

## О САМОВОЗБУЖДЕНИИ БЕСКОЛЛЕКТОРНОГО ЭМУ РЕГУЛИРУЕМОЙ ЧАСТОТЫ

Ш. С. РОЙЗ, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Бесколлекторный ЭМУ регулируемой частоты (рис. 1) представляет собой электромашинно-полупроводниковый комплекс, состоящий из управляемого полупроводникового коммутатора и электромашинной части.

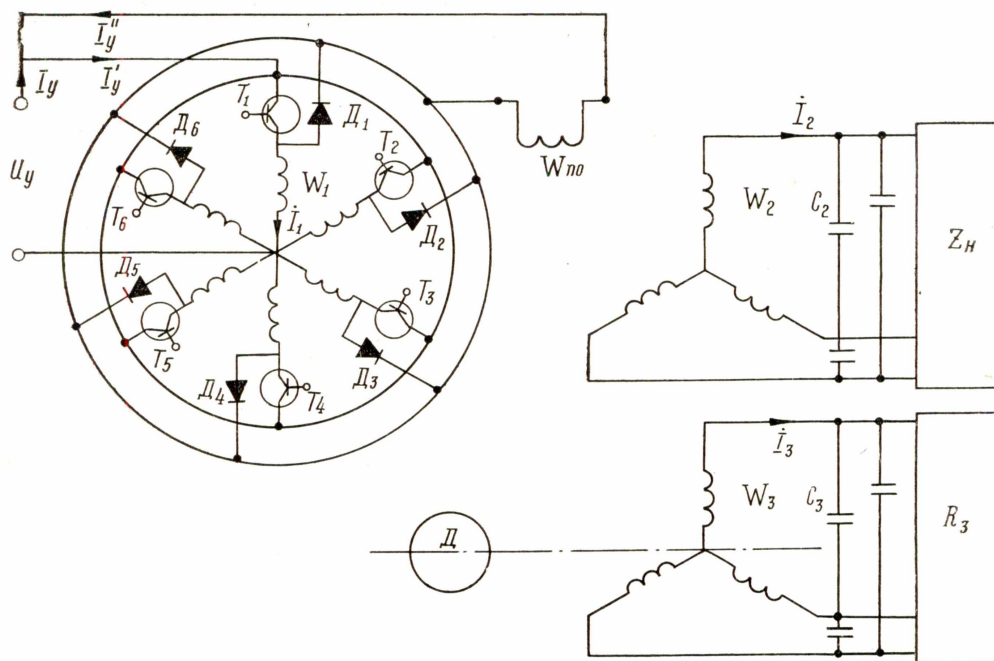


Рис. 1. Схема бесколлекторного ЭМУ регулируемой частоты.

УПК на схеме (рис. 1) представлен полупроводниковыми ключами  $T_1, T_2 \dots T_6$  и обратными диодами  $D_1, D_2 \dots D_6$  в цепи управления. Электромашинная часть усилителя состоит из асинхронного генератора (обмотки  $W_2, W_3$ ) и обмотки управления  $W_1$ . Ротор усилителя вращается с помощью приводного двигателя.

УПК, обеспечивая закономерную последовательность подключения и отключения фаз обмотки управления к источнику постоянного тока, создает в усилителе вращающийся магнитный поток управления. Поток управления наводит э.д.с. в выходной обмотке  $W_2$  и роторной  $W_3$ .

Изменяя частоту переключения фаз обмотки управления, можно регулировать частоту на выходе усилителя практически от несколько герц до

максимальной частоты, определяемой числом полюсов асинхронного генератора  $p_1$  и скоростью вращения ротора  $n$ .

$$f_{\text{вых}} = p_1 n. \quad (1)$$

Для обеспечения генераторного режима ротор асинхронного генератора должен вращаться в одном направлении с полем возбуждения, причем скорость ротора должна быть больше.

Работая с отрицательным скольжением, генератор отдает активную мощность, поступающую с вала, в нагрузку и обмотку управления  $W_1$ , благодаря чему резко снижается мощность управления.

