

## АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С УПРАВЛЯЕМЫМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ КОММУТАТОРОМ

Б. Е. ТРОФИМЕНКО, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В [1] на базе асинхронной машины с возбуждением от источника постоянного тока через управляемый полупроводниковый коммутатор (УПК-предложен электромашинный усилитель регулируемой частоты (ЭМУ-РЧ).

На рис. 1 приведена схема ЭМУ-РЧ, состоящего из асинхронного генератора (обмотка  $W_p, W_c$ ) и обмотки возбуждения ( $W_b$ ). Обмотка возбуждения с выходной обмоткой заложена в пазы статора и представляет собой шестифазную звезду с нулевым проводом. Питание фаз однополупериодное. Схема УПК обеспечивает закономерное последовательное подключение и отключение фаз обмотки возбуждения, благодаря чему в машине создается вращающаяся н. с. возбуждения.

Ротор ЭМУ-РЧ вращается приводным двигателем (в принципе любым) с переменной либо постоянной скоростью. При любой скорости приводного вала асинхронный генератор, работая с отрицательным скольжением, отдает активную мощность в нагрузку и источник возбуждения.

При малых нагрузках усилителя возможен режим его самовозбуждения, т. е. потеря управления выходным напряжением. Для обеспечения нормальной работы ЭМУ-РЧ в широком диапазоне нагрузок он снабжен обмоткой подмагничивания  $W_{\Pi}$ , намотанной вокруг спинки статора и включенной в цепь возбуждения  $U_b$  (рис. 1).

Целью данной работы является теоретическое исследование предложенного варианта усилителя. Ввиду дискретного переключения фаз обмотки возбуждения посредством УПК исследовать ЭМУ-РЧ как обычную асинхронную машину невозможно.

Рассмотрение как переходных, так и установившихся режимов возможно по межкоммутационным интервалам времени, в течение которых число действующих э. д. с. и участвующих в процессе цепей неизменно.

Закономерности протекания токов и напряжений в отдельных интервалах времени могут быть описаны системой дифференциальных уравнений, составленных относительно мгновенных фазных переменных.

Для составления системы уравнений и последующего аналитического исследования принимается, кроме общеизвестных в теории электрических машин допущений: магнитная цепь ненасыщена, потери в стали и вытеснение тока отсутствуют и т. д., ряд дополнительных допущений: скорость вращения ротора постоянна, нагрузка ЭМУ-РЧ и ее обмотки симметричны; транзисторные ключи УПК идеальные, т. е. угол коммутации фаз обмотки  $W_b$  равен нулю.

Запишем для интервала, когда открыты ключи УПК К1, К2, К3, уравнения фазных переменных для обмоток ЭМУ-РЧ:

$$|U_b| = r_b |i_m^b| + \frac{d}{dt} |\psi_m^b|$$

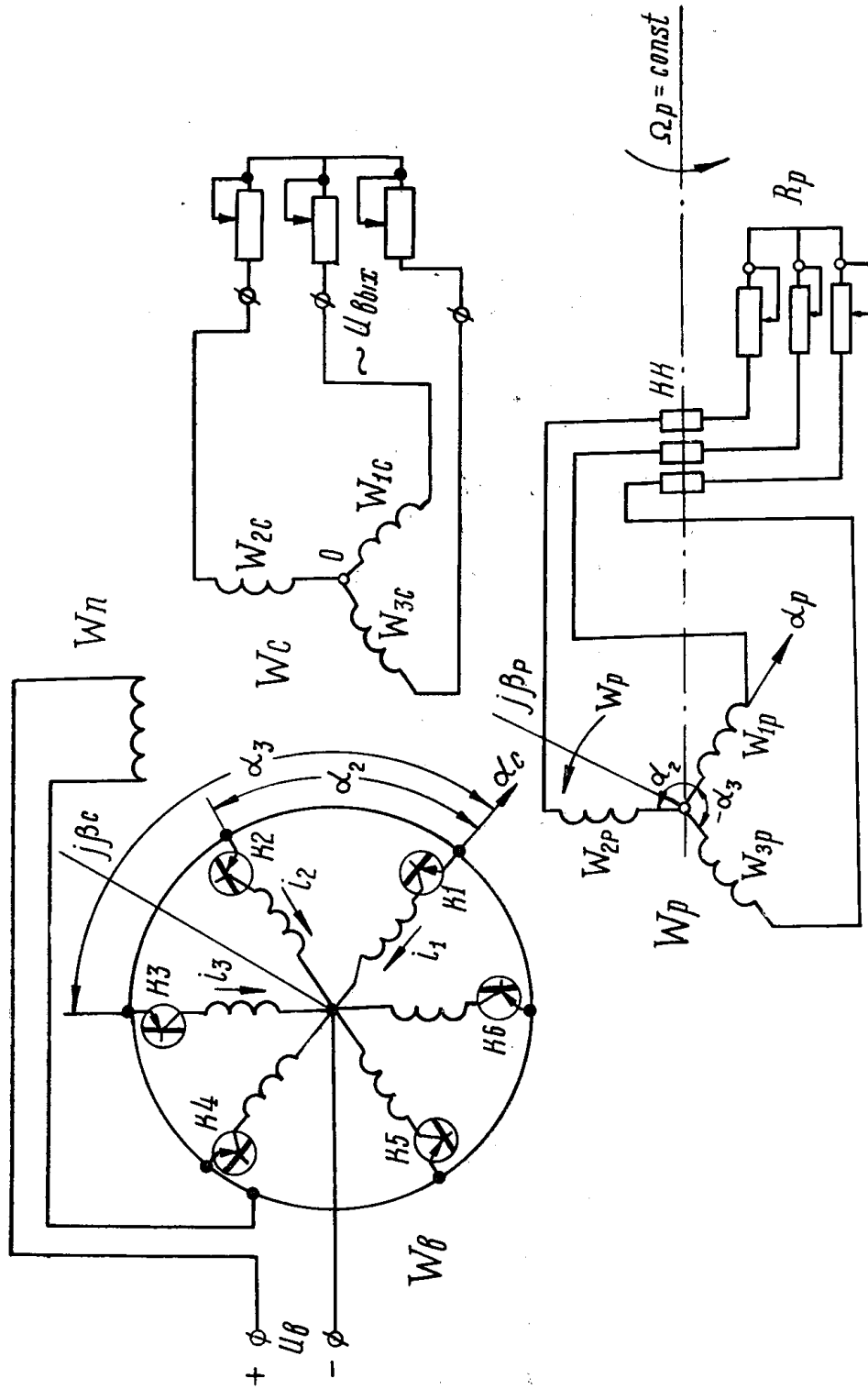


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема ЭМУ-РЧ.

$$0 = r'_p |i_n^p| + \frac{d}{dt} |\psi_n^p|, \quad (1)$$

$$0 = r'_c |i_q^c| + \frac{d}{dt} |\psi_q^c|,$$

где  $|U_B|$ ,  $|i_m^B|$ ,  $|i_n^p|$ ,  $|i_q^c|$ ,  $|\psi_m^B|$ ,  $|\psi_n^p|$ ,  $|\psi_q^c|$  — столбцевые матрицы напряжений, токов и потокосцеплений фаз обмоток усилителя.

Полные потокосцепления фаз относительно выбранных ортогональных координатных осей  $\alpha_c, j\beta_c$  — на статоре,  $\alpha_p, j\beta_p$  — на роторе, запишутся

$$\begin{aligned}\psi_m^B &= L_{\sigma B} \cdot i_m^B + \sum_{t=1}^m M^{B^B} i_t^B \cdot \cos(\alpha_m^B - \alpha_t^B) + \sum_{k=1}^n M^{B^P} i_k^P \cos(\alpha_k^P + \Theta_p - \alpha_m^B) + \\ &\quad + \sum_{s=1}^q M^{B^C} i_s^C \cos(\alpha_q^C - \alpha_m^B), \\ \psi_q^C &= L_{\sigma C} i_q^C + \sum_{s=1}^q M^{C^C} i_s^C \cos(\alpha_q^C - \alpha_s^C) + \sum_{t=1}^m M^{C^B} i_t^B \cos(\alpha_m^B - \alpha_q^C) + \\ &\quad + \sum_{k=1}^n M^{C^P} i_k^P \cos(\alpha_k^P + \Theta_p - \alpha_q^C), \\ \psi_n^P &= L_{\sigma P} i_n^P + \sum_{k=1}^n M^{P^P} i_k^P \cos(\alpha_n^P - \alpha_k^P) + \sum_{t=1}^m M^{P^B} i_t^B \cos[\alpha - (\alpha_n^P + \theta_p)] + \\ &\quad + \sum_{s=1}^q M^{P^C} i_s^C \cos[\alpha_s^C - (\alpha_n^P + \theta_p)],\end{aligned}$$

где  $m = 1, 2, \dots, m_B, \quad t = 1, 2, \dots, m_B,$   
 $n = 1, 2, \dots, n_P, \quad K = 1, 2, \dots, n_P,$   
 $q = 1, 2, \dots, q_C, \quad s = 1, 2, \dots, q_C,$

$m_B$  — число фаз обмотки возбуждения;

$n_P$  — число фаз роторной обмотки;

$q_C$  — число фаз выходной обмотки;

$M^{B^B}, M^{P^P}, M^{C^C}, M^{B^P} = M^{P^B}, M^{B^C} = M^{C^B}, M^{C^P}, M^{P^C}$  — взаимоиנדуктивности фаз обмоток при совпадении их магнитных осей;

$r_B, r_C, r_P$  — активные сопротивления в фазах обмоток  $W_B, W_C, W_P$ ;

$L_{\sigma B}, L_{\sigma C}, L_{\sigma P}$  — индуктивности рассеяния фаз обмоток ЭМУ-РЧ;

$\alpha_m^B, \alpha_n^P, \alpha_q^C$  — углы сдвига магнитных осей фаз обмоток относительно выбранных осей статора и ротора в начальный момент  $t = 0$ ;

$\theta_p = \omega_p \cdot t$  — угол продольной оси ротора, зависящий от его вращения.

Система уравнений (1) является системой дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами.

Для получения системы линейных уравнений осуществляется переход от осей фаз обмоток к выбранным осям на статоре и роторе. При этом преобразование переменных производится умножением уравнений (1) на систему (2)

$$\begin{aligned}|A|^B &= |e^{j\alpha_1^B}, e^{j\alpha_2^B}, \dots, e^{j\alpha_m^B}|, \\ |A|^C &= |e^{j\alpha_1^C}, e^{j\alpha_2^C}, \dots, e^{j\alpha_q^C}|, \\ |A|^P &= e^{j\theta_p} |e^{j\alpha_1^P}, e^{j\alpha_2^P}, \dots, e^{j\alpha_n^P}|.\end{aligned}\tag{2}$$

После умножения (1) на (2) соответственно получены уравнения с новыми комплексными переменными:

$$\begin{aligned}\bar{U}_B &= r_B \cdot \bar{I}_B + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_B, \\ 0 &= r_C \bar{I}_C + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_C, \\ 0 &= r_P \bar{I} + \frac{d}{dt} \bar{\Psi}_P - j\omega_p \bar{\Psi}_P,\end{aligned}\tag{3}$$

где

$$\begin{aligned} \bar{U}_B &= \sum_{t=1}^{m_B} u_t^B e^{j\alpha_t^B}, \quad \bar{e}_B = \sum_{t=1}^{m_B} i_t^B \cdot e^{j\alpha_t^B}. \\ \bar{I}_C &= \sum_{s=1}^{q_C} i_s^C \cdot e^{j\alpha_s^C}, \quad \bar{I}_P = e^{j\Theta_P} \cdot \sum_{k=1}^{n_P} i_k^P \cdot e^{j\alpha_k^P} \end{aligned}$$

результатирующие векторы токов и напряжений, представленные в комплексной плоскости, характеризующие их мгновенные значения; потокосцепления запишутся

$$\begin{pmatrix} \bar{\Psi}_B \\ \bar{\Psi}_C \\ \bar{\Psi}_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{\sigma B} + \frac{m_B}{2} M^{BB} \cdot \frac{m_B}{2} M^{BC} \cdot \frac{m_B}{2} M^{BP} \\ \frac{q_C}{2} M^{CB} \cdot L'_{\sigma C} + \frac{q_C}{2} M^{CC} \cdot \frac{q_C}{2} M^{CP} \\ \frac{n}{2} M^{PB} \cdot \frac{n}{2} M^{PC} \cdot L_{\sigma P} + \frac{n}{2} M^{PP} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \\ \bar{I}_P \end{pmatrix}.$$

Таким образом, преобразование позволило получить линейную систему уравнений (3) с постоянными коэффициентами и новыми комплексными переменными.

Уравнения (3) для комплексных относительных величин в операторной форме, после приведения обмоток к роторной, с учетом начальных условий запишутся в области изображения:

$$\begin{aligned} \bar{U}_B + p x_B \bar{I}_{OB} + p x_m \bar{I}_{OC} + p x_m \bar{I}_{OP} &= (r_B + p x_B) \bar{I}_B + p x_m \bar{I}_C + p x_m \bar{I}_P, \\ p x_m \bar{I}_{OB} + p x_C \bar{I}_{OC} + p x_m \bar{I}_{OP} &= p x_m \bar{I}_B + (r'_C + p x_C) \bar{I}_C + p x_m \bar{I}_P, \\ p x_m \bar{I}_{OB} + p x_m \bar{I}_{OC} + p x_P \bar{I}_{OP} &= (p - j) x_m \bar{I}_B + (p - j) x_m \bar{I}_C + [r'_P + x_P (p - j)] \cdot \bar{I}_P, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$x_B = x_m + x_{\sigma B},$$

$$x_P = x_m + x_{\sigma P},$$

$$x_C = x_m + x_{\sigma C} = x_m + x_{\sigma C} + x_H, \quad \omega = 1$$

Для упрощения решения системы (4) на основании того, что характер переходных процессов в машине определяется в основном полной индуктивностью обмоток, принимается  $x_{\sigma B} = 0$ ,  $x_{\sigma P} = 0$ . Допущение справедливо для рабочего диапазона частот, так как при больших скольжениях  $r'_P \gg x_{\sigma P}$ .

В результате решения найдены результирующие векторы тока обмоток ЭМУ-РЧ:

$$\begin{aligned} \bar{I}_B(t) &= \frac{\bar{U}_B}{r_B} + \frac{r'_P \cdot x_m (r'_C \bar{I}_{OC} + \bar{U}_B)}{r_B \cdot x'_{\sigma C} \cdot (r'_P - j x_m) - x_m r'_C \cdot (r_B + r'_P)} \cdot e^{a\tau} + \\ &+ \frac{r_B^2 \Sigma \bar{I}_O \cdot (x_m x'_{\sigma C} + r'_P r'_C - j r_C x_m) + [(r_B - r'_C) \cdot (r'_C + r'_P) - j r'_C x_C] \cdot r'_P \bar{U}_B}{r_B \cdot x'_{\sigma C} \cdot (r_B + r'_P)^2} l^{(a+jB) \cdot \tau}, \\ \bar{I}_P(t) &= \frac{r_B \cdot r'_C \cdot x_m \cdot \bar{I}_{OB} + j x_m r_B \cdot (x_m \Sigma \bar{I}_O + x'_{\sigma C} \bar{I}_{OC})}{r_B \cdot x'_{\sigma C} \cdot (r'_P - j x_m) - r'_C \cdot x_m \cdot (r_B + r'_P)} e^{a\tau} + \\ &+ \frac{r_B \cdot x_m \Sigma \bar{I}_O \cdot [(r_B \cdot x_m + r_B \cdot x'_{\sigma C} + r'_C x_m) + j (x_m x'_{\sigma C} - r_B r'_C)] + j r'_P \bar{U}_B \cdot (r_B \cdot x'_{\sigma C} - r'_C \cdot x_m)}{x_m \cdot (r_B + r'_P) \cdot [r_B x'_{\sigma C} - j (r'_C)^2]} \times \\ &\quad \times e^{(a+jB) \cdot \tau}, \quad (5) \\ \bar{I}_C(t) &= \\ &= \frac{r'_P x_m \cdot (r_B \Sigma \bar{I}_O - U_B) + \bar{I}_{OC} (r_B r'_P x'_{\sigma C} - r_B r'_C x_m - r'_P r'_C x_m) - j x_m r_B (x_m \Sigma \bar{I}_O + x'_{\sigma C} \bar{I}_{OC})}{r_B \cdot x'_{\sigma C} \cdot (r'_P - j x_m) - r'_C \cdot x_m \cdot (r_B + r'_P)} \times \\ &\quad \times e^{a\tau} + \frac{r'_P x_m \cdot (r_B \Sigma \bar{I}_O - \bar{U}_B) - j r_B \cdot x_m^2 \Sigma \bar{I}_O}{r_C x_m (r'_P + r'_C) - r_B x'_{\sigma C} \cdot (r'_P - j x_m)} e^{(a+B) \cdot \tau}, \end{aligned}$$

где

$$\Sigma \bar{I}_o = \bar{I}_{об} + \bar{I}_{ос} + \bar{I}_{ор} ,$$

$$a = - \frac{r_B \cdot r'_p}{x_m \cdot (r_B + r'_p)} , \quad b = \frac{r_B}{r_B + r'_p} ,$$

$$x'_{\sigma c} = x_{\sigma c} + x_n, \quad x_n, R_n \text{ — параметры нагрузки ЭМУ — РЧ,}$$

$$r'_c = r_c + R_n,$$

$r'_p = r_p + R_p$ ,  $R_p$  — регулируемое дополнительное сопротивление в цепи ротора для создания режима критического скольжения при любых выходных частотах ЭМУ-РЧ.

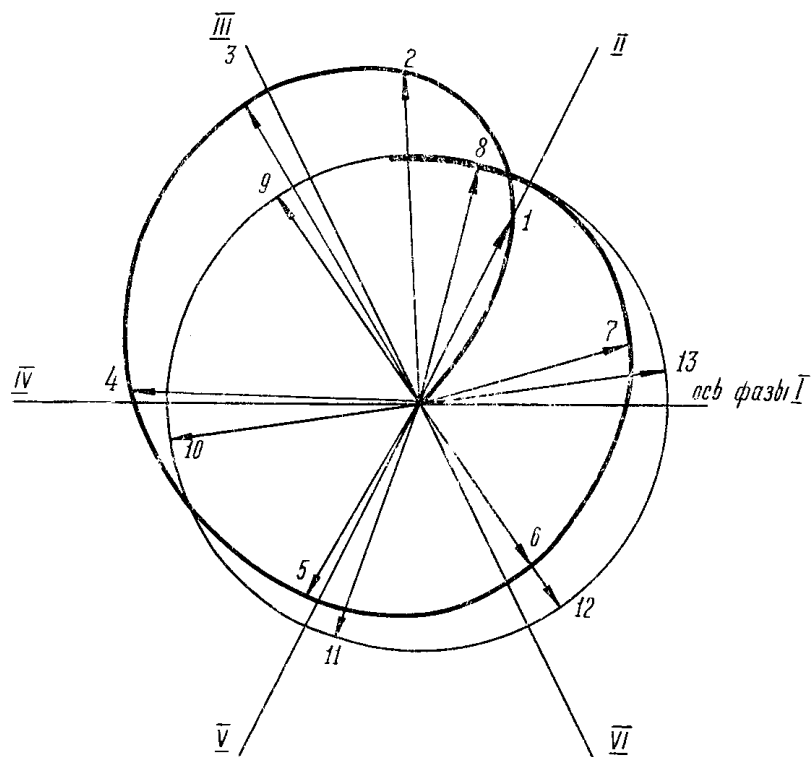


Рис. 2. Изменение величины и положения результирующего вектора обмотки возбуждения при включении  $U_B$ .

Уравнения (5) позволяют рассчитать переходные и установившиеся процессы в ЭМУ-РЧ с учетом работы управляемого транзисторного коммутатора. Расчет производится по интервалам времени.

При известных комплексных токах  $\bar{I}_B$ ,  $\bar{I}_c$ ,  $\bar{I}_p$  по выражениям обратного преобразования находят мгновенные значения токов в фазах обмоток усилителя.

Мгновенные значения токов равны:

$$|i_m^B| = Re [|\bar{I}_B| \cdot |T|^B],$$

$$|i_q^c| = Re [|\bar{I}_c| \cdot |T|^c],$$

$$|i_n^p| = Re [|\bar{I}_p| \cdot |T|^p],$$

где  $|T|^B$ ,  $|T|^c$ ,  $|T|^p$  — столбцевые матрицы обратного преобразования.

В случае наличия трех фаз матрицы запишутся:

$$|T|^{b,c} = \frac{1}{\Delta_{b,c,p}} \begin{vmatrix} (\sin \alpha_3^{b,c} - \sin \alpha_2^{b,c}) + j (\cos \alpha_3^{b,c} - \cos \alpha_2^{b,c}) \\ (\sin \alpha_1^{b,c} - \sin \alpha_3^{b,c}) + j (\cos \alpha_1^{b,c} - \cos \alpha_3^{b,c}) \\ (\sin \alpha_2^{b,c} - \sin \alpha_1^{b,c}) + j (\cos \alpha_2^{b,c} - \cos \alpha_1^{b,c}) \end{vmatrix},$$

$$|T|^p = \frac{-j\theta_p}{\Delta_{b,c,p}} \begin{vmatrix} (\sin \alpha_3^p - \sin \alpha_2^p) + j (\cos \alpha_3^p - \cos \alpha_2^p) \\ (\sin \alpha_1^p - \sin \alpha_3^p) + j (\cos \alpha_1^p - \cos \alpha_3^p) \\ (\sin \alpha_2^p - \sin \alpha_1^p) + j (\cos \alpha_2^p - \cos \alpha_1^p) \end{vmatrix},$$

где  $\Delta_{b,c,p} = \sin(\alpha_1^{b,c,p} - \alpha_2^{b,c,p}) + \sin(\alpha_2^{b,c,p} - \alpha_3^{b,c,p}) + \sin(\alpha_3^{b,c,p} - \alpha_1^{b,c,p})$ .

В матрице  $|T|^b$  углы  $\alpha_1^b, \alpha_2^b, \alpha_3^b$  это углы фаз обмотки  $W_b$ , которые в рассматриваемом интервале времени присоединены к источнику  $U_b$ .

В выражениях (5) не учтено влияние подмагничивающей обмотки на работу ЭМУ-РЧ. Так как обмотка  $W_n$  в процессе работы изменяет  $\chi_m$  машины, то учесть ее влияние при известном токе управления и кривой намагничивания железа машины не представляет труда.

На рис. 2 приведено рассчитанное установление результирующего вектора тока обмотки возбуждения при включении источника  $U_b$ . Из рисунка видно, что процесс установления вектора тока носит колебательный характер. Из годографа установления результирующего вектора может быть определена постоянная времени и быстродействие усилителя. Годограф принципиально может быть построен для любой обмотки ЭМУ-РЧ и любых его режимов.

Таким образом, в результате проведенного исследования ЭМУ-РЧ получены выражения для токов его обмоток, позволяющие рассчитывать установившиеся переходные процессы, а также основные характеристики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ш. С. Ройз, Б. Е. Трофименко, А. И. Скороспешкин, М. Л. Костырев, Э. Ф. