

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МНОГОФАЗНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ПРИ НЕРАВНОМЕРНО СДВИНУТЫХ ВО ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ СИЛОВЫХ КАНАЛОВ

ANALYSIS OF ELECTRICAL PROCESSES IN MULTIPHASE PULSE CONVERTERS AT THE NONUNIFORMLY SHIFTED IN TIME ELECTRICAL PROCESSES OF POWERED CHANNELS

Аннотация. Рассмотрены особенности электрических процессов многофазных импульсных преобразователей при разрывных токах дросселей и неравномерно сдвинутых во времени идентичных силовых процессах силовых каналов.

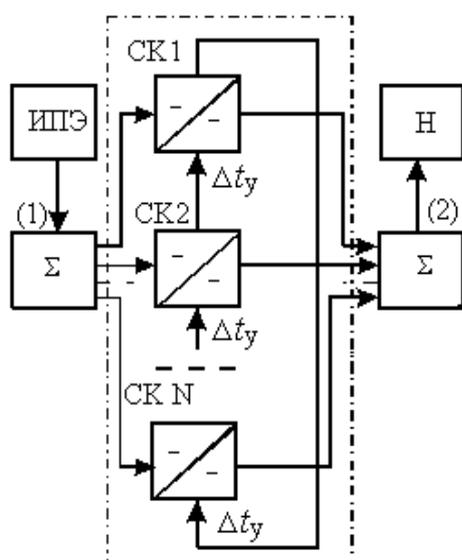
Summary. The features of electrical processes of multiphase pulse converters are surveyed at explosive currents of among chokes and identical powered processes, nonuniformly shifted in time, of powered channels.

Наличие качественных и надежных средств электропитания, являющихся составной частью телекоммуникационных систем, обеспечивает решение основной проблемы отрасли связи – предоставление качественных и надежных информационных услуг. Составной частью современных средств электропитания являются импульсные преобразователи и регуляторы электрической энергии (ПЭЭ) модульной структуры, выполненные из параллельно включенных N однотипных взаимозаменяемых преобразователей постоянного напряжения – силовых каналов (СК).

Снижение массогабаритных показателей, повышение надежности и экономичности импульсных ПЭЭ аппаратуры связи является одной из наиболее серьезных задач, актуальность решения которой отражена в «Концепции развития ОАО "Укртелеком" до 2010 г.», других нормативных документах [1, 2]. При однофазном режиме работы модульного ПЭЭ в однофазном импульсном преобразователе (ОИП) СК коммутируются одновременно, электрические процессы в однотипных элементах схемы синхронны и синфазны, временной сдвиг между ними отсутствует – $\Delta t_y = 0$. При многофазном режиме работы модульного ПЭЭ в многофазном импульсном преобразователе (МИП) электрические процессы в k -х СК синхронны, но не синфазны, и смещены во времени, например, на интервал $\Delta t_y = \Delta t_N = T/N$, где T – период электрических процессов (период преобразования) в отдельно взятом k -м СК. Суммирование смещенных во времени электрических процессов приводит к значительному уменьшению уровня переменных составляющих (пульсаций) на входе и выходе МИП [3, 4]. Это обуславливает использование сглаживающих фильтров с меньшими значениями емкости и индуктивности, а, значит, улучшенными массогабаритными показателями. Эффективность фильтрации переменной составляющей в МИП зависит от симметрии электрических процессов в СК, т.е. от идентичности электрических процессов в отдельно взятых СК и их равномерного сдвига во времени относительно друг друга [5].

Исследование и проектирование МИП значительно упрощается при наличии математических моделей, адекватно описывающих их характеристики, в частности электрические процессы. В известных публикациях [3, 4] приведены математические модели, описывающие симметричные электрические процессы. Однако, отсутствие математических моделей, описывающих несимметричные электрические процессы, в частности, при неравномерном сдвиге во времени электрических процессов СК, сдерживает использование МИП на практике.

Цель работы – выполнить анализ электрических процессов МИП при разрывных токах дросселей и неравномерно сдвинутых во времени идентичных силовых процессах силовых каналов и разработать соответствующую математическую модель.