При работе бесколлекторного ЭМУ в номинальном режиме самовозбуждение усилителя может произойти вследствие параметрического резонанса. При этом усилитель теряет управление по частоте. Устойчивая работа усилителя сохраняется при коэффициенте усиления 20—200. Более высокие значения коэффициента усиления ограничиваются точностью подстройки конденсаторов, нестабильностью нагрузки и температурными факторами [1].

При определенном значении скольжения, сопротивления нагрузки и активного сопротивления в цепи ротора усилитель может потерять управление и по выходному напряжению. Это обусловлено тем, что ток  $I'_y$ , протекающий через обратные диоды, может оказаться большим, нежели ток  $I'_y$ , протекающий по полупроводниковым ключам. Результирующий ток управления в данном случае может быть равным нулю или принимать отрицательные значения, хотя э.д.с. выхода  $E_2$  значительно отличается от нуля. Такой режим нами принято рассматривать как режим самовозбуждения.

С целью устранения самовозбуждения нами предлагается на спинке статора усилителя укладывать подмагничивающую обмотку  $W_{\text{по}}$  и включать ее последовательно в цепь постоянного тока УПК, либо в цепь обратных диодов. Назначение обратных диодов в схеме УПК состоит в том, что при работе усилителя в режиме холостого хода или при незначительной нагрузке результирующий магнитный поток наводит э.д.с. в обмотке управления. Переменный ток, протекающий по обмотке управления, выпрямляется за счет обратных диодов и поступает в сеть постоянного тока. Наличие обратных диодов в схеме УПК благоприятно сказывается на работе УПК, уменьшая величину коммутационных перенапряжений на силовых элементах УПК.

Проведем исследования границ самовозбуждения при работе усилителя на всем частном диапазоне. Для этого составим систему уравнений бесколлекторного ЭМУ в установившемся режиме. При составлении уравнений приняты следующие допущения:

1. По обмоткам  $W_1, W_2, W_3$  протекают синусоидальные токи.
2. Обмотка управления  $W_1$  рассматривается как  $m$ -фазная обмотка переменного тока, питающаяся от источника переменного тока.
3. Потери в стали не учитываются.

Учитывая принятые допущения, составим для цепей усилителя следующие уравнения:

Для цепи управления

$$\dot{U}'_1 = \dot{I}_{01} Z_{01} (H_{\text{п}}) + \dot{I}'_1 (r'_1 + j x'_{\sigma 1}), \quad (2)$$

где

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}_1 K_{u1}, \dot{I}'_1 = \dot{I}_1 \frac{1}{K_{i1}}, r'_1 = r_1 K_1, x'_{\sigma 1} = x_{\sigma 1} K_1,$$

$K_{u1} = \frac{W_2 K_{w_2}}{W_1 K_{w_1}}$  — коэффициент приведения по напряжению обмотки  $W_1$ ;

$K_{i1} = \frac{m_2 W_2 K_{w_2}}{m_1 W_1 K_{w_1}}$  — коэффициент приведения по току обмотки  $W_1$ ;



$K_1 = \left( \frac{W_2 K_{W_2}}{W_1 K_{W_1}} \right)^2 \frac{m_2}{m_1}$  — коэффициент приведения сопротивлений обмотки  $W_1$ .

$Z_{01}(H_{II})$  — сопротивление намагничивающего контура с учетом влияния подмагничивающей обмотки.

Примечание: Параметры обмоток  $W_1$  и  $W_3$  приведены к выходной обмотки  $W_2$ .

Для цепи нагрузки

$$0 = \dot{I}_{01} Z_{01}(H_{II}) + \dot{I}_2 [ (r_2 + R_2) + j(x_{\delta 2} - x_2) ],$$

где

$$R_2 = \frac{R_H x_{c2} (x_{c2} - x_H) - R_H x_{c2} x_H}{R_H^2 + (x_{c2} - x_H)^2},$$

$$x_2 = \frac{R_H^2 x_{c2} - x_{c2} (x_{c2} - x_H) x_H}{R_H^2 + (x_{c2} - x_H)^2}$$

$Z_H = R_H + jx_H$  — полное сопротивление нагрузки.

