ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. С. М. КИРОВА

Том 293 1977

УДК 621.316.722

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОТРАНСФОРМАТОРНОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ю. Б. ВОЛЫНСКИЙ

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

В общем случае схема автотрансформаторного регулятора напряжения переменного тока состоит (рис. 1) из повышающего автотрансформатора *1*, выпрямительной мостовой схемы *2* и электромашинного усилителя *3*, управляемого цепью обратной связи.

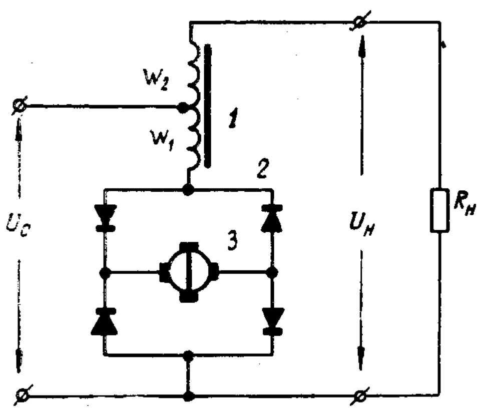

Рис. 1. Автотрансформаторный электромашинный регулятор напряжения переменного тока

Если индуктивность последовательной обмотки автотрансформатора 1 с числом витков W_2 обозначить через L_2, то, пренебрегая потерями в обмотках и в магнитопроводе и потоками рассеяния, можно записать

$$U_c = i_0 R_0 + K^2 L_2 \frac{di_0}{dt} - KL_2 \frac{di_н}{dt}, \tag{1}$$

$$U_c = L_2 \frac{di_н}{dt} + i_н R_н - KL_2 \frac{di_0}{dt}, \tag{2}$$

где U_c — напряжение сети;
i_0 — ток исполнительного органа;
$i_н$ — ток нагрузки;
R_0 — эквивалентное сопротивление исполнительного органа;
$R_н$ — сопротивление нагрузки.

Используя операторную форму записи [1], имеем из (1, 2)

$$U_н(p) = \frac{U_c(p) R_н [R_0 + pL_2 K(1+K)]}{R_0 R_н + pL_2 (K^2 R_н + R_0)}, \tag{3}$$

$$U_0(p) = \frac{U_c(p) R_0]R_н + pL_2 (1+K)]}{R_0 R_н + pL_2 (K^2 R_н + R_0)}, \tag{4}$$

где $U_н$ — напряжение на нагрузке;
U_0 — напряжение на исполнительном органе.

Принцип действия электромашинного исполнительного органа основан на том, что при работе выпрямителя на нагрузку, имеющую противоэлектродвижущую силу, ток будет существовать только в том случае, если напряжение, приложенное к аноду вентиля, имеет положительный знак по отношению к его катоду, т. е. работа выпрямителя происходит с отсечкой тока [2]. Угол отсечки тока определяется величиной противоэлектродвижущей силы, поэтому меняя величину противоэлектродвижущей силы $E_{ЭМУ}$, можно осуществлять изменения эффективного значения тока i_0, что соответствует изменению величины некоторого эквивалентного сопротивления R_0.

При $E_{эму} = 0$, согласно (3, 4), имеем

$$U_н = U_{mc} \frac{1+K}{K} \sin \omega t, \tag{5}$$

$$i_0 = U_{mc} \frac{\sqrt{1 + b^2 (1+K^2)}}{R_н b K^2} \sin \left[\omega t + \operatorname{arctg} \frac{1}{b(1+K)} \right], \tag{6}$$

где

$$b = \frac{\omega L_2}{R_н}.$$

Если в момент перехода через нулевое значение сетевого напряжения включить противоэлектродвижущую силу $E_{эму}$, то при $\omega t > 0$ работа выпрямительного моста происходит с отсечкой тока, и ток i_0 будет существовать только при условии $U_0 - E_{эму} > 0$. При $E_{эму} > U_0$

$$U_н = U_{mc} \left[\frac{b}{1+b^2} l^{-\frac{\omega t}{b}} + \frac{1}{\sqrt{1+b^2}} \sin(\omega t - \operatorname{arctg} b) \right], \tag{7}$$

$$U_0 = U_{mc} \left\{ \sqrt{\frac{1+b^2(1+K)^2}{1+b^2}} \sin \left[\omega t + \operatorname{arctg} \frac{Kb}{1+b^2(1+K)} \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{Kb}{1+b^2} l^{-\frac{\omega t}{b}} \right\}. \tag{8}$$

Момент возникновения тока i_0 определяется условием

$$\omega t_{к1} = \arcsin \left\{ \frac{E_{эму}}{U_{mc}} \sqrt{\frac{1+b^2}{1+b^2(1+K)^2}} + \right.$$

$$+ \frac{Kb\, l^{-\frac{\omega t_{к_1}}{b}}}{\sqrt{(1+b^2)[1+b^2(1+K)^2]}} \left\{ - \operatorname{arctg} \frac{Kb}{1+b^2(1+K)} \right. . \tag{9}$$

При $\omega t > \omega t_{к_1}$, пренебрегая потерями в цепи якоря ЭМУ, имеем

$$U_н = U_н(\omega t_{к_1}) - \frac{U_{mc}(1+K)}{K} \sin \omega t_{к_1} + U_{mc} \frac{(1+K)}{K} \sin \omega t, \tag{10}$$

где $U_н(\omega t_{к_1})$ — напряжение на нагрузке в момент времени $\omega t_{к_1}$, определенное согласно выражению (7).

Ток i_0 отстает по фазе от напряжения $U_н$ на угол

$$\varphi_0 = \operatorname{arctg} \frac{1}{b(1+K)}$$

и становится равным нулю в момент времени

$$\omega t_{к_2} = \pi - \arcsin \left[\sin \omega t_{к_1} - \frac{U_н(\omega t_{к_1})}{U_{mc}} \cdot \frac{K}{1+K} \right] +$$

$$+ \operatorname{arctg} \frac{1}{b(1+K)}. \tag{11}$$

В интервале $\omega t > \omega t_{\kappa_2}$

$$U_{\text{н}} \equiv \left[U_{\text{н}}(\omega t_{\kappa_2}) - \frac{U_{m\text{c}}}{\sqrt{1+b^2}} \sin(\omega t_{\kappa_2} = \operatorname{arctg} b) \right] l^{-\frac{\omega(t-t_{\kappa_2})}{b}} + \tag{12}$$
$$+ \frac{U_{m\text{c}}}{\sqrt{1+b^2}} \sin(\omega t - \operatorname{arctg} b),$$

$$U_0 = U_{m\text{c}} \sqrt{\frac{1+b^2(1+\kappa)^2}{1+b^2}} \sin\left[\omega t + \operatorname{arctg} \frac{\kappa b}{1+b^2(1+K)}\right] - \tag{13}$$
$$-K\left[U_{\text{н}}(\omega t_{\kappa_2}) - \frac{U_{m\text{c}}}{\sqrt{1+b^2}} \sin(\omega t_{\kappa_2} - \operatorname{arctg} b)\right] l^{-\frac{\omega(t-t_{\kappa_2})}{b}}.$$

Следующий момент появления тока $i_0(\omega t = \omega t_{\kappa_3})$ имеет место при $U_0 = -E_{\text{эму}}$. При $\omega t > \omega t_{\kappa_3}$ процесс протекает так же, как и в первом случае при положительном полупериоде питающего напряжения. Квазиустановившийся режим имеет место тогда, когда $\omega t_{\kappa n+2} = \omega t_{\kappa_n} + \pi$, где n — целое число. Для случая $b = 2-5$ длительность переходного процесса не превышает 3—6 периодов питающего напряжения.

В момент перехода тока i_0 через нулевое значение напряжение $U_{\text{н}}$ в большинстве случаев много меньше максимального мгновенного значения напряжения на нагрузке $\frac{1+K}{K} U_{m\text{c}}$, поэтому можно допустить, что при $i_0 = 0$ $U_{\text{н}} \approx 0$. В этом случае для рассматриваемого устройства имеем соотношения, аналогичные (3, 4),

$$U_{\text{c}}(p) = i_0(p) pL_2 K^2 - i_{\text{н}}(p) pL_2 K + E_{\text{эму}}, \tag{14}$$

$$U_{\text{c}}(p) = i_{\text{н}}(p) R_{\text{н}} + i_{\text{н}}(p) pL_2 - i_0(p) pL_2 K, \tag{15}$$

поэтому в квазиустановившемся режиме напряжение на нагрузке будет существовать только во временном интервале $\omega t_{\kappa_1} < \omega t < \pi - \omega t_{\kappa}$ и определяться выражением

$$U_{\text{н}} = \frac{1+K}{K} U_{m\text{c}} \sin \omega t - \frac{E_{\text{эму}}}{K}. \tag{16}$$

Значения ωt_{κ_1} определяются для различных из (16) при $U_{\text{н}} = 0$. Зависимости $\omega t_{\kappa_1} = f\left(\frac{E_{\text{эму}}}{U_{mc}}\right)$ при различных значениях K приведены на рис. 2 в виде пунктирных линий. На этом же рисунке в виде сплошных линий изображены кривые, показывающие зависимость относительного значения напряжения на нагрузке от отношения $\frac{U_{\text{дн}}}{U_{m\text{c}}} = f\left(\frac{E_{\text{эму}}}{U_{m\text{c}}}\right)$. Действующее значение напряжения на нагрузке равно

$$U_{\text{дн}} = \frac{U_{m\text{c}}(1+K)}{K\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\pi}{2} - \omega t_{\kappa_1} - \frac{3}{2}\sin 2\omega t_{\kappa_1} + (\pi - 2\omega t_{\kappa_1})\sin^2 \omega t_{\kappa_1}}. \tag{17}$$

Периодическая нечетная функция вида (16) удовлетворяет условиям Дирихле и может быть разложена в неполный ряд Фурье по синусам кратных дуг. Амплитуды гармоник ряда Фурье равны

$$B_{nm} = \frac{1}{\pi} U_{mc} \frac{1+K}{K} \left\{ \frac{\sin\left[(n-1)(\pi - \omega t_{\kappa_1})\right]}{n-1} - \right.$$

$$\left. - \frac{\sin\left[(n+1)(\pi - \omega t_{\kappa_1})\right]}{n+1} + \frac{\sin(n+1)\,\omega t_{\kappa_1}}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\,\omega t_{\kappa_1}}{n-1} \right\}. \qquad (18)$$

Из (18) амплитуда первой гармоники

$$B_{1m} = \frac{(1+K)}{K\pi} U_{mc}\left[\pi - 2\omega t_{\kappa_1} + \sin 2\omega t_{\kappa_1}\right], \qquad (19)$$

амплитуды четных гармоник равны нулю, а амплитуды нечетных высших гармоник определяются выражением

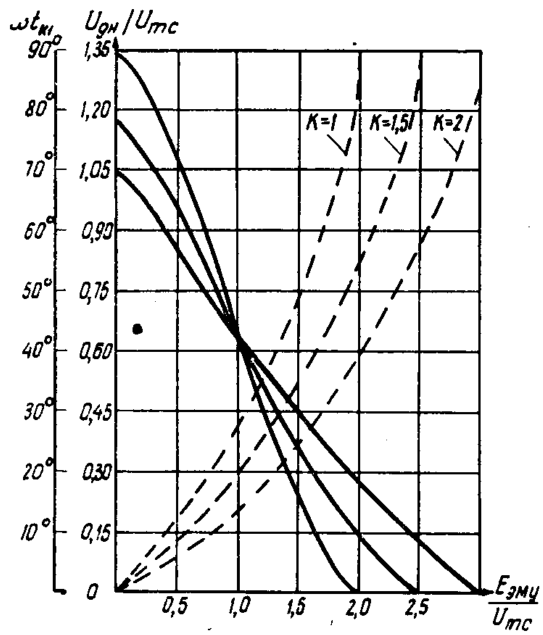

Рис. 2. Зависимости $\omega t_{\text{к}1} = f\left(\frac{E_{\text{эму}}}{U_{mc}}\right)$ и $\frac{U_{\text{дн}}}{U_{mc}} = f\left(\frac{E_{\text{эму}}}{U_{mc}}\right)$ при различных значениях коэффициента κ

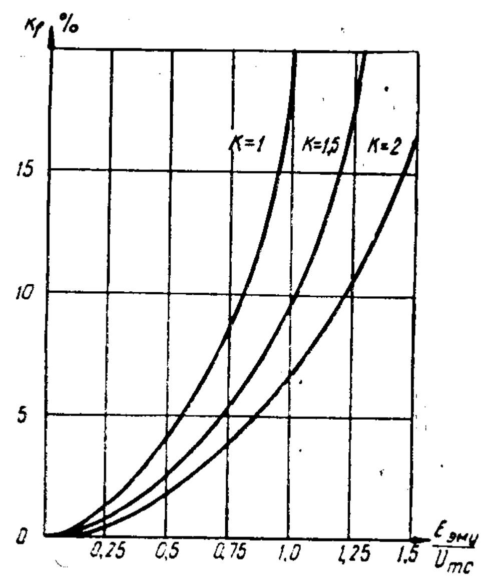

Рис. 3. Зависимость коэффициента гармоник K_f от $\frac{E_{\text{эму}}}{U_{mc}}$ при различных значениях коэффициента κ

$$B_{nm} = \frac{2}{\pi} U_{mc} \frac{1+K}{K} \times \left[\frac{\sin(n+1)\,\omega t_{\kappa_1}}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\,\omega t_{\kappa_1}}{n-1} \right], \qquad (20)$$

$$n = 3,\ 5,\ 7\ldots$$

Зависимости коэффициента гармоник K_f выходного напряжения от отношения $\frac{E_{\text{эму}}}{U_{mc}}$ при различных значениях коэффициента K представлены на рис. 3.

Выводы

1. Применение автотрансформаторного регулятора напряжения переменного тока с электромашинным исполнительным органом позволяет изменять в 2,5—3 раза действующее значение напряжения на нагрузке.

2. При изменении выходного напряжения регулятора в диапазоне 2—2,5 раза коэффициент гармоник выходного напряжения изменяется не более чем на 15—20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Конторович. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях. М., «Наука», 1964.
2. В. Н. Аксенов. Выпрямители и трансформаторные подстанции. М., Связьиздат, 1961.