

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОСТЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А. И. ЗАЙЦЕВ. В. Н. МИШИН

Рекомендована научным семинаром электромеханического факультета

### РЕЖИМ НЕПРЕРЫВНЫХ ТОКОВ

Большие перспективы открываются перед преобразовательной техникой в связи с разработкой и применением полностью управляемых полупроводниковых вентилях. Полностью управляемые вентильные преобразователи (ПУВП) можно также строить на транзисторах, электронных лампах, тиристорах с искусственной коммутацией. ПУВП позволяют установке работать при регулировании напряжения с опережающими углами управления, что превращает вентильную установку из потребителя в генератор реактивной энергии, устраняя основной недостаток управляемых вентильных систем [1].

ПУВП могут работать в наивыгоднейшем режиме, «выпрямляя» соответствующий участок синусоиды напряжения сети, т. е. позволяют регулировать коэффициент мощности установки, ориентируясь на оптимальную для каждого конкретного случая величину. Закон управления вентилями таких систем должен учитывать потребности данной сети в реактивной энергии. При наличии в цепи постоянного тока индуктивности подобная работа ПУВП возможна лишь с нулевым вентилем.

Проведем исследование статики одноктных полностью управляемых преобразователей в предположении, что питание установки осуществляется от абсолютно жесткой сети бесконечной мощности, падения напряжения на вентилях ( $E_v$ ) равны и не зависят от величины тока, параметры нагрузки ( $L$ ,  $R$ ,  $E$ ) постоянны. Схема рассматриваемого случая изображена на рис. 1, где полностью управляемый вентиль представляется автоматическим выключателем  $K$ , производящим в соответствующие моменты времени мгновенные переключения в силовых и нулевой цепях.

Исследование ПУВП проведем в системе относительных единиц [2].

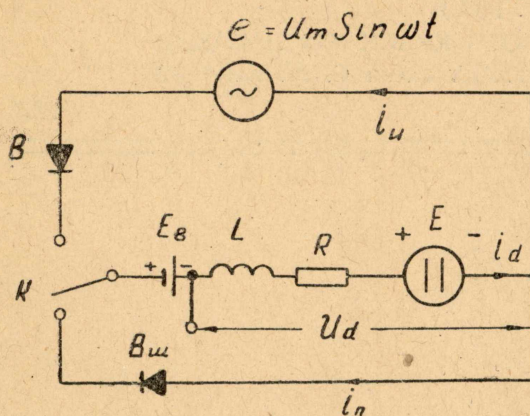


Рис. 1.

Обозначим:

$U_m$  — амплитудное значение фазного напряжения сети;  
 $\omega$  — частота сети;  
 $m$  — число фаз преобразователя,

$$\frac{E + E_B}{U_m} = \varepsilon \text{ — относительная э.д.с.};$$

$$\frac{L}{U_m R} = j \text{ — относительный ток};$$

$$\omega \frac{L}{R} = \operatorname{tg} \Theta \text{ — параметр нагрузки.}$$

Мгновенные значения тока через силовые и нулевой вентили описываются следующими уравнениями соответственно [3].

$$\begin{cases} i_u = \cos \Theta \sin (\nu_B - \Theta + \nu) - \varepsilon + [\varepsilon - \cos \Theta \sin (\nu_B - \Theta) + j_{ou}] e^{-\nu \operatorname{ctg} \Theta} \\ i_n = (\varepsilon + j_{on}) e^{-\nu \operatorname{ctg} \Theta} - \varepsilon, \end{cases} \quad (1)$$

где:  $\nu_B$  — фаза напряжения сети, соответствующая включению силового вентиля;

$\nu$  — угловая координата, отсчитываемая от момента замыкания той или иной цепи;

$j_{ou}, j_{on}$  — начальные значения токов силовых и нулевого вентилей соответственно.

Начальные значения токов найдутся как:

$$j_{on} = (j_n)_{\nu=\lambda}, \quad (2)$$

$$j_{ou} = (j_u)_{\nu=\frac{2\pi}{m} - \lambda},$$

где:  $\lambda$  — продолжительность включения силовых вентилей.

Подставив условия [2] в систему уравнений [1], получим

$$j_{ou} = \frac{\cos \Theta [e^{\lambda \operatorname{ctg} \Theta} \cdot \sin (\nu_B - \Theta + \lambda) - \sin (\nu_B - \Theta)]}{e^{\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta} - 1} - \varepsilon, \quad (3)$$

$$j_{on} = \frac{\cos \Theta [\sin (\nu_B - \Theta + \lambda) - e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta} \cdot \sin (\nu_B - \Theta)]}{1 - e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}} - \varepsilon. \quad (4)$$

Если нулевой вентиль отсутствует или не принимает участие в работе, то в режиме непрерывных токов нагрузки  $\lambda = \frac{2\pi}{m}$ .

Условиями существования режима непрерывных токов нагрузки будут:

$$j_{ou} \geq 0, \text{ если } \nu_B \geq \operatorname{arc} \sin \varepsilon, \quad (5)$$

и

$$(j_u) \geq 0 \text{ } \nu = \operatorname{arc} \sin \varepsilon - \nu_B, \text{ если } \nu_B \leq \operatorname{arc} \sin \varepsilon. \quad (6)$$

Таким образом, граничные значения угловых координат, при которых еще существует режим непрерывного тока в нагрузке, с учетом условий [5]—[6] и выражений [1] и [3], найдутся из уравнений:

$$\frac{\cos \Theta [e^{\lambda_{rp} \operatorname{ctg} \Theta} \cdot \sin(\nu_B - \Theta + \lambda_{rp}) - \sin(\nu_B - \Theta)]}{e^{\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta} - 1} - \varepsilon = 0, \quad (7)$$

если

$$\nu_B \geq \arcsin \varepsilon$$

и

$$\cos \Theta \sin(\arcsin \varepsilon - \Theta) - \frac{e^{\left(\lambda_{rp} \frac{2\pi}{m}\right) \operatorname{ctg} \Theta} \cdot \sin(\nu_B - \Theta + \lambda_{rp}) - \sin(\nu_B - \Theta)}{\left(1 - e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}\right) e^{(\arcsin \varepsilon - \nu_B) \operatorname{ctg} \Theta}} = 0 \quad (8)$$

если

$$\nu_B \leq \arcsin \varepsilon.$$

Если  $\lambda = \frac{2\pi}{m}$ , ищем с помощью [7] или [8] величину угла включения  $\nu_B$ , при которой существует граничный режим непрерывного тока нагрузки. В системах с нулевым вентилем удобнее задаваться углом включения и находить из [7] или [8] величину граничной продолжительности включения. Для преобразователей с нулевым неуправляемым вентилем при законе управления вентилями, обеспечивающим минимально возможные углы включения, и  $\lambda < \frac{2\pi}{m}$  угол включения равен нулю.

Рассчитав границы существования режима непрерывных токов, можно переходить к определению среднего и действующего значений тока в элементах системы, а также спектрального состава тока, протекающего через силовые вентили преобразователя.

С помощью интегрирования выражений (1) получим средние значения тока нагрузки, силовых и нулевых вентилях в относительных единицах соответственно

$$j_{cp} = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\lambda}{2} \sin \left( \nu_B + \frac{\lambda}{2} \right) - \varepsilon, \quad (9)$$

$$j_{cp.и} = \frac{\cos \Theta}{2\pi} \left[ 2 \sin \frac{\lambda}{2} \sin \left( \nu_B - \Theta + \frac{\lambda}{2} \right) + A \operatorname{tg} \Theta (1 - e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta}) \right] - \frac{\lambda}{2\pi} \varepsilon, \quad (10)$$

$$j_{cp.п} = \frac{m}{2\pi} \sin \Theta \left[ 2 \sin \frac{\lambda}{2} \cos \left( \nu_B - \Theta + \frac{\lambda}{2} \right) - A (1 - e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta}) \right] - \varepsilon \left( 1 - \frac{m}{2\pi} \lambda \right), \quad (11)$$

где

$$A = \frac{e^{\left(\lambda - \frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta\right)} \cdot \sin(\nu_B - \Theta + \lambda) - \sin(\nu_B - \Theta)}{1 - e^{-\frac{2\pi}{m} \operatorname{ctg} \Theta}}.$$

Для удобства записи выразим действующие значения токов через соответствующие квадратичные площади импульсов тока

$$j_d = \sqrt{\frac{m}{2\pi} (S_{кв.и} + S_{кв.п})}, \quad (12)$$

$$j_{д.и} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} S_{кв.и}}, \quad (13)$$

$$j_{д.п} = \sqrt{\frac{m}{2\pi} S_{кв.п}}, \quad (14)$$

где квадратичные площади тока силовых и нулевых вентилей найдутся как

$$S_{\text{кв. н}} = \int_0^{\lambda} j_{\text{н}}^2(\nu) d\nu. \quad (15)$$

$$S_{\text{кв. п}} = \int_0^{\frac{2\pi}{m} - \lambda} j_{\text{п}}^2(\nu) d\nu. \quad (16)$$

Подставив в (15) и (16) выражения (1) и проинтегрировав, после упрощений получим

$$\begin{aligned} S_{\text{кв. н}} &= 0,5 \cos^2 \Theta \left[ \lambda - \sin \lambda \cos 2 \left( \nu_{\text{В}} - \Theta + \frac{\lambda}{2} \right) \right] + \varepsilon^2 \lambda - \\ &- 4\varepsilon \cos \Theta \sin \frac{\lambda}{2} \sin \left( \nu_{\text{В}} - \Theta + \frac{\lambda}{2} \right) + 0,25 A^2 (1 - e^{-2\lambda \operatorname{ctg} \Theta}) \sin 2\Theta + \\ &+ 2A \sin \Theta \{ \cos^2 \Theta [\sin \nu_{\text{В}} - e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta} \sin (\nu_{\text{В}} + \lambda)] - (1 - e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta}) \varepsilon \}, \\ S_{\text{кв. п}} &= 0,5 \operatorname{tg} \Theta (\varepsilon + j_{\text{оп}}) \left[ 1 - e^{-\left( \frac{2\pi}{m} - \lambda \right) \operatorname{ctg} \Theta} \right] \left\{ \left[ 1 + e^{-\left( \frac{2\pi}{m} - \lambda \right) \operatorname{ctg} \Theta} \right] (\varepsilon + j_{\text{оп}}) - \right. \\ &\left. - 4\varepsilon \right\} + \left( \frac{2\pi}{m} - \lambda \right) \varepsilon^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Ток силовых вентилей преобразователя можно представить в виде следующего ряда Фурье [2]

$$j_{\text{н}} = j_{\text{ср. н}} + \sum_{k=1}^{\infty} j_{\text{ки}} \sin (k \nu + \psi_k), \quad (19)$$

где

$$j_{\text{ки}} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (20)$$

— амплитуда К-ой гармоники импульса тока;

$$\psi_k = \operatorname{arctg} \frac{b_k}{a_k}. \quad (21)$$

— фаза К-ой гармоники, отсчитываемая от начала импульса.

Фаза К-ой гармоники относительно напряжения сети переменного тока найдется как

$$\varphi_k = \nu_{\text{В}} - \operatorname{arctg} \frac{b_k}{a_k}. \quad (22)$$

Коэффициенты ряда Фурье определяются с помощью интегралов

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda} j_{\text{н}}(\nu) \sin k\nu d\nu, \quad (23)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{\lambda} j_{\text{н}}(\nu) \cos k\nu d\nu, \quad (24)$$

откуда после преобразований получим коэффициенты первой гармоники ( $k=1$ )

$$b_1 = \frac{\cos \Theta}{2\pi} \left\{ \lambda \sin (\nu_{\text{В}} - \Theta) + \sin \lambda \sin (\nu_{\text{В}} - \Theta + \lambda) + \right.$$

$$+2A \left[ \cos \Theta - e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta} \cdot \cos (\Theta + \lambda) \right] \sin \Theta \Big\} - \frac{\varepsilon}{\pi} \sin \lambda, \quad (25)$$

$$a_1 = \frac{\cos \Theta}{2\pi} \left\{ \lambda \cos (\nu_B - \Theta) - \sin \lambda \cos (\nu_B - \Theta + \lambda) + \right. \\ \left. + 2A \left[ \sin \Theta - e^{-\operatorname{ctg} \Theta} \cdot \sin (\Theta + \lambda) \right] \sin \Theta \right\} - \frac{2\varepsilon}{\pi} \sin^2 \frac{\lambda}{2} \quad (26)$$

и коэффициенты высших гармоник ( $k > 1$ )

$$a_k = \frac{\cos \Theta}{\pi (1 - k^2)} \left[ k \sin (\nu_B - \Theta + \lambda) \cos k\lambda - \sin k\lambda \cos (\nu_B - \Theta + \lambda) - \right. \\ \left. - k \sin (\nu_B - \Theta) \right] + \frac{A \cos \Theta}{\pi (k^2 + \operatorname{ctg}^2 \Theta)} [k - e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta} (\operatorname{ctg} \Theta \sin k\lambda + k \cos k\lambda)] - \\ - \frac{\varepsilon}{k\pi} (1 - \cos k\lambda), \quad (27)$$

$$b_k = \frac{\cos \Theta}{\pi (1 - k^2)} [\cos (\nu_B - \Theta) - \cos k\lambda \cos (\nu_B - \Theta + \lambda) - \\ - k \sin k\lambda \sin (\nu_B - \Theta + \lambda)] + \frac{A \cos \Theta \operatorname{ctg} \Theta}{\pi (k^2 + \operatorname{ctg}^2 \Theta)} [1 + e^{-\lambda \operatorname{ctg} \Theta} (k \operatorname{tg} \Theta \sin k\lambda - \\ - \cos k\lambda)] - \frac{\varepsilon}{k\pi} \sin k\lambda. \quad (28)$$

При расчете цепей с вентилями часто оказывается нужным знать амплитудные значения импульсов тока.

Максимальная величина тока нулевого вентиля равна его начальному значению  $j_{\text{п макс.}} = (j_{\text{п}})_{\nu=0} = j_{\text{оп.}}$

Угловую координату, соответствующую максимуму тока в силовых вентилях, найдем из условия

$$\frac{dj_{\text{п}}}{d\nu} = 0,$$

откуда после подстановки (1) и упрощений получим трансцендентное уравнение

$$\sin \Theta \cos (\nu_B - \Theta + \nu_{\text{макс.}}) e^{\nu_{\text{макс.}} \operatorname{ctg} \Theta} = \varepsilon - \cos \Theta \sin (\nu_B - \Theta) + j_{\text{оп.}} \quad (29)$$

Вычислив с помощью (29)  $\nu_{\text{макс.}}$  и подставив в (1), можно найти амплитудное значение тока силовых вентилях. Заметим, что уравнение (29) справедливо лишь при  $\nu_{\text{макс.}} \leq \lambda$ , в противном случае максимум тока следует искать как

$$j_{\text{п макс.}} = (j_{\text{п}})_{\nu=\lambda} = j_{\text{оп.}} \quad (30)$$

При  $\nu_B + \lambda \leq \frac{\pi}{2}$  максимальная величина тока импульса всегда соответствует условию (30).

Коэффициент мощности полностью управляемого преобразователя в бестрансформаторной схеме может быть рассчитан как

$$K_{\text{м}} = \nu \cos \varphi_{(1)}, \quad (31)$$

где  $\nu = \frac{j_{(1)}}{j_{\text{д.и}}} = \frac{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}{\sqrt{2} j_{\text{д.и}}}$  — коэффициент искажения;

а коэффициент сдвига ( $\cos \varphi$ ) определяется с помощью (22).

Используя полученные формулы, можно рассчитывать и обычные преобразователи с отстающими углами управления. При этом в системах с нулевым вентилем нужно иметь в виду, что

$$\lambda = \pi - \nu_B, \quad \text{если} \quad \nu_B \geq \pi \frac{m-2}{m},$$

или

$$\lambda = \frac{2\pi}{m}, \quad \text{если} \quad \nu_B \leq \pi \frac{m-2}{m}.$$

На основании полученных формул можно выбрать вентили преобразователя, выбрать по условиям нагрева двигатель (если ПУВП используется в системе электропривода), оценить энергетические показатели установки. Применение системы относительных единиц позволяет рассчитать соответствующие универсальные таблицы и диаграммы для определенных законов управления вентилями преобразователя, которыми удобно пользоваться в инженерной практике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Л. Каганов. Электронные и ионные преобразователи, ч. III, ГЭИ, 1956.
2. А. А. Булгаков. Основы динамики управляемых вентильных систем. Изд. АН СССР, 1963.
3. А. И. Зайцев, В. Н. Мишин. К расчету некоторых мутаторов на полностью управляемых элементах. Известия ТПИ, т. 153, 1965.