

Секция 7. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3

РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ЕМКОСТНЫМ ФИЛЬТРОМ

Терентьев А.А.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент БЛАДЫКО Ю.В.

В настоящей работе приводится алгоритм расчета среднего значения выпрямленного сглаженного напряжения с учетом конечных значений емкости фильтра и сопротивлений трансформатора и диодов (рисунок 1).

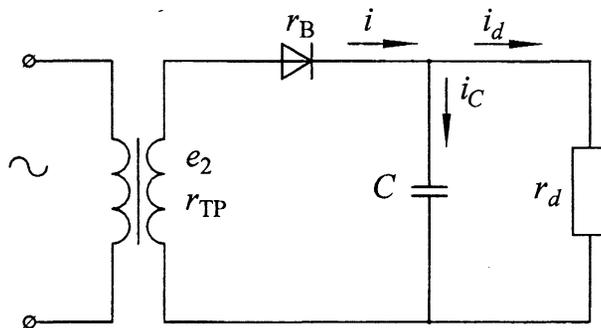


Рис. 1. Расчетная схема выпрямителя с емкостным фильтром

Форма напряжения на выходе выпрямителя при отсутствии емкости (случай чисто активной нагрузки) представляет собой пульсирующую кривую, состоящую из положительных полупериодов синусоиды. При включении на выходе выпрямителя емкости C происходит периодический заряд емкости током трансформатора и последующий ее разряд на нагрузочное сопротивление r_d (рисунок 2).

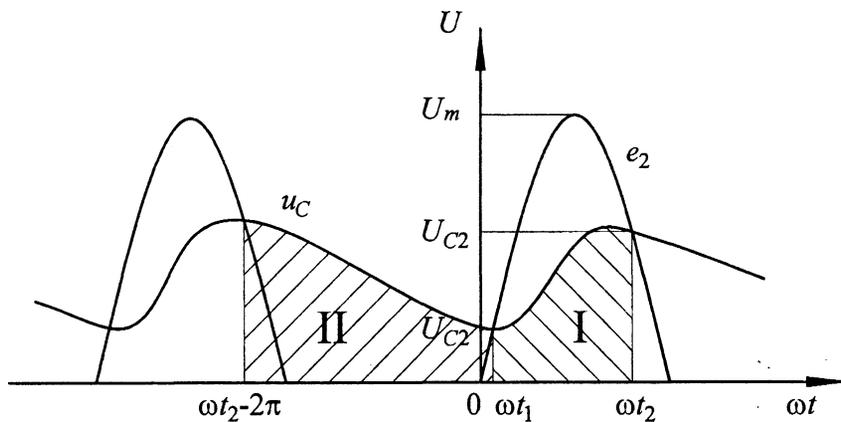


Рис. 2. Сглаживание емкостным фильтром при однополупериодном выпрямлении

В момент времени $t_1 - t_2$ (участок I на рисунке 2) мгновенные напряжения u_d на нагрузке по величине меньше, чем ЭДС e_2 вторичной обмотки трансформатора. Вследствие этого к вентиллю приложено напряжение в проводящем направлении и в цепи выпрямителя протекает ток i . Ток выпрямителя распределяется между сопротивлением нагрузки и конденсатором C , заряжая последний. Напряжение на конденсаторе

u_C в процессе заряда увеличивается, но все время остается меньше ЭДС e_2 вторичной обмотки трансформатора из-за потерь напряжения на внутренних сопротивлениях трансформатора и вентиля от зарядного тока.

В момент времени t_2 напряжение на конденсаторе становится равным ЭДС вторичной обмотки, ток через вентиль спадает до нуля. Заряд конденсатора прекращается, и начинается его разряд на сопротивление нагрузки r_d (участок II на рисунке 2). Напряжение на конденсаторе при разряде спадает по экспоненциальной кривой, наклон которой зависит от величины сопротивления нагрузки r_d в емкости конденсатора C .

Разряд конденсатора длится до тех пор, пока ЭДС вторичной обмотки трансформатора вновь не становится равной напряжению на конденсаторе. В следующие моменты времени ЭДС вторичной обмотки превышает напряжение на конденсаторе, и процесс заряда конденсатора повторяется.

Для упрощения расчета будем считать внутреннее сопротивление вентиля r_B постоянным, не зависящим от тока, а сопротивление трансформатора, приведенного ко вторичной обмотке, чисто активным:

$$r_{TP} = r_1 + r_2,$$

где r_1 и r_2 – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Сопротивление фазы выпрямителя равно сумме внутренних сопротивлений вентиля и трансформатора:

$$r = \frac{m_1}{m_2} r_B + r_{TP},$$

где m_1 – количество вентилях, включенных последовательно (например, при мостовой схеме $m_1 = 2$);

m_2 – количество вентилях, включенных параллельно.

ЭДС вторичной обмотки трансформатора изменяется по синусоидальному закону

$$e_2 = U_m \sin \omega t.$$

Проанализируем процесс заряда конденсатора (участок I на рисунке 2).

Ток выпрямителя

$$i = i_C + i_d, \quad (1)$$

где $i_C = C \frac{du_C}{dt}$ – ток через емкость;

$i_d = \frac{u_C}{r_d}$ – ток через нагрузку.

Напряжение на конденсаторе (и на нагрузке)

$$u_C = e_2 - ir. \quad (2)$$

Подставим (1) в (2), получим

$$u_C = e_2 - \left(C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{r_d} \right) r$$

или

$$Cr \frac{du_C}{dt} + u_C \left(\frac{r}{r_d} + 1 \right) - U_m \sin \omega t = 0. \quad (3)$$

Найдем закон изменения u_C , решив дифференциальное уравнение (3):

$$u_C = u_{C \text{ пр}} + u_{C \text{ сб}}, \quad (4)$$

где $u_{C\text{ пр}}$, $u_{C\text{ св}}$ – соответственно принужденная и свободная составляющая напряжения на конденсаторе.

Принужденная составляющая u_C

$$u_{C\text{ пр}} = e_2 - i_\infty r = U_m \sin \omega t - \frac{U_m r}{Z} \sin(\omega t + \varphi) = U_{Cm} \sin(\omega t - \beta), \quad (5)$$

где $i_\infty = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \varphi)$ – ток установившегося режима (при $t = \infty$);

$$Z = \sqrt{(r + r_\partial)^2 + X_\partial^2};$$

$$r_\partial = \frac{1}{y^2};$$

$$X_\partial = \frac{1}{y^2};$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{1}{r_d}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C}\right)^2};$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C};$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_\partial}{r + r_\partial};$$

$$U_{Cm} = U_m \sqrt{1 - 2 \frac{r}{Z} \cos \varphi + \left(\frac{r}{Z}\right)^2};$$

$$\beta = \arctg \frac{\frac{r}{Z} \sin \varphi}{1 - \frac{r}{Z} \cos \varphi}.$$

Свободная составляющая u_C изменяется по экспоненциальному закону

$$u_{C\text{ св}} = Ae^{p_1(t-t_1)} = Ae^{-\frac{t-t_1}{\tau}}, \quad (6)$$

где p_1 – корень характеристического уравнения, получаемого из (3):

$$Crp_1 u_{C\text{ св}} + u_{C\text{ св}} \left(\frac{r}{r_d} + 1 \right) = 0,$$

откуда

$$p_1 = \frac{\frac{r}{r_d} + 1}{Cr} = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{r_d} + \frac{1}{r} \right).$$

Постоянная времени цепи заряда конденсатора

$$\tau = -\frac{1}{p_1} = \frac{r_d r C}{r_d + r}.$$

Подставляя (5) и (6) в (4), получаем формулу напряжения на конденсаторе в процессе его заряда

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t - \beta) + Ae^{-\frac{\omega t - \omega t_1}{\omega \tau}}, \quad (7)$$

где

$$A = U_{Cm} \sin(\beta - \omega t_1) + U_{C_1};$$

U_{C_1} – напряжение на конденсаторе в момент времени t_1 ,

$$U_{C_1} = U_m \sin(\omega t_1). \quad (8)$$

Момент времени t_2 определяется из условия, что ток выпрямителя в этот момент времени равен нулю. Найдём t_2 , подставив (7) в (1):

$$i(t_2) = C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{r_d} = \omega C U_{Cm} \cos(\omega t_2 - \beta) - \frac{1}{\tau} C A e^{-\frac{\omega t_2 - \omega t_1}{\omega \tau}} + \\ + \frac{U_{Cm}}{r_d} \sin(\omega t_2 - \beta) + \frac{A}{r_d} e^{-\frac{\omega t_2 - \omega t_1}{\omega \tau}} = 0,$$

откуда получаем трансцендентное уравнение

$$\omega t_2 = \pi + \beta + \gamma - \arcsin \left(\frac{A}{B} e^{-\frac{\omega t_2 - \omega t_1}{\omega \tau}} \right), \quad (9)$$

где

$$B = U_{Cm} \omega r; \\ \gamma = \arctg(\omega C r_d).$$

В момент времени t_2 напряжение на конденсаторе достигнет величины

$$U_{C_2} = U_m \sin(\omega t_2),$$

вентиль запирается, начинается процесс разряда конденсатора на сопротивление r_d (участок II рисунок 2).

Напряжение на конденсаторе при его разряде изменяется экспоненциально:

$$u_C = U_{C_2} e^{-\frac{\frac{2\pi}{m} - \omega t_2 + \omega t_1}{\omega C r_d}}, \quad (10)$$

где m – параметр выпрямителя, равный количеству полупериодов тока, пропускаемых вентилями через нагрузку в течение периода: $m = 1$ для схем однополупериодного выпрямления; $m = 2$ для схем двухполупериодного выпрямления.

Разряд конденсатора заканчивается в момент времени t_1 . Найдём его, приняв (8) и (10) для $t = t_1$

$$U_{C_2} e^{-\frac{\frac{2\pi}{m} - \omega t_2 + \omega t_1}{\omega C r_d}} = U_m \sin(\omega t_1),$$

откуда

$$\omega t_1 = \arcsin \left(\frac{U_{C_2}}{U_m} e^{-\frac{\frac{2\pi}{m} - \omega t_2 + \omega t_1}{\omega C r_d}} \right). \quad (11)$$

Уравнение (11) является трансцендентным и подобно уравнению (9) записано в виде, удобном для решения методом простой итерации.

Среднее значение напряжения:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{m}{2\pi} \int_{\omega t_1}^{\omega t_2} U_{C_1} d(\omega t) + \frac{m}{2\pi} \int_{\omega t_2 - 2\pi}^{\omega t_1} U_{C_2} d(\omega t) = \\
 &= \frac{m}{2\pi} 2U_{Cm} \sin\left(\frac{\omega t_1 + \omega t_2}{2} - \beta\right) \sin\left(\frac{\omega t_2 - \omega t_1}{2}\right) + \\
 &+ \frac{m}{2\pi} \left[\omega \tau A \left(1 - e^{-\frac{\omega t_2 - \omega t_1}{\omega \tau}}\right) + \omega Cr_d U_{C_2} \left(1 - e^{-\frac{\frac{2\pi}{m} - \omega t_2 + \omega t_1}{\omega Cr_d}}\right) \right].
 \end{aligned}$$

Для нахождения U_d необходимо предварительно найти ωt_1 и ωt_2 путём совместного решения трансцендентных уравнений (9) и (11). Решение их вручную громоздко, поэтому была составлена программа расчёта U_d на ПЭВМ.

УДК 621.3

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Воробей А.М.

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент СОНЧИК Л.И.

С ростом масштабов производства промышленной продукции все более актуальной является проблема эффективного использования электроэнергии. Одним из возможных путей решения этой проблемы является анализ причин, влияющих на увеличение потерь электрической энергии в электролизных и электротермических установках, и разработка на этой основе организационно-технических мероприятий с целью оптимизации показателей технологического процесса обработки материалов.

Эффективность использования электроэнергии в электротермических установках зависит от соблюдения параметров технологического процесса.

Потери электрической энергии в плавильных и термических электроустановках вследствие частичной загрузки печи в соответствии с технологической картой рассчитывается по формуле:

$$\Delta W = (W_r - W_d) G_{\Pi} K_3, \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где W_r – удельный расход электрической энергии на плавку металла при частичной загрузке печи, кВт·ч/т;

W_d – директивный удельный расход электрической энергии на плавку металла при полной загрузке печи, кВт·ч/т, принимается по паспортным данным или из опыта эксплуатации печи;

G_{Π} – емкость печи, т, принимается по паспортным данным;

K_3 – коэффициент загрузки печи.

Удельный расход электрической энергии на плавку металла при частичной загрузке печи рассчитывается по формуле:

$$W_r = \frac{W_r}{G_r}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/т},$$