_{L_H}; \quad U_{L_{Bk}} = U_{L_B} = U_{Hk}; \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

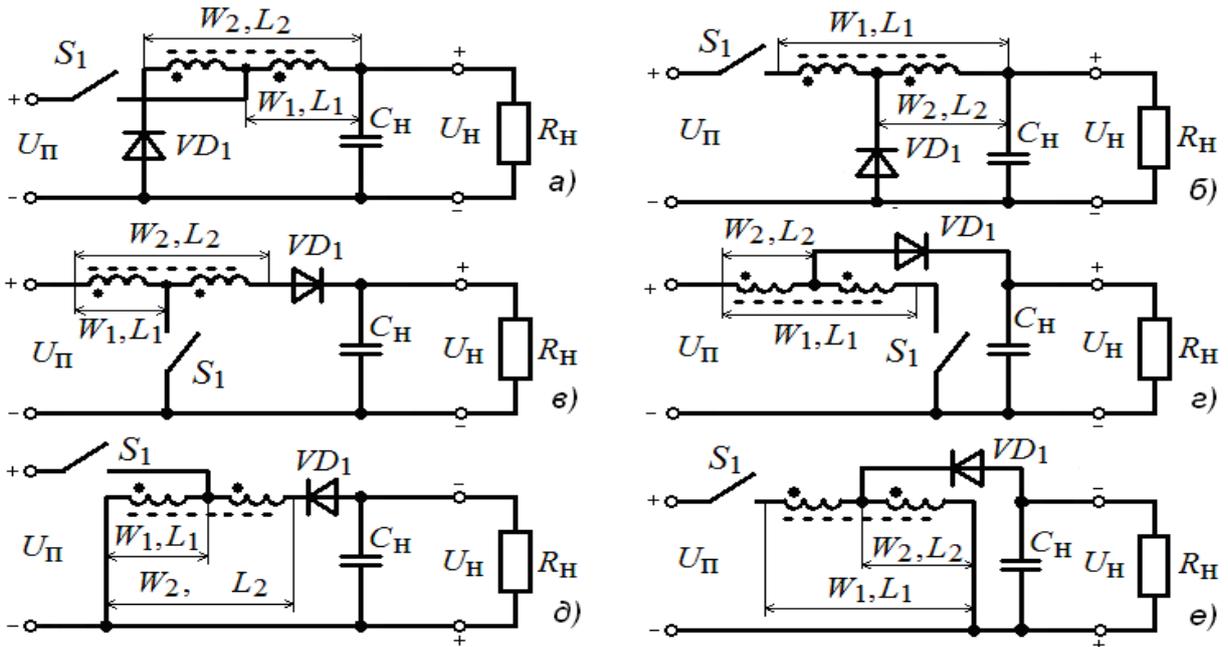


Рисунок 1 – Силовые каналы с автотрансформаторным включением дросселя при  $n_{21} > 1$  (а, в, д) и  $n_{21} < 1$  (б, з, е): понижающий  $y = 1$  (а, б); повышающий  $y = 2$  (в, з); полярно-инвертирующий  $y = 3$  (д, е)

В общем случае параметры элементов СК имеют технологический и иной разброс, например, вызванный температурными изменениями окружающей среды, старением элементов и т. п. Учтем это в виде приращений (отклонений) от параметров, соответствующих идеальному случаю. Тогда параметры элементов и электрических процессов  $k$ -го СК можно представить в виде [4]:

$$L_{1k} = L_k + \Delta L_{1k}, \quad t_{ck} = (k-1)T_n + \Delta t_{ck}, \quad \kappa_{nk} = \kappa_n + \Delta \kappa_{nk}, \quad (10)$$

$$\kappa_{bk} = \kappa_b + \Delta \kappa_{bk}, \quad I_{mk} = I_m + \Delta I_{mk}, \dots$$

где  $L_k$  – номинальное значение индуктивности первичной обмотки дросселя с числом витков  $W_{1k}$  сглаживающего фильтра  $k$ -го СК,  $T_n = T/N$ ,  $\kappa_{nk}$ ,  $\kappa_{bk}$  – коэффициенты накопления и возврата соответственно:  $\kappa_{nk} = t_{nk} / T$ ,  $\kappa_{bk} = t_{bk} / T$ .

Идеальному случаю соответствует идентичность параметров элементов в отдельно взятых СК, равномерности и временного сдвига между электрическими процессами СК, и распределения тока нагрузки между СК. Это соответствует в равенстве (10) нулю приращений:  $\Delta L_k = 0$ ,  $\Delta t_{ck} = 0$ ,  $\Delta \kappa_{nk} = 0$ , ...

Рассмотрим электрические процессы в МИП при идеальном, равномерном распределении тока нагрузки между СК.

Из анализа работы основных схем МИП ( $y=1, 2, 3$ ) следует (рис. 2):

- в отдельно взятом  $k$ -м СК происходят повторяющиеся с периодом коммутации  $T = 1/f_k$  ( $f_k$  – частота коммутации ключа СК) электрические процессы, идентичные электрическим процессам ОИП (рис. 2, а – з);
- характер изменения тока в силовых дросселях одинаков для всех типов СК ППН модульной структуры построения, функционирующих и с однофазным (ОИП), и с многофазным (МИП) принципом преобразования;
- пульсации токов  $\Delta I_n$  в цепи нагрузки и  $\Delta I_n$  в цепях питания во всех схемах МИП повторяются через интервал  $T_n = T/N$  в  $N$  раз меньший периода коммутации  $T$  отдельно взятого СК (рис. 2, д, е, ж);
- так же, как и в отдельном СК характер изменения токов соответственно в цепях нагрузки понижающего ( $y=1$ )  $i_{n1}(t)$  и питания повышающего ( $y=2$ )  $i_{n2}(t)$  МИП (рис. 2, д), в цепях питания понижающего ( $y=1$ )  $i_{n1}(t)$  и инвертирующего ( $y=3$ )  $i_{n3}(t)$  МИП (рис. 2, е), в цепях нагрузки повышающего ( $y=2$ )  $i_{n2}(t)$  и инвертирующего ( $y=3$ )  $i_{n3}(t)$  МИП (рис. 2, ж) одинаков.

