

## УСЛОВИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАШИННОГО УСИЛИТЕЛЯ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОЛЕМ

В. П. ЛАГУНОВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

При работе в нагрузочном режиме, а также при работе на холостом ходу электромашиный усилитель с поперечным полем (ЭМУ ПП) при определенных условиях может произвольно самовозбуждаться, при этом теряется управляемость им.

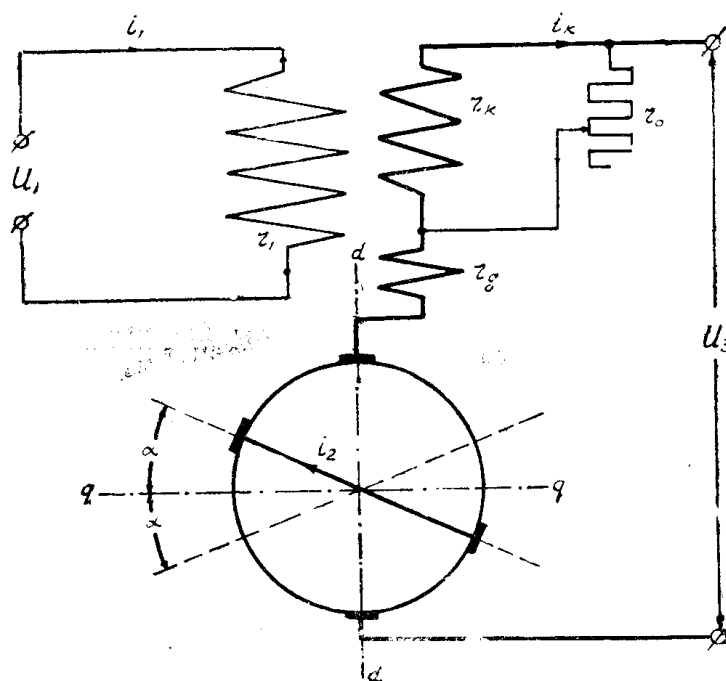


Рис. 1.

Принципиальная схема ЭМУ с поперечным полем.

- $U_1$  — напряжение, подаваемое на обмотку управления.
- $U_3$  — напряжение на зажимах продольной цепи усилителя.
- $r_1$  — сопротивление обмотки управления.
- $r_k$  — сопротивление компенсационной обмотки.
- $r_0$  — шунтирующее сопротивление.
- $r_g$  — сопротивление обмотки добавочного полюса.
- $i_1$  — ток в обмотке управления.
- $i_2$  — ток поперечной цепи якоря.
- $i_k$  — ток в компенсационной обмотке.
- $d-d$  — продольная ось усилителя.
- $q-q$  — поперечная ось усилителя.
- $\alpha$  — угол сдвига щеток поперечной цепи.

Чтобы выяснить условия, при которых возможно самовозбуждение ЭМУ ПП на холостом ходу, а также скорость протекания этого процесса, необходимо исследовать систему дифференциальных уравнений усилителя, которая может быть представлена следующим образом [1].

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{1k} \frac{di_k}{dt} - M_{12} \frac{di_2}{dt}, \\ 0 &= M_{k1} \frac{di_1}{dt} + i_k R_k + L_k \frac{di_k}{dt} - M_{k2} \frac{di_2}{dt}, \\ e_2 &= \kappa_{21} i_1 + \kappa_{2k} i_k - \kappa_{2p} i_2 = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}, \\ e_3 &= \kappa_{32} i_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $U_1$ —напряжение, прикладываемое к обмотке управления;

$e_2$ —э. д. с. на щетках поперечной цепи;

$e_3$ —э. д. с. на щетках продольной цепи;

$r_1$  и  $L_1$ —активное сопротивление и индуктивность обмотки управления;

$M_{1k}$  и  $M_{12}$ —взаимоиндуктивность обмотки управления с компенсационной обмоткой и с поперечной цепью;

$r_k$  и  $L_k$ —активное сопротивление и индуктивность компенсационной обмотки;

$R_k = r_k + r_0$ —общее сопротивление контура—компенсационная обмотка—шунтирующее сопротивление;

$M_{k1}$  и  $M_{k2}$ —взаимоиндуктивности компенсационной обмотки с обмоткой управления и с поперечной цепью;

$\kappa_{21}$ —коэффициент крутизны характеристики э. д. с. поперечной цепи от тока управления;

$\kappa_{2k}$ —коэффициент крутизны характеристики э. д. с. поперечной цепи от тока компенсационной обмотки.

$$\kappa_{2p} = \kappa_z + \kappa_c \pm \kappa_w, \quad (2)$$

где  $\kappa_z$ ,  $\kappa_c$ ,  $\kappa_w$ —коэффициенты, учитывающие изменение э. д. с. поперечной цепи за счет реакции коммутационных и вихревых токов, а также за счет сдвига щеток поперечной цепи (+соответствует сдвигу щеток по направлению вращения усилителя);

$r_2$  и  $L_2$ —активное сопротивление и индуктивность поперечной цепи;

$\kappa_{32}$ —коэффициент крутизны характеристики э. д. с. продольной цепи от тока поперечной цепи.

Система дифференциальных уравнений (1) имеет следующее характеристическое уравнение третьей степени относительно  $p$ :

$$\begin{aligned} (L_1 L_k L_2 - M_{k1} M_{1k} L_2) p^3 + (\kappa_{2p} L_1 L_k + r_2 L_1 L_k + R_k L_1 L_2 + r_1 L_k L_2 + \\ + \kappa_{21} M_{1k} M_{k2} + \kappa_{2k} M_{k1} M_{12} - \kappa_{21} M_{12} L_k - \kappa_{2k} M_{k2} L_1 - \kappa_{2p} M_{1k} M_{k2} - \\ - r_2 M_{k1} M_{1k}) p^2 + (\kappa_{2p} R_k L_1 + \kappa_{2p} r_1 L_k + r_2 R_k L_1 + r_1 r_2 L_k + r_1 R_k L_2 - \\ - \kappa_{21} R_k M_{12} - \kappa_{2k} r_1 M_{k2}) p + r_1 R_k \kappa_{32} + r_1 r_2 R_k = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Обычно при теоретическом рассмотрении переходных процессов ЭМУ ПП коэффициент связи между обмотками управления и компенсационной принимается равным единице [1]. Если принять это до-

пущение и разделить полученное характеристическое уравнение на  $r_1$ ,  $r_2$  и  $R_k$ , то оно будет иметь следующий вид (4):

$$a_0 p^2 + a_1 p + a_2 = 0, \quad (4)$$

где коэффициенты  $a_0$ ,  $a_1$  и  $a_2$  равны:

$$a_0 = T_2 (T_1 + T_k) + \frac{\kappa_{21}}{r_2} (T_{1k} T_{k2} - T_k T_{12}) + \frac{\kappa_{2k}}{r_2} (T_{12} T_{k1} - T_{k2} T_1), \quad (5)$$

$$a_1 = \left( \frac{\kappa_{2p} + r_2}{r_2} \right) (T_1 + T_k) + T_2 - \frac{1}{r_2} (\kappa_{21} T_{12} + \kappa_{2k} T_{k2}), \quad (6)$$

$$a_2 = \frac{\kappa_{2p} + r_2}{r_2}, \quad (7)$$

где

$$T_1 = \frac{L_1}{r_1} \text{ — постоянная времени цепи обмотки управления;}$$

$$T_k = \frac{L_k}{R_k} \text{ — постоянная времени контура компенсационной обмотки;}$$

$$T_2 = \frac{L_2}{r_2} \text{ — постоянная времени поперечной цепи;}$$

$$T_{12} = \frac{M_{12}}{r_1} \text{ — постоянная времени, определяемая взаимной индукцией обмотки управления с поперечной цепью;}$$

$$T_{k2} = \frac{M_{k2}}{R_k} \text{ — постоянная времени, определяемая взаимной индукцией компенсационной обмотки с поперечной цепью;}$$

$$T_{k1} = \frac{M_{k1}}{R_k} \text{ — постоянная времени, определяемая взаимной индукцией компенсационной обмотки с обмоткой управления;}$$

$$T_{1k} = \frac{M_{1k}}{r_1} \text{ — постоянная времени, определяемая взаимной индукцией обмотки управления с компенсационной обмоткой.}$$

Характеристическое уравнение (4) имеет два корня

$$p_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0 a_2}}{2a_0},$$

Характер переходного процесса нарастания э. д. с. на продольных щетках ЭМУ ПП целиком определяется корнями  $p_{1,2}$ . Для того, чтобы выяснить те условия, при которых возможно самовозбуждение усилителя, а также установить, каким образом влияют различные факторы на скорость протекания этого процесса, произведем исследование корней характеристического уравнения (4).

Самовозбуждение усилителя возможно лишь в том случае, если один из корней примет значение вещественного положительного числа. Такое значение корней возможно в двух случаях, а именно:

1. При  $a_1 > 0$  и  $a_2 < 0$ .

В этом случае

$$p_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \gamma a_1}{2a_0},$$

где  $\gamma > 1$ .

Таким образом, в этом случае мы будем иметь хотя бы один вещественный положительный корень.

2. При  $a_1 < 0$  и  $a_2 < 0$ .

Причем необходимо отметить, что коэффициент  $a_1$  становится меньше нуля только в том случае, если  $a_2 < 0$ . Это следует из анализа структуры коэффициентов характеристического уравнения.

Случай 2 не характерен для режима самовозбуждения усилителя по следующей причине. Эквивалентная постоянная времени ЭМУ ПП имеет следующее выражение [2]

$$T_{эк} = \frac{2a_0}{a_1}. \quad (8)$$

Рассматривая выражение для эквивалентной постоянной времени усилителя (8), мы видим, что, если  $a_1$  принимает значение, равное нулю или меньше нуля, то самовозбуждение усилителя становится невозможным.

Таким образом, для режима самовозбуждения усилителя характерен первый случай, т. е. случай, когда  $a_1 > 0$  и  $a_2 < 0$ . Выясним, при каких условиях коэффициент  $a_2$  является отрицательным.

Выражение коэффициента  $a_2$  согласно (7) равно:

$$a_2 = \frac{\kappa_{2p}}{r_2} + 1. \quad (9)$$

Из уравнения (9) следует, что коэффициент  $a_2$  может стать отрицательным в том случае, когда

$$\kappa_{2p} \leq -r_2. \quad (10)$$

Обращаясь к выражению (2), мы можем установить, что неравенство (10) существует в случае сдвига щеток поперечной цепи против направления вращения. Иными словами, самовозбуждение усилителя становится возможным при определенном сдвиге щеток поперечной цепи против направления вращения усилителя.

Учитывая, что коэффициент  $\kappa_{щ}$  пропорционален углу сдвига щеток поперечной цепи, мы можем определить условие (11), при котором наступает самовозбуждение усилителя.

Условие (11) может быть определено следующим образом.

В выражение (10) подставим значение  $\kappa_{2p}$  согласно (2) и мы получим следующее выражение:

$$\kappa_z + \kappa_c - \kappa_{щ} \leq -r_2$$

или

$$\kappa_{щ} \geq \kappa_z + \kappa_c + r_2. \quad (11)$$

По мере увеличения угла сдвига щеток поперечной цепи против направления вращения коэффициент  $a_1$  (6) уменьшается, приближаясь к нулю. При  $a_1 = 0$ , как уже отмечалось ранее, самовозбуждение прекращается. Из последнего выражения можно определить максимальный угол поворота, при котором еще существует самовозбуждение

$$a_1 = \frac{\kappa_{2p}}{r_2} T_1 + \frac{\kappa_{2p}}{r_2} T_k + T_1 + T_k + T_2 - \frac{\kappa_{21}}{r_2} T_{12} - \frac{\kappa_{2k}}{r_2} T_{k2} = 0$$

или

$$\kappa_{щ} = \kappa_c + \kappa_z + r_2 \left( 1 + \frac{T_2}{T_1 + T_k} \right) - \frac{\kappa_{21} T_{12} + \kappa_{2k} T_{k2}}{T_1 + T_k}. \quad (12)$$

Таким образом, угол сдвига щеток поперечной цепи, при котором возможно самовозбуждение ЭМУ ПП, может быть определен по коэффициенту  $\kappa_{щ}$ , значение которого находится в данном случае в следующих пределах:

$$\kappa_c + \kappa_z + r_2 \left( 1 + \frac{T_2}{T_1 + T_k} \right) - \frac{\kappa_{21} T_{12} + \kappa_{2k} T_k}{T_1 + T_k} \geq \kappa_{щ} \geq \kappa_z + \kappa_c + r_2. \quad (13)$$

Скорость нарастания э.д.с. продольной цепи при самовозбуждении определяется эквивалентной постоянной времени (8), которая обратно пропорциональна коэффициенту  $a_1$ . Анализируя выражение для коэффициентов  $a_1$  и  $a_0$ , мы можем заключить, что скорость нарастания э.д.с. продольной цепи при самовозбуждении зависит от ряда параметров, которые постоянны для конкретного усилителя и, кроме того, зависит от угла сдвига щеток поперечной цепи и величины шунтирующего сопротивления  $r_0$ , которые могут меняться при настройке усилителя. Рассмотрение эквивалентной постоянной времени усилителя показывает, что увеличение угла сдвига щеток поперечной цепи против направления вращения и уменьшение шунтирующего сопротивления  $r_0$  приводит к увеличению эквивалентной постоянной времени усилителя.

### Выводы

1. Самовозбуждение ЭМУ ПП на холостом ходу наступает при  $\kappa_{2p} < -r_2$ , что соответствует сдвигу на определенный угол щеток поперечной цепи против направления вращения. Минимальная величина угла, при котором может наступить самовозбуждение усилителя, определяется выражением (11).

Максимальный угол поворота щеток поперечной цепи, при котором ЭМУ ПП еще находится в режиме самовозбуждения, может быть определен из (12).

2. Скорость нарастания э.д.с. на продольных щетках зависит от величины угла сдвига щеток поперечной цепи, причем при увеличении угла сдвига этих щеток против направления вращения процесс самовозбуждения протекает более медленно.

На величину эквивалентной постоянной времени влияет контур компенсационной обмотки.

При увеличении шунтирующего сопротивления  $T_{эк}$  усилителя уменьшается, иными словами, процесс самовозбуждения протекает более быстро.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Рудаков. Характеристики электромашинных усилителей с поперечным полем, Вестник электропромышленности, № 10, 1952.
2. В. В. Рудаков. Влияние сдвига щеток поперечной цепи на переходный процесс электромашинного усилителя, Электричество, № 11, 1952.