$\Delta t_y = 0$ – ОИП, $\Delta t_y = T/N$ – МИП

Рисунок 1 – Структурная схема ПЭЭ: ИПЭ – источник первичного электропитания, Н – нагрузка, (1) – входные, (2) – выходные цепи

Идеальность электрических процессов в МИП предполагает равномерное распределение тока нагрузки I_n между N СК и обеспечение $\Delta t_v = \Delta t_N = T/N = T_n$ (рис. 1). Введение перекрестных синхронизирующих связей – отрицательная обратная связь по току – гарантирует с заданной точностью равномерное распределение тока I_n . Обеспечение $\Delta t_v = T_n$ в реальных условиях затруднено, так как даже если многофазный задающий генератор обеспечивает $\Delta t_v = T_n$, то при прохождении сигнала управления ко входу широтно-импульсного модулятора (ШИМ) СК через электрические тракты с различными постоянными времени появляется дополнительный временной сдвиг $\pm \Delta t_k$.

Кроме того, возможен выход из строя СК, что также приводит к неидеальности процессов в МИП. Исследование данных режимов необходимо для определения допусков на возможные отклонения и требуемые параметры элементов МИП.

Появление дополнительных к Δt_v временных сдвигов ($\pm \Delta t_k$ или $\pm \delta_k = \pm \Delta t_k/T_n$) приводят к тому, что максимальный I_{rmaxi} и минимальный I_{rmini} токи, поступающие в нагрузку в моменты t_{1i}, t_{2i} в i -е интервалы времени T_{ni} ($1 \leq i \leq N$ в одном периоде T), в общем случае не равны I_{rmax} и I_{rmin} , полученным в [3, 4] (здесь и далее приняты обозначения [3, 4]):

$$I_{rmax} = \sum_{k=1}^N i_k = \sum_{k=1}^{p_1} i_k + \sum_{k=N-b_1+1}^N i_k, \quad (1)$$

где $\sum_{k=1}^{p_1} i_k = I_m p_1 [1 - (p_1 - 1) / 2N\kappa_n]$, (2)

$$\sum_{k=N-b_1+1}^N i_k = \begin{cases} I_m b_1 [1 - (b_1 + 1) / 2N\kappa_n], & \text{при } t_B > T_n, \\ 0, & \text{при } t_B \leq T_n. \end{cases} \quad (3)$$

$$I_{rmin} = \sum_{k=1}^N i'_k = \sum_{k=1}^{p_2} i'_k + \sum_{k=N-b_2+1}^N i'_k, \quad (4)$$

где $\sum_{k=1}^{p_2} i'_k = I_m p_2 (p_2 - 1) / 2N\kappa_n$, (5)

$$\sum_{k=N-b_2+1}^N i'_k = \begin{cases} I_m b_2 [1 - (2p_2 - 2N\kappa_n + b_2 - 1) / 2N\kappa_n], & \text{при } \Delta t_2 < t_B, \\ 0, & \text{при } \Delta t_2 > t_B. \end{cases} \quad (6)$$

I_m – размах пульсации тока дросселя; κ_n (κ_B) = $t_n(t_B)/T$ – коэффициент накопления (возврата) электрической энергии; $p_1(p_2)$ дросселей накапливают энергию; $b_1(b_2)$ дросселей возвращают энергию в нагрузку; энергия $z_1(z_2)$ дросселей равна нулю соответственно в моменты времени $t_1(t_2)$.

В каждом T_{ni} в момент t_{1i} , отстоящем от начала T_{ni} на $\pm \Delta t_{1i}$, происходит отключение РЭ ($1i$ -го) СК ($k = 1$). Энергия, накопленная ($1i$ -м) дросселем, в данный момент времени максимальна. В момент t_{2i} , отстоящем от начала T_{ni} на $T_n + (\pm \Delta t_{p_2+1i})$, происходит включение РЭ ($p_2 + 1i$ -го) СК ($k = p_2 + 1$). Таким образом, в момент t_{1i} ток ($1i$ -го) дросселя (равный $i_{1i} = I_m$), а в момент t_{2i} ток ($p_2 + 1i$ -го) дросселя ($i_{2i} = 0$) не зависят от временных дополнительных сдвигов ни в собственном, ни в других СК. Токи дросселей с ($2i$) по (Ni) в момент времени t_{1i} и с ($1i$) по (p_2i), с (p_2+2i) по (Ni) в момент времени t_{2i} зависят от дополнительных временных сдвигов как собственного $\pm \Delta t_{ki}$, так и $\pm \Delta t_{1i}$ (для t_{1i}), $\pm \Delta t_{p_2+1i}$ (для t_{2i}). При сохранении принятого выше начала отсчета от СК, у которого накапливаемая энергия имеет максимальное значение, в T_{ni} , выражения для i_{ki} в момент t_{1i} запишутся следующим образом:

$$i_{ki} = I_m (N\kappa_n - k + 1 - \delta_{1ki}) / N\kappa_n, \quad 1 \leq k \leq p_1 - 1 \quad \text{при } -1 \leq \delta_{1ki} \leq 1, \quad (7)$$

$$i_{ki} = I_m (1 + (k - 1 - N + \delta_{1ki}) / N\kappa_n), \quad N - b_1 + 2 \leq k \leq N \quad \text{при } -1 \leq \delta_{1ki} \leq 1, \quad (8)$$

$$i_{ki} = I_m (\delta_{1ki} - 1 + \alpha) / N\kappa_n, \quad k = p_1 + 1 \quad \text{при } \delta_{1ki} > 1 - \alpha'; \quad (9)$$

$$i_{ki} = I_m (\alpha_1 - 1 - \delta_{1ki}) / N\kappa_B, \quad k = N - b_1 \quad \text{при } \delta_{1ki} < \alpha_1 - 1; \quad (10)$$

$$i_{ki} = 0, \quad p_1 + 2 \leq k \leq N - b_1 - 1 \quad \text{при } -1 \leq \delta_{1ki} \leq 1, \quad (11)$$

$$k = p_1 \quad \text{при } \delta_{1ki} \leq \alpha',$$

$$k = p_1 + 1 \quad \text{при } \delta_{1ki} \geq \alpha_1,$$

$$k = N - b_1 \quad \text{при } \delta_{1ki} \geq \alpha_1 - 1.$$

А в момент $t = t_{2i}$ выражения для i'_{ki} будут следующими:

$$i'_{ki} = I_m (p_2 + 1 - k + \delta_{2ki}) / N\kappa_n, \quad 2 \leq k \leq p_2 \quad \text{при } -1 \leq \delta_{2ki} \leq 1,$$

$$\begin{aligned}
 & k = 1 \quad \text{при } \delta_{2ki} \leq \alpha'; \quad (12) \\
 i'_{ki} &= I_m (k - p_1 + N(\kappa_B + \kappa_H - 1) - \delta_{2ki}) / N\kappa_B, \quad (13) \\
 & N - b_2 + 2 \leq k \leq N - 1 \quad \text{при } -1 \leq \delta_{2ki} \leq 1, \\
 & k = N \quad \text{при } \delta_{2ki} > 1 - \alpha', \\
 & k = N - b_2 + 1 \quad \text{при } \delta_{2ki} \leq \alpha_2; \\
 i'_{ki} &= I_m (\alpha_2 - 1 - \delta_{2ki}) / N\kappa_B, \quad k = N - b_2 \quad \text{при } \delta_{2ki} < \alpha_2 - 1; \quad (14) \\
 i'_{ki} &= I_m (1 + (\delta_{2ki} + 1 - \alpha') / N\kappa_H), \quad k = N \quad \text{при } \delta_{2ki} < 1 - \alpha'; \quad (15) \\
 i'_{ki} &= I_m \{1 - [(\delta_{2ki} - \alpha') / N\kappa_B]\}, \quad k = 1 \quad \text{при } \delta_{2ki} > \alpha'; \quad (16) \\
 i'_{ki} &= 0, \quad p_2 + 1 \leq k \leq N - b_2 - 1 \quad \text{при } -1 \leq \delta_{2ki} \leq 1, \quad (17) \\
 & k = N - b_2 \quad \text{при } \delta_{2ki} \geq \alpha_2 - 1, \\
 & k = N - b_2 + 1 \quad \text{при } \delta_{2ki} > \alpha_2,
 \end{aligned}$$

где $\alpha' = N\kappa_H - p_1 + 1$; $\alpha_1 = \Delta t_1' / T_n$; $\alpha_2 = \Delta t_2' / T_n$;

(18)

$\delta_{1ki} = \delta_{1i} - \delta_{ki}$; $\delta_{2ki} = \delta_{p_2+1i} - \delta_{ki}$; δ_{ki} – элементы квадратной матрицы $[\delta_{ki}]$;

$[\delta_{ki}]$ – квадратная матрица порядка N , образуемая как

$$[\delta_{ki}] \equiv \begin{vmatrix} \pm \delta_1 & \pm \delta_2 & \dots & \pm \delta_N \\ \pm \delta_2 & \pm \delta_3 & \dots & \pm \delta_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \pm \delta_N & \pm \delta_1 & \dots & \pm \delta_{N-1} \end{vmatrix} \quad (19)$$

$\pm \delta_1, \pm \delta_2, \dots, \pm \delta_N$ – относительные дополнительные временные сдвиги СК МИП (с 1-го по N -й).

Максимальный и минимальный токи I_{rmaxi}, I_{rmini} на выходе МИП определяются для каждого T_{pi} в момент t_{1i} :

$$I_{rmaxi} = \sum_{k=1}^N i_{ki}, \quad 1 \leq i \leq N, \quad (20)$$

$$I_{rmini} = \sum_{k=1}^N i'_{ki}, \quad 1 \leq i \leq N. \quad (21)$$

В последующие интервалы времени (кратные T) процессы повторяются, поэтому достаточно рассмотреть процессы в МИП за один период T . Суммарные изменения токов во всех дросселях ΔI_{pi} за каждый T_{pi} , определяемые выражением

$$\Delta I_{pi} = I_{rmaxi} - I_{rmini}, \quad (22)$$

характеризуют высокочастотную переменную составляющую на частоте ω_N , наложенную на низкочастотную ΔI_{pkB} с частотой ω_{kB} :

$$\Delta I_{pkB} = \max \{I_{rmaxi}\} - \min \{I_{rmini}\}, \quad (23)$$

где $\max \{I_{rmaxi}\}$ – максимальное из значений I_{rmaxi} , определяемое по (20); $\min \{I_{rmini}\}$ – минимальное из значений I_{rmini} , определяемое по (21).

В частности, когда лишь один k -й СК имеет дополнительный относительный временной сдвиг δ_c ($-1 \leq \delta_c \leq 1$), получим

$$\Delta I_{pkB} = \Delta I_p + I_m (|\delta_c|) (1/\kappa_H + 1/\kappa_B), \quad (24)$$

где

$$\Delta I_p = I_{rmax} - I_{rmin}. \quad (25)$$

Из (24) следует, что наличие δ_c в одном из СК приводит к появлению дополнительной составляющей на частоте квантования РЭ СК, пропорциональной δ_c , на которую наложена высокочастотная составляющая ΔI_p (на частоте ω_N).

Соответственно для размаха переменной составляющей напряжения в нагрузке МИП с учетом (23) или (24) будем иметь

$$\Delta U_{kB-} = \Delta I_{pkB} R_H / [1 + (R_H \omega_{kB} C_H)^2]^{0.5}, \quad (26)$$

где $R_{nk} = NR_H; R_{nk}, R_H$ – сопротивления нагрузки k -го СК и МИП соответственно.

На основании приведенных выше соотношений можно определить выражение для тока потребления I_n . Он складывается из суммы токов дросселей, в которых происходит накопление электрической энергии. Аналогично предыдущему будем определять значения I_n в моменты t_{1i}, t_{2i} (с уче-

том δ_{ki}). Максимальный ток $I_{\text{пmax}i}$. потребления для моментов $t_{ki} \rightarrow t_{1i}$ с учетом (7) будет равен

$$I_{\text{пmax}i} = \sum_{k=1}^{p1} i_{ki}, \quad 1 \leq i \leq N. \quad (27)$$

Минимальный ток $I_{\text{пmin}i}$ в каждом $T_{\text{п}i}$ будет определяться моментом $t_{ki}=t_{1i}$, при котором происходит отключение РЭ (1i)-го СК, ток потребления которого достиг значения I_m :

$$I_{\text{пmin}i} = I_{\text{пmax}i} - I_m. \quad (28)$$

Ток потребления $I_{\text{п}i}$ в момент времени t_{2i} с учетом (12) определится в виде

$$I_{\text{п}i} = \sum_{k=1}^{p2} i'_{ki}, \quad 1 \leq i \leq N. \quad (29)$$

В зависимости от режима работы МИП значения $I_{\text{п}i}$ будут находиться в интервале

$$I_{\text{пmin}i} \leq I_{\text{п}i} \leq I_{\text{пmax}i}. \quad (30)$$

Суммарные изменения токов во всех дросселях $\Delta I_{\text{п}i}$ на частоте ω_N в каждом $T_{\text{п}i}$, как следует из (28), равны

$$\Delta I_{\text{п}i} = I_m. \quad (31)$$

Однако дополнительные временные сдвиги $\pm \Delta t_{ki}$ в СК приводят к появлению в потребляемом токе МИП переменной составляющей на частоте преобразования СК, размах пульсации $\Delta I_{\text{пкв}}$ которой с учетом (27) и (28) определится как

$$\Delta I_{\text{пкв}} = \max \{I_{\text{пmax}i}\} - \min \{I_{\text{пmin}i}\}, \quad 1 \leq i \leq N. \quad (32)$$