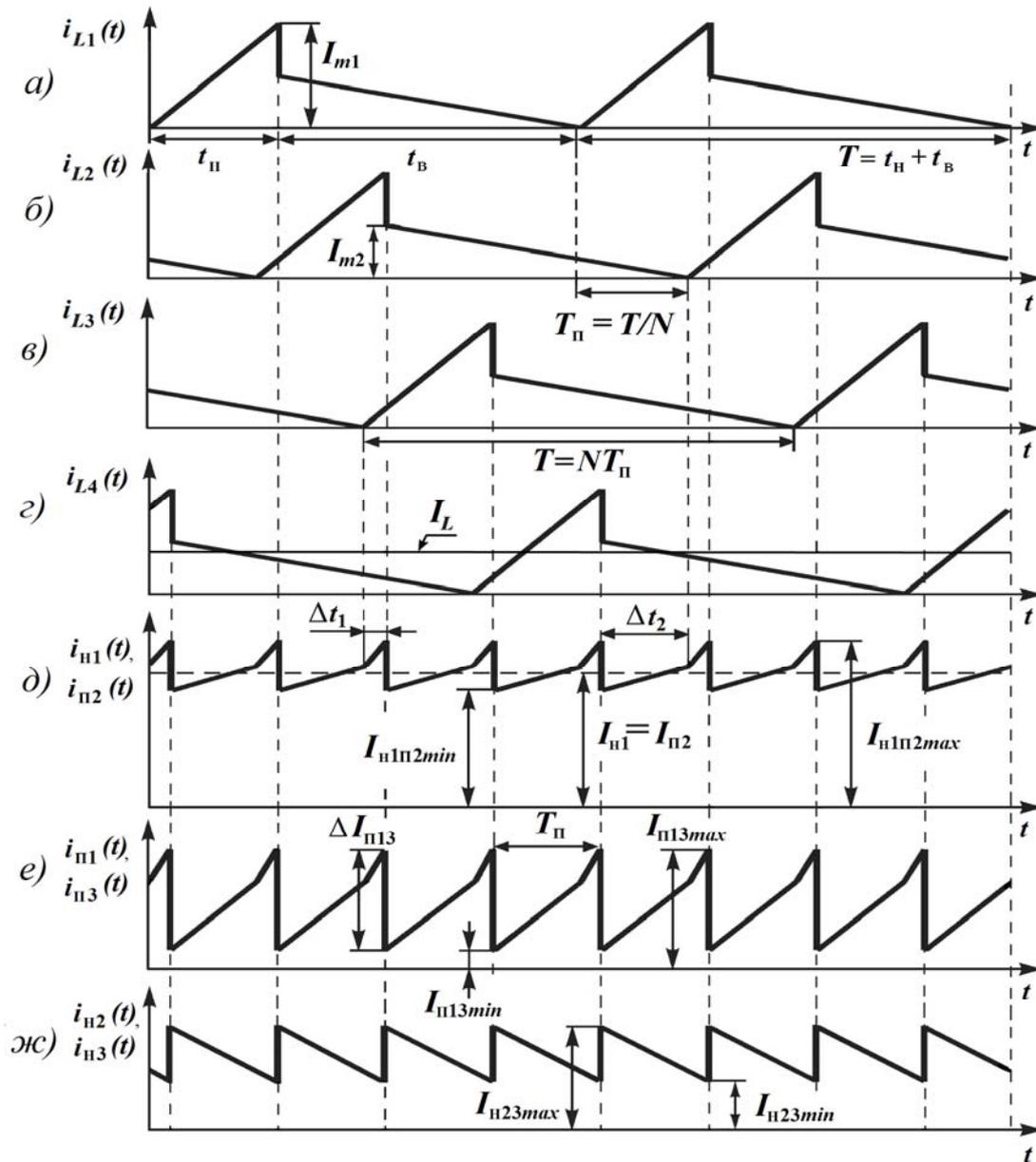


Рисунок 2 – Временные диаграммы токов в дросселях СК (а – з): в цепях нагрузки понижающего  $i_{n1}(t)$  и питания повышающего  $i_{n2}(t)$  МИП (д); в цепях питания понижающего  $i_{n1}(t)$  и инвертирующего  $i_{n3}(t)$  МИП (е); в цепях нагрузки повышающего  $i_{n2}(t)$  и инвертирующего  $i_{n3}(t)$  МИП (жс) для  $N = 4$

При неизменном коэффициенте накопления  $k_n$  в отдельно взятом силовом канале СК коммутация-переход в замкнутое (разомкнутое) проводящее (не проводящее) состояние силового коммутационного элемента повторяется через интервал времени  $T_n$ . В общем случае моменты отключения и подключения регулирующих элементов в МИП не совпадают.

Поскольку электрические процессы в цепях питания и нагрузки рассматриваемых типов МИП повторяются, то целесообразно ограничиться рассмотрением любого интервала времени длительностью  $T_n$ .

Примем за начало отсчета любого периода  $T_n$  момент времени  $t_0$ , соответствующий моменту времени перехода в замкнутое проводящее состояние силового коммутирующего элемента любого (очередного)  $k$ -го ( $k=1, 2, \dots, N$ ) силового канала СК, у которого ток  $i_{Lvk}(t)$  дросселя достиг к моменту  $t = t_0$  нулевого значения. Тогда момент времени  $t_1$ , соответствующий моменту перехода в разомкнутое непроводящее состояние силового коммутирующего элемента любого (очередного)  $k$ -го силового канала СК, у которого ток  $i_{Lvk}(t)$  достиг максимального значения, равного  $I_{m1k}$ , будет в интервале  $0 \leq t_1 \leq T_n$ .

Отрезок времени от начала периода  $T_n$  (точка  $t_0$ ) до момента времени  $t_1$  определяется как часть времени накопления

$$\Delta t_1 = t_n - T_n \lceil t_n / T_n \rceil, \quad (11)$$

где (как и в дальнейшем) прямые скобки обозначают целую часть числа.

С учетом  $T_n = T/N$  преобразуем (11) к виду:

$$\Delta t_1 = T_n (Nk_n - \lceil Nk_n \rceil). \quad (12)$$

Учитывая отрезок времени  $\Delta t_2$  от момента  $t_1$  до конца периода  $T_n$ , имеем

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 = T_n. \quad (13)$$

С учетом (12) и (13) определим  $\Delta t_2$  в виде:

$$\Delta t_2 = T_n (1 - Nk_n + \lceil Nk_n \rceil). \quad (14)$$

В результате интервалы времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  (соответственно от 0 до  $\Delta t_1$  и от  $\Delta t_1$  до  $T_n$ ) определим как

$$\Delta t_1 = (Nk_n - p_1 + 1)T_n; \quad (15)$$

$$\Delta t_2 = (p_1 - Nk_n)T_n; \quad (16)$$

$$p_1 = \lceil Nk_n \rceil + 1. \quad (17)$$

При различных коэффициентах накопления  $k_n = t_n/T$  в интервале времени  $t_0 < t < t_1$  при граничном режиме работы  $p_1$  дросселей накапливают энергию;  $b_1$  дросселей возвращают накопленную энергию.

Согласно [2] для  $p_1$  справедливо

$$Nk_n \leq p_1 \leq Nk_n + 1; \quad p_1 = 1, 2, \dots, N, \quad (18)$$

где  $t_n$  – время, в течение которого в дросселе  $k$ -го силового канала происходит накопление электрической энергии от первичного источника питания.

При различных коэффициентах  $k_b = t_b/T$  возврата накопленной энергии для  $b_1$

$$Nk_b - 1 \leq b_1 \leq Nk_b, \quad b_1 = 0, 1, 2, \dots, N - p_1, \quad (19)$$

где  $t_b$  – время, в течение которого дроссель отдельно взятого СК возвращает накопленную энергию. С учетом (18), (19) получим

$$b_1 = N - p_1. \quad (20)$$

Для токов выделенных групп дросселей к моменту времени  $t \rightarrow t_1$  для линейного характера их изменения в соответствии с (1) получим

$$\begin{aligned} i_{L_{1p}}(t \rightarrow t_1) &= I_{m1p} \left[ 1 - (p-1)/Nk_n \right], \quad \text{при } 1 \leq p \leq p_1; \\ i_{L_{2b}}(t \rightarrow t_1) &= I_{m2b} \left[ 1 - b/Nk_b \right], \quad \text{при } 1 \leq b \leq b_1, \end{aligned} \quad (21)$$

где  $I_{m1p}$ ,  $I_{m2b}$  – размахи пульсаций токов соответственно в индуктивности  $L_{1p}$  обмотки  $W_{1p}$  и индуктивности  $L_{2b}$  обмотки  $W_{2b}$  силового дросселя с текущим значением  $p$  и  $b$  (при принятых допущениях  $I_{m1p} = I_{m1}$ ,  $I_{m2b} = I_{m2}$ ).

Если за начало отсчета принять  $p = 1$ , то в силовых каналах СК при  $1 \leq k \leq p_1$  происходит накопление энергии в дросселях, а при  $p_1 + 1 \leq k \leq N$  – дроссели возвращают накопленную энергию в нагрузку МИП.

Соответственно, текущие значения  $b$  в соответствии с (21) через коэффициент  $k$  силового канала СК запишутся

$$b = N + 1 - k. \quad (22)$$

Преобразуя (21) с учетом (22) и  $I_{m1k} = I_{m1p}$  и  $I_{m2k} = I_{m2b}$ , для тока дросселя  $i_k$   $k$ -го силового канала СК понижающего, повышающего и инвертирующего МИП к моменту времени  $t_1$  ( $t \rightarrow t_1$ ) получаем

$$i_{Lk}(t \rightarrow t_1) = \begin{cases} i_{L_{1k}}(t \rightarrow t_1) = I_{m1k} \left[ 1 - (k-1)/Nk_n \right] & \text{при } 1 \leq k \leq p_1, \\ i_{L_{2k}}(t \rightarrow t_1) = I_{m2k} \left[ 1 + (k-1-N)/Nk_b \right] & \text{при } p_1 + 1 \leq k \leq N. \end{cases} \quad (23)$$

В момент  $t_1$  (в конце интервала времени  $\Delta t_1$ ) силовой коммутирующий элемент  $(k-1)$ -го силового канала СК МИП отключается – переходит в закрытое непроводящее состояние и к моменту

$t \rightarrow T_{\Pi}$ , в зависимости от  $k_{\text{н}}$  и  $k_{\text{в}}$  будет  $p_2$  дросселей накапливать энергию,  $b_2$  дросселей возвращать накопленную энергию.

Значения  $p_2$  и  $b_2$ , соответственно определяются как

$$\begin{aligned} Nk_{\text{н}} - 1 \leq p_2 \leq Nk_{\text{н}}, \quad p_2 = 0, 1, 2, \dots, N - 1; \\ Nk_{\text{в}} - 1 \leq b_2 \leq Nk_{\text{в}}, \quad b_2 = 1, 2, 3, \dots, N - p_2. \end{aligned} \quad (24)$$

Токи дросселей  $i_{L_{\text{н}p}}(t)$ ,  $i_{L_{\text{в}p}}(t)$ , соответствующие (24), к моменту времени  $t \rightarrow T_{\Pi}$  определяются следующим образом:

$$i_{L_{\text{н}p}}(t \rightarrow T_{\Pi}) = I_{m1p} p / Nk_{\text{н}} \quad \text{при } 0 \leq p \leq p_2, \quad (25)$$

$$i_{L_{\text{в}p}}(t \rightarrow T_{\Pi}) = I_{m1b} (Nk_{\text{в}} - b + 1) T_{\Pi} / t_{\text{в}} \quad \text{при } 1 \leq b \leq b_2. \quad (26)$$

Аналогично предыдущему будем считать, что при  $1 \leq k \leq p_2$  в дросселях  $k$ -вых СК накапливается электрическая энергия, а при  $p_2 + 1 \leq k \leq N$  дроссели  $k$ -вых СК возвращают накопленную электрическую энергию в цепь нагрузки. При этом силовому каналу СК, отключение силового коммутирующего элемента в котором произошло в момент  $t = t_1$ , присваивается номер  $k = N$ , а силовому каналу СК, у которого энергия имеет максимальное значение, присваивается номер  $k = 1$ . При этом текущие значения  $p$ ,  $b$  в (25) и (26), в зависимости от номера  $k$  силового канала, примут следующий вид:

$$p = p_2 - k + 1, \quad b = N + 1 - k; \quad (27)$$

После подстановки (27) в (25) и (26) для момента времени  $t \rightarrow T_{\Pi}$  получаем следующие выражения для тока дросселя  $k$ -го СК понижающего, повышающего и инвертирующего МИП:

$$i_{Lk}(t \rightarrow T_{\Pi}) = \begin{cases} i_{L_{\text{н}k}}(t \rightarrow T_{\Pi}) = I_{mk} (p_2 + 1 - k) / Nk_{\text{н}}, & 1 \leq k \leq p_2; \\ i_{L_{\text{в}k}}(t \rightarrow T_{\Pi}) = I_{mk} (k - p_1 + Nk_{\text{в}} + Nk_{\text{н}} - N) / Nk_{\text{в}}, & p_2 + 1 \leq k \leq N. \end{cases} \quad (28)$$

Токи нагрузки повышающего  $i_{\text{н}2}(t)$  и инвертирующего  $i_{\text{н}3}(t)$  МИП являются суммой токов  $i_{L_{\text{в}k}}(t)$  силовых каналов, дроссели которых возвращают накопленную за время  $t_{\text{н}k}$  энергию (рис. 2, жс). Очевидно, что максимальное количество энергии (мгновенное значение), поступающее в цепь нагрузки и повышающего ( $y = 2$ ) и инвертирующего ( $y = 3$ ) МИП, будет соответствовать моменту времени  $t = t_1$ , когда к нагрузке подключается дроссель очередного СК с максимальной накопленной энергией после отключения – перехода в закрытое непроводящее состояние его силового коммутирующего элемента. Соответственно, минимальное (мгновенное) значение энергии, поступающей в цепь нагрузки, будет соответствовать моменту времени  $t \rightarrow t_1$ , т. е. до начала указанной выше коммутации силового коммутационного элемента. Поэтому сумма

$$I_{\text{н}23 \text{ min}} = \sum_{p_1+1}^N i_{L_{\text{в}k}}(t \rightarrow t_1) \quad (29)$$

токов дросселей, возвращающих накопленную энергию в момент времени  $t \rightarrow t_1$ , определяется с учетом (23). В общем виде минимальное значение тока, поступающего в нагрузку повышающего  $I_{\text{н}2 \text{ min}}$  и инвертирующего  $I_{\text{н}3 \text{ min}}$  МИП:

$$I_{\text{н}2 \text{ min}} = I_{\text{н}3 \text{ min}} = I_{\text{н}23 \text{ min}}; \quad (30)$$

$$I_{\text{н}23 \text{ min}} = I_{m2} b_1 [1 - (b_1 + 1) / 2Nk_{\text{в}}]. \quad (31)$$

Так как после отключения – перехода в закрытое непроводящее состояние силового коммутирующего элемента очередного  $k$ -го СК при  $t = t_1$  к нагрузке МИП подключается дроссель с током  $I_{m2} = I_{m1} / n_{21}$  (рис. 2), то максимальный ток  $I_{\text{н}23 \text{ max}}$ , поступающий в нагрузку повышающего  $I_{\text{н}2 \text{ max}}$  и инвертирующего  $I_{\text{н}3 \text{ max}}$  МИП определяется в общем виде как

$$I_{\text{н}2 \text{ max}} = I_{\text{н}3 \text{ max}} = I_{\text{н}23 \text{ max}}; \quad (32)$$

$$I_{\text{н}23 \text{ max}} = I_{\text{н}23 \text{ min}} + I_{m2}.$$

Из (30), (31) следует, что максимальное мгновенное значение размаха  $\Delta I_{\text{н}23}$  пульсации тока переменной составляющей в цепи нагрузки повышающего  $\Delta I_{\text{н}2}$  и инвертирующего  $\Delta I_{\text{н}3}$  МИП определяется в виде:

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{н}2} = \Delta I_{\text{н}3} = \Delta I_{\text{н}23}; \\ \Delta I_{\text{н}23} = I_{\text{н}23 \text{ max}} - I_{\text{н}23 \text{ min}} = I_{m2}. \end{aligned} \quad (33)$$

Каждый СК понижающего и инвертирующего МИП в общем случае потребляет энергию от первичного источника питания в течение времени  $t_n$  открытого состояния силового коммутирующего элемента. В отличие от выполненного из  $N$  силовых каналов ОИП, потребляющего энергию от первичного источника питания всеми  $N$  силовыми каналами одновременно, в МИП (при  $k_n < 1$ ) к первичному источнику питания подключены лишь  $p_1$  силовых каналов СК. При этом максимальное количество энергии (мгновенное значение) потребляется в каждом периоде  $T_n = T/N$  к моменту  $t \rightarrow t_1$  – перехода в разомкнутое непроводящее состояние силового коммутирующего элемента очередного СК.

Соответствующие указанному моменту времени максимальные значения токов  $I_{n1 \max}$  и  $I_{n3 \max}$ , потребляемых от первичного источника питания соответственно понижающим и инвертирующим МИП, могут быть определены с учетом (23) как:

$$I_{n1 \max} = I_{n3 \max} = I_{n13 \max};$$

$$I_{n13 \max} = \sum_1^{p_1} I_{Lk} (t \rightarrow t_1) = I_{m1} p_1 [1 - (p_1 - 1)/2Nk_n]. \quad (34)$$

В момент времени  $t = t_1$  рассматриваемого периода  $T_n$  отключается – переходит в закрытое, не проводящее состояние силовой коммутирующий элемент очередного  $k$ -го СК, ток дросселя которого достиг значения  $I_{m1}$ , поэтому минимальные значения токов  $I_{n1 \min}$  и  $I_{n3 \min}$ , потребляемых в указанный момент от первичного источника питания соответственно понижающим и повышающим МИП, определяется в общем виде  $I_{n13 \min}$  выражениями

$$I_{n1 \min} = I_{n3 \min} = I_{n13 \min} = I_{n13 \max} - I_{m1};$$

$$I_{n13 \min} = I_{m1} p_1 [1 - (p_1 - 1)/2Nk_n] - I_{m1}. \quad (35)$$

Из (34), (35) следует, что размахи пульсаций переменных составляющих понижающего  $\Delta I_{n1}$  и инвертирующего  $\Delta I_{n3}$  МИП определяются значением  $I_{m1}$ :

$$\Delta I_{n1} = \Delta I_{n3} = \Delta I_{n13};$$

$$\Delta I_{n13} = I_{n13 \max} - I_{n13 \min} = I_{m1}. \quad (36)$$

Ток нагрузки  $i_{n1}(t)$  понижающего МИП и ток потребления  $i_{n2}(t)$  повышающего МИП в любой момент времени определяется суммой токов  $i_{Lk}(t)$  дросселей всех СК (рис. 2, а – з, д)

$$i_{n1}(t) = i_{n2}(t) = \sum_1^N i_{Lk}(t). \quad (37)$$

При коэффициентах трансформации  $n_{21} \geq 1$  токи  $I_{m1k} \geq I_{m2k} = I_{m1k}/n_{21}$ , поэтому моменту времени  $t \rightarrow t_1$  будут соответствовать максимальные значения токов  $i_{n1}(t) = I_{n1 \max}$  и  $i_{n2}(t) = I_{n2 \max}$  соответственно в цепях нагрузки понижающего и питания повышающего МИП.

При  $n_{21} < 1$  токи  $I_{m2k} > I_{m1k}$ , поэтому максимальные значения токов  $i_{n1}(t \rightarrow t_1) = I_{n1 \max}$  и  $i_{n2}(t \rightarrow t_1) = I_{n2 \max}$  будут соответствовать не моменту  $t \rightarrow t_1$  в отличие от  $n_{21} \geq 1$ , а моменту времени  $t = t_1$ , когда в МИП происходит уменьшение (с  $p_1$  по  $p_1 - 1 = p_2$ ) на единицу числа дросселей, накапливающих электрическую энергию и увеличение (с  $b_1$  на  $b_1 + 1 = b_2$ ) на единицу числа дросселей, возвращающих электрическую энергию из-за перехода в рассматриваемом периоде  $T_n$  в закрытое непроводящее состояние силового коммутирующего элемента очередного СК.

В момент времени  $t = t_1$ , с одной стороны, происходит уменьшение суммарного тока  $\sum_1^N i_{Lk}(t \rightarrow t_1)$  (определяемого до момента  $t \rightarrow t_1$ ) на величину  $I_{m1}$ , а с другой – увеличение этого суммарного тока на величину  $I_{m2}$ .

Таким образом, максимальные значения токов  $I_{n1 \max}$  и  $I_{n2 \max}$  являются функцией коэффициента автотрансформации  $n_{21}$ :

$$I_{n1 \max} = I_{n2 \max} = I_{n1n2 \max} = \begin{cases} I_{n1n2 \max 1} & \text{при } n_{21} \geq 1; \\ I_{n1n2 \max 2} & \text{при } n_{21} < 1, \end{cases} \quad (38)$$

где

$$I_{n1n2 \max 1} = \sum_1^N i_{Lk}(t \rightarrow t_1) = \sum_1^{p_1} i_{Lnk}(t \rightarrow t_1) + \sum_{p_1+1}^N i_{Lbk}(t \rightarrow t_1); \quad (39)$$

$$I_{n1n2 \max 2} = \sum_1^N i_{Lk}(t = t_1) = I_{n1n2 \max 1} - I_{m1} + I_{m2}.$$

С учетом соотношений (23), (31) и (34) для  $I_{n1n2 \max 1}$  получим

$$I_{n1n2 \max 1} = I_{m1} p_1 [1 - (p_1 - 1)/2N_{кн}] + I_{m2} b_1 [1 - (b_1 + 1)/2N_{кв}]. \quad (40)$$

Из соотношений (38), (39) и (40) видим следующее:

– при коэффициентах трансформации  $n_{21} < 1$  максимальные значения суммарных токов  $I_{n1 \max}$  и  $I_{n2 \max}$  имеют место в момент времени  $t = t_1$  в каждом периоде  $T_n$  после перехода силового коммутирующего элемента очередного силового канала в закрытое непроводящее состояние и определяются  $I_{n1n2 \max 2}$  в соответствии с соотношением (39). По мере уменьшения коэффициента  $n_{12} < 1$  происходит увеличение и амплитуд токов  $I_{m2k} = I_{m2} = I_{m1}/n_{21}$  и максимальных значений  $I_{n1 \max}$ ,  $I_{n2 \max}$  соответственно тока нагрузки  $i_{n1}(t_1)$  понижающего и тока потребления  $i_{n2}(t_1)$  повышающего МИП;

– при коэффициентах трансформации  $n_{21} \geq 1$  максимальные значения токов  $I_{n1 \max}$  и  $I_{n2 \max}$  определяются значением  $I_{n1n2 \max 1}$  в соответствии с соотношением (39) и имеют место в каждом из периодов  $T_n$  в момент времени  $t \rightarrow t_1$ , соответствующий состоянию до указанной выше коммутации силового коммутационного элемента очередного силового канала.

Минимальные значения токов  $I_{n1 \min}$  и  $I_{n2 \min}$  соответственно в цепях нагрузки понижающего и питания повышающего МИП также зависят от коэффициента трансформации  $n_{21}$ .

При  $n_{21} \geq 1$  минимальные значения токов  $I_{n1 \min}$  и  $I_{n2 \min}$  имеют место в каждом периоде  $T_n$  в конце интервала времени  $\Delta t_2$  (при  $t \rightarrow T_n$ ) и определяются как

$$I_{n1 \min} = I_{n2 \min} = I_{n1n2 \min 1}; \quad (41)$$

$$I_{n1n2 \min 1} = \sum_1^N i_{Lk}(t \rightarrow t_1) = \sum_1^{p_2} i_{Lnk}(t \rightarrow T_n) + \sum_{p_2+1}^N i_{Lbk}(t \rightarrow T_n). \quad (42)$$

С учетом соотношения (28) при  $t \rightarrow T_n$  для тока  $I_{n1n2 \min 1}$  получим

$$I_{n1n2 \min 1} = I_{m1} p_1 (p_1 - 1)/2N_{кн} + I_{m2} b_2 (b_2 - 1)/2N_{кв}. \quad (43)$$

Поскольку при  $n_{21} > 1$  размахи пульсаций  $I_{m1k} = n_{21k} I_{m2k} = I_{m1} = I_{m2} n_{21}$  становятся больше  $I_{m2}$  ( $I_{m1} > I_{m2}$ ), то в момент времени  $t = t_1$  происходит скачкообразное уменьшение суммарного тока на величину  $I_{m1} - I_{m2}$  из-за уменьшения (с  $p_1$  на  $p_1 - 1$ ) в МИП на единицу числа дросселей, накапливающих электрическую энергию и увеличения (с  $b_1$  на  $b_1 + 1$ ) на единицу числа дросселей, возвращающих электрическую энергию. При этом значения токов нагрузки  $i_{n1}(t_1)$  понижающего и потребления  $i_{n2}(t_1)$  повышающего МИП определяются с учетом (38), (40) в виде:

$$\begin{aligned} i_{n1}(t_1) &= i_{n2}(t_1) = i_{n1n2}(t_1), \\ i_{n1n2}(t_1) &= I_{n1n2 \max} - I_{m1} + I_{m2}. \end{aligned} \quad \text{при } n_{21} > 1. \quad (44)$$

По мере увеличения коэффициента трансформации  $n_{21}$  (при  $n_{21} > 1$ ) будут увеличиваться уровни пульсаций суммарных токов дросселей в момент времени  $t = t_1$  в каждом из периодов  $T_n$ . И при граничном коэффициенте трансформации  $n_{21 \text{гран}1}$  минимальные значения токов нагрузки  $I_{n1 \min}$  понижающего и питания  $I_{n2 \min}$  повышающего МИП для моментов времени  $t \rightarrow T_n$  и  $t = t_1$  становятся равными:

$$I_{n1 \min} = I_{n2 \min} = I_{n1n2 \text{гран}1} \quad \text{при } n_{21} = n_{21 \text{гран}1}; \quad (45)$$

$$I_{n1n2 \text{гран}1} = \sum_1^N i_{Lk}(t = t_1) = \sum_1^N i_{Lk}(t \rightarrow T_n) \quad \text{при } n_{21} = n_{21 \text{гран}1}; \quad (46)$$

$$I_{n1n2 \text{гран}1} = I_{n1n2 \min 1} = i_{n1n2}(t = t_1) \quad \text{при } n_{21} = n_{21 \text{гран}1}, \quad (47)$$

где  $I_{n1n2 \min 1}$  и  $i_{n1n2}(t=t_1)$  определяются соотношениями соответственно (43) и (44).

При увеличении  $n_{21}$  более  $n_{21 \text{гран}1}$  ( $n_{21} > n_{21 \text{гран}1}$ ) происходит дальнейшее увеличение размахов пульсаций  $I_{m1k} = n_{21} I_{m2k}$ . Это приведет к уменьшению минимальных значений токов нагрузки  $I_{n1 \min}$

понижающего и питания  $I_{п2\min}$  повышающего МИП, определенных в моменты времени  $t = t_1$  ( $I_{н1\min} < I_{н1п2\text{гран}1}$ ,  $I_{п2\min} < I_{н1п2\text{гран}1}$ ):

$$\begin{aligned} I_{н1\min} &= I_{п2\min} = I_{н1п2\min2} \quad \text{при } n_{21} > n_{21\text{гран}1}; \\ I_{н1п2\min2} &= i_{н1п2}(t = t_1) \quad \text{при } n_{21} > n_{21\text{гран}1}. \end{aligned} \quad (48)$$

С учетом соотношения (40), (44) при  $n_{21} > n_{21\text{гран}1}$  для  $t = t_1$  получим

$$I_{н1п2\min2} = I_{м1}p_1[1 - p_2/2N_{кн}] + I_{м2}b_1[1 - b_2/2N_{кв}] - I_{м1} + I_{м2}. \quad (49)$$

В случаях уменьшения коэффициента трансформации при  $n_{21} < 1$  в момент времени  $t \rightarrow T_{п}$  происходит увеличение амплитуд токов  $I_{м2к} = I_{м2} = I_{м1}/n_{21}$ . При этом происходит уменьшение минимальных значений токов  $I_{н1\min} = I_{п2\min} = I_{н1п2\min1}$ , определяемых как сумму токов дросселей всех силовых каналов в момент времени  $t \rightarrow T_{п}$  в каждом из периодов  $T_{п}$  в соответствии с соотношениями (41)...(43).

Это приводит к тому, что при  $n_{21} = n_{21\text{гран}2}$  минимальные значения токов  $I_{н1\min}$ ,  $I_{п2\min}$ , определяемые в соответствии с соотношениями (41)...(43) для моментов времени  $t \rightarrow T_{п}$ , и  $t \rightarrow t_1$ , становятся равными  $I_{н1п2\text{гран}2}$ :

$$I_{н1\min} = I_{п2\min} = I_{н1п2\text{гран}2} \quad \text{при } n_{21} = n_{21\text{гран}2}; \quad (50)$$

$$I_{н1п2\text{гран}2} = \sum_1^N i_{Lk}(t \rightarrow T_{п}) = \sum_1^N i_{Lk}(t \rightarrow t_1) \quad \text{при } n_{21} = n_{21\text{гран}2}; \quad (51)$$

$$I_{н1п2\text{гран}2} = \frac{I_{м1}p_1p_2}{2N_{кн}} + \frac{I_{м2}b_2(b_2 - 1)}{2N_{кв}} = I_{н1п2\min1} \quad \text{при } n_{21} = n_{21\text{гран}2}, \quad (52)$$

где  $I_{н1п2\min1}$  определяется соотношением (43).

