

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621 316.1

Жежеленко И.В.¹, Саенко Ю.Л.², Бараненко Т.К.³

ИНТЕРГАРМОНИКИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОС НАБЖЕНИЯ ПРОМПРЕДПРИЯТИЙ

Изложена теория возникновения интергармоник в электрических сетях с резкопеременными и нелинейными нагрузками. Проведен расчет, спектра напряжения и тока для таких нагрузок как сварка, прокатные станы, преобразователи частоты. Показано, что при наличии интергармоник спектр тока и напряжения имеет вероятностный характер.

Интергармоники - это гармонические колебания с частотами, не кратными частоте питающей сети. В амплитудно-частотном спектре они находятся между каноническими гармониками либо каноническими и неканоническими. Для интергармоник с частотой более 50 Гц иногда используется термин «дробные ультрагармоники».

Возникновение интергармоник в ряде случаев обусловлено модуляцией несинусоидальных процессов, кривые которых содержат только кратные высшие гармоники (ВГ), а также низкочастотными колебаниями, характерными для сетей с резкопеременными нагрузками. К таким потребителям относятся, в первую очередь, электродуговые сталеплавильные печи (ЭДСП),¹ сварочные установки, тиристорные электроприводы с частотным регулированием! скорости вращения электродвигателей. В большинстве случаев эти процессы носят случайный характер, - поэтому, в отличие от рассмотренных ранее ВГ, интергармоники нестабильны по частоте и амплитуде; амплитуды ВГ оказываются значительно меньше амплитуд кратных гармоник (на порядок и более); их частоты достигают] 000 Гц.

Оценить с достаточной точностью амплитуды и частоты интергармоник, обусловленных работой ЭДСП, не представляется возможным в силу нестабильности формы кривой и параметров электрической дуги. Поэтому ограничимся выводом!, имеющим чисто иллюстративный характер. Полагая, что вольтамперная характеристика электрической дуги идеальна (рис. 1), f кривую напряжения на шинах ЭДСП можно принять прямоугольно-ступенчатой с амплитудами, меняющимися от полупериода к полупериоду по случайному закону (рис.2) с равномерным распределением [1].

Гармонический анализ кривой $u(t)$, имеет смысл только на интервале стационарности T' процесса расплавления; как правило, T' составляет $n = 12+20$ периодов основной частоты. Частота этого процесса

$$\omega' = \frac{2\pi}{T'} = \frac{\omega}{n}, \quad (1)$$

где ω - частота сети; $n = \frac{\omega}{\omega'}$.

Ряд Фурье для кривой $u(t)$ на интервале T' :

$$u(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos k\omega't + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\omega't. \quad (2)$$

¹ ПГТУ, д-р. техн. наук, проф.

² ПГТУ, д-р. техн. наук, проф.

³ ПГТУ, аспирант.

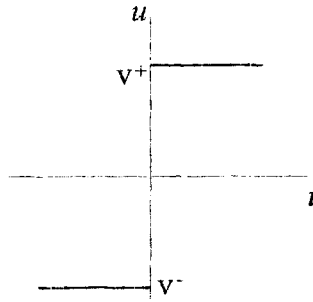


Рис.1 - Вольтамперная характеристика электрической дуги

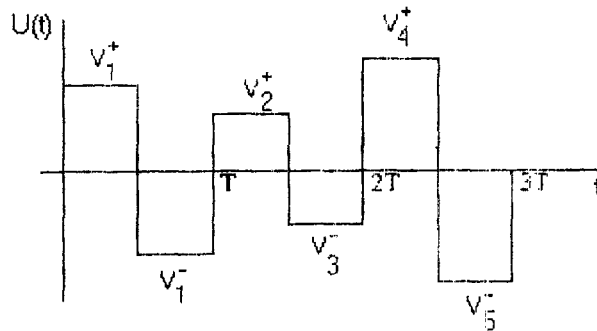


Рис.2 - Кривая напряжения на шинах ЭДСП

Коэффициенты ряда

$$A_k = \frac{1}{nk} \sum_{i=1}^n \left[u_i^+ \left(\sin\left(k\pi \frac{2i-1}{n}\right) - \sin\left(k\pi \frac{2i-2}{n}\right) \right) + u_i^- \left(\sin\left(k\pi \frac{2i-1}{n}\right) - \sin\left(k\pi \frac{2i}{n}\right) \right) \right]; \quad (3)$$

$$B_k = \frac{1}{nk} \sum_{i=1}^n \left[u_i^+ \left(\cos\left(k\pi \frac{2i-2}{n}\right) - \cos\left(k\pi \frac{2i-1}{n}\right) \right) + u_i^- \left(\cos\left(k\pi \frac{2i}{n}\right) - \cos\left(k\pi \frac{2i-1}{n}\right) \right) \right]. \quad (4)$$

На рис.3 представлен характерный амплитудный спектр напряжения, кривая которого содержит интергармоники. Результаты измерений, выполненных с помощью анализатора спектра, подтверждают наличие интергармоник, главным образом, с частотами до 150 Гц; относительные значения амплитуд отдельных интергармоник достигают 7-8 %.

При точечной сварке изделий в питающей сети возникают кратковременные (длительностью до 0,5-0,6с) импульсы тока; характерная кривая изменения тока при точечной сварке приведена на рис.4. На рис.5 приведен рассчитанный на ЭВМ амплитудный спектр тока. Можно заключить, что заметные интергармоники появляются в достаточно узком диапазоне частот 35-75 Гц, а также 150-160 Гц.

Регулирование скорости вращения электродвигателей с помощью тиристорных преобразователей частоты сопровождается появлением значительных, интергармоник в кривых сетевых токов. Частоты и амплитуды отдельных интергармоник зависят от схемы (типа) преобразователя частоты и его режима работы типа приводного электродвигателя, закона регулирования скорости и других факторов; однако во всех случаях имеет место амплитудная модуляция кривых сетевых токов. Какие-либо общие закономерности формирования амплитудного спектра интергармоник, кроме отмеченной выше модуляции, не установлены.

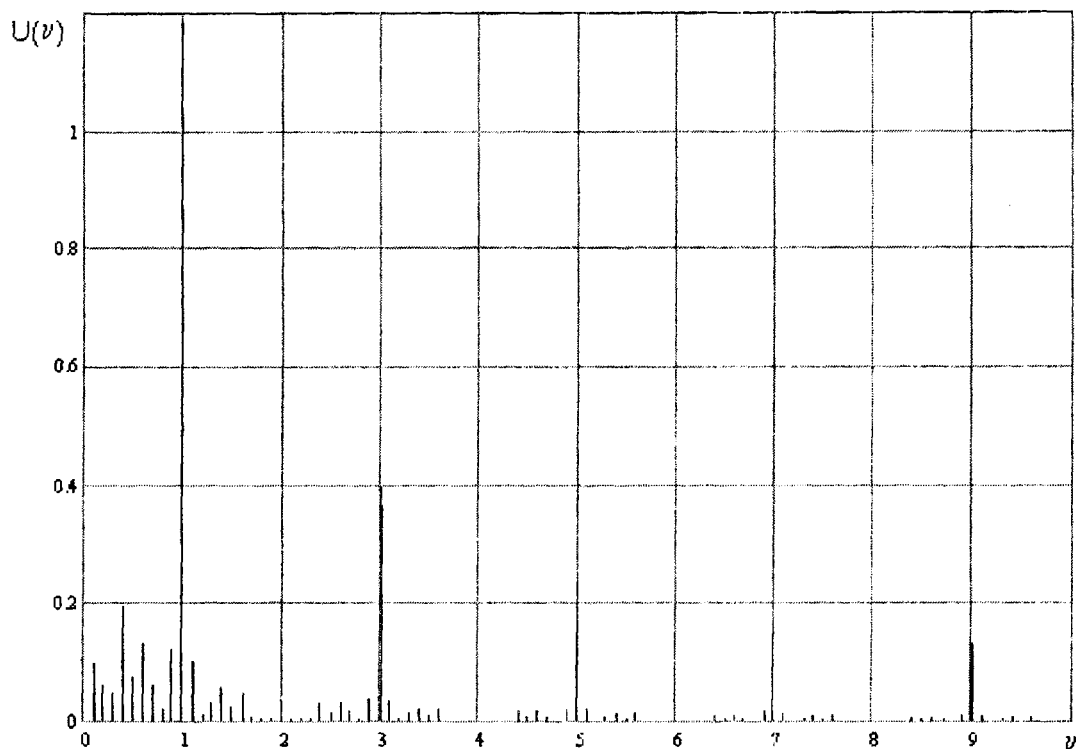


Рис.3 - Амплитудный спектр напряжения ЭДСП

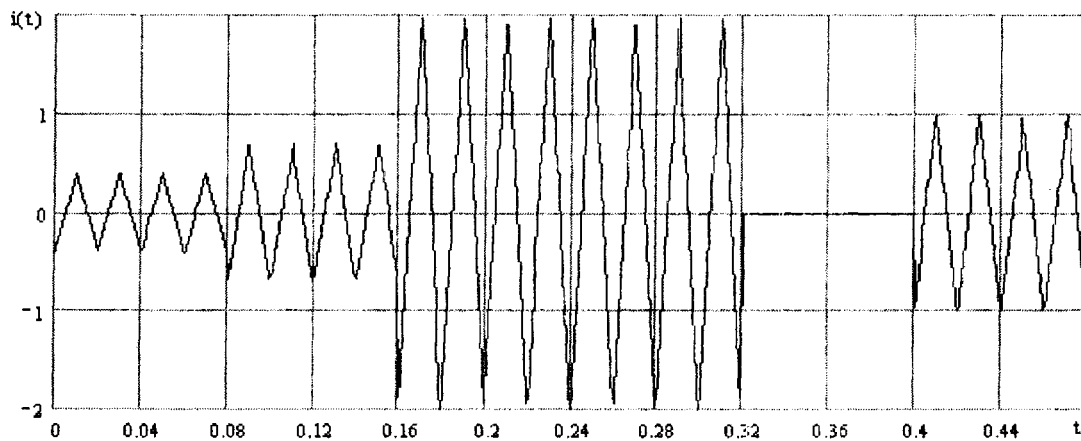


Рис.4 - Кривая тока при точечной сварке изделия

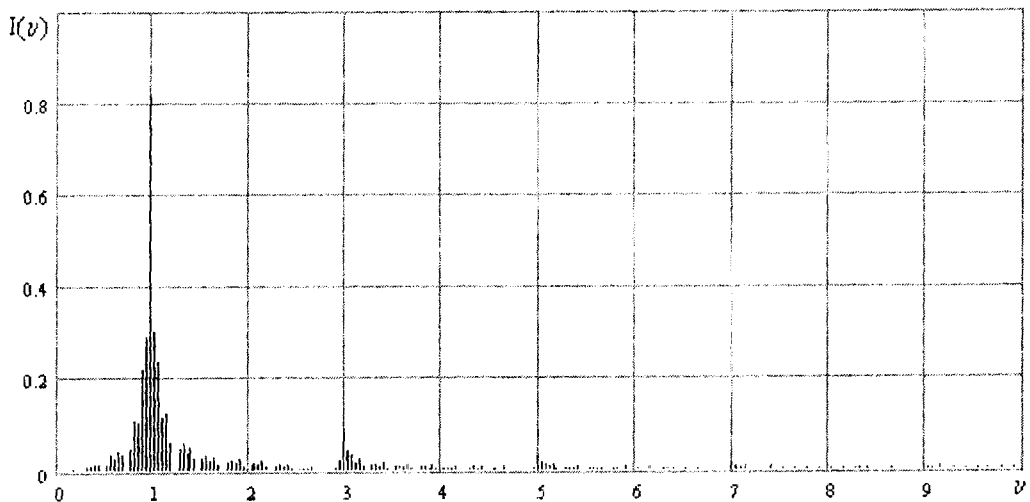


Рис.5 - Амплитудный спектр тока при точечной сварке

В случае трехфазно-однофазного преобразователя частоты, основными элементами которого являются выпрямитель и инвертор, в [2] приводится следующее выражение для мгновенного значения сетевого тока:

$$i(t) = \frac{-3 \cdot \sqrt{3}}{\pi^2} u_{lm} \left[\sum_{s=-n}^n \left[\sum_{q=-n}^n \frac{(-1)^s \cdot (-1)^q}{(6 \cdot q + 1) \cdot (6 \cdot s + 1) \cdot Z(s)} \left[\sin \left[(6 \cdot q + 6 \cdot s + 2) \cdot \omega_m \cdot t - \omega_1 \cdot t - \frac{2\pi}{3} + \phi(s) \right] + \sin \left[(6 \cdot q - 6 \cdot s) \cdot \omega_m \cdot t + \omega_1 \cdot t - \frac{2\pi}{3} - \phi(s) \right] \right] \right], \quad (5)$$

где ω_1 и ω_m — частоты питающей сети и на выходе инвертера;

$$\phi(s) = \arctan \left[\left[(6 \cdot s + 1) \cdot \left(\frac{\omega_m}{\omega_1} \right) - 1 \right] \cdot \operatorname{tg} \phi_n \right]. \quad (6)$$

На рис.6 представлена кривая сетевого тока при $\omega_m = 2n \cdot 30 \text{ с}^{-1}$. Амплитудный спектр сетевого тока представлен на рис.7. Обращает на себя внимание значительный уровень гармоник в диапазоне 100-400 Гц. Гармоники 5 и 7-го порядков представляют собою суперпозицию соответствующих канонических гармоник и гармоник, образовавшихся в результате модуляции кривой сетевого тока.

Кривые сетевых токов прокатных станов различных типов, оборудованные тиристорным электроприводом, представляют собой амплитудно-модулированные колебания; как правило, частоты модуляции находятся в пределах 5-г 10 Гц. Диапазон частот значимых интергармоник обычно находится в пределах (0,93-И,07)-50 с^{-1} . Относительные уровни их не превосходят 10%. Следует отметить, что при холостом ходе прокатных электродвигателей уровень интергармоник незначителен.

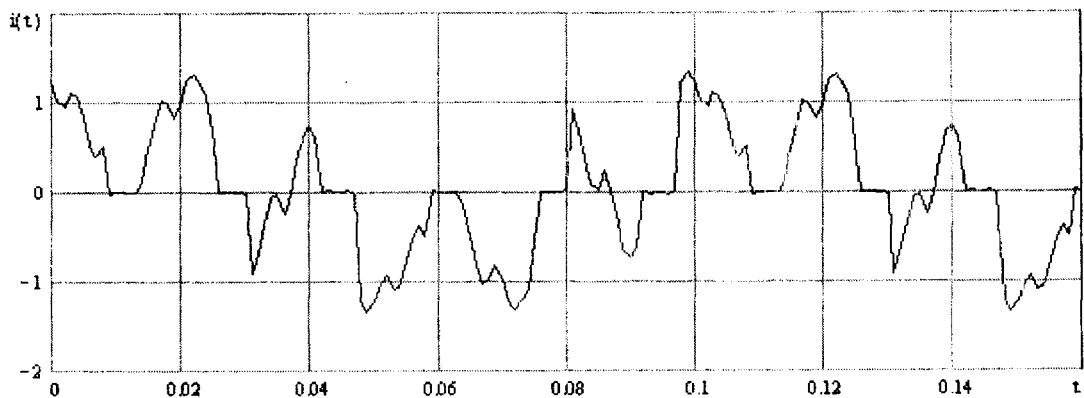


Рис.6 - Кривая сетевого тока преобразователя частоты при $\omega_m = 2\pi \cdot 30 \text{ с}^{-1}$

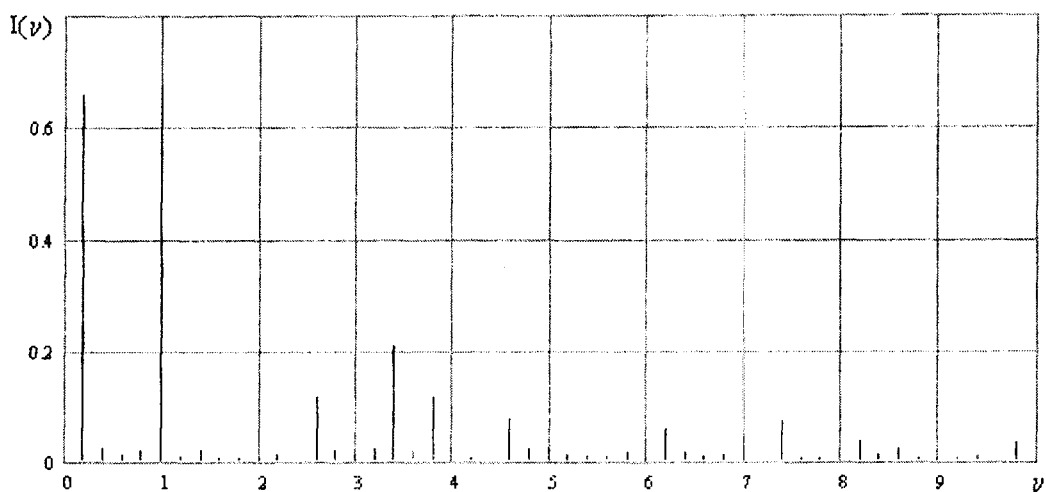


Рис.7 - Амплитудный спектр сетевого тока преобразователя частоты при $\omega_m = 2n \cdot 30 \text{ с}^{-1}$

На рис.8 представлен амплитудный спектр сетевого тока электропривода прокатного стана типа «блюминг» в диапазоне частот $(0,84 \div 1,16)\omega \text{ с}^{-1}$. В системах электроснабжения (СЭС) предприятий возможно появление V_c n_c субгармонических колебаний, порядок которых (по отношению к основной частоте) n_c ; в конкретных случаях k_c и n_c представляются рядом четных;

либо нечетных чисел. Примером могут быть колебания, порядок которых $1/2$; $1/4$; $3/2$ или $1/5$; $3/5$; $7/5$ и т.д.

Субгармонические колебания могут возникать как при последовательном, так и при параллельном соединении емкостей и трансформаторов со значительным насыщением, которое имеет место при повышенном - в сравнении с номинальным -- напряжении. Известен случай возникновения субгармоник порядков $1/5$; $3/5$ и $1/7$; $3/7$ с амплитудами до 4+5% в СЭС прокатного стана типа «блюминг», в которой была использована установка продольной емкостной компенсации питающей линии. В настоящее время в СЭС прокатных стенов продольная компенсация/применяется чрезвычайно редко. Субгармоники могут появляться в нагрузочных ветвях при малых значениях нагрузки и наличии батарей конденсаторов (БК) поперечно-емкостной компенсации в случае образования резонансного контура на частоте какой-либо субгармоники. ;

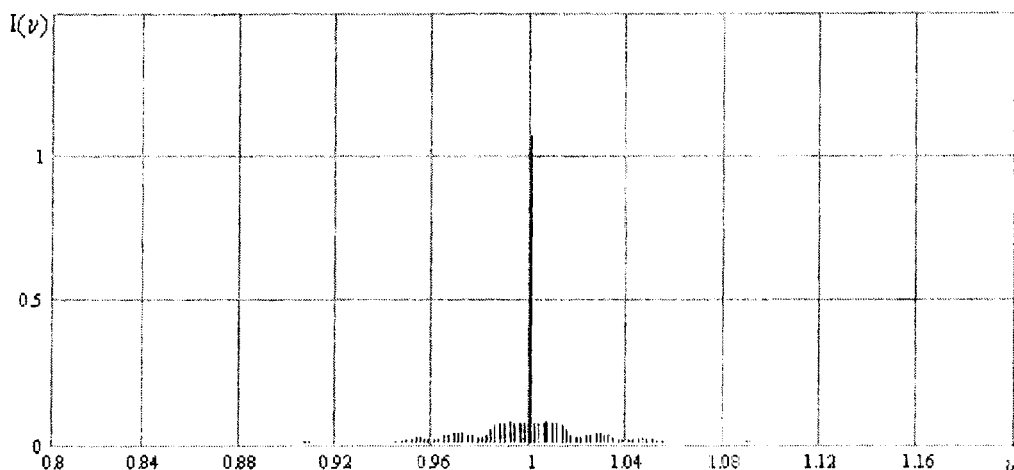


Рис.8 - Амплитудный спектр сетевого тока электропривода прокатного стана типа «блюминг»

Однако вероятность их появления весьма мала, поэтому такие явления возникают чрезвычайно редко. Появление субгармоник может привести к нерегулярным колебаниям тока нагрузки и перенапряжениям, опасным для изоляции. В промышленных СЭС такие явления наблюдались; они характерны для СЭС с протяженными холостыми или слабонагруженными линиями. При строительстве подстанций глубокого ввода 500 и 750кВ на территории предприятия и питании их по протяженным линиям, тем более с установками продольной компенсации, следует прогнозировать возможность появления субгармоник.

Перечень ссылок

1. A.David Graham. Line interharmonic currents in frequency changers. 8th international conference of harmonics and quality power// Proceedings.- Athens.- 0998. P.749-754.
2. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И. М. Основы преобразовательной техники .-М.: Высшая школа, 1980.- 423 стр.

Жежеленко Игорь Владимирович. Ректор Приазовского государственного технического университета, академик АН Высшей школы Украины, д-р техн. наук, проф., Заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий ГИ ТУ. (Основные направления научных исследований - проблемы качества электрической энергии; теория электромагнитной совместимости; вероятностные методы расчёта электрических нагрузок.

Саенко Юрий Леонидович. Д-р техн. наук, проф. кафедры электроснабжения промышленных предприятий Приазовского государственного **технического** университета, окончил Мариупольский металлургический институт в 1984 году. Основные направления научных исследований - проблемы качества **электрической** энергии; **теория** расчёта реактивной мощности; вероятностные методы расчёта электрических нагрузок.

Бараненко Татьяна Константиновна. Аспирант и ассистент кафедры **электроснабжения** промышленных предприятий Приазовского государственного технического университета, окончила Приазовский государственный **технический** университет в 1989 году. Основные направления научных исследований - проблемы качества электрической энергии.