ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА
Том 161 1967

РЕЖИМЫ ПРЕРЫВИСТОГО ТОКА ПОЛНОСТЬЮ УПРАВЛЯЕМЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

А. И. ЗАЙЦЕВ, В. Н. МИШИН

При исследовании режимов прерывистого тока примем изложенные выше допущения и обозначения величин [1].

Рассмотрим различные режимы прерывистого тока следующие в порядке уменьшения нагрузки.

1. Ток нагрузки уменьшается до нуля при работе силовых вентилей в области угловых координат

$$\arc\sin\varepsilon > \nu_n < \frac{\pi}{2}.$$

В данном режиме вентиль включается с приходом сигнала управления и проводит ток за счет э.д.с. самоиндукции индуктивности нагрузки. Если величина энергии, запасенной в электромагнитном поле индуктивности мала, то ток может упасть до нуля раньше, чем выполнится условие устойчивой работы вентиля — $\nu_н \geqslant \arc\sin\varepsilon$. После такого естественного выключения вентиля, в случае сохранения на его управляющих элементах включающего сигнала, прибор включится вновь, когда угловая координата напряжения сети станет равной $\nu_н = \nu_{В_2} = \arc\sin\varepsilon$. При повторном включении вентиля ток нагрузки, а, следовательно, и ток вентиля начнут возрастать с нулевого значения.

Таким образом, ток силового вентиля в данном режиме за время включения состоит из двух импульсов: первый, начинаясь с некоторого значения постепенно уменьшается до нуля, а второй возрастает с нулевого значения до некоторой величины, при которой вентиль искусственно выключается. Следует отметить, что рассматриваемый режим является весьма характерным для систем с опережающими углами управления.

Ток нагрузки описывается уравнениями [2]

$$j_{н1} = \cos\Theta\sin(\nu_{В_1} - \Theta + \nu) - \varepsilon + [\varepsilon - \cos\Theta\sin(\nu_{В_1} - \Theta) + j_{он_1}]\, e^{-\nu \operatorname{ctg}\Theta}, \quad (1)$$

$$j_{н2} = \cos\Theta\sin(\nu_{В_2} - \Theta + \nu) - \varepsilon + [\varepsilon - \cos\Theta\sin(\nu_{В_2} - \Theta)]\, e^{-\nu \operatorname{ctg}\Theta}, \quad (2)$$

$$j_п = (\varepsilon + j_{оп})\, e^{-\nu \operatorname{ctg}\Theta} - \varepsilon, \quad (3)$$

где: $\nu_{В_1}$ и $\nu_{В_2}$ — угловые координаты первого и второго включений силовых вентилей;

ν — угловая координата, отсчитываемая от начала соответствующих импульсов тока.

Начальные значения тока равны [2]

$$j_{оп} = \cos\Theta \sin(\nu_{B_2} - \Theta + \lambda_2) - \varepsilon + [\varepsilon - \cos\Theta \sin(\nu_{B_2} - \Theta)]\, e^{-\lambda_2 \operatorname{ctg}\Theta}, \tag{4}$$

$$j_{он1} = \{\cos\Theta \sin(\nu_{B_2} - \Theta + \lambda_2) + [\varepsilon - \cos\Theta \sin(\nu_{B_2} - \Theta)]\, e^{-\lambda_2 \operatorname{ctg}\Theta}\} \times$$
$$\times e^{-\left(\frac{2\pi}{m} - \lambda\right)\operatorname{ctg}\Theta} - \varepsilon, \tag{5}$$

где λ — заданная продолжительность включения силовых вентилей;
λ_2 — продолжительность второго включения силовых вентилей.

При расчетах в качестве независимой переменной удобнее использовать продолжительность второго включения силовых вентилей. Тогда неизвестной угловой координатой оказывается продолжительность первого включения, которую можно найти из условия

$$(j_{и1})_{\nu=\lambda_1} = 0. \tag{6}$$

После подстановки в (6) выражения (1) получим уравнение, определяющее неизвестную величину

$$\cos\Theta \sin(v_{п1} - \Theta) - \varepsilon + [\varepsilon - \cos\Theta \sin(\nu_{B_1} - \Theta) + j_{он1}]\, e^{-\lambda_1 \operatorname{ctg}\Theta}, \tag{7}$$

где

$$\nu_{п1} = \nu_{B_1} + \lambda_1.$$

Если нулевой вентиль отсутствует или не работает, то продолжительность второго включения силовых вентилей равна

$$\lambda_2 = \frac{2\pi}{m} - (\arcsin\varepsilon - \nu_{B_1}). \tag{8}$$

Верхней границей режима является область непрерывных токов, рассчитываемая по уравнению [1],

$$\cos\Theta \sin(\arcsin\varepsilon - \Theta) - \varepsilon +$$
$$+ \cos\Theta \frac{e^{\left(\lambda - \frac{2\pi}{m}\right)\operatorname{ctg}\Theta} \cdot \sin(\nu_{B_1} - \Theta + \lambda) - \sin(\nu_{B_1} - \Theta)}{\left(1 - e^{-\frac{2\pi}{m}\operatorname{ctg}\Theta}\right) e^{(\arcsin\varepsilon - \nu_{B_1})\operatorname{ctg}\Theta}} = 0, \tag{9}$$

нижнюю границу найдем из условия

$$(j_{он1}) = 0, \tag{10}$$

откуда после подстановки (5) получим

$$\{\cos\Theta \sin(\nu_{B_2} - \Theta + \lambda_2) +$$
$$+ [\varepsilon - \cos\Theta \sin(\nu_{B_2} - \Theta)]\, e^{-\lambda_2 \operatorname{ctg}\Theta}\}\, e^{-\left(\frac{2\pi}{m} - \lambda\right)\operatorname{ctg}\Theta} = \varepsilon. \tag{10a}$$

Определив границы существования режима, перейдем к расчету средних и действующих значений токов системы и их спектрального состава.

Учитывая, что ток силовых вентилей в периоде состоит из двух импульсов, после интегрирования (1) — (3) получим

$$j_{ср.\,и} = \frac{1}{2\pi}\left\{\left[\sin\frac{\lambda_1}{2}\sin\left(\nu_{B_1} + \frac{\lambda_1}{2}\right) + \sin\frac{\lambda_2}{2}\sin\left(\nu_{B_2} + \frac{\lambda_2}{2}\right)\right] 2 -\right.$$
$$\left. - (\varepsilon + j_{он1})(1 - e^{-\lambda_п \operatorname{ctg}\Theta}) \operatorname{tg}\Theta - \varepsilon\lambda^1 \right\}, \tag{11}$$

$$j_{ср.\,п} = \frac{m}{2\pi}\left[(\varepsilon + j_{он1})(e^{-\lambda \operatorname{ctg}\Theta} + 1)\operatorname{tg}\Theta - \varepsilon\lambda_п\right]. \tag{12}$$

$$j_{ср} = \frac{m}{\pi}\left[\sin\frac{\lambda_1}{2}\sin\left(\nu_{B_1} + \frac{\lambda_1}{2}\right) + \sin\frac{\lambda_2}{2}\sin\left(\nu_{B_2} + \frac{\lambda_2}{2}\right)\right] - \frac{m}{2\pi}(\lambda' + \lambda_п)\,\varepsilon, \tag{13}$$

где

$$\lambda_п = \frac{2\pi}{m} - \lambda_{и2} - \nu_{B_2} + \nu_{B_1} = \frac{2\pi}{m} - \lambda;$$

$$\lambda' = \lambda_1 + \lambda_2.$$

Квадратичную площадь импульсов тока через силовой вентиль выразим как

$$S_{кв} = S_{кв.\,и1} + S_{кв.\,и2},$$

где $S_{кв.\,и1}$ и $S_{кв.\,и2}$ найдутся с помощью выражения

$$S_{кв.\,и.\,к} = 0{,}5\cos^2\Theta\left[\lambda - \sin\lambda\cdot\cos^2\left(\nu_B - \Theta + \frac{\lambda}{2}\right) - \right.$$

$$- 4\varepsilon\cos\Theta\sin\frac{\lambda}{2}\sin\left(\nu_B - \Theta + \frac{\lambda}{2}\right) + \varepsilon^2\lambda + B\sin 2\Theta\,[\sin\nu_B - e^{-\lambda\operatorname{ctg}\Theta}\times$$

$$\left.\times\sin(\nu_B + \lambda)\right] - B\,(1 - e^{-\lambda\operatorname{ctg}\Theta})\,[2\varepsilon - 0{,}5B\,(1 + e^{-\lambda\operatorname{ctg}\Theta})]\operatorname{tg}\Theta, \tag{14}$$

в которое при вычислении соответствующих площадей нужно подставлять

1) для $S_{кв\,и1}$: $\nu_B = \nu_{B_1}$, $\lambda = \lambda_{и1}$, $B = B_1 = \varepsilon - \cos\Theta\sin(\nu_{B_1} - \Theta) + j_{он1}$;

2) для $S_{кв\,и2}$: $\nu_B = \nu_{B_2}$, $\lambda = \lambda_{и2}$, $B = B_2 = \varepsilon - \cos\Theta\sin(\nu_{B_2} - \Theta)$.

Квадратичная площадь импульса тока нулевого вентиля равна

$$S_{кв\,п} = (\varepsilon + j_{оп})(1 - e^{-\lambda_п\operatorname{ctg}\Theta})[0{,}5\,(\varepsilon + j_{оп})(1 + e^{-\lambda_п\operatorname{ctg}\Theta}) -$$

$$- 2\varepsilon]\operatorname{tg}\Theta + \varepsilon^2\lambda_п\,. \tag{15}$$

Коэффициенты основной гармоники ряда Фурье для тока силовых вентилей имеют вид

$$a_1 = \frac{1}{\pi}\left\{\frac{\cos\Theta}{2}\left[\lambda'\cos(\nu_{B_1} - \Theta) - \sin\lambda_1\cdot\cos(\nu_{п_1} - \Theta) - \sin\lambda_2\cos(\nu_{B_2} - \Theta + \lambda)\right] - \right.$$

$$- 2\varepsilon\left[\sin^2\frac{\lambda_1}{2} + \sin\frac{\lambda_2}{2}\cdot\sin\left(\lambda - \frac{\lambda_2}{2}\right)\right] + B_1\sin\Theta\ [\sin\Theta - e^{-\lambda_1\operatorname{ctg}\Theta}\times$$

$$\left.\times\sin(\Theta + \lambda_1)] + B_2\sin\Theta\,[\sin(\nu_{B_2} - \nu_{B_1} + \Theta) - e^{-\lambda_2\operatorname{ctg}\Theta}\cdot\sin(\lambda + \Theta)]\right\}, \tag{16}$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi}\left\{\frac{\cos\Theta}{2}\left[\lambda'\cdot\sin(\nu_{B_1} - \Theta) + \sin\lambda_1\cdot\sin(\nu_{п_1} - \Theta) + \right.\right.$$

$$\left. + \sin\lambda_2\sin(\nu_{B_2} + \lambda - \Theta)\right] - \varepsilon\left[\sin\lambda_1 - 2\sin\frac{\lambda_2}{2}\cos\left(\lambda - \frac{\lambda_2}{2}\right)\right] +$$

$$+ B_1\sin\Theta\,[\cos\Theta - e^{-\lambda_1\operatorname{ctg}\Theta}\cdot\cos(\Theta + \lambda_1)] + B_2\sin\Theta\,[\cos(\nu_{B_2} - \nu_{B_1} + \Theta) -$$

$$\left. - e^{-\lambda_2\operatorname{ctg}\Theta}\cdot\cos(\lambda + \Theta)]\right\}. \tag{17}$$

а коэффициенты высших гармоник вычисляются как

$$a_к = \frac{\cos\Theta}{\pi(1-k)}\left\{\cos\left[\nu_{B_1} - \Theta + \frac{\lambda_1}{2}(1-k)\right]\cdot\sin\frac{\lambda_1}{2}(1-k) + \right.$$

$$\left. + \cos\left[\nu_{B_2} - \Theta + \frac{\lambda_2}{2}(1+k) - k\lambda\right]\cdot\sin\frac{\lambda_2}{2}(1-k)\right\} -$$

$$- \frac{\cos\Theta}{\pi(1+} \quad \nu_{B_1} - \Theta + \frac{\lambda_1}{2}(1+k) \Big] \cdot \sin\frac{\lambda_1}{2}(1+k) +$$

$$+ \cos\left[\nu_{B_2} - \Theta + \frac{\lambda_1}{2}(1-k) + k\lambda\right] \sin\frac{\lambda_2}{2}(1+k)\Big\} +$$

$$+ \frac{B_2}{\pi(k^2+\operatorname{ctg}^2\Theta)} \Big\{ [k - e^{-\lambda_1 \operatorname{ctg}\Theta} \cdot (\operatorname{ctg}\Theta \sin k\lambda_1 + k\cos k\lambda)] \frac{B_1}{B_2} +$$

$$+ \operatorname{ctg}\Theta\,[\sin k(\nu_{B_2} - \nu_{B_1}) - e^{-\lambda_2 \operatorname{ctg}\Theta} \cdot \sin k\lambda] + k\,[\cos k(\nu_{B_2} - \nu_{B_1}) -$$

$$- e^{-\lambda_2 \operatorname{ctg}\Theta} \cdot \cos k\lambda]\Big\} \frac{2\varepsilon}{\pi k}\left[\sin^2 k\frac{\lambda_1}{2} + \sin k\left(\lambda - \frac{\lambda_2}{2}\right) \cdot \sin k\frac{\lambda_2}{2}\right], \qquad (18)$$

$$b_\kappa = \frac{1}{\pi}\Big\{ \frac{\cos\Theta}{1-k^2}\,[\cos(\nu_{B_1} - \Theta) - \cos k\lambda_1 \cdot \cos(\nu_{\Pi_1} - \Theta) -$$

$$- k\sin k\lambda_1 \cdot \sin(\nu_{\Pi_1} - \Theta) + \cos(\nu_{B_2} - \Theta) \cdot \cos k(\nu_{B_2} - \nu_{B_1}) -$$

$$- \cos(\nu_{B_2} - \Theta + \lambda_2) \cdot \cos k\lambda + k\sin(\nu_{B_2} - \Theta)\sin(\nu_{B_2} - \nu_{B_1}) -$$

$$- k\sin(\nu_{B_2} - \Theta + \lambda_2)\sin k\lambda] - \frac{\varepsilon}{k}\left[\sin k\lambda_1 + 2\cos k\left(\lambda - \frac{\lambda_2}{2}\right)\sin k\frac{\lambda_2}{2}\right] +$$

$$+ \frac{\operatorname{ctg}\Theta}{k^2+\operatorname{ctg}^2\Theta}[B_1 + B_1 e^{-\lambda_1 \operatorname{ctg}\Theta}(k \cdot \operatorname{tg}\Theta \cdot \sin k\lambda_1 - \cos k\lambda_1) + B_2 k e^{-\lambda_2 \operatorname{ctg}\Theta} \times$$

$$\times \operatorname{tg}\Theta \cdot \sin k\left(\lambda - \frac{\lambda_2}{2}\right) - B_2 e^{-\lambda_2 \operatorname{ctg}\Theta} \cdot \cos k\lambda - B_2 k \operatorname{tg}\Theta \sin(\nu_{B_2} - \nu_{B_1})k +$$

$$+ B_2 \cos k(\nu_{B_2} - \nu_{B_1})]\Big\}. \qquad (19)$$

2. Ток нагрузки уменьшается до нуля в паузе.

Минимально возможные углы включения силовых вентилей определяются величинами э. д. с. в цепи постоянного тока и падением напряжения на вентилях

$$\nu_B \geqslant \arcsin\varepsilon.$$

Ток нагрузки при работе силовых и нулевого вентилей описывается уравнениями (2)—(4), в которых положим $\nu_{B_2} = \nu_B$, $\lambda_2 = \lambda$.

Сверху данный режим ограничивает область непрерывных токов нагрузки, если $\nu_B \geqslant \arcsin\varepsilon$, в противном случае — вышерассмотренный режим прерывистых токов. Таким образом в одном случае верхние граничные величины следует искать из (11), а в другом из [1]

$$\frac{\cos\Theta\,[\,e^{\lambda \operatorname{ctg}\Theta}\sin(\nu_B - \Theta + \lambda) - \sin(\nu_B - \Theta)]}{e^{\frac{2\pi}{m}\operatorname{ctg}\Theta} - 1} - \varepsilon = 0, \qquad (20)$$

если $\nu_B \geqslant \arcsin\varepsilon$.

Нижнюю границу исследуемого режима найдем из условия

$$j_{\text{оп}} = 0 \qquad (21)$$

или, подставив (4), получим уравнение

$$\cos\Theta\sin(\nu_B - \Theta + \lambda) - \varepsilon + [\varepsilon - \cos\Theta\sin(\nu_B - \Theta)]\,e^{-\lambda \operatorname{ctg}\Theta} = 0. \qquad (22)$$

Как следует из (21), снизу режим токов, спадающих до нуля при паузе, ограничивает область прерывистого тока с естественным выключением вентилей.

Продолжительность работы нулевого вентиля найдется с помощью условия

$$(j_{\text{п}})_{\nu=\lambda_{\text{п}}} = 0. \qquad (23)$$

Подставив в (23) выражение (4), получим уравнение для определения $\lambda_{\text{п}}$

$$\lambda_{п} = \mathrm{tg}\,\Theta\{\ln[\cos\Theta\sin(\nu_B - \Theta + \lambda)e^{\lambda\,\mathrm{ctg}\,\Theta} + \varepsilon -$$
$$- \cos\Theta\sin(\nu_B - \Theta)] - \ln\varepsilon\} - \lambda. \tag{24}$$

Средние значения токов найдутся как

$$j_{ср\,и} = \frac{1}{2\pi}\Big\{2\cos\Theta\sin\frac{\lambda}{2}\Big(\nu_B - \Theta + \frac{\lambda}{2}\Big) - \varepsilon\lambda +$$
$$+ [\varepsilon - \cos\Theta\sin(\nu_B - \Theta)](1 - e^{-\lambda\,\mathrm{ctg}\,\Theta})\,\mathrm{tg}\Theta\Big], \tag{25}$$

$$j_{ср\,п} = \frac{m}{2\pi}[(\varepsilon + j_{оп})\,\mathrm{tg}\,\Theta\,(1 - e^{-\lambda\,\mathrm{ctg}\,\Theta}) - \varepsilon\lambda_{п}], \tag{26}$$

$$j_{ср} = \frac{m}{\pi}\sin\frac{\lambda}{2}\sin\Big(\nu_B + \frac{\lambda}{2}\Big) - \frac{m}{2\pi}(\lambda + \lambda_{п})\,\varepsilon. \tag{27}$$

Квадратичные площади импульсов тока силовых и нулевого вентилей следует искать по выражениям (14) и (15), подставляя в последнее $\lambda_{п}$ из (24).

Для коэффициентов ряда Фурье справедливы уравнения

$$a_1 = \frac{1}{\pi}\Big\{\frac{\cos\Theta}{2}[\lambda\cos(\nu_B - \Theta) - \sin\lambda\cos(\nu_B - \Theta + \lambda)] - 2\,\varepsilon\sin^2\frac{\lambda}{2} +$$
$$+ [\varepsilon - \cos\Theta\sin(\nu_B - \Theta)][\sin\Theta - e^{-\lambda\,\mathrm{ctg}\,\Theta}\sin(\Theta + \lambda)]\sin\Theta\Big\}, \tag{28}$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi}\Big\{\frac{\cos\Theta}{2}[\lambda\sin(\nu_B - \Theta) + \sin\lambda\sin(\nu_B - \Theta + \lambda)] - \varepsilon\sin\lambda +$$
$$+ [\varepsilon - \cos\Theta\sin(\nu_B - \Theta)][\cos\Theta - e^{-\lambda\,\mathrm{ctg}\,\Theta}\cos(\Theta + \lambda)]\sin\Theta\Big\}, \tag{29}$$

$$a_к = \frac{1}{\pi}\Big\{\frac{\cos\Theta}{1 - k^2}[k\sin(\nu_B - \Theta + \lambda)\cos k\lambda - \sin k\lambda\cos(\nu_B - \Theta + \lambda) -$$
$$- k\sin(\nu_B - \Theta)] - \frac{\varepsilon}{k}(1 - \cos k\lambda) +$$
$$+ \frac{\varepsilon - \cos\Theta\sin(\nu_B - \Theta)}{k^2 + \mathrm{ctg}^2\Theta}[k - e^{-\lambda\,\mathrm{ctg}\,\Theta}(\mathrm{ctg}\,\Theta\sin k\lambda + k\cos k\lambda)]\Big\}, \tag{30}$$

$$b_к = \frac{1}{\pi}\Big\{\frac{\cos\Theta}{1 - k^2}[\cos(\nu_B - \Theta) - \cos k\lambda\cos(\nu_B - \Theta + \lambda) -$$
$$- k\sin k\lambda\cdot\sin(\nu_B - \Theta + \lambda)] - \frac{\varepsilon}{k}\sin k\lambda +$$
$$+ \frac{\varepsilon - \cos\Theta\cdot\sin(\nu_B - \Theta)}{k^2 + \mathrm{ctg}^2\Theta}[1 + e^{-\lambda\,\mathrm{ctg}\,\Theta}(k\,\mathrm{tg}\,\Theta\cdot\sin k\lambda - \cos k\lambda)]\,\mathrm{ctg}\,\Theta\Big\}. \tag{31}$$

При уменьшении нагрузки режим прерывистых токов, спадающих до нуля при паузе, переходит в режим токов, которые уменьшаются до нуля, протекая через силовые вентили преобразователя. Таким образом в последнем режиме прерывистых токов вентили искусственно не выключаются, и преобразователь может работать только с отстающими углами управления. Указанный режим подробно исследован в работах А. А. Булгакова [3] и здесь не рассматривается.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Зайцев, В. Н. Мишин. Исследование полностью управляемых преобразователей. Статья в настоящем сборнике.
2. А. И. Зайцев, В. Н. Мишин. К расчету некоторых мутаторов на полностью управляемых элементах. Известия ТПИ, т. 153, 1965.
3. А. А. Булгаков. Основы динамики вентильных систем. Изд. АН СССР, 1963.