При дальнейшем уменьшении коэффициента трансформации при  $n_{21} < n_{21\text{гран}2} < 1$  минимальные значения токов нагрузки  $I_{н1\min}$  понижающего и потребления  $I_{п2\min}$  повышающего МИП будут иметь место в каждом из периодов  $T_{п}$  не в моменты времени  $t \rightarrow T_{п}$ , в отличие от  $n_{21} > n_{21\text{гран}2} < 1$ , а в моменты времени  $t \rightarrow t_1$ :

$$\begin{aligned} I_{н1\min} &= I_{п2\min} = I_{н1п2\min3}; \\ I_{н1п2\min3} &= \sum_1^N i_{Lk}(t \rightarrow t_1). \end{aligned} \quad (53)$$

С учетом (23) при  $n_{21} < n_{21\text{гран}2}$  для  $t \rightarrow t_1$ , получим

$$I_{н1п2\min3} = I_{м1}p_1[1 - (p_1 - 1)/2N_{кн}] + I_{м2}b_1[1 - (b_2 + 1)/2N_{кв}] \quad \text{при } n_{21} < n_{21\text{гран}2}. \quad (54)$$

С учетом изложенного выше, при различных коэффициентах  $n_{21}$  для минимальных токов  $I_{н1\min} = I_{п2\min} = I_{н1п2\min}$ , запишем

$$I_{н1п2\min} = \begin{cases} I_{н1п2\min1} = \frac{I_{м1}p_1(p_1 - 1)}{2N_{кн}} + \frac{I_{м2}b_2(b_2 - 1)}{2N_{кв}} & \text{при } n_{21\text{гран}1} \geq n_{21} \geq n_{21\text{гран}2}, \\ & n_{21\text{гран}1} \geq 1, n_{21\text{гран}2} < 1; \\ I_{н1п2\min2} = I_{м1}p_1 \left[ 1 - \frac{p_2}{2N_{кн}} \right] + I_{м2}b_1 \left[ 1 - \frac{b_2}{2N_{кв}} \right] - I_{м1} + I_{м2} & \text{при } n_{21} > n_{21\text{гран}1} > 1; \\ I_{н1п2\min3} = I_{м1}p_1 \left[ 1 - \frac{p_2}{2N_{кн}} \right] + I_{м2}b_1 \left[ 1 - \frac{b_2}{2N_{кв}} \right] & \text{при } n_{21} < n_{21\text{гран}2} < 1. \end{cases} \quad (55)$$

Суммарные изменения токов во всех дросселях  $\Delta I_{нп}$ , определяющие пульсации тока нагрузки  $I_{н1}$  понижающего и тока потребления  $\Delta I_{п2}$  повышающего МИП, в интервалах времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  равны

$$\Delta I_{н1} = \Delta I_{п2} = \Delta I_{нп} = I_{н1п2\max} - I_{н1п2\min}, \quad (56)$$

где  $I_{н1п2\max}$ ,  $I_{н1п2\min}$  определяются выражениями (38), (55) соответственно.

Переменные составляющие токов на входе и выходе МИП позволяют определить переменные составляющие напряжений на входе  $\Delta U_{вх\sim}$  и выходе  $\Delta U_{н\sim}$  как [3]

$$\Delta U_{вх\sim} = \Delta I_{пy} R_{п} / \sqrt{R_{п}^2 \omega^2 N^2 C_{вх}^2 + 1}; \quad (57)$$

$$\Delta U_{n\sim} = \Delta I_{ny} R_n / \sqrt{R_n^2 \omega_N^2 C_n^2 + 1}, \quad (58)$$

где  $y = 1, 2, 3$  — соответственно для понижающей, повышающей и инвертирующей схем МИП;  $\omega_N = 2\pi N f_k$ ,  $R_n = U_n / I_n$ ;  $U_n, I_n$  — напряжение и потребляемый ток источника первичного питания;  $R_n$  — сопротивление нагрузки МИП.

Для сохранения этих пульсаций напряжения в заданных пределах (например, при проектировании МИП) емкости конденсаторов на входе  $C_{вх}$  и выходе  $C_n$ , как следует из [3], должны удовлетворять следующему условию

$$C_i \geq \sqrt{\Delta I_i^2 / (\Delta U_i^2 \omega_N^2) - 1 / (R_i \omega_N)^2}, \quad (59)$$

$$C_i \geq \begin{cases} C_n & \text{при } \Delta I_i = \Delta I_n, R_i = R_n, \Delta U_i = \Delta U_{n\sim}; \\ C_{вх} & \text{при } \Delta I_i = \Delta I_n, R_i = R_n, \Delta U_i = \Delta U_{вх\sim}. \end{cases} \quad (60)$$

Соотношения (1) ... (50) являются обобщенными; при этом соотношения (1) ... (28), (57) ... (60) справедливы (при принятых допущениях) для всех трех основных схем МИП, а каждое из соотношений (29) ... (55) — для двух схем МИП (в различных сочетаниях). Переход к конкретной схеме МИП осуществляется подстановкой в указанные обобщенные соотношения коэффициентов  $I_{m1k}, I_{m2k}, t_b, k_n, U_n$ , которые в зависимости от конкретной схемы МИП определяются различными выражениями.

При граничном режиме работы средние значения токов в цепях питания  $I_{п1}, I_{п2}, I_{п3}$  и нагрузки  $I_{н1}, I_{н2}, I_{н3}$ , соответственно понижающего, повышающего и инвертирующего ОИП могут быть представлены в виде:

$$I_{п1} = I_{п3} = I_{п13} = N I_{m1k_n} / 2; \quad (61)$$

$$I_{н2} = I_{н3} = I_{н23} = N I_{m2k_b} / 2; \quad (62)$$

$$I_{н1} = I_{п2} = I_{н1п2} = N I_{m1}(k_n + k_b n_{21}) / 2. \quad (63)$$

Соотношения (33), (36), (56) и (61) ... (63) позволяют определить относительные значения переменных составляющих (размах пульсаций) токов на входе  $\Delta I_{п1}, \Delta I_{п2}, \Delta I_{п3}$  и выходе  $\Delta I_{н1}, \Delta I_{н2}, \Delta I_{н3}$  соответственно понижающего, повышающего и инвертирующего МИП:

$$\Delta \bar{I}_{п1} = \Delta \bar{I}_{п3} = \Delta I_{п13} / I_{п13} = 2 / N k_n; \quad (64)$$

$$\Delta \bar{I}_{н2} = \Delta \bar{I}_{н3} = \Delta I_{н23} / I_{н23} = 2 / N k_b; \quad (65)$$

$$\Delta \bar{I}_{н1} = \Delta \bar{I}_{п2} = \Delta I_{н1п2} / I_{п2}. \quad (63)$$

Полученные результаты позволяют определить максимальные и минимальные значения токов и напряжений и их переменные составляющие во входных и выходных цепях трех основных структур МИП (понижающей, повышающей и инвертирующей), что дает возможность определить параметры силовых сглаживающих фильтров при оценке целесообразности использования различных структур МИП, оптимизация которых необходима при решении проблем миниатюризации.

В качестве иллюстрации к вышеизложенному на рис. 3, 4 для преобразователей модульной структуры (ОИП и МИП) понижающего типа ( $y=1$ ) приведены зависимости абсолютных пульсаций тока нагрузки  $\Delta I_n$  от коэффициента накопления  $k_n$  для различных значений коэффициента автотрансформации  $n_{21}$  ( $n_{21} = 0,5; 1,0; 2,0$ ) при количестве СК  $N = 4$ .

Исходные данные: выходное напряжение ППН  $U_n = 48$  В, ток нагрузки  $I_n = 10$  А. Индуктивность первичной полуобмотки дросселя  $L_1 = 1,25 \times 10^{-6}$  Гн, а индуктивность вторичной полуобмотки дросселя  $L_2$  является функцией от коэффициента автотрансформации  $n_{21}$ .

Видно (рис. 4), что при коэффициенте автотрансформации  $n_{21} = 1,0$  кривые получаются симметричными относительно значения  $k_n = 0,5$ . Также видно, что кривые для  $n_{21} = 0,5$  и  $n_{21} = 2,0$  являются «зеркальными» относительно друг друга (рис. 3, 4).

Пульсации тока  $\Delta I_n$  на выходе понижающего ( $y=1$ ) МИП при коэффициенте автотрансформации  $n_{21} = 1$  стремятся к нулю в точках, где коэффициент накопления  $k_n$  кратен величине  $1/N$ , причем таких точек во всем диапазоне регулирования на единицу меньше количества силовых каналов  $N$ . Например, для рис. 4, при  $N=4$ , количество таких точек составляет 3 ( $k_n=0,25; k_n=0,5; k_n=0,75$ ).

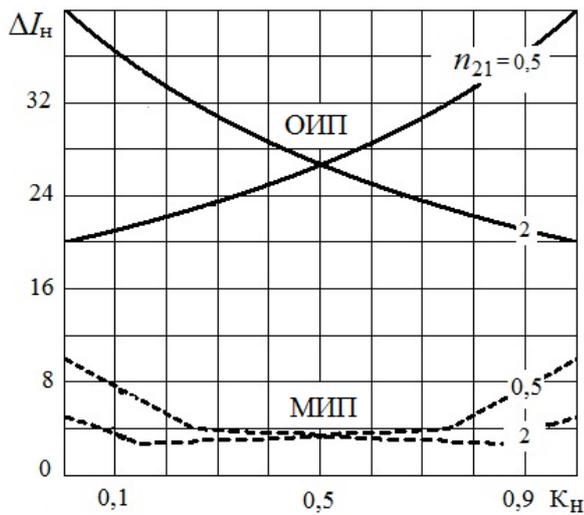


Рисунок 3 – Пульсации тока нагрузки  $\Delta I_H$  ОИП и МИП при  $N=4$ ,  $n_{21} = 0,5$ ,  $n_{21} = 2,0$

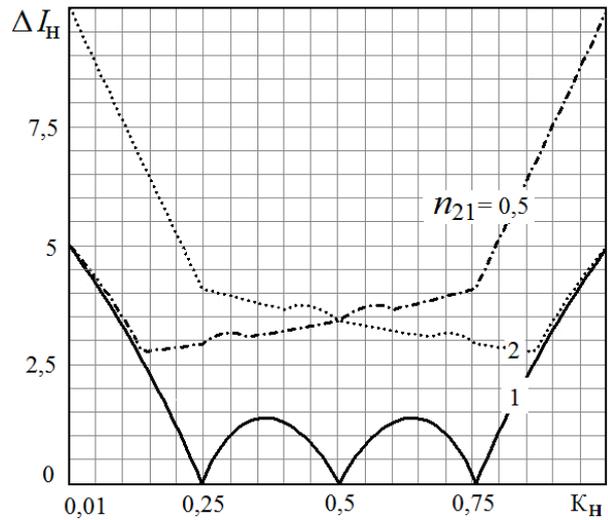


Рисунок 4 – Пульсации тока нагрузки  $\Delta I_H$  МИП при  $N=4$ ,  $n_{21} = 0,5$ ,  $n_{21} = 1,0$ ,  $n_{21} = 2,0$

Амплитуда пульсации тока  $\Delta I_H$  на выходе МИП при любом коэффициенте автотрансформации  $n_{21}$  и количестве СК  $N > 1$  всегда меньше, чем на выходе ОИП. Это способствует уменьшению габаритов сглаживающих фильтров ППН с многофазным принципом преобразования электрической энергии и повышению качества преобразования.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ электрических процессов МИП с СК понижающего, повышающего и инвертирующего типов с автотрансформаторным включением дросселей.
2. Получена математическая модель электрических процессов МИП при граничном режиме работы силовых каналов с автотрансформаторным включением дросселей, обобщенная к типу СК и его схемотехнической реализации, позволяющая определить максимальные и минимальные значения токов и напряжений и их переменные составляющие во входных и выходных цепях МИП.
3. Получены результаты исследований электрических процессов. Показано, что неравенство  $n_{21}$  коэффициентов автотрансформации единице ( $n_{21} \neq 1$ ) приводит к ухудшению электрических процессов – увеличению уровня пульсаций тока и напряжения.

Таким образом, полученные результаты дают возможность определять параметры силовых сглаживающих фильтров как при выполнении исследований, так и при проектировании МИП, что необходимо для оценки целесообразности использования различных структур МИП, оптимизация которых необходима при решении проблем улучшения технико-экономических показателей средств электропитания телекоммуникационных систем.

### Литература

1. Концепція розвитку ВАТ «Укртелеком» до 2010 року. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2006. – 49 с.
2. Кадацкий А.Ф. Электрические процессы в многофазных импульсных преобразователях постоянного напряжения при разрывных токах дросселей / А.Ф. Кадацкий // Электронная техника в автоматике. – 1985. – Т. 16. – С.55 – 66.
3. Кадацкий А.Ф. Электрические процессы в многофазных импульсных преобразователях постоянного напряжения при безразрывных токах дросселей / А.Ф. Кадацкий, А.В. Саксонов // Электронная техника в автоматике. – 1985. – Т. 16. – С.67 – 78.
4. Кадацкий А.Ф. Асимметрия электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения модульной структуры с граничным режимом функционирования / А.Ф. Кадацкий, И.П. Малявин // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2008. – № 3 (75). – С. 7 – 14.