

## 11.6 Несинусоидальность напряжения

Характерной особенностью несинусоидальности напряжения является потребление из сети несинусоидального тока при подведенном синусоидальном напряжении. Несинусоидальный ток имеет кусочно-непрерывный график на протяжении периода. Функцию, описывающую такой график можно разложить в ряд Фурье

$$f(t) = A_0 + \sum_{v=1}^n (a_v \cos v\omega t + b_v \sin v\omega t) \quad (11.13)$$

где  $n$  - номер гармоники;

$a_v, b_v$  – коэффициенты ряда Фурье;

$n=1$  - первая гармоника при  $f=50$ Гц, остальные гармоники высшие.

Коэффициенты ряда Фурье

$$a_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos v\omega t \, d\omega t \quad (11.14)$$

$$b_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin v\omega t \, d\omega t \quad (11.15)$$

Амплитуда  $n$ -ной гармоники

$$A_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2} \quad (11.16)$$

Начальная фаза гармоники

$$\varphi_v = \operatorname{argctg} \frac{b_v}{a_v} \quad (11.17)$$

Токи высших гармоник вызывают падения напряжения в элементах сети, накладываются на основную синусоиду напряжения, приводят к искажению формы кривой напряжения. При разложении несинусоидального напряжения появляются высшие гармонические составляющие вида  $v = kp \pm 1$

Гармоники  $v = kp + 1$  образуют системы ЭДС и токов прямой последовательности,

гармоники вида  $v = kp - 1$ , гармоники обратной последовательности.

Несинусоидальность напряжения характеризуется коэффициентом несинусоидальности

$$K_{НС} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^n U_v^2}}{U_{НОМ}} 100 \quad (11.18)$$

где  $U_n$  – действующее значение напряжения n-й гармоники.

К источникам несинусоидального напряжения относятся:

- преобразовательные установки различных видов (выпрямители, инверторы, частотные преобразователи, регуляторы напряжения, электроподвижной состав переменного и постоянного тока и т.д.);
- аппараты с электрической дугой или аппараты, использующие электрический разряд (дуговые печи, сварочные установки, люминесцентное освещение т.д.);
- установки с магнитными цепями, работающими в режиме насыщения (трансформаторы, дроссели с сердечником и т.д.), вращающиеся машины (генераторы, двигатели);

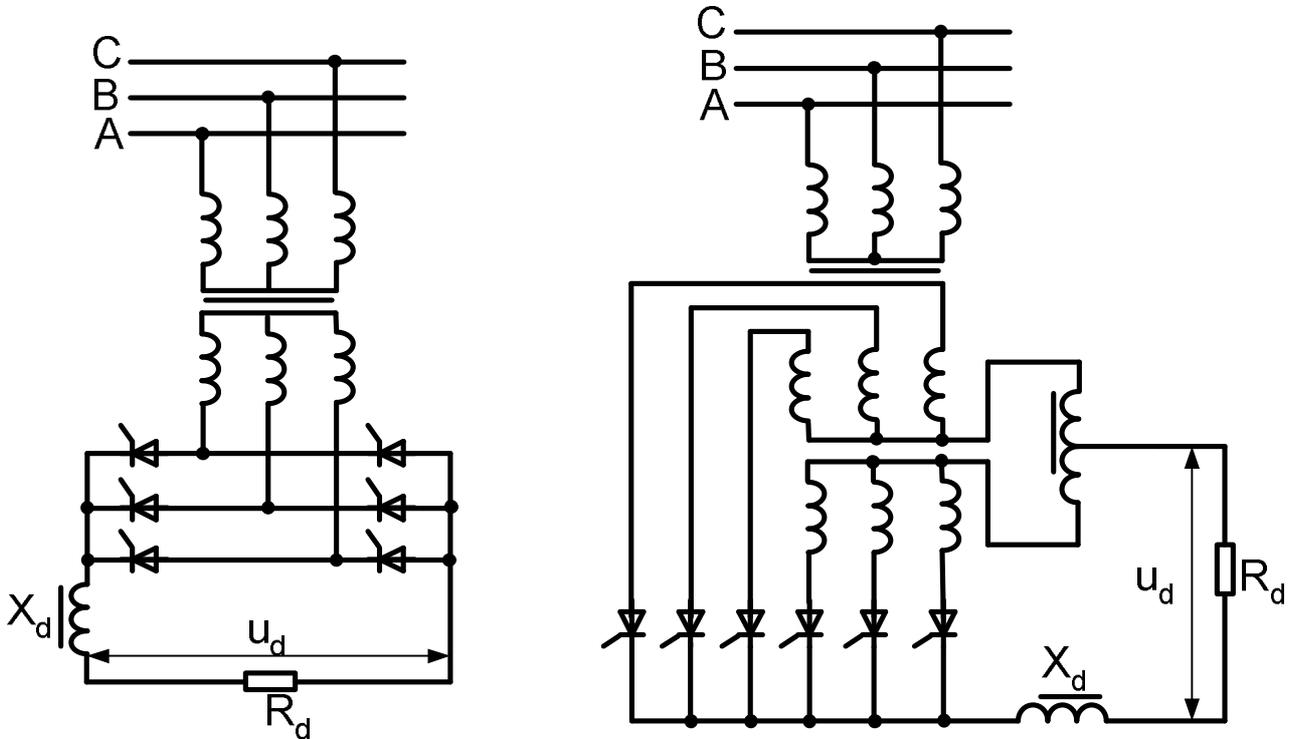


Рисунок 11.2 – Силовые схемы выпрямления  
а) трехфазная мостовая схема Ларионова, б) шестифазная мостовая

Вентильные преобразователи, как правило, имеют большие мощности и присоединяются к сети (6-10) кВ через специальные трансформаторы. Наиболее распространенные схемы соединения – трехфазная мостовая (схема Ларионова), - шестифазная с уравнительным реактором, рисунок 11.2.

В режиме ХХ вентильного преобразователя уровень высших гармоник напряжения достигает максимума, высших гармоник тока равен нулю.

В режиме КЗ при системе неограниченной мощности высшие гармоники тока имеют наибольшие значения, в кривой напряжения их нет. Для приближенных расчетов состава первичных токов при  $n \leq 19$  можно применить выражение

$$I_v = \frac{I_1}{v} \left( \frac{\sin \frac{v \cdot \gamma}{2}}{\frac{v \cdot \gamma}{2}} \right) \quad (11.19)$$

где  $\gamma$  - угол коммутации первичного тока.

Для кривой переменного тока прямоугольной формы содержание высших гармоник тока определяется по

$$I_v = \frac{I_1}{v} \quad (11.20)$$

Суммарное действие гармоник от нескольких преобразователей определяется геометрическим сложением гармоник от каждого преобразователя. Необходимая фаза гармоник определяется по

$$\varphi_v = v \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \quad (11.21)$$

где  $\alpha$  - угол управления тиристорами.

При  $n \leq 19$ ,  $10^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ ,  $\gamma \leq 15^\circ$ , погрешность не превышает 15%

Исследования сетей показали, что в амплитудных спектрах вентильных преобразователей, кроме  $n=5, 7, 11, 13, 17, 19$  есть аномальные гармоники  $n=2, 3, 4, 6, 8, 10$ .

Например, в режиме прокатки значение аномальных гармоник достигает 20%. Поэтому необходим учет всего спектра гармоник, особенно при возможности появления резонансных явлений на повышенных частотах.

Причина аномальных гармоник - асимметрия импульсов управления.

Дуговые сталеплавильные электропечи. Высшие гармоники генерируются за счет нелинейности ВАХ дуги. Формы кривых тока зависят от режима горения дуги в разные периоды плавки. В начальный период ток печи

колеблется между токами ХХ и металлического КЗ. С появлением жидкого металла плавка ведется при короткой дуге, колебания тока становятся меньше, форма кривой приближается к синусоиде. В связи с несимметрией цепей дуговых печей в токах содержатся гармоники кратные трем и аномальные. Знать спектральный анализ гармоник тока и напряжения необходимо для выбора мероприятий снижающих уровень высших гармоник и стабилизирующих дугу. Относительные значения амплитуд в гармоник определяют приближенно по (11.22)

$$I_\nu = \frac{I_1}{\nu} = \frac{k_\delta}{\nu^2}. \quad (11.22)$$

где  $k_\delta = f(\beta, x_K/r_K)$ ,

$x_K/r_K$  - - сопротивления печного трансформатора, короткой сети и системы

$\beta = \frac{E_0}{E_m}$  - отношение противо ЭДС дуги к ЭДС питающей системы

$\beta = (0,3 \div 0,4)$  и  $\beta = (0,05 \div 0,1)$  - в начале и в конце плавки.

Порядок высших гармоник  $\nu = 6k \pm 1$

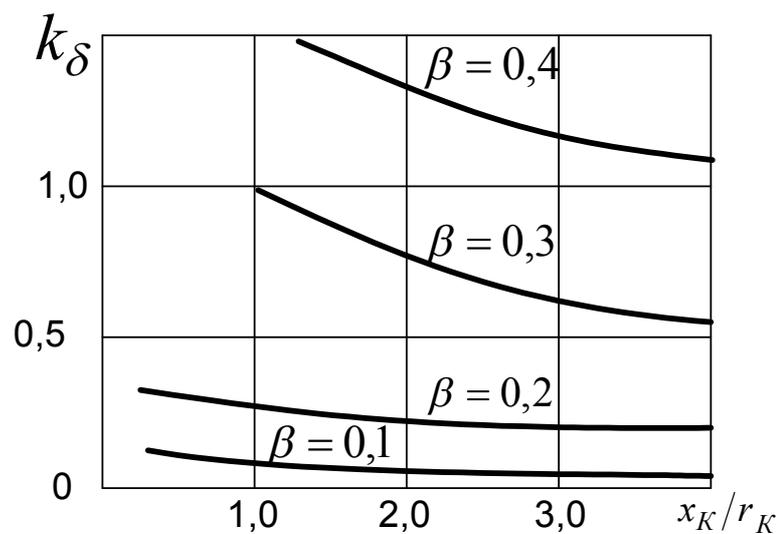


Рисунок 11. 3 - График зависимости  $k_\delta = f(\beta, x_K/r_K)$

Установки электродуговой сварки. Трехфазная мостовая схема выпрямления с неуправляемыми вентилями. Напряжение питания 380/220В, потребляемая мощность (9-31) кВА.

Генерация высших гармоник зависит от режима работы: А - режим прерывистых токов при малых нагрузках, В - режим смешанной коммутации при средних нагрузках, С - режим трехвентильной коммутации при больших нагрузках. Режим А – не характерный режим, режим В – при  $1,43 \leq k \leq 1,52$ , где

$k = \frac{E_D}{U_m}$  - противо ЭДС дуги к напряжению на выпрямительном мосте.

Режим С имеет место при пологих внешних характеристиках, когда  $I_D \geq (0,6 \div 0,65)I_{D.K}$ , где  $I_D, I_{D.K}$  - ток дуги в рабочем режиме и при КЗ.

Режим С с крутопадающими характеристиками наступает при  $I_D \geq (0,2 \div 0,3)I_{D.K}$ .

Амплитуда гармоник  $v = 6k \pm 1$ , определяется по (11.23)

$$I_v = \frac{I_1}{v^2} \quad (11.23)$$

Уровень гармоник в режиме С ниже, чем в режиме В. Причина аномальных гармоник – асимметрия углов зажигания вентиляей из-за нестабильности вентиляей и подмагничивания трансформаторов.

Применяемые устройства фазового регулирования также приводят к искажению формы тока сварочных машин. Средние значения токов нечетных гармоник

$$I_{vp} = \frac{S_{ПАСП} k_3 a}{v^2 U_H} \quad (11.24)$$

где а – коэффициент запаса, а=0,97 для первой гармоники, а=2,0 для третьей гармоники, а=2,3 для пятой гармоники, а=1,4 для седьмой гармоники.

$K_3$  – коэффициент загрузки.

Экспериментальными исследованиями в спектре гармоник сварочных машин обнаружены четные гармоники, но их влияние невелико.

## 11.7 Методы и средства снижения высших гармоник

Для снижения содержания высших гармоник в сетях применяются методы и средства:

- увеличение мощности КЗ питающей сети;

- раздельное питание приемников с нелинейной ВАХ;
- увеличение числа фаз выпрямления, эффективно при одинаковых углах управления нескольких выпрямителей
- применение фильтров высших гармоник, которые сами по себе также являются источниками реактивной мощности.

Рекомендуемые фильтры имеют недостатки – высокую стоимость, требования к настройке, так как возможна неполная фильтрация высших гармоник. Для контроля несинусоидальности применяются разные приборы, отдельные и комбинированные.