

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕКРЫТИЯ НА ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ТОКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ С ВЕНТИЛЯМИ

В. А. ШУБЕНКО

(Представлено научным семинаром энергетического факультета).

При проектировании преобразовательных установок всегда бывает необходимо определять действующее значение тока в обмотках трансформатора и вентилях. Значением этого тока определяется мощность трансформатора, питающего схему, конструктивные размеры вентиля и др.

Как известно, коммутация токов через вентили, имеющая место в многофазных схемах преобразования, оказывает влияние как на форму кривой этих токов, так и на их действующее значение.

Длительность коммутации зависит от величины индуктивности в цепи тока, от величины преобразуемого тока, а также от угла зажигания вентилей в случае регулируемого с помощью сеток преобразователя.

Чаще всего действующее значение тока определяют без учета влияния коммутации. Однако в связи с появлением мощных преобразовательных установок с трансформаторами, имеющими значительные сопротивления рассеяния, небезинтересно оценить величину ошибки, допускаемой при определении действующего значения тока без учета явления коммутации.

Рассмотрим схему, наиболее пригодную для преобразования больших электрических мощностей, предложенную профессором Ларионовым (фиг. 1). Формы кривых тока и напряжения, характеризующие работу данной схемы, представлены на фиг. 2.

Введем следующие обозначения:

e_a, e_b, e_c — мгновенные значения синусоидальных э.д.с. вторичной обмотки трансформатора;

E_2 — действующее значение вторичной э.д.с.;

$E_{л. макс} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot E_2$ — амплитуда линейного напряжения;

X_a — реактивность трансформатора, определяемая из опыта короткого замыкания;

X_g — реактивность в цепи постоянного тока преобразователя;

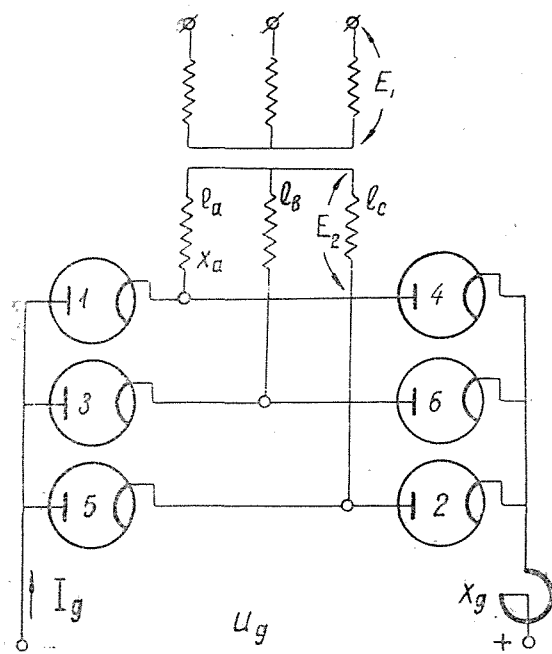
I_2 — действующее значение тока через вентили;

$e_s = -X_a \frac{di}{d\theta}$ — э.д.с. самоиндукции;

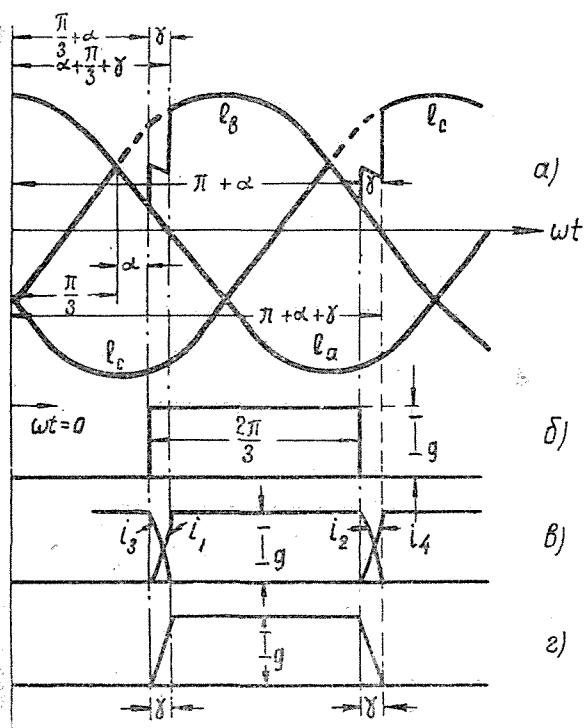
i_1 и i_2 — ток вентиля 6, соответственно возрастающий и снижающийся в течение перекрытия;