Для цепи ротора

$$0 = \dot{I}_{01} Z_{01}(H_{II}) + \dot{I}'_3 \left[ \left( \frac{r'_3}{S} + R_{\sigma 3} \right) + j(x'_{\sigma 3} - x_{\sigma 3}) \right], \quad (4)$$

где

$$R_{\sigma 3} = \frac{R'_3 x_{c3}^{12}}{S^3 \left[ R_3^{12} + \left( \frac{x'_{c3}}{S} \right)^2 \right]},$$

$$x_{\sigma 3} = \frac{R_3^{12} x'_{c3}}{S^2 \left[ R_3^{12} + \left( \frac{x'_{c3}}{S} \right)^2 \right]},$$

$$\dot{I}'_3 = I_3 \frac{1}{K_{i3}}, \quad r'_3 = r_3 K_3, \quad x'_{\sigma 3} = x_{\sigma 3} K_3, \quad x'_{c3} = x_{c3} K_3, \quad R'_3 = R_3 K_3,$$

$K_{i3} = \frac{m_2 W_2 K_{W_2}}{m_3 W_3 K_{W_3}}$  — коэффициент приведения по току обмотки  $W_3$ ;

$K_3 = \frac{m_2}{m_3} \left( \frac{W_2 K_{W_2}}{W_3 K_{W_3}} \right)^2$  — коэффициент приведения сопротивлений обмотки  $W_3$ ;

$S = \frac{\omega_y - \omega}{\omega_y}$  — скольжение асинхронного генератора,

$$\dot{I}_{01} = \dot{I}'_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}'_3.$$

Связь УПК и обмотки управления  $W_1$ , запишется в виде

$$U_1 = K_u U_y, \quad (5)$$

где  $K_u$  — коэффициент передачи по напряжению при наличии обратных диодов в схеме УПК;

$U_y$  — напряжение сети постоянного тока на входе УПК,

$$I_y = I'_y + I''_y, \quad (6)$$

где  $I'_y = K_I I_{1p}$  — ток управления, протекающий по полупроводниковым ключам, требуемый для создания магнитного потока;

$I''_y = K_I I_{\Gamma a}$  — ток управления, протекающий по обратным диодам, обусловленный активной составляющей тока ротора  $I_3$ ;

$K_I$  — коэффициент передачи по току при наличии обратных диодов в схеме УПК.

Параметр  $Z_{01}(H_{п})$  на схеме замещения (рис. 2), построенный по уравнениям (1)—(6), равен

$$Z_{01}(H_{п}) = \frac{E_2}{I_{01}(H_{п})} \quad (7)$$

При отсутствии потока подмагничивающей обмотки

$$Z_{01}(H_{п}) = Z_{01} = \frac{E_2}{I_{01}}. \quad (8)$$

Значение токов  $I_{01}(H_{п})$  и  $I_{01}$  выразим через н.с. обмотки  $W_2$

$$I_{01}(H_{п}) = \frac{\Sigma F_2(H_{п})}{0,9 m_2 W_2 K W_2}, \quad (9a)$$

$$I_{01} = \frac{\Sigma F_2}{0,9 m_2 W_2 K W_2}, \quad (9б)$$

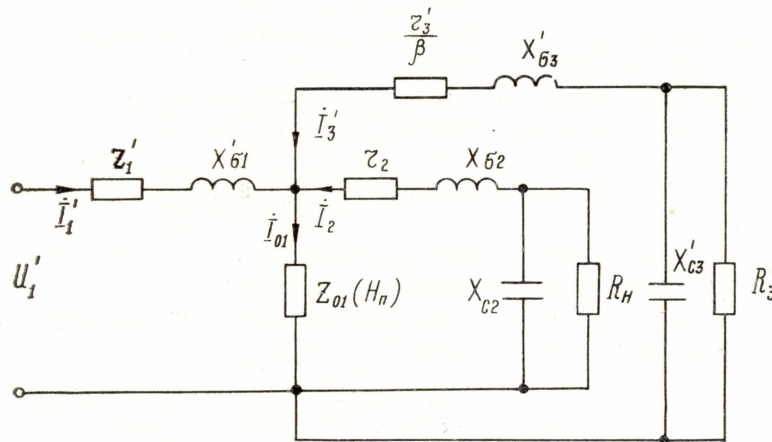


Рис. 2. Схема замещения бесколлекторного ЭМУ регулируемой частоты.

где  $\Sigma F_2(H_{п})$  — суммарная н.с. магнитной цепи с учетом потока подмагничивающей обмотки;

$\Sigma F_2$  — суммарная н.с. магнитной цепи без учета подмагничивающей обмотки.

Решая совместно (9а) и (9б), получим

$$I_{01}(H_{п}) = I_{01} \frac{\Sigma F_2(H_{п})}{\Sigma F_2}. \quad (10)$$

С учетом (10) параметр  $Z_{01}$  равен

$$Z_{01}(H_{п}) = Z_{01} \frac{\Sigma F_2(H_{п})}{\Sigma F_2}. \quad (11)$$

Суммарные значения н.с.  $\Sigma F_2(H_{п})$  и  $\Sigma F_2$ , выраженные через н.с. участков магнитной цепи, равны

$$\Sigma F_2(H_{п}) = F_{01} + F_{zp} + F_{zc} + F_{jp} + F'_{jc}, \quad (12a)$$

$$\Sigma F_2 = F_{01} + F_{zp} + F_{zc} + F_{jp} + F_{jc}, \quad (12б)$$

где  $F_{01}$  — н.с. воздушного зазора;  
 $F_{zp}$  и  $F_{zc}$  — н.с. зубцов ротора и статора;  
 $F_{jp}$  — н.с. спинки ротора;  
 $F_{jc}$  — н.с. спинки статора без учета подмагничивающей обмотки;

$F'_{jc}$  — н.с. спинки статора с учетом подмагничивающей обмотки.  
С учетом (12а) и (12б) параметр  $Z_{01}(H_{\Pi})$  равен

$$Z_{01}(H_{\Pi}) = Z_{01}K_{\Pi}, \quad (13)$$

где  $K_{\Pi} = \frac{1}{1 + \frac{F'_{jc}}{\sum F_2}}$  — коэффициент, учитывающий влияние подмагничивающей обмотки.

Намагничивающая сила  $F'_{jc}$  определяется по выражению

$$F'_{jc} = H'_{jc} l_{jc} \xi, \quad (14)$$

где  $H'_{jc}$  — действующее значение напряженности спинки статора при одновременном намагничивании постоянным и переменным током;

$l_{jc}$  — длина силовой магнитной линии спинки статора;

$\xi$  — коэффициент, учитывающий непостоянство потока вдоль магнитной силовой линии.

Определение  $H'_{jc}$  производится по известной методике (2), где мгновенное значение напряженности спинки статора равно

$$H'_{jc} = \alpha \operatorname{Sh} \beta (B_{\Pi} + B_{\max} \cdot \sin \omega t), \quad (15)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты аппроксимации стали;

$B_{\Pi}$  — постоянная составляющая индукции;

$B_{\max}$  — амплитудное значение переменной составляющей индукции.  
Действующее значение напряженности  $H'_{jc}$  определяется по формуле

$$H'_{jc} = 1,41 \sqrt{(1 + \varepsilon_{\Pi})^2 [I_{2n+1}(j b_M)]^2 + \varepsilon_{\Pi}^2 [I_{2n}(j b_M)]^2}, \quad (16)$$

где

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{h_{\Pi}}{I_c(j b_M)}, \quad h_{\Pi} = \frac{H_{\Pi}}{\alpha}, \quad b_M = \beta B_{\max},$$

$H_{\Pi}$  — напряженность магнитного поля в спинке статора от потока подмагничивающей обмотки,

$I_{\Pi}$  — бесселевы функции  $n$ -порядка от чисто мнимого аргумента ( $j b_M$ ).

Значение бесселевых функций определяется по таблице для модифицированных функций [3].

Усилитель работает без самовозбуждения, если выполнено условие

$$I_y = I'_y - I''_y > 0 \quad (17a)$$

или

$$|I'_{1p}| - |I'_{1a}| > 0. \quad (17b)$$

Составляющие токов  $I'_{1p}$  и  $I'_{1a}$  равны

$$I'_{1p} = I_{01} + I'_{3p} + I'_{2p}, \quad (18a)$$

$$I'_{1a} = I_{2a} + I'_{3a}, \quad (18b)$$

где  $I'_{3p}$  и  $I'_{3a}$  — реактивная и активная составляющие тока ротора  $I'_3$ ;

$I'_{2p}$  и  $I'_{2a}$  — реактивная и активная составляющие тока нагрузки  $I'_2$ .

Подставляя значение токов  $I'_{1p}$  и  $I'_{1a}$ , выраженных через параметры

усилителя, в (176), получим

$$\left| \frac{1}{x_{01} (H_{II})} + \frac{x_{\sigma 2} - x_2}{(r_2 + R_2)^2 + (x_{\sigma 2} - x_2)^2} + \frac{x'_{\sigma 3} - x_{\sigma 3}}{\left(\frac{r'_3}{S} + H_{\sigma 3}\right)^2 + (x'_{\sigma 3} - x_{\sigma 3})^2} \right| +$$

$$+ \left| \frac{r_2 + R_2}{(r_2 + R_2)^2 + (x_{\sigma 2} - x_2)^2} + \frac{\frac{r'_3}{S} + R_{\sigma 3}}{\left(\frac{r'_3}{S} + R_{\sigma 3}\right)^2 + (x'_{\sigma 3} - x_{\sigma 3})^2} \right| \geq 0. \quad (19)$$

Уравнение (19) является условием отсутствия самовозбуждения усилителя при любой нагрузке.

Наиболее опасным режимом с точки зрения самовозбуждения является режим холостого хода.

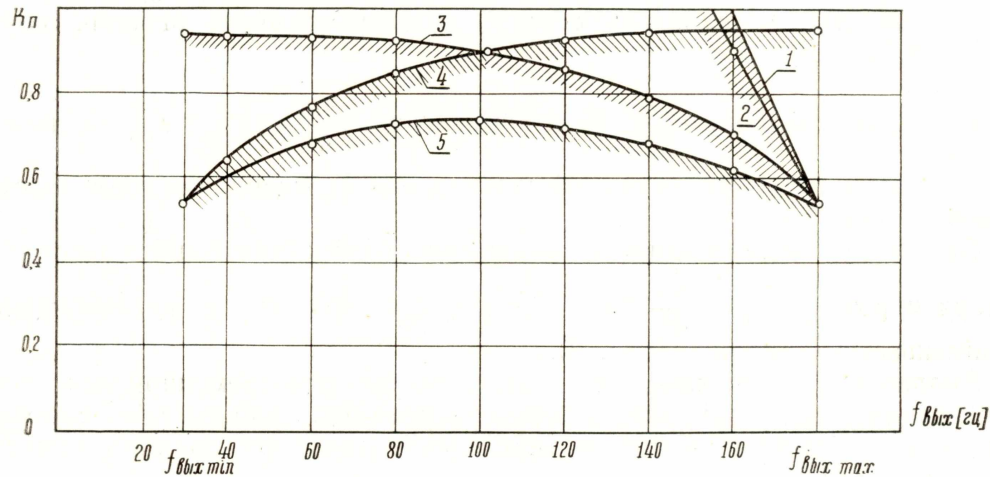


Рис. 3.

Исследуем области работы усилителя в режиме холостого хода, в которых самовозбуждение по амплитуде выходного напряжения отсутствует. Расчет областей произведен при значении параметров:  $r_2 = 7,8 \text{ ом}$ ,  $L_{\sigma 2} = 21,4 \text{ мГн}$ ,  $r_3 = 1,5 \text{ ом}$ ,

$$L_{\sigma 3} = 31,8 \text{ мГн}, L_{01} = 120 \text{ мГн}, C_2 = 6 \text{ мкФ}, C_3 = 30 \text{ мкФ}.$$

Режим 1. Режим холостого хода. Добавочное сопротивление в цепи ротора отсутствует ( $R'_3 = 0$ ).

Условие отсутствия самовозбуждения усилителя в данном режиме с учетом (13) примет вид

$$K_{II} < \frac{1}{x_{01} \left\{ \left| \frac{1}{(x_{\sigma 2} - x_{\sigma 2})} + \frac{x'_{\sigma 3}}{\left(\frac{r'_3}{S}\right)^2 + x_{\sigma 3}^2} \right| + \left| \frac{\frac{r'_3}{S}}{\left(\frac{r'_3}{S}\right)^2 + x'_{\sigma 3}} \right| \right\}}. \quad (20)$$

При осуществлении емкостной компенсации  $x_{\sigma 2} \leq x_{01} + x_{\sigma 2}$  на верхней частоте частотного диапазона область самовозбуждения ограничивается кривой 1 (рис. 3). Область, где самовозбуждение отсутствует, располагается снизу кривой.

При осуществлении емкостной компенсации  $x_{\sigma 2} \geq x_{01} + x_{\sigma 2}$  на всем частотном диапазоне область самовозбуждения ограничивается кривой 2 (рис. 3).



Анализ данного режима показывает, что область устойчивой работы сохраняется почти на всем частотном диапазоне работы усилителя.

Р е ж и м 2. Режим холостого хода. Добавочное сопротивление в цепи ротора регулируется по определенному закону.

Закон регулирования  $R'_3$  может быть записан выражением

$$R'_3 = R_p \beta - r'_3, \quad (21)$$

где

$$R_p = \frac{r'_3}{\beta_{\max}},$$

$$\beta_{\max} = \frac{\omega_{y \max} - \omega}{\omega_{y \max}} \text{ — относительное скольжение.}$$

Такой закон обеспечивает постоянство тока ротора  $I'_{3a}$ .

При осуществлении емкостной компенсации  $x_{c2} \leq x_{01} + x_{\sigma 2}$  на верхней частоте частотного диапазона область самовозбуждения ограничивается кривой 3 (рис. 3).

При осуществлении емкостной компенсации  $\frac{x'_{c3}}{S^2} \leq x_{01} + x'_{\sigma 3}$  на нижней частоте частотного диапазона область самовозбуждения ограничивается кривой 4 (рис. 3).

При осуществлении одновременной емкостной компенсации со стороны статора и ротора  $x_{c2} + \frac{x'_{c3}}{S^2} \leq x_{01} + x_{\sigma 2} + x'_{\sigma 3}$  область самовозбуждения ограничивается кривой 5 (рис. 3).

Анализ данного режима показывает, что при одновременной емкостной компенсации со стороны статора и ротора усилитель работает без самовозбуждения в широком частотном диапазоне только при наличии обмотки подмагничивания.

В результате проведенного исследования можно заключить:

1. На основе уравнений бесколлекторного ЭМУ получено условие отсутствия самовозбуждения усилителя при работе в режиме холостого хода. Для конкретных параметров усилителя рассчитаны границы самовозбуждения.

2. Анализ работы усилителя в режиме холостого хода показал, что устранение самовозбуждения по амплитуде выходного напряжения возможно лишь при наличии отрицательной обратной связи. Эту связь в усилителе предлагается осуществлять обмоткой подмагничивания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. И. З е л и ч е н о к. Электромашинный асинхронный усилитель мощности, «Электротехника», 1966, № 12.
2. А. И. Б е р т и н о в. Авиационные электрические генераторы, Оборонгиз, Москва 1959.
3. Е. Я н к е, Ф. Э м д е, Ф. Л е ш. Специальные функции. «Наука», Москва, 1968.