Размах переменной составляющей напряжения $\Delta U_{\text{вквб}}$ на входе МИП определяется:

$$\Delta U_{\text{вквб}} = \Delta I_{\text{пкв}} R_{\text{п}} / [1 + (R_{\text{п}} \omega_{\text{кв}} C_{\text{вх}})^2]^{0.5}. \quad (33)$$

Выражение (32) позволяет определять размах пульсации при дополнительных сдвигах времени в одном, двух, ..., N СК.

Рассмотрим частный случай, когда дополнительный сдвиг во времени имеется лишь в одном k -м ($i = c$) СК, т.е. один из N СК имеет дополнительный сдвиг времени Δt_c (при $-T_{\text{п}} \leq \Delta t_c \leq T_{\text{п}}$) к Δt_y , соответствующему идеальному случаю. Конец интервала времени $\Delta t_{1c} = \Delta t_y + \Delta t_c$, соответствующий моменту времени t_{1c} (при котором в (1c)-м СК происходит закрывание РЭ), может приходиться на два характерных участка с различными законами изменения тока потребления $i_{\text{п}}(t)$. В идеальном случае первый участок характеризуется интервалом Δt_1 , на котором $i_{\text{п}1}(t)$ описывается как [3]

$$i_{\text{п}1}(t) = (U_{\text{п}} - U_{\text{н}})[p_1 t + \sum_{k=1}^{p1} (p_1 - k)T_{\text{п}}], \quad (34)$$

где $\sum_{k=1}^{p1} (p_1 - k)T_{\text{п}} = p_1(p_1 - 1)T_{\text{п}}/2$.

Дополнительный сдвиг Δt_c приводит к изменению $i'_{\text{п}1}(t)$ на данном участке. При совмещении начала координат с моментом t_{i1} , характеризующим момент отключения РЭ k -го СК при $\Delta t_c = 0$, $i'_{\text{п}1}(t)$ запишется следующим образом:

$$i'_{\text{п}1}(t) = \begin{cases} i_{\text{п}1}(t) - I_m - (U_{\text{п}} - U_{\text{н}})\Delta t_c / L_k & \text{при } -\Delta t_1 \leq \Delta t_c \leq 0, \\ i_{\text{п}1}(t) + I_m & \text{при } \Delta t_2 \leq \Delta t_c \leq T_{\text{п}}. \end{cases} \quad (35)$$

В идеальном случае второй участок характеризуется интервалом Δt_2 , на котором $i_{\text{п}2}(t)$ описывается выражением [3]

$$i_{\text{п}2}(t) = I_{\text{пmin}} + (U_{\text{п}} - U_{\text{н}})(p_1 - 1)t / L_k, \quad (36)$$

где L_k – индуктивность дросселя k -го СК.

Соответственно $i'_{\text{п}2}(t)$, когда Δt_c имеется в одном СК, запишется так:

$$i'_{\text{п}2}(t) = \begin{cases} i_{\text{п}2}(t) - I_m - (U_{\text{п}} - U_{\text{н}})\Delta t_c / L_k & \text{при } -T_{\text{п}} \leq \Delta t_c \leq \Delta t_1, \\ i_{\text{п}2}(t) + I_m & \text{при } 0 \leq \Delta t_c \leq \Delta t_2. \end{cases} \quad (37)$$

Подставляя в (35) $t = \Delta t_1 + \Delta t_c$, $t = T_{\text{п}} + \Delta t_c$ и преобразуя для значения минимального тока по-

ребления $I_{\text{min}c}$ при $\Delta t_c < 0$, получим

$$I_{\text{min}c} = \begin{cases} I_m \left[\frac{p_1(2\alpha' + 2\delta_c + p_1 - 1)}{2N_{\text{кн}}} - 1 - \frac{\delta_c}{N_{\text{кн}}} \right] & \text{при } \delta_c = \Delta t_c / T_{\text{п}} \leq -\alpha', \\ I_m \left[\frac{(p_1 - 1)(2N_{\text{кн}} - p_1 + 2\delta_c + 2)}{2N_{\text{кн}}} - 1 - \frac{\delta_c}{N_{\text{кн}}} \right] & \text{при } -1 \leq \delta_c \leq -\alpha'. \end{cases} \quad (38)$$

При $\delta_c = -\alpha'$ (38) принимает вид

$$I_{\text{min}c} = I_m \left[\frac{p_1(p_1 - 1)}{2N_{\text{кн}}} - 1 - \frac{\delta_c}{N_{\text{кн}}} \right] \quad (39)$$

Подставляя в (37) $t = \Delta t_c - \Delta t_2$, $t = \Delta t_c$ для $\Delta t_c > 0$, получим

$$I_{\text{max}c} = \begin{cases} I_m \left[\frac{2p_1(\delta_c - 1 + \alpha) + p_1(p_1 - 1)}{2N_{\text{кн}}} + 1 \right] & \text{при } 1 - \alpha \leq \delta_c \leq 1, \\ I_m \left[(p_1 - 1) \left(1 + \frac{2\delta_c - p_1}{2N_{\text{кн}}} \right) + 1 \right] & \text{при } 0 \leq \delta_c \leq 1 - \alpha'. \end{cases} \quad (40)$$

При $\Delta t_c < 0$ в моменты времени t_{1i} ток $I_{\text{max}c}$ определится

$$I_{\text{max}c} = I_{\text{max}i} - (U_{\text{п}} - U_{\text{н}}) \Delta t_c / L_k, \quad (41)$$

где

$$c - N_{\text{кн}} - |\delta_c| \leq i \leq c. \quad (42)$$

Подставляя в (41) $I_{\text{max}i}$ из [3]

$$I_{\text{max}c} = \sum_{k=1}^{p_1} i_{\text{нк}}(t) = I_m p_1 [1 - (p_1 - 1) / 2N_{\text{кн}}], \quad (43)$$

получим

$$I_{\text{max}c} = I_m \{ p_1 - [p_1(p_1 - 1) + 2\delta_c] / 2N_{\text{кн}} \}. \quad (44)$$

В оставшиеся i -е интервалы $T_{\text{п}i}$, не попадающие в неравенство (42), значения $i_{\text{п}}(t)$ с учетом (43) и минимального тока потребления $I_{\text{min}i}$ в момент времени $t = t_1$ отключения регулирующего элемента СК с максимальным отклонением I_m [3]:

$$I_{\text{min}i} = I_{\text{max}c} - I_m = I_m (p_1 - 1) (1 - p_1 / 2N_{\text{кн}}) \quad (45)$$

будут определяться

$$I_{\text{min}i} \leq i_{\text{п}}(t) \leq I_{\text{max}i}. \quad (46)$$

Минимальный ток $I_{\text{min}c}$ при $\Delta t_c > 0$ так же, как и $I_{\text{min}i}$, совпадает с моментами t_{1i} в i -х интервалах, удовлетворяющих неравенству (42), и определяется

$$I_{\text{min}c} = I_{\text{max}c} - I_m. \quad (47)$$

Преобразуя (47) с учетом (41), (43), получим

$$I_{\text{min}c} = I_m \left[p_1 - \frac{p_1(p_1 - 1) + 2\delta_c}{2N_{\text{кн}}} - 1 \right]. \quad (48)$$

При $\Delta t_c > 0$ значения $i_{\text{п}}(t)$ в i -е интервалы $T_{\text{п}i}$, не удовлетворяющие (42), будут определяться, как и в идеальном случае (46).

С учетом (38), (40), (44), (48) размах пульсации тока потребления $\Delta I_{\text{пкв}}$ на частоте $\omega_{\text{кв}}$ определится как

$$\Delta I_{\text{пкв}} = \begin{cases} I'_{\text{max}c} - I'_{\text{min}c} & \text{при } \Delta t_c \leq 0, \\ I_{\text{max}c} - I_{\text{min}c} & \text{при } \Delta t_c > 0. \end{cases} \quad (49)$$

Полученное выражение для $\Delta I_{\text{пкв}}$ позволяет по (33) определять $\Delta U_{\text{вкв}}$ при дополнительном сдвиге во времени в одном kc -м СК.

