

Определение параметров уравнивающего реактора

в 12-пульсных преобразователях

В статье рассматриваются теоретические вопросы определения параметров уравнивающего реактора в 12-пульсных преобразователях и дан пример расчета.

**Александр Иванов
Владислав Арзамасов**

privod@vniir.chfts.ru

В настоящее время в полупроводниковых преобразователях постоянного и переменного тока большой мощности широкое распространение получили мостовые 12-пульсные схемы выпрямления. Они выполняются на базе трехобмоточных трехфазных трансформаторов с соединением вторичных обмоток в звезду и треугольник, выходы которых подключаются к неуправляемым выпрямителям (В) или управляемым выпрямителям (УВ), имеющим одинаковые линейные напряжения. При соединении выпрямительных мостов УВ1 и УВ2 последовательно происходит удвоение выходного напряжения отдельного выпрямителя, а при включении их параллельно через уравнивающий реактор (УР) осуществляется удвоение тока в цепи нагрузки [1]. Последняя схема находит, в частности, применение в системах тиристорного электропривода на большие токи (рис. 1). В этом случае полусумма напряжений мостов определяет выпрямленное напряжение на нагрузке:

$$u_d = 0,5[u_{d1}(\omega t) + u_{d2}(\omega t)], \quad (1)$$

а разность указанных напряжений обуславливает переменную составляющую уравнивающего напряжения

$$u_{yp}(\omega t) = u_{d2}(\omega t) - u_{d1}(\omega t), \quad (2)$$

прикладываемую к УР. Ток через реактор $i_{yp}(\omega t)$ ограничивается индуктивностью L его полной обмотки.

Следует отметить, что в литературе по силовой полупроводниковой технике расчет УР в 12-пульсных схемах выпрямления освещен недостаточно. Мы предлагаем методику расчета УР в мостовых преобразователях. При этом величина индуктивности УР определяется для двух типов преобразователей — неуправляемых и управляемых выпрямителей.

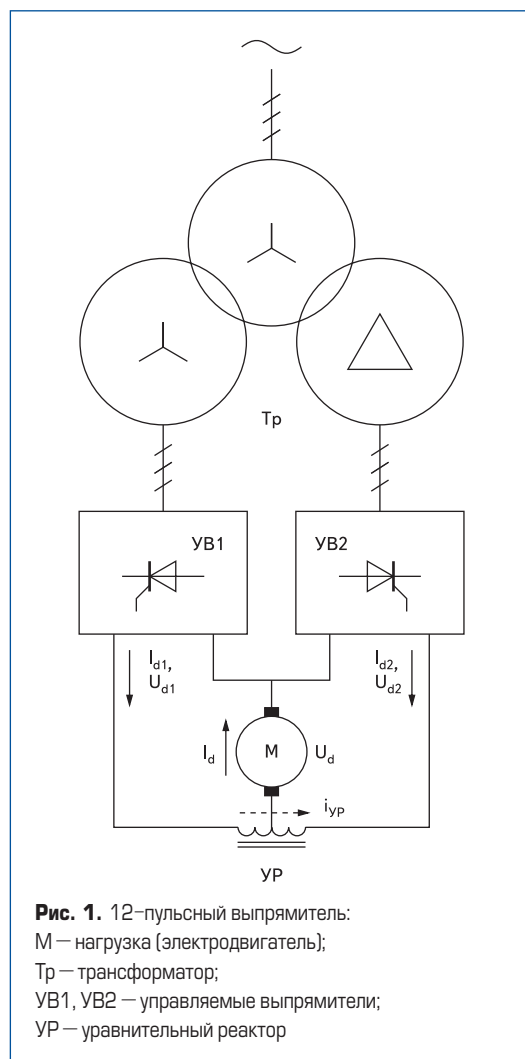
В общем случае эта задача сводится к определению индуктивности УР при работе УВ с углами регулирования $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ эл. На рис. 2 приведены временные диаграммы, левая часть которых относится к случаю $\alpha = 0$, а правая — для наиболее тяжелого режима, когда величина $u_{yp}(\omega t)$ максимальна, что имеет место при $\alpha = 90^\circ$ эл. Фазные напряжения на рис. 2а относятся к УВ1, сдвиг между $u_{d1}(\omega t)$ и $u_{d2}(\omega t)$ составляет 30° эл.

1) Случай $\alpha = 0$.

Для уравнивающего контура имеем:

$$\omega L \frac{di_{yp}}{d\omega t} = u_{yp}(\omega t), \quad (3)$$

где $\omega = 314 \text{ с}^{-1}$ — круговая частота сети с частотой 50 Гц, $u_{yp}(\omega t)$ — уравнивающее напряжение, определяемое по (2) из рис. 2 и представляющее собой



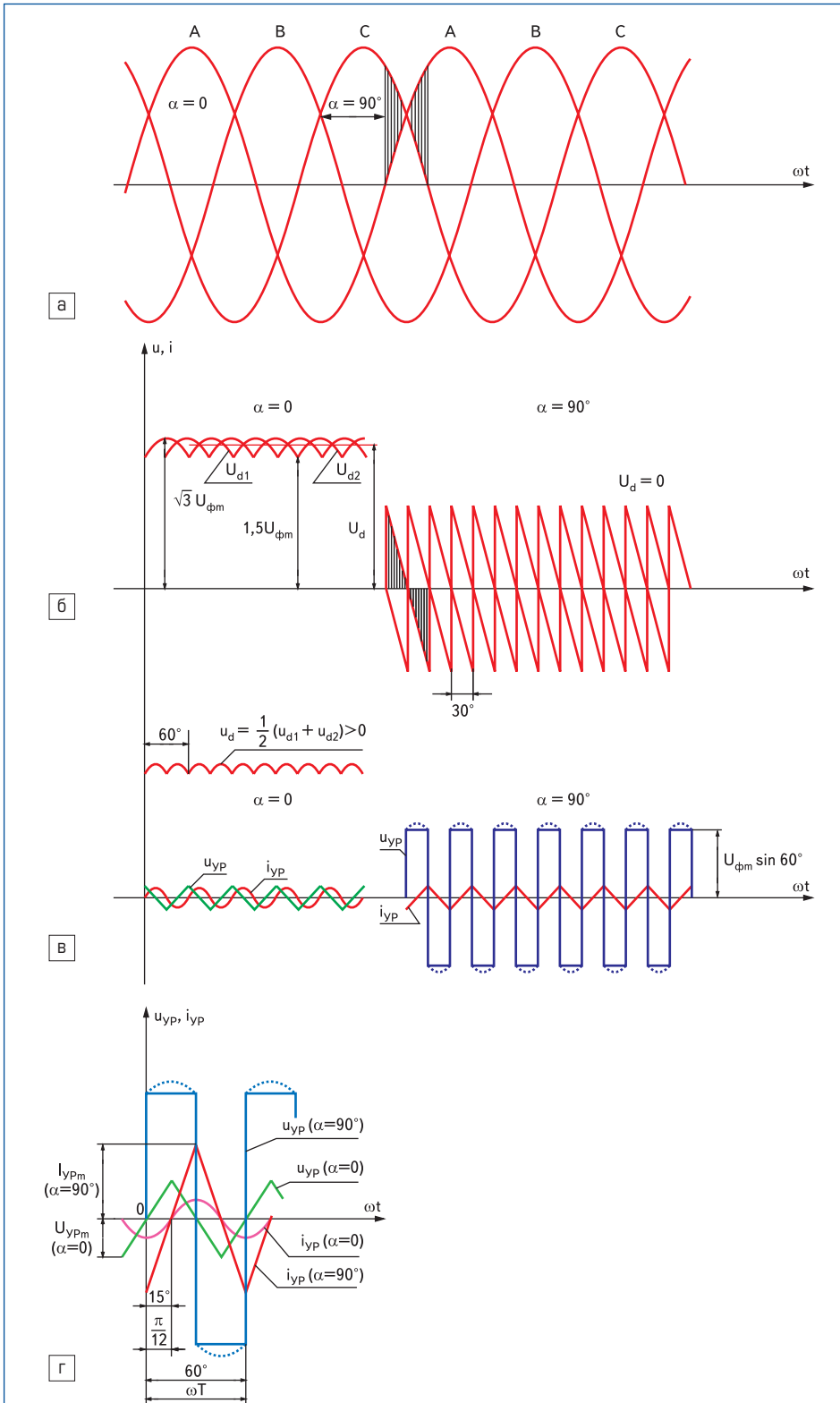


Рис. 2. Диаграммы работы: а) фазные напряжения на входе УВ1; б) выпрямленные напряжения на выходе УВ1, УВ2 для углов $\alpha = 0$ и $\alpha = 90^\circ$ эл.; в, г) уравнивающие напряжения и токи при $\alpha = 0$ и $\alpha = 90^\circ$ эл.

приближенно пилообразную кривую с частотой 300 Гц и амплитудой

$$U_{ypm} = \sqrt{3}U_{\phi,m} - 1,5U_{\phi,m} = 0,324U_{\phi} \approx 0,19U_L \quad (4)$$

где U_{ϕ} , U_L — действующие значения фазного и линейного напряжений для УВ1.

Учитывая, что величины линейных напряжений для обоих выпрямителей одинаковые, в дальнейшем будем пользоваться (4) относительно линейного напряжения.

Из (2), (4) и рис. 2г найдем уравнивающее напряжение:

а) при $-\pi/12 \leq \omega t \leq \pi/12$ для «прямой» пилы:

$$u_{yp}(\omega t) = k\omega t \quad (5)$$

где $k = U_{ypm} / (\pi/12) \approx 0,73U_L$, (6)

б) при $\pi/12 \leq \omega t \leq \pi/4$ для «обратной» пилы:

$$u_{yp}(\omega t) = U_{ypm} - k(\omega t - \pi/12) = 2U_{ypm} - k\omega t \quad (7)$$

С учетом вышеизложенного из (5–7) окончательно определим:

- для «прямой» пилы:
$$u_{yp} = U_{ypm} [\omega t / (\pi/12)], \quad (8)$$

- для «обратной» пилы:
$$u_{yp} = U_{ypm}(2 - (\omega t / (\pi/12))). \quad (9)$$

Из (3), (4) и (8) определим уравнивательный ток i_{yp} и его амплитудное значение I_{ypm} на участке $0 \leq \omega t \leq \pi/12$:

$$\int_{-i_{yp}}^0 di_{yp} = \frac{1}{\omega L} \int_{\omega t}^{\pi/12} u_{yp}(\omega t) d\omega t = \frac{U_{ypm}}{\frac{\pi}{12}\omega L} \int_{\omega t}^{\pi/12} \frac{(\omega t)^2}{2} d\omega t = \frac{0,19U_L}{\frac{\pi}{6}\omega L} \left[\left(\frac{\pi}{12} \right)^2 - (\omega t)^2 \right]$$

Окончательно имеем:

$$i_{yp} = \frac{0,36U_L}{\omega L} \left[(\omega t)^2 - \left(\frac{\pi}{12} \right)^2 \right] < 0 \quad (10)$$

откуда при $\omega t = 0$

$$I_{ypm} \approx 8 \times 10^{-5} (U_L / L) \quad (11)$$

Аналогично с учетом (9) можно получить кривую $i_{yp}(\omega t)$ на участке $\pi/12 \leq \omega t \leq \pi/6$:

$$i_{yp} = \frac{0,19U_L}{\omega L} \left[2\omega t - \frac{(\omega t)^2}{\pi/6} - \frac{\pi}{8} \right] > 0 \quad (12)$$

Из (12) следует, что при $\omega t = \pi/12$ $i_{yp} = 0$, а при $\omega t = \pi/6$ $i_{yp} = I_{ypm}$ и соответствует (11).

Задаваясь значением амплитуды уравнивательного тока I_{ypm} из (11), можно определить требуемую индуктивность УР для данного случая $\alpha = 0$:

$$L \approx 0,08 (U_L / I_{ypm}) \text{ [мГн]} \quad (13)$$

2) Случай $\alpha = 90^\circ$ эл. (наихудший по условиям работы УР).

Для данного случая, как и для предыдущего, в правой части рис. 2б приведены приближенно линеаризованные кривые $u_{d1}(\omega t)$ и $u_{d2}(\omega t)$: первая получена из рис. 2а, вторая — путем смещения первой на 30° эл. вправо. Вычитанием кривых друг из друга определяется диаграмма уравнивающего напряжения, имеющая практически прямоугольную форму с частотой 300 Гц и амплитудой:

$$u_{yp} = U_{ypm} = u_{d2}(\omega t) - u_{d1}(\omega t) \approx 0,5\sqrt{3}U_{\phi m} = 0,5\sqrt{2}U_L \approx 0,7U_L \quad (14)$$

Пунктиром показана диаграмма с учетом синусоидальности указанных кривых.

Решая (3) и (14) аналогично вышеизложенному, найдем:

а) на участке $0 \leq \omega t \leq \pi/12$ (рис. 2г)

$$i_{yp} = \frac{U_{ypm}}{\omega L} \int_0^{\pi/12} d\omega t = \frac{0,7U_{л}}{\omega L} \left(\omega t - \frac{\pi}{12} \right) < 0, \quad (15)$$

б) на участке $\pi/12 \leq \omega t \leq \pi/6$

$$i_{yp} = \frac{U_{ypm}}{\omega L} \int_{\pi/12}^{\omega t} d\omega t = \frac{0,7U_{л}}{\omega L} \left(\omega t - \frac{\pi}{12} \right) > 0. \quad (16)$$

Как следует из сравнения (10), (12) и (15), (16), функции $i_{yp}(\omega t)$ не являются синусоидальными, отличаются по форме и величине, но являются симметричными относительно точки $\omega t = \pi/12$ (рис. 2г).

Максимальная величина i_{yp} по (15) и (16) соответствует точкам $\omega t = 0$ и $\omega t = \pi/6$ и составляет:

$$I_{ypm} = \frac{0,7U_{л}\pi}{12\omega L} \approx 5,8 \times 10^{-4} \frac{U_{л}}{L}. \quad (17)$$

Для заданного значения I_{ypm} из (17) найдем:

$$L = 0,58 (U_{л}/I_{ypm}) \text{ [мГн]}. \quad (18)$$

Из (11) и (18) определим соотношение индуктивностей при $I_{ypm} = \text{const}$ для 12-пульсных мостовых диодных (В) и тиристорных выпрямителей (УВ) (соответственно при $\alpha = 0$ и $\alpha = 90^\circ$ эл.):

$$L_{yp,UB}/L_{yp,B} = 0,58/0,08 \approx 7,3. \quad (19)$$

Соотношение максимальных значений уравнивающих напряжений для тех же выпрямителей по (4) и (14) составляет:

$$U_{ypm,UB}/U_{ypm,B} = 0,7/0,19 \approx 3,7.$$

Определим в указанных ранее режимах типовую мощность $S_{m,yp}$ УР, которая зависит от действующих значений тока и напряжения

в цепи УР. Поскольку данный реактор в отличие от трансформатора содержит одну обмотку, то его установленная мощность равна половине мощности эквивалентного трансформатора, то есть:

$$S_{m,yp} = 0,5U_{yp}I_{yp,\Sigma}, \quad (20)$$

где $I_{yp,\Sigma}$ — действующее значение суммарного тока нагрузки и уравнительного; U_{yp} — действующее значение уравнительного напряжения.

В данном случае ток через УР с учетом нагрузки составляет:

$$I_{yp,\Sigma} \approx 0,5I_d \quad (21)$$

где I_d — ток нагрузки, который при расчете мощности $S_{m,yp}$ принимаем номинальным, а уравнительным током пренебрегаем ввиду его малости.

Для диодного выпрямителя ($\alpha = 0$) величину U_{yp} определим с учетом (4) и (8) из рис. 2г:

$$U_{yp,B} = \sqrt{\frac{4}{\omega T} \int_0^{\omega T/4} u_{yp}^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{12}{\pi} \int_0^{\pi/12} 0,19^2 u_{л}^2 \left(\frac{\omega t}{\pi/12} \right)^2 d\omega t} \approx 0,11U_{л}. \quad (22)$$

Для управляемого выпрямителя при $\alpha = 90^\circ$ эл. из рис. 2г имеем:

$$U_{yp,UB} = U_{ypm} = 0,7U_{л}. \quad (23)$$

Соотношение между величинами по (22) и (23)

$$U_{yp,UB}/U_{yp,B} = 0,7/0,11 \approx 6,36. \quad (24)$$

Из (20–24) следует, что соотношение между типовыми мощностями для УР в режимах $\alpha = 0$ и $\alpha = 90^\circ$ эл. будет соответствовать (24), то есть

$$S_{m,yp,UB}/S_{m,yp,B} = 6,36. \quad (25)$$

Отношение типовой мощности УР к мощности нагрузки составляет:

• для В ($\alpha = 0$) из (20–22)

$$\frac{S_{m,yp,B}}{P_d} = \frac{0,5 \times 0,11U_{л} \times 0,5I_d}{1,35U_{л}I_d} \approx 0,02. \quad (26)$$

• для УВ ($\alpha = 90^\circ$ эл.) из (25), (26)

$$S_{m,yp,UB}/P_d = 6,36 \times 0,02 \approx 0,13, \quad (27)$$

где $P_d = U_d I_d = 1,35U_{л} I_d$ — мощность нагрузки В (УВ).

Пример. Рассчитать L_{yp} и $S_{m,yp}$ для выпрямителя и управляемого выпрямителя при $U_{л} = 500$ В, $I_d = 2$ кА, $I_{ypm} = 100$ А (где I_{ypm} — по рис. 2г).

Из (13) и (26) для В ($\alpha = 0$) соответственно найдем:

$$L_{yp,B} \approx 0,08 \times (500/100) = 0,4 \text{ мГн}, \\ S_{m,yp,B} \approx 0,02 \times 1,35 \times U_{л} I_d = 0,02 \times 1,35 \times 500 \times 2000 = 27 \text{ кВА}.$$

Из (18) и (27) для УВ соответственно получим для наиболее тяжелого режима $\alpha = 90^\circ$ эл.:

$$L_{yp,UB} = 0,58 \times (500/100) \times 3 \text{ мГн}, \\ S_{m,yp,UB} \approx 0,13 \times 1,35 \times U_{л} I_d = 0,13 \times 1,35 \times 500 \times 2000 = 175 \text{ кВА}.$$

Для УВ, работающего в перемежающихся режимах с углами от $\alpha = 0$ до $\alpha = 90^\circ$ эл. можно практически принять среднюю величину мощности:

$$S_{m,cp} = (175 + 27)/2 \approx 101 \text{ кВА}.$$

Литература

1. Полупроводниковые выпрямители. Под ред. Ф. И. Ковалева и Г. П. Мостковой. М.: Энергия, 1978.
2. Чиженко И. М., Руденко В. С., Сенько В. И. Основы преобразовательной техники. М.: Энергия, 1981.