α — угол зажигания вентилей, отсчитываемый от точки естественного зажигания при выпрямлении;

γ — угол коммутации (перекрытия).



Фиг. 1.



Фиг. 2.

При выбранном начале отсчета углов $\vartheta = \omega t$ (фиг. 2).

$$\begin{aligned} e_a &= \sqrt{2} \cdot E_2 \cos \vartheta, \\ e_b &= -\sqrt{2} \cdot E_2 \cos \left(\vartheta + \frac{\pi}{3} \right), \\ e_c &= -\sqrt{2} \cdot E_2 \cos \left(\vartheta - \frac{\pi}{3} \right). \end{aligned}$$

Действующее значение тока без учета перекрытия по фиг. 2б определяется как:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha + \frac{\pi}{3}}^{\alpha + \pi} I_g^2 \cdot d\vartheta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_g. \quad (1)$$

Для того чтобы определить действующее значение тока с учетом перекрытия, необходимо иметь уравнения, характеризующие изменение тока через вентиль в течение перекрытия (фиг. 2б).

Пренебрегая активным сопротивлением обмоток трансформатора и вентиля и полагая, что в цепи постоянного тока преобразователя включен достаточно большой дроссель, для контура коммутации по фиг. 3 запишем:

$$e_a + e_{s3} - e_{s1} - e_b = 0.$$

Данное уравнение выражает уравновешенность э.д.с. в контуре коммутации и справедливо в интервале углов $\alpha + \frac{\pi}{3} < \vartheta < \alpha + \frac{\pi}{3} + \gamma$.

$$\sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \cos \vartheta + X_a \frac{di_1}{d\vartheta} - X_a \frac{di_3}{d\vartheta} + \sqrt{2} \cdot E_2 \cos \left(\vartheta + \frac{\pi}{3} \right) = 0.$$

При наличии достаточно большой реактивности X_g в течение перекрытия $i_1 + i_3 = I_g$. Таким образом,

$$\begin{aligned} di_1 &= -\frac{E_{л.макс}}{2X_a} \cos \left(\vartheta + \frac{\pi}{6} \right) d\vartheta, \\ i_1 &= -\frac{E_{л.макс}}{2X_a} \sin \left(\vartheta + \frac{\pi}{6} \right) + K. \end{aligned}$$

Используя условие $i_1 = 0$ при $\vartheta = \alpha + \frac{\pi}{3}$, получим:

$$K = \frac{E_{л.макс}}{2X_a} \cos \alpha$$

и

$$i_1 = \frac{E_{л.макс}}{2X_a} \left[\cos \alpha - \cos \left(\vartheta - \frac{\pi}{3} \right) \right].$$

В момент времени, характеризуемый углом,

$$\vartheta = \alpha + \frac{\pi}{3} + \gamma; i_1 = I_g$$

и

$$\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma) = \frac{2X_a I_g}{E_{л.макс}}. \quad (2)$$

Таким образом, для тока, возрастающего в течение перекрытия, получим

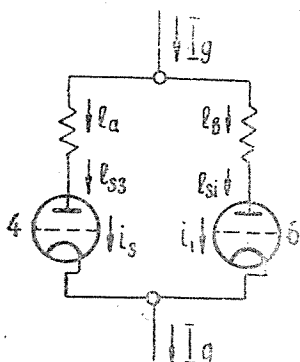
$$i_1 = I_g \cdot \frac{\cos \alpha - \cos \left(\vartheta - \frac{\pi}{3} \right)}{\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)} \quad (3)$$

Рассуждая аналогичным образом, для интервала $\alpha + \pi < \vartheta < \alpha + \pi + \gamma$ получим

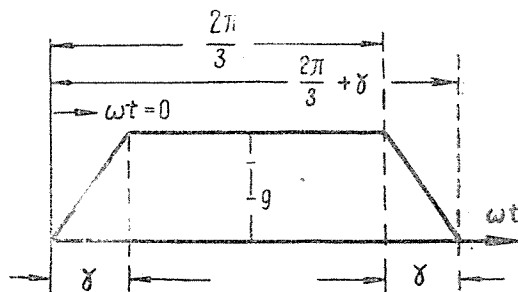
$$i_2 = I_g \left[1 - \frac{\cos \alpha + \cos \vartheta}{\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)} \right] \quad (4)$$

Действующее значение тока с учетом перекрытия определяется как

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_{\alpha + \frac{\pi}{3}}^{\alpha + \frac{\pi}{3} + \gamma} i_1^2 \cdot d\vartheta + \int_{\alpha + \frac{\pi}{3} + \gamma}^{\alpha + \pi} I_g^2 \cdot d\vartheta + \int_{\alpha + \pi}^{\alpha + \pi + \gamma} i_2^2 d\vartheta \right]} \quad (5)$$



Фиг. 3.



Фиг. 4.

Подставляя уравнения (3) и (4) в (5) и интегрируя, получим:

$$I_2 = I_g \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{2\gamma - 2\sin \gamma + \cos (2\alpha + \gamma)(\gamma \cdot \cos \gamma - \sin \gamma)}{[\cos \alpha - \cos (\alpha + \gamma)]^2} + \frac{2\pi}{3} - \gamma \right\}} \quad (6)$$

Представляется возможным получить более простое выражение для определения I_2 , если упрощенно учитывать влияние перекрытия на форму кривой тока. По фиг. 4, уравнение изменения тока, возрастающего в течение перекрытия,

$$i_1 = I_g \frac{\vartheta}{\gamma} \quad (7)$$

и уравнение изменения тока, снижающегося в течение перекрытия, спустя $\frac{2\pi}{3}$

$$i_2 = \frac{I_g}{\gamma} \left[\left(\frac{2\pi}{3} + \gamma \right) - \vartheta \right] \quad (8)$$

Подстановка уравнений (7) и (8) в (5) и последующее интегрирование дает

$$I_2 = I_g \sqrt{\frac{1}{3} - \frac{\gamma}{6\pi}}. \quad (9)$$

Угол γ , входящий в выражение (6) и (9), может быть определен из условия (2).

Однако условие (2) для большего удобства определения γ возможно преобразовать, привлекая для этой цели систему относительных единиц.

Если выбрать в качестве базисных величин

I_{gn} — номинальный ток в цепи постоянного тока и

E_1 — первичное фазовое напряжение, то можно показать, что

$$\frac{2X_a I_g}{E_{\text{лм}}} = X_{a*} I_{g*}.$$

Таким образом, получается удобное уравнение для определения угла γ

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = X_{a*} I_{g*}.$$

При всех прочих равных условиях с увеличением угла зажигания α форма кривой тока приближается к идеальной по фиг. 2б. Большим углам α соответствует меньшая длительность коммутации, так как по мере увеличения α растет э.д.с., определяющая скорость коммутации. Чем больше угол γ , тем сильнее влияние перекрытия на величину I_2 . Об этом же говорят формулы (6) и (9). Следовательно, ставя задачу оценки величины наибольшей ошибки в определении I_2 по упрощенным формулам (1) и (9) необходимо сравнение произвести для случая $\alpha = 0$.

Это соответствует и практически рекомендуемому режиму работы мощных выпрямителей, которые для сокращения потребления реактивной мощности из питающей системы должны работать с углами зажигания, близкими или равными нулю.

Сравнительные расчеты, проведенные для одинаковых условий, показали, что ошибка в определении I_2 по упрощенной формуле (9) в диапазоне реактивностей 2—14% не превышает 1%.

Определение I_2 из формулы (1) при реактивностях трансформатора 10—14% дает ошибку не более 3%.