При выходе из строя или отключении одного СК средний ток в каждом из оставшихся СК I_+ увеличится от $I_+ = I_{\text{н}}/N$ до $I''_+ = I_{\text{н}}/(N-1)$. Кроме того, в выходном токе МИП появится низкочастотная составляющая с частотой $\omega_{\text{кв}}$ и двойной амплитудой $\Delta I_{\text{ркв}}$, равной

– для режима стабилизации

$$\Delta I_{pкв} = [2U_n^2(U_n - U_n)T/R_n U_n L_k(N-1)]^{0,5}; \quad (50)$$

– для режима слежения

$$\Delta I_{pкв} = 4U_n/R_n \kappa_n N [1 + 2g_k/\kappa_n^2 + (1 + 4g_k/\kappa_n^2)^{0,5}], \quad (51)$$

где $g_k = 2L_k / (R_{нк}T)$ – коэффициент реактивности нагрузки.

Размах пульсации $\Delta U_{кв}$ в данном случае определится (26).

Сопоставление выражения для размаха пульсаций выходного напряжения МИП для симметричного случая [3]:

$$\Delta U_{н\sim} = 2\Delta U_{мн\sim} = \Delta I_p R_n / [1 + (R_n \omega_N C_n)^2]^{0,5}, \quad (52)$$

где $\Delta U_{мн\sim}$ – амплитуда пульсации выходного напряжения МИП, и соотношения (26) с учетом (50), (51) показывает, что отключение одного СК существенно увеличивает переменную составляющую выходного напряжения при сохранении параметров фильтра и нагрузки неизменными или требует увеличения реактивных элементов фильтра при сохранении переменной составляющей выходного напряжения.

Сравним МИП, у которого отключен один СК, с ОИП, работающие, например, на границе разрывного и безразрывного токов с одинаковыми выходными параметрами. При этом максимальный размах тока в дросселе $L_{гр}$ ОИП определится

$$\Delta I_{роип} = [2U_n^2(U_n - U_n)T/R_n U_n L_{гр}]^{0,5}. \quad (53)$$

Определим отношение $\Delta I_{роип}$ к $\Delta I_{pкв}$:

$$J_1 = \Delta I_{роип} / \Delta I_{pкв} = [(N-1)L_k / L_{гр}]^{0,5}. \quad (54)$$

Т.е., при выходе из строя одного СК увеличение $\Delta I_{pкв}$ на выходе МИП остается в J_1 раз меньше переменной составляющей $\Delta I_{роип}$ ОИП. При этом, чем больше количество СК N , тем выше преимущество МИП по сравнению с ОИП – примерно в \sqrt{N} раз.

Итак, нарушение равномерного сдвига во времени идентичных электрических процессов СК или отключение одного из СК при разрывных или безразрывных токах дросселей приводит к появлению пульсации тока (напряжения) с частотой преобразования СК как на выходе, так и на входе МИП. Однако и в этом случае МИП имеет преимущества по сравнению с ОИП, обеспечивающим те же выходные параметры (см. соотношение (54)).

В заключение можно сделать следующий вывод. Проведенные исследования, полученная математическая модель позволяют проводить требуемые расчеты при исследовании и проектировании при разрывных токах дросселей и асимметрии электрических процессов МИП, определить размахи пульсаций токов и напряжений на выходе МИП – соотношения (23), (26), на входе МИП – соотношения (32), (33).

Литература

1. *Программа реструктуризации Украинского объединения электросвязи «Укртелеком»*. Постановление КМУ № 1 от 04.01.1998 г.
2. *Перечень государственных, научных и научно-технических программ по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002-2006 г.г.* Постановление КМУ № 1716 от 24.12.2001 г.
3. *Кадацкий А.Ф.* Электрические процессы в многофазных импульсных преобразователях постоянного напряжения при разрывных токах дросселей // *Электронная техника в автоматике: Сб. статей / Под ред. Ю.И. Конева.* – М.: Сов. радио, 1985. – Вып. 16. – С. 55–67.
4. *Кадацкий А.Ф., Саксонов А.В.* Электрические процессы в многофазных импульсных преобразователях постоянного напряжения при безразрывных токах дросселей // *Электронная техника в автоматике: Сб. статей / Под ред. Ю.И. Конева.* – М.: Сов. радио, 1985. – Вып. 16. – С. 67–78.
5. *Кадацкий А.Ф., Гурков В.Г., Грабовий О.А., Малявін І.П.* До дослідження несиметричних електричних процесів в імпульсних перетворювачах модульної структури // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2003.* – № 1. – С. 27 – 34.