

## ВОПРОСЫ ТЕОРИИ БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ЭМУ ПОСТОЯННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА

Э. Н. ПОДБОРСКИЙ, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В настоящей статье рассматривается принцип действия предлагаемого бесколлекторного электромашинного усилителя постоянного тока, дается его теория в режиме холостого хода.

Бесколлекторный ЭМУ представляет собой двухкаскадный одноякорный усилитель, каждый каскад которого является машиной постоянного тока с полупроводниковым коммутатором. Обмотка якоря первого каскада  $W_{p1}$  питает через полупроводниковый коммутатор обмотку возбуждения второго каскада  $W_{p2}$ . Оба каскада выполнены в одном магнитопроводе таким образом, что между ними отсутствует индуктивная связь. Полупроводниковый коммутатор представляет собой выпрямитель, собранный по мостовой схеме на неуправляемых диодах. В пазах ротора, расположенных на полюсах, уложена компенсационная обмотка  $W_k$ , ось которой сдвинута на 90 электрических градусов относительно обмотки  $W_{p2}$ . Схема усилителя представлена на рис. 1. Полу-

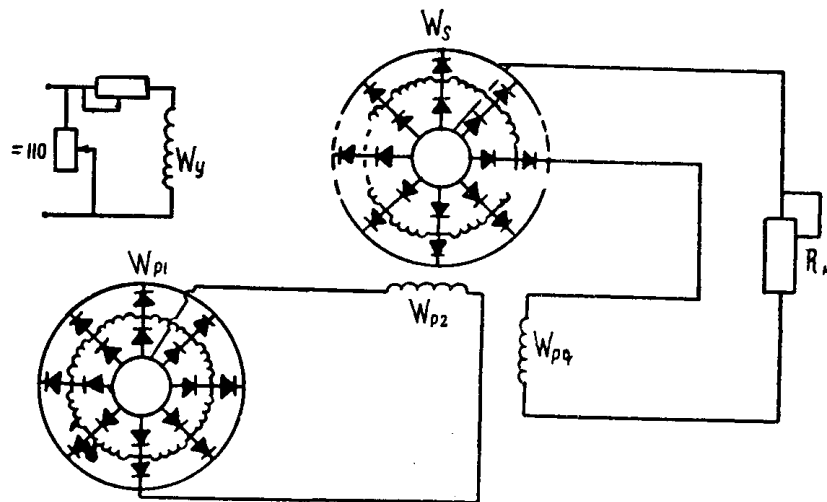


Рис. 1

проводниковый коммутатор с замкнутыми обмотками может быть получен путем замены каждой коллекторной пластины парой последовательно соединенных вентилях, между которыми присоединен вывод обмотки [1]. Объединив одноименные электроды, получим выпрямительный мост. Напряжения на всех вентилях распределяются таким образом, что всегда оказывается открытой пара вентилях, расположенных диа-

метрально. Ось, по которой располагаются открытые вентили, называемая коммутационной осью, всегда располагается по физической нейтральной. Таким образом, происходит как бы поворот щеток на физическую нейтраль.

При холостом ходе составим систему дифференциальных уравнений усилителя. При составлении уравнений будем оперировать результирующими потоками, действующими независимо один от другого, так как использование коэффициентов взаимной индуктивности между обмотками сильно усложняет задачу [2]. Магнитная цепь усилителя считается ненасыщенной, что справедливо при работе с номинальным напряжением.

С учетом этого система уравнений имеет следующий вид: Здесь

$$\Phi_1 = \lambda_1(W_y i_y - W_p i_2), \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \lambda_2 W_{p2} i_2, \quad (2)$$

$$U_y = r_y i_y + \sigma_y W_y p \Phi_1, \quad (3)$$

$$e_2 = C_1 \Phi_1 = r_2 i_2^2 + \sigma_{p2} W_{p2} p \Phi_2 + \frac{c_1 \lambda_1 W_{p1}}{\pi} \beta_1 i_2, \quad (4)$$

$$\sigma_k W_k p \Phi_2 + R_k i_k = 0, \quad (5)$$

$$e_3 = C_2 \Phi_2 + \sigma_3 W_3 p \Phi_2 - r_k i_k - \sigma_k W_k p \Phi_2. \quad (6)$$

Здесь

$\Phi_1, \lambda_1$  — поток и магнитная проводимость первого каскада усилителя,

$W_y, W_{p2}; W_k, W_3$  — числа витков обмотки управления, обмотки возбуждения второго каскада, компенсационной и выходной,

$$W_p = \frac{W_{p1} \beta_1}{\pi} + W_z,$$

где

$W_{p1}$  — число витков якоря первого каскада;

$\beta_1$  — угол сдвига коммутационной оси первого каскада относительно геометрической нейтрали;

$W_z = \frac{F_{z1}}{i_2}$  — фиктивные витки, соответствующие н. с. за счет реакции

коммутационных токов первого каскада;

$i_y$  — ток управления;

$\Phi_2, \lambda_2$  — поток и магнитная проводимость второго каскада;

$i_2$  — ток возбуждения второго каскада;

$U_y$  — напряжение управления;

$\delta_y, \delta_{p2}, \delta_k$  — коэффициенты рассеяния обмоток управления, возбуждения второго каскада и компенсационной;

$C_1, C_2$  — коэффициенты пропорциональности между э. д. с.  $e_2$  и  $e_3$  и потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ ;

$r_2 = r_{p1} + r_{p2} + 2r_b$  — активные сопротивления обмоток якоря первого каскада и сопротивление вентиляй;

$R_k = r_k + r_{ш}$  — общее сопротивление контура компенсационная обмотка — шунтирующее сопротивление.

Система (1—6) характеризует переходный процесс изменения э. д. с. для случая, когда сопротивление  $r_2$  принимается величиной постоянной и значение выходного потока линейно связано с током  $i_2$ .

Для вывода характеристического уравнения и передаточной функции усилителя при холостом ходе используем систему (1—6). Решение этой системы проводим, считая  $\beta_1 = \text{const}$ . Это допущение является вполне приемлемым, поскольку сопротивление  $r_2$  остается постоянным. Бла-

годаря этому допущению данная система становится линейной и ее можно решить в общем виде [3].

Выходная э. д. с. усилителя при холостом ходе в функции напряжения управления будет равна:

$$e_3 \left[ p^2 T_y T_2 + p(T_y + T_2 + T_y K_p'') + 1 + K_p'' + K_p'' \right] = \left[ 1 + \frac{\sigma_3 W_3 p(1 - \epsilon_2)}{C_2} \right] K_2 K_u U_y, \quad (7)$$

где

$K_u = \frac{C_1 \lambda_2 W_y}{r_y} = \frac{C_{12}}{r_y}$  — коэффициент передачи по напряжению для обмотки управления.

$K_p'' = \frac{\lambda_1 W_{p1} C_1 \beta_1}{r^2 \pi}$  — коэффициент передачи, обусловленный реакцией якоря за счет тока  $I_2$ ,

$K_p' = \frac{\lambda_1 C_1 W_z}{r_2}$  — коэффициент передачи, обусловленный реакцией коммутационных токов первого каскада,

$$K_p = K_p'' + K_p',$$

$K_2 = \frac{\lambda_2 W_{p2} C_2}{r_2}$  — коэффициент передачи по напряжению второй ступени усилителя,

$T_y = \frac{\lambda_y \sigma_y \cdot W_y^2}{r_y}$  — постоянная времени цепи уединенной обмотки управления,

$T_2 = \frac{\lambda_2 \sigma_{p2} W_{p2}^2}{r_2}$  — постоянная времени цепи возбуждения второго каскада.

Для установившегося режима получим

$$E_3 = \frac{K_2 K_u}{1 + K_p'' + K_p} U_y. \quad (8)$$

В первом приближении членом

$$\frac{\sigma_3 W_3 p(1 - \epsilon_2)}{C_2}$$

можно пренебречь как малым по сравнению с единицей.

В этом случае уравнение (7) примет вид

$$e_3 = \frac{1 + K_p'' + K_p}{p^2 T_y T_2 + p(T_1 + T_2 + T_1 K_p'') + K_p + K_p'' + 1} E_3. \quad (9)$$

Характеристическое уравнение системы будет иметь вид

$$D(p) = a_0 p^2 + a_1 p + a_2,$$

где

$$a_0 = T_y T_2; \quad a_1 = T_y + T_2 + T_y K_p''; \quad a_2 = K_p + K_p'' + 1.$$

Для анализа переходного процесса исследуем характеристическое уравнение (10), которое имеет два корня

$$p_{1,2} = \frac{-(T_y + T_2 + T_y K_p'') \pm \sqrt{(T_y - T_2 + T_y K_p'')^2 - 4T_y T_2 K_p}}{2T_y T_2} \quad (11)$$

Из (11) следует, что величина корней для конкретного усилителя определяется двумя постоянными времени  $T_y$  и  $T_2$  и величиной коэффициентов  $K_p$  и  $K_p''$ .

В процессе настройки работы усилителя может изменяться величина постоянной времени  $T_y$  за счет включения добавочного сопротивления.

Величина коэффициентов  $K_p$  и  $K_p''$  меняется при сдвиге коммутационной оси первого каскада, причем может принимать как положительные, так и отрицательные значения в зависимости от направления сдвига коммутационной оси.

Из (11) видно, что граничный случай аperiodического процесса будет тогда, когда параметры усилителя удовлетворяют соотношению

$$(T_y - T_2 + T_y K_p'')^2 = 4T_y T_2 K_p'', \quad (12)$$

так как при  $4T_y T_2 K_p > (T_y - T_2 + T_y K_p'')^2$  корни характеристического уравнения будут комплексными и будет наблюдаться колебательный процесс, а при  $4T_y T_2 K_p < (T_y - T_2 + T_y K_p'')^2$

корни вещественные, следовательно, процесс будет аperiodический.

Введем коэффициент

$$\gamma = \frac{T_2}{T_y}.$$

Подставляя  $\lambda$  в (12), получим

$$\gamma^2 - 2\gamma(2K_p'' + 2K_p' + 1) + (1 + K_p'')^2 = 0. \quad (13)$$

Придавая различные значения коэффициенту  $K_p''$  и учитывая, что он зависит от величины смещения коммутационной оси первого каскада, можно получить соответствующие значения параметра  $\lambda$  и на плоскости параметров построить кривую, являющуюся границей областей с аperiodическим и колебательным режимами (рис. 2). Плоскость параметров построена для модели бесколлекторного ЭМУ, которая исследуется в лаборатории.

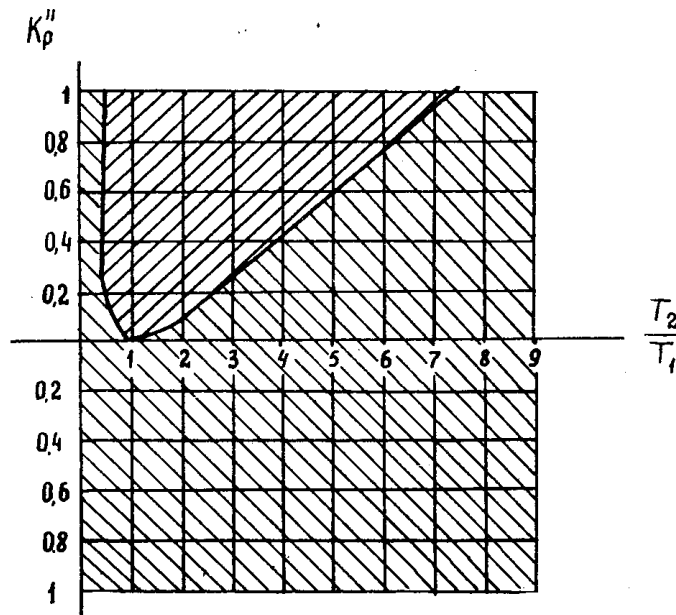


Рис. 2

Режим самовозбуждения может возникнуть лишь в том случае, если один из коэффициентов характеристического уравнения станет отрицательным. Анализ коэффициентов этого уравнения показывает, что только свободный член уравнения  $a_2$  может стать отрицательным. Таким образом, второй граничный случай аperiodического процесса будет тогда, когда параметры системы удовлетворяют соотношению

$$a_2 = K_p + K_p'' + 1 = 0,$$

т. е. при всех значениях

$$K_p + K_p'' < -1$$

мы будем иметь самовозбуждение усилителя.

Найдем значение относительного смещения коммутационной оси первого каскада  $X_1 = \frac{2\beta_1}{\pi}$ , при котором наступает процесс самовозбуждения. С этой целью коэффициент  $K_p$  представим в виде двух слагаемых

$$K_p = K_p'' + K_p' = \pm \frac{C_1 \gamma_1 W_{p1}}{2r_2} X + \frac{C_1 \gamma_1 W_z}{r_2}. \quad (15)$$

Подставим (15) в (14)

$$- \frac{C_1 \gamma_1 W_{p1}}{2r_2} X + \frac{C_1 \gamma_1 W_z}{r_2} + 1 = 0. \quad (16)$$

Знак минус перед первым членом говорит о том, что данное равенство возможно только при смещении коммутационной оси против направления вращения якоря. Из последнего равенства следует

$$X_1 = \frac{W_z}{W_{p1}} + \frac{r_2 W_y}{C_{12} W_{p1}}. \quad (17)$$

Таким образом, при значениях

$$X_1 > \frac{W_{z1}}{W_{p1}} + \frac{r_2 W_y}{C_{12} W_p}$$

усилитель работает в режиме самовозбуждения.

С физической стороны режим самовозбуждения может быть объяснен тем, что сдвиг коммутационной оси первого каскада с геометрической нейтрали против направления вращения якоря вызывает продольную подмагничивающую реакцию якоря, которая при значениях  $X_1$ , определяемая выражением (17), компенсирует действие всех размагничивающих факторов, а при большей величине сдвига может их превышать, что и переводит усилитель в режим самовозбуждения.

Величина и направление сдвига коммутационной оси первого каскада с геометрической нейтрали могут изменяться только при изменении степени компенсации поперечной реакции якоря первого каскада с помощью специальной обмотки, уложенной на статоре и питающейся от выходного напряжения. Если эта обмотка отсутствует, то сдвиг коммутационной оси возможен только по направлению вращения якоря. Колебательный процесс, как указывалось выше, возможен при

$$4T_y T_2 K_p > (T_y - T_2 + T_y K_p'')^2. \quad (18)$$

Корни характеристического уравнения при этом станут комплексными, а именно

$$P_{1,2} = - \frac{1}{T_3} \pm j\omega, \quad (19)$$

где

$$T_3 = \frac{2T_y T_2}{T_y + T_2 + T_y K_p''} \text{ — эквивалентная постоянная времени,}$$
$$\omega = \sqrt{\frac{K_p}{T_y T_2} - \left( \frac{T_y - T_2 + T_y K_p''}{2 T_y T_2} \right)^2} \text{ — собственная частота колебаний усилителя.}$$

В общем случае уравнение нарастания э. д. с. усилителя при внезапном включении управления на постоянное напряжение может быть записано в следующем виде [3]:

$$e_3 = E_3 \left[ 1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \left( \cos \omega t + \frac{1}{T_3 \omega} (\sin \omega t) \right) \right]. \quad (20)$$

Таким образом, величина эквивалентной постоянной времени определяется величинами постоянных времени  $T_y$  и  $T_2$  и величиной сдвига коммутационной оси с геометрической нейтрали. Увеличение сдвига коммутационной оси приводит к уменьшению эквивалентной постоянной времени.

Вторым фактором, характеризующим переходный процесс, является частота колебаний  $\omega$ , которая в значительной степени зависит от коэффициента  $K_p''$ . Сдвиг коммутационной оси по направлению вращения якоря приводит к увеличению частоты колебаний. При  $\omega=0$  колебательный процесс переходит в апериодический.

Из анализа режимов работы бесколлекторного ЭМУ на холостом ходу можно сделать следующие выводы:

1. На характер переходного процесса в основном влияют коэффициенты  $K_p''$  и  $K_p$ . В изготовленном усилителе коэффициент  $K_p''$  определяется величиной и направлением сдвига коммутационной оси первого каскада. В зависимости от него в усилителе могут существовать три вида переходных процессов: а) апериодический, б) колебательный и в) режим мягкого самовозбуждения.

2. Величина эквивалентной постоянной времени зависит от  $T_y$  и  $T_2$ , а также от величины сдвига коммутационной оси.

3. Частота колебаний определяется главным образом коэффициентом  $K_p$ , иными словами, в изготовленном усилителе зависит от сдвига коммутационной оси.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Лотоцкий. Исследование бесколлекторных машин постоянного тока с полупроводниковым коммутатором. Труды МАИ, 1966.
2. Д. П. Морозов. К методике составления дифференциальных уравнений для сложных схем электропривода механизмов. Труды МЭИ, вып. XXII, 1956.
3. В. П. Лагунов. К вопросу исследования устойчивой работы электромашиного усилителя поперечного поля при учете нелинейности его параметров. Диссертация, Томск, 1964.