

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ В УПК С НЕЛИНЕЙНЫМ ИНДУКТИВНЫМ ШУНТИРУЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

В.Г.БАУМАН, В.М.КВЯТКОВСКИЙ,
С.А.МАКСИМОВ

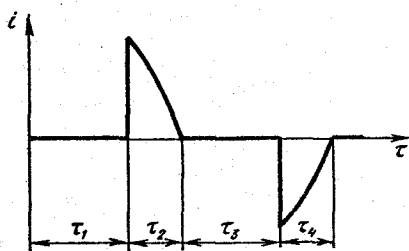


Рис.1. График тока в индуктивном шунте

Установки продольно-емкостной компенсации УПК для предотвращения нежелательных режимов иногда целесообразно шунтировать индуктивным нелинейным элементом^х.

Увеличение тока нагрузки фидера, снабженного УПК, сверх некоторого значения, приводит к возрастанию тока нелинейного шунта. Форма этого тока показана на рис.1 и описывается выражением

$$i = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq \tau \leq \tau_1 \\ \frac{x_c I_{m0}}{r} \sin \tau & \text{при } \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где x_c - емкостное сопротивление конденсаторов; r - активное сопротивление шунтирующей цепи; I_{m0} - амплитуда тока фазы; τ - текущее время в синхронных секундах; τ_1 - время, при котором происходит отпирание шунтирующей цепи; $\tau_2 = \pi - \tau_1$ - время, в течение которого шунтирующая ветвь проводит ток.

Кривая тока симметрична относительно оси времени и содержит нечетные высшие гармоники. Все высшие гармоники практически замыкаются через конденсатор, который шунтирует ветвь нагрузки и генератора. Таким образом, форма тока конденсатора также отличается от синусоидальной. Наличие высших гармоник в токе конденсатора должно быть учтено при определении в нем

^х В.Г.Бауман, В.Г.Бугаков. Энергетические показатели шахтных сетей с УПК. - Изв. вузов, Горный журн., 1974, № 8.

потерь. Спектральный состав тока шунта, таким образом, определяет и спектральный состав тока емкости УПК.

Используя комплексную форму разложения в ряд Фурье, находим спектральный состав тока нелинейного шунта

$$\dot{I}_{mk} = j \frac{2}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} i(t) e^{-jk \frac{2\pi}{T} t} dt = j \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} i(\tau) e^{-jk\tau} d\tau. \quad (2)$$

Подставив выражение тока (I) в (2), находим комплексную амплитуду k -й гармоники

$$\dot{I}_{mk} = -j \frac{1 - e^{-jk\pi}}{2\pi} \left[\frac{1 - e^{-j(1-k)\tau_2}}{1-k} + \frac{1 - e^{j(1+k)\tau_2}}{1+k} \right] \frac{x_c I_{m0}}{r}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что в составе спектра тока будут отсутствовать четные гармоники, для которых $1 - e^{-jk\pi} = 0$.

Так как для любой нечетной гармоники $1 - e^{-jk\pi} = 2$;

$$\dot{I}_{mk} = -j \frac{x_c I_{m0}}{\pi r} \left[\frac{1 - e^{-j(1-k)\tau_2}}{1-k} + \frac{1 - e^{j(1+k)\tau_2}}{1+k} \right]. \quad (4)$$

Для большей общности выразим комплексную амплитуду k гармоники в долях от величины $x_c I_{m1}/r$

$$\dot{I}_{mk}^* = \frac{\dot{I}_{mk}}{x_c I_{m1}/r} = \frac{r \dot{I}_{mk}}{x_c I_{m1}} = -j \frac{1}{\pi} \left[\frac{1 - e^{-j(1-k)\tau_2}}{1-k} + \frac{1 - e^{j(1+k)\tau_2}}{1+k} \right]. \quad (5)$$

Действительные $I_{mk}^{*'}$ и мнимые $I_{mk}^{*''}$ составляющие комплексной относительной амплитуды I_{mk}^* будут

$$I_{mk}^{*'} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\sin(k-1)\tau_2}{k-1} - \frac{\sin(k+1)\tau_2}{k+1} \right], \quad (6)$$

$$I_{mk}^{*''} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1 - \cos(k-1)\tau_2}{k-1} + \frac{1 - \cos(k+1)\tau_2}{k+1} \right]. \quad (7)$$

Модуль относительной комплексной амплитуды k гармоники

$$I_{mk}^* = \sqrt{(I_{mk}^{*'})^2 + (I_{mk}^{*''})^2}. \quad (8)$$

Относительная комплексная амплитуда первой гармоники

$$\dot{I}_{m1}^* = \frac{\tau_2 - \frac{\sin 2\tau_2}{2}}{\pi} - j \frac{1 - \cos 2\tau_2}{2\pi}. \quad (9)$$

Действительная часть выражения (9) представляет собой составляющую первой гармоники тока, совпадающую по фазе с напряжением на конденсаторе и может быть названа активной составляющей I_{ma}^* . Мнимая часть выражения (9) представляет составляющую тока, сдвинутую по фазе относительно напряжения на конденсаторе на -90° , и может быть названа реактивной составляющей I_{mr}^* .

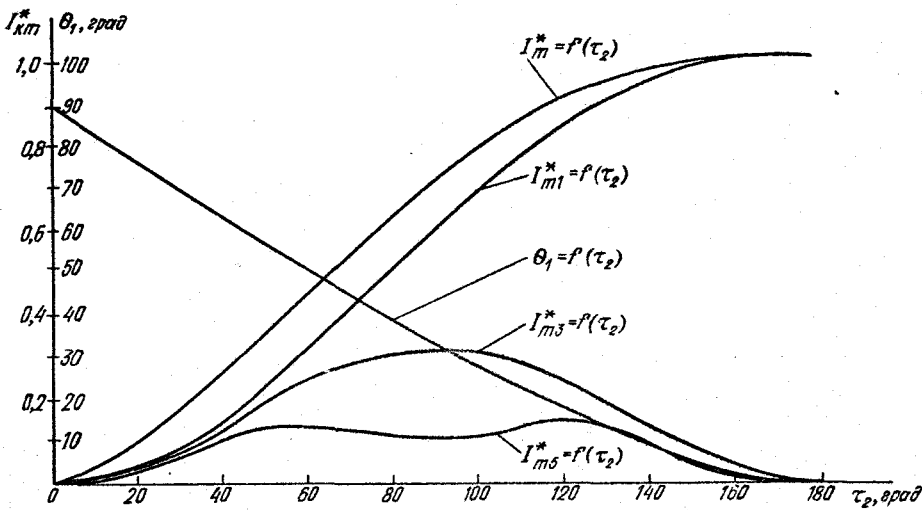


Рис.2. Относительные величины тока и его гармонических составляющих и начальной фазы первой гармоники в функции времени включения τ_2

Начальная фаза первой гармоники тока

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{I_{mp}^*}{I_{ma}^*} = -\frac{1 - \cos 2\tau_2}{\tau_2 - \frac{\sin 2\tau_2}{2}} = 2 \frac{\cos 2\tau_2 - 1}{2\tau_2 - \sin 2\tau_2}, \quad (10)$$

а амплитуда

$$I_{m1}^* = \sqrt{I_{ma}^{*2} + I_{mp}^{*2}}. \quad (11)$$

По формулам (6)-(11) проведены вычисления и на рис.2 построены графики зависимостей от τ_2 начальной фазы θ_1 первой гармоники, относительных амплитуд токов первой, третьей и пятой гармоник, а также действующего значения I_m^* .

Как следует из графиков, величина третьей гармоники максимальна при $\tau_2 = 90^\circ$, а пятой - при $\tau_2 = 45^\circ$ и $\tau_2 = 135^\circ$. При увеличении угла τ_2 содержание высших гармоник в токе сокращается.

Комплексные амплитуды первой и высших гармоник легко найти геометрическим построением в следующей последовательности.

Формулу (5) представим в виде

$$I_{mk}^* = j \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{k-1} - \frac{1}{k+1} \right] - j \frac{1}{\pi} \frac{e^{j(k-1)\tau_2}}{k-1} + j \frac{1}{\pi} \frac{e^{j(k+1)\tau_2}}{k+1}. \quad (12)$$

Как следует из выражения (12), относительная комплексная амплитуда гармоники k определяется суммой трех составляющих: а) постоянной, зависящей только от порядка гармоники

$$a_1 = j \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{k-1} - \frac{1}{k+1} \right); \quad (13)$$

б) постоянной по модулю, но поворачивающейся в положительном направлении на угол $(k-1)\tau_2$

$$\dot{a}_2 = -j \frac{1}{\pi} \frac{1}{k-1} e^{j(k-1)\tau_2}; \quad (14)$$

в) постоянной по модулю и поворачивающейся в положительном направлении на угол $(k+1)\tau_2$

$$\dot{a}_3 = j \frac{1}{\pi} \frac{1}{k+1} e^{j(k+1)\tau_2} \quad (15)$$

Так, например, для третьей гармоники имеем

$$\begin{aligned} \dot{I}_{m3}^* &= j \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{3-1} - \frac{1}{3+1} \right) - j \frac{1}{\pi} \frac{1}{3-1} e^{j(3-1)\tau_2} + j \frac{1}{\pi} \frac{1}{3+1} e^{j(3+1)\tau_2} = \\ &= j0,0795 - j0,159 e^{j2\tau_2} + j0,0795 e^{j4\tau_2} \end{aligned} \quad (16)$$

По выражению (16) на рис. 3 построен вектор относительной комплексной амплитуды третьей гармоники для $\tau_2 = 20^\circ$.

Произведя аналогичные построения по формулам (9) и (12) для различных значений τ_2 , найдем годографы векторов первой, третьей и пятой гармоник тока (рис. 4).

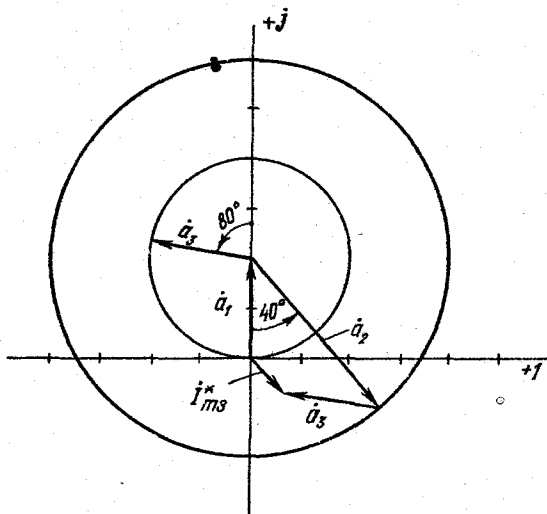


Рис. 3. Пример графического определения амплитуды третьей гармоники тока

Нелинейная катушка индуктивности, таким образом, является источником высших гармоник тока, которые, распространяясь по сети, могут вызывать искажения формы напряжения и ряд нежелательных явлений. Для оценки величин гармоник тока в различных участках распределительной рудничной сети можно использовать известные методы^х.

Как было показано ранее, нелинейная катушка генерирует нечетные гармоники $k = 3; 5; 7; 9, \dots$ Эти высшие гармоники в трехфазной цепи создадут системы токов различных последовательностей. Так, высшие гармоники

^х И.В. Жежеленко. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. М., Энергия, 1974.

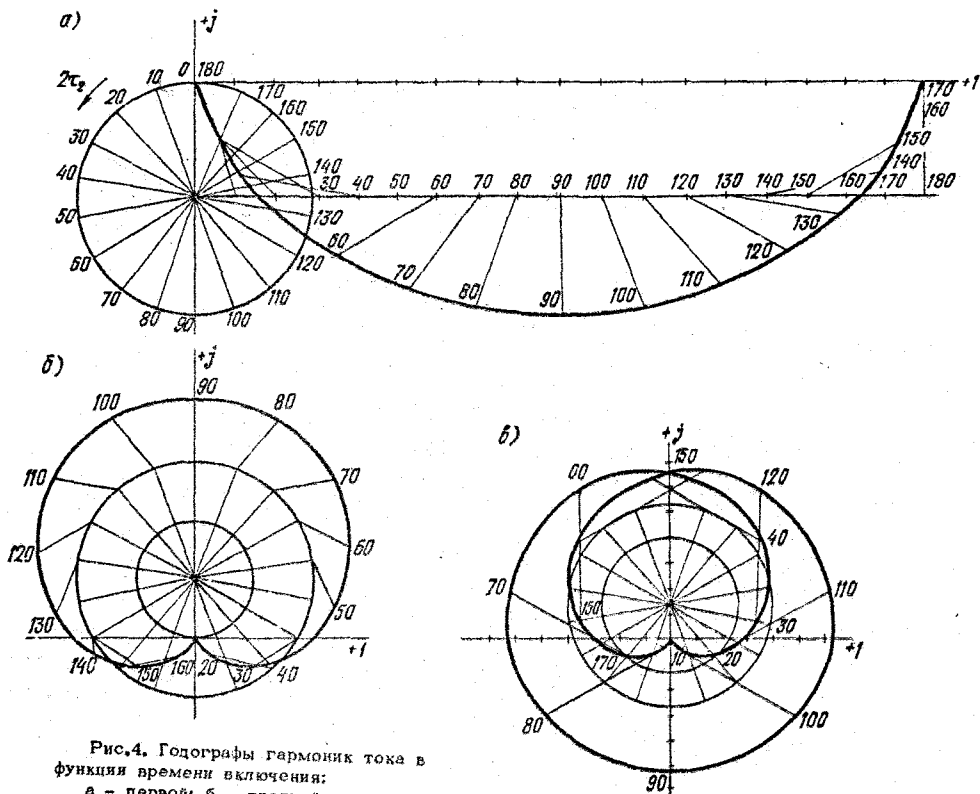


Рис.4. Годографы гармоник тока в функции времени включения:
 а - первой; б - третьей; в - пятой

тока, кратные трем, создают систему токов нулевой последовательности. Гармоники 5, 11 и т.д. создают систему токов обратной последовательности, а гармоники 7, 13 и т.д. - систему токов прямой последовательности. Каждая система токов замыкается в сети по своим путям. Так, токи высших гармоник, кратных трем, в радиальной рудничной сети с изолированной нейтралью могут замыкаться только через частичные емкости C_{11} жил кабеля на землю. Частичные емкости между жилами кабеля C_{12} не влияют на распределение тока.

Величины собственных частичных емкостей кабеля C_{11} в тысячи раз меньше емкости C батареи УПК, которая включена параллельно источнику высших гармоник тока. В силу этого токи высших гармоник, кратные трем, будут замыкаться практически только через емкости батареи УПК. Следует иметь в виду, что емкостное сопротивление батареи УПК, которое на основной частоте составляет величину порядка 0,1-0,15, на третьей гармонике будет уже 0,033-0,05, т.е. падение напряжения на нем мало.

Высшие гармоники $k = 5; 7 \dots$ будут замыкаться по тем же путям, что и первые, т.е. через емкость батареи конденсаторов УПК. Падение напряжения на батарее также мало.

Таким образом, на основании рассмотренных соотношений можно сделать заключение, что влияние высших гармоник в такой сети можно не принимать во внимание, так как источник тока высших гармоник шунтирован малым емкостным сопротивлением.