

УДК 621.311.004.12

## КАНОНИЧЕСКИЕ ГАРМОНИКИ И ИНТЕРГАРМОНИКИ СЕТЕВОГО ТОКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ СО ЗВЕНОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Барвинский Н.А., диспетчер ПС «Заря-330кВ» Мариупольских МЭС ДЭС, аспирант Приазовский государственный технический университет**

Адрес: ПГТУ, ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, Донецкая обл., 87500, Украина

E-mail: [barvinsky\\_n@mail.ru](mailto:barvinsky_n@mail.ru)

У даній статті запропонований інженерний метод оцінки інтергармонік і вищих гармонік перетворювача частоти з ланкою постійного струму, показано, що інтергармоніки порівнянні за величиною з канонічними гармоніками мережного струму перетворювача частоти з ланкою постійного струму.

**Ключові слова:** інтергармоніка, перетворювач частоти, мережний струм.

The engineering method of estimation of the interharmonics and high harmonics of the frequency converter with dc link is presented in the article. The values of interharmonics are commensurable with high harmonics of the network current of the frequency converter with dc link.

**Key words:** interharmonics, frequency converter, dc link.

**Введение.** В современных системах электропривода с регулированием скорости вращения электродвигателей широкое применение находят тиристорные преобразователи частоты (ПЧ) – непосредственные (НПЧ) и со звеном постоянного тока (ПЧП). Достоинства ПЧП определяются, в первую очередь, широким диапазоном регулирования скорости вращения электропривода и достаточно высоким КПД.

Однако достоинства ПЧ как элемента системы электропривода несколько снижаются вследствие их отрицательного влияния на питающие электрические сети, что, в ряде случаев, приводит к ухудшению электромагнитной совместимости электропривода и электрической сети, в первую очередь, вследствие наличия в спектре сетевых токов канонических и неканонических высших гармоник (ВГ), а также интергармоник (ИГ).

**Анализ предыдущих исследований.** Применительно к НПЧ вопрос ВГ и ИГ исследован достаточно подробно. В то же время исследования частотных и амплитудных спектров ПЧП практически не выполнялись; как правило, наличие ИГ в спектрах сетевых токов игнорировалось [1-3].

**Цель работы.** Рассмотрение инженерного метода оценки сетевого тока ПЧП с целью оценки гармоник сетевых токов при проектировании систем электроснабжения.

**Материал и результаты исследования.** ПЧП являются источниками канонических ВГ и ИГ, содержащихся в их входных (сетевых) токах; их уровни при определенных условиях могут превосходить значения, характерные для вентильных электроприводов с 6 и 12 фазными преобразователями (ВП) при бесконечной индуктивности выпрямленного тока [1, 3]. Это объясняется тем, что в ПЧП с инвертором напряжения индуктивность звена постоянного тока  $L_d$  имеет конечное значение ( $L_d \neq \infty$ ), что обуславливает увеличение канонических гармоник в сравнении с относитель-

ной величиной  $\frac{1}{n}$  ( $n$  – номер канонической гармоники,  $n = 5, 7, 11, 13...$  или  $n = 11, 13...$  – в зависимости от пульсности ВП). Отличие частот выпрямителя и инвертора приводит к появлению ИГ в сетевых токах ПЧП.

Канонические гармоники сетевого тока определяется по известной формуле:

$$I_{en}^* = \frac{1}{n} + m_n I_i, \quad (1)$$

где  $I_{en}^*$  – относительное действующее значение  $n$ -й гармоники;

$I_i$  – коэффициент пульсации в цепи выпрямленного тока выпрямителя;

$m_n$  – поправочный коэффициент в зависимости от номера гармоники.

Значение  $I_{en}^*$  согласно [3, 5]

$n$	$I_{en}^*$ ;	
5	$0,2 + 0,9I$ ;	
7	$0,14 - 0,21I$ ;	(2)
11	$0,09$ ;	
13	$0,076 - 0,087I$ .	

Коэффициент  $I_i$  определяется отношением амплитуды наибольшей гармоники выпрямленного тока  $I_{6\max}$  к среднему значению  $I_d$  [3, 5]

$$I_i = \frac{I_{6\max}}{I_d}. \quad (3)$$

На рис. 1 представлена кривая сетевого тока при  $L_d \neq \infty$ . Выражения (2) получены путем разложения этой кривой в ряд Фурье.

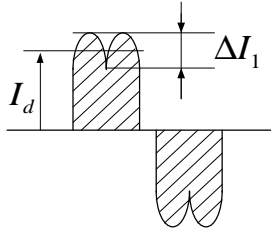


Рисунок 1 – Зависимость кривых линейных токов выпрямителя от величины  $L_d$

$$I_i = \frac{U_{d0} K_{d6}}{6w L_d I_d}, \quad (4)$$

где  $U_{d0}$  - максимальное значение выпрямленного напряжения выпрямителя;

$K_{d6}$  - коэффициент, определяющий амплитуду 6-й гармоники выпрямленного напряжения в зависимости от угла управления  $a$ .

Очевидно

$$L_d = \frac{U_{d0} K_{d6}}{6I_i w I_d} \quad (5)$$

или в относительных единицах при  $U_{d0}^* = 1$ ,  $I_d^* = 1$ .

$$L_d^* = \frac{K_{d6}}{6I_i w}. \quad (6)$$

Индуктивность контура коммутации  $L_K$  находится из известного уравнения:

$$U_d = U_{d0} \cos a - I_d X_K, \quad (7)$$

$$L_K = \frac{U_{d0} \cos a - U_d}{I_d w}. \quad (8)$$

В относительных единицах

$$L_K^* = \frac{\cos a - x}{w}, \quad (9)$$

где  $x = \frac{U_d}{U_{d0}}$ .

Например, при  $x = 0,8$  и  $a = 30^\circ$  оказывается

$$\frac{L_d}{L_K} \approx \frac{1}{2,2I_i}, \quad I_i \approx \frac{1}{2,2 \frac{L_d}{L_K}}. \quad (10)$$

Кривые зависимости  $I_5, I_7, I_{11}, I_{13}$  от величины  $\frac{L_d}{L_K}$  представлены на рис. 2. На этом же рисунке приведены зависимости действующих значений

токов 6-й и 12-й гармоник в цепи выпрямленного тока выпрямителя от значений  $\frac{L_d}{L_K}$ .

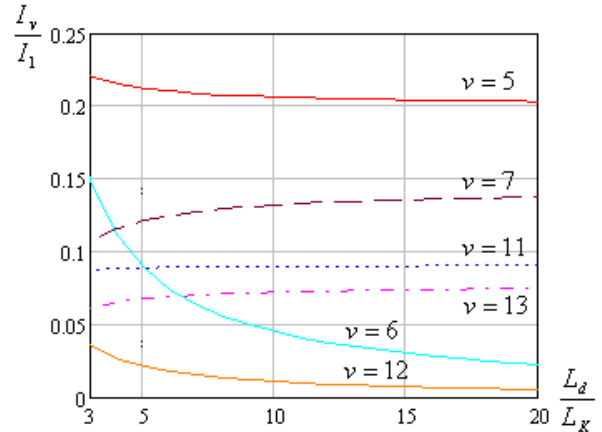


Рисунок 2 – Зависимость гармоник сетевого тока и ток нагрузки от отношения  $\frac{L_d}{L_K}$

Для 6-й гармоники относительное значение тока

$$I_{6^*}^{(u)} = I_i \quad (11)$$

Аналогичным образом был рассчитан график тока

$$I_{12^*}^{(u)} \left( \frac{L_d}{L_K} \right).$$

На практике часто используется коэффициент пульсации по напряжению  $I_u$ . Очевидно, что

$$I_u = I_i \cdot X_{d6}^*. \quad (12)$$

Как правило, 12-я гармоника тока и напряжения не учитывается.

Представленные выше кривой гармоники рассчитаны без учета активных сопротивлений; как правило, при  $\frac{L_d}{L_K} < 1$  погрешность их неучета ока-

зывается значительной (более 20 %), поэтому для указанного случая графики не построены.

Из рассмотрения кривых рис. 2 можно заключить, что при уменьшении индуктивности звена постоянного тока (или увеличении индуктивности контура коммутации, что возможно при уменьшении мощности питающего трансформатора или мощности короткого замыкания сети в узле подключения ПЧП) существенно возрастает уровень 5-й гармоники сетевого тока выпрямителя и снижается уровень 7-й, 11 и 13-я гармоника изменяется мало. Возрастание уровней 6 и 12-й гармоник свидетельствует об аналогичном росте значений интергармоник в кривой сетевого тока ПЧП.

Из (6) (в относительных единицах) при  $I_i = 0,2$  и  $K_{d6} = 0,178$

$$X_d^* = \frac{0,178}{6 \cdot 0,2} = 0,15. \quad (13)$$

Интергармоники. Схема, поясняющая принцип работы ПЧП, представлена на рис.3. Выпрямитель (В) и инвертор (И) имеют независимые системы управления. Конденсатор  $C$ , наличие которого обусловлено работой инвертора, практически не влияет на состав и уровень гармоник сетевого тока [2]. Индуктивное сопротивление  $X_d \gg R$ , поэтому в расчете спектрального состава тока в звене постоянного тока активное сопротивление не учитывается.

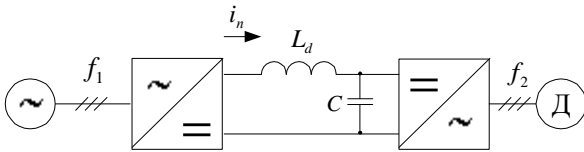


Рисунок 3 – Преобразователь частоты со звеном постоянного тока

Инвертор генерирует в звено постоянного тока гармоники порядков 6, 12, 18... Наибольшее значение имеет 6-я гармоника, амплитуда которой

$$I_6^{(u)} = \frac{U_{d0} K_{d6} \cos a}{\frac{w_2}{w_1} 6X_d}, \quad (14)$$

в относительных единицах

$$I_{6^*}^{(u)} = \frac{K_{d6} \cos a}{\frac{w_2}{w_1} 6X_d^*}, \quad (15)$$

где  $a$  - угол управления выпрямителя,  
 $b$  - угол управления инвертора.

Для оценки ее значения на стороне переменного тока, т.е. на входе выпрямителя, необходимо ток  $I_6^{(u)}$  умножить на коммутационную функцию; ею является каноническое разложение тока выпрямителя

$$i_6 = \frac{2\sqrt{3}}{p} I_d \left( \sin w_1 t - \frac{1}{5} \sin 5w_1 t - \frac{1}{7} \sin 7w_1 t + \dots \right), \quad (16)$$

или в относительных единицах с учетом только 1-й гармоники:

$$I_6^* = \frac{2\sqrt{3}}{p}. \quad (17)$$

После перемножения (15) и (17) получаем амплитудное значение ИГ  $I_{\sim}^{(u)}$  на стороне переменного тока:

$$I_{\sim}^{(u)} = \frac{2\sqrt{3} K_{d6} \cos a}{\frac{w_2}{w_1} 6X_d^*}, \quad (18)$$

или по отношению к амплитуде сетевого тока источника:

$$I_{\sim a}^{(u)} = \frac{K_{d6} \cos a}{\frac{w_2}{w_1} 6X_d^*}. \quad (19)$$

Например, при  $a = 30^\circ$ ,  $X_d^* = 0,15$  согласно (19) оказывается, что

$$I_{\sim a}^{(u)} = \frac{0,178 \cdot \cos 30}{0,6 \cdot 6 \cdot 0,15} = 0,29, \quad (20)$$

т.е. амплитуда гармоники с частотой 3,6 составляет 29% амплитуды 1-й гармоники сетевого тока.

Относительные величины канонических гармоник в рассматриваемом случае

$$\begin{aligned} I_5^* &= 0,2 + 0,9 \cdot 0,2 = 0,38; \\ I_7^* &= 0,14 - 0,21 \cdot 0,2 = 0,1; \\ I_{11}^* &= 0,09; \\ I_{13}^* &= 0,076 - 0,087 \cdot 0,2 = 0,06. \end{aligned}$$

**Выводы.** Показано, что ИГ тока соизмеримы по величине с каноническими гармониками сетевого тока ПЧП, относительное значение 5-й гармоники может существенно возрастать (почти в 2 раза), а значение 7-й - заметно уменьшаться (на 28%). Предложен инженерный метод оценки ИГ и ВГ ПЧП, основанный на использовании простых формул с учетом только первых членов ряда токов В и И.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Żeżelenko I.V., Hanzelka Z. Interharmoniczne w systemie elektroenergetycznym // VI szkoła-konferencja Elektrotechnika Prądy Niesinusoidalne. – Zielona Góra (Polska), 2002. – P. 117-142.
2. Graham A.D. Line interharmonic currents in frequency changers // Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'98). – Athens (Greece), 1998. – P. 749-754.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. - М., Энергоатомиздат, 2004.- 358 с.
4. Арриллага Д., Бредли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
5. Поссе А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока. – Л.: Энергия, 1973. – 305 с.

Статья поступила 15.01.07 р.  
Рекомендовано к печати д.т.н., проф.  
Черным А.П.