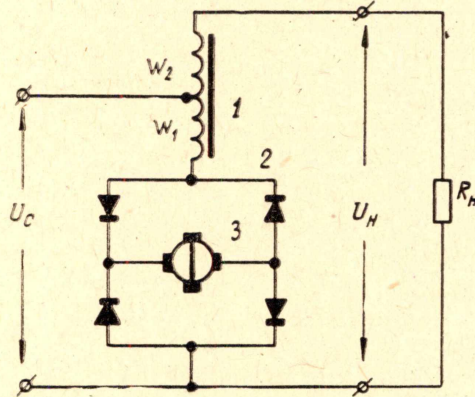


## СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОТРАНСФОРМАТОРНОГО ЭЛЕКТРОМАШИННОГО РЕГУЛЯТОРА НАПЯЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

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.



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

$$U_c = i_0 R_0 + K^2 L_2 \frac{di_0}{dt} - KL_2 \frac{di_n}{dt}, \quad (1)$$

$$U_c = L_2 \frac{di_n}{dt} + i_n R_n - KL_2 \frac{di_0}{dt}, \quad (2)$$

Рис. 1. Автотрансформаторный электромашинный регулятор напряжения переменного тока

где  $U_c$  — напряжение сети;

$i_0$  — ток исполнительного органа;

$i_n$  — ток нагрузки;

$R_0$  — эквивалентное сопротивление исполнительного органа;

$R_n$  — сопротивление нагрузки.

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

$$U_n(p) = \frac{U_c(p) R_n [R_0 + pL_2 K (1 + K)]}{R_0 R_n + pL_2 (K^2 R_n + R_0)}, \quad (3)$$

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

где  $U_n$  — напряжение на нагрузке;

$U_0$  — напряжение на исполнительном органе.

Принцип действия электромашинного исполнительного органа основан на том, что при работе выпрямителя на нагрузку, имеющую проти-

возлеktродвижущую 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  $E_{\text{ЭМУ}}$ , можно осуществлять изменения эффективного значения тока  $i_0$ , что соответствует изменению величины некоторого эквивалентного сопротивления  $R_0$ .

При  $E_{\text{ЭМУ}} = 0$ , согласно (3, 4), имеем

$$U_H = U_{mc} \frac{1+K}{K} \sin \omega t, \quad (5)$$

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

где

$$b = \frac{\omega L_2}{R_H}.$$

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

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

$$U_0 = U_{mc} \left\{ \sqrt{\frac{1+b^2(1+K^2)}{1+b^2}} \sin \left[ \omega t + \arctg \frac{Kb}{1+b^2(1+K)} \right] - \frac{Kb}{1+b^2} l^{-\frac{\omega t}{b}} \right\}. \quad (8)$$

Момент возникновения тока  $i_0$  определяется условием

$$\omega t_{\kappa_1} = \arcsin \left\{ \frac{E_{\text{ЭМУ}}}{U_{mc}} \sqrt{\frac{1+b^2}{1+b^2(1+K)^2}} + \frac{Kb l^{-\frac{\omega t_{\kappa_1}}{b}}}{\sqrt{(1+b^2)[1+b^2(1+K)^2]}} \left\{ -\arctg \frac{Kb}{1+b^2(1+K)} \right\} \right\}. \quad (9)$$

При  $\omega t > \omega t_{\kappa_1}$ , пренебрегая потерями в цепи якоря ЭМУ, имеем

$$U_H = U_H(\omega t_{\kappa_1}) - \frac{U_{mc}(1+K)}{K} \sin \omega t_{\kappa_1} + U_{mc} \frac{(1+K)}{K} \sin \omega t, \quad (10)$$

где  $U_H(\omega t_{\kappa_1})$  — напряжение на нагрузке в момент времени  $\omega t_{\kappa_1}$ , определенное согласно выражению (7).

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

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

и становится равным нулю в момент времени

$$\omega t_{\kappa_2} = \pi - \arcsin \left[ \sin \omega t_{\kappa_1} - \frac{U_H(\omega t_{\kappa_1})}{U_{mc}} \cdot \frac{K}{1+K} \right] + \arctg \frac{1}{b(1+K)}. \quad (11)$$

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

$$U_H \equiv \left[ U_H(\omega t_{\kappa_2}) - \frac{U_{mc}}{\sqrt{1+b^2}} \sin(\omega t_{\kappa_2} - \text{arctg } b) \right] l^{-\frac{\omega(t-t_{\kappa_2})}{b}} + \quad (12)$$

$$+ \frac{U_{mc}}{\sqrt{1+b^2}} \sin(\omega t - \text{arctg } b),$$

$$U_0 = U_{mc} \sqrt{\frac{1+b^2(1+\kappa)^2}{1+b^2}} \sin \left[ \omega t + \text{arctg} \frac{\kappa b}{1+b^2(1+\kappa)} \right] - \quad (13)$$

$$- K \left[ U_H(\omega t_{\kappa_2}) - \frac{U_{mc}}{\sqrt{1+b^2}} \sin(\omega t_{\kappa_2} - \text{arctg } b) \right] l^{-\frac{\omega(t-t_{\kappa_2})}{b}}.$$

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  $U_H$  в большинстве случаев много меньше максимального мгновенного значения напряжения на нагрузке  $\frac{1+K}{K} U_{mc}$ , поэтому можно

допустить, что при  $i_0 = 0$   $U_H \approx 0$ . В этом случае для рассматриваемого устройства имеем соотношения, аналогичные (3, 4),

$$U_c(p) = i_0(p) p L_2 K^2 - i_H(p) p L_2 K + E_{\text{эму}}, \quad (14)$$

$$U_c(p) = i_H(p) R_H + i_H(p) p L_2 - i_0(p) p L_2 K, \quad (15)$$

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

$$U_H = \frac{1+K}{K} U_{mc} \sin \omega t - \frac{E_{\text{эму}}}{K}. \quad (16)$$

Значения  $\omega t_{\kappa_1}$  определяются для различных из (16) при  $U_H = 0$ . 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  $\frac{U_{\text{дн}}}{U_{mc}} = f\left(\frac{E_{\text{эму}}}{U_{mc}}\right)$ . Действующее значение напряжения на нагрузке равно

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

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

$$B_{nm} = \frac{1}{\pi} U_{mc} \frac{1+K}{K} \left\{ \frac{\sin [(n-1)(\pi - \omega t_{\kappa_1})]}{n-1} - \frac{\sin [(n+1)(\pi - \omega t_{\kappa_1})]}{n+1} + \frac{\sin (n+1) \omega t_{\kappa_1}}{n+1} - \frac{\sin (n-1) \omega t_{\kappa_1}}{n-1} \right\}. \quad (18)$$

Из (18) амплитуда первой гармоники

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

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

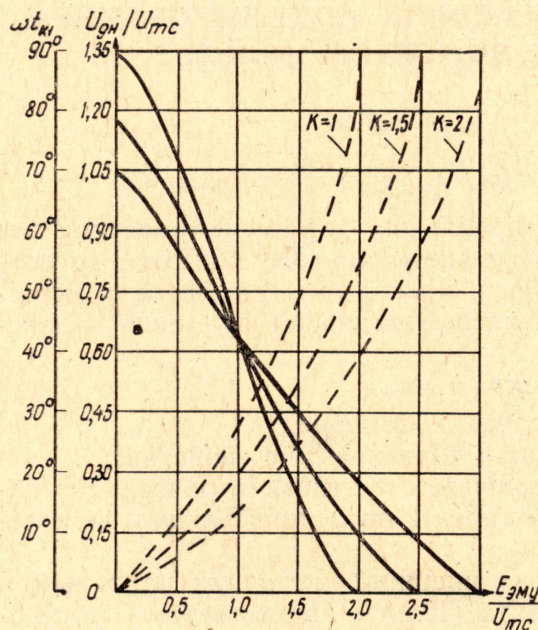


Рис. 2. Зависимости  $\omega t_{\kappa_1} = f\left(\frac{E_{эмү}}{U_{mc}}\right)$  и  $\frac{U_{дн}}{U_{mc}} = f\left(\frac{E_{эмү}}{U_{mc}}\right)$  при различных значениях коэффициента  $\kappa$

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

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

Зависимости коэффициента гармоник  $K_f$  выходного напряжения от отношения  $\frac{E_{эмү}}{U_{mc}}$  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.

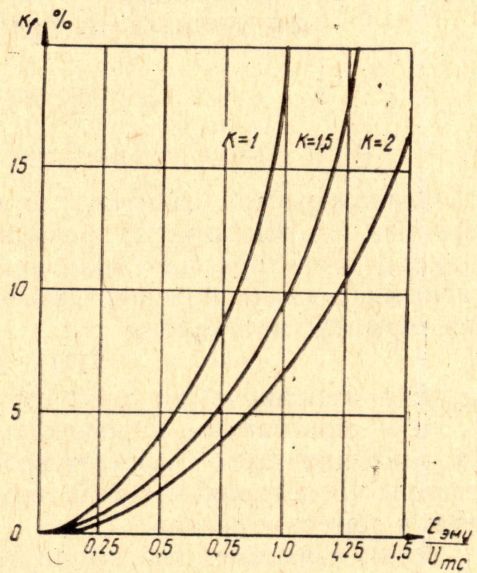


Рис. 3. Зависимость коэффициента гармоник  $K_f$  от  $\frac{E_{эмү}}{U_{mc}}$  при различных значениях коэффициента  $\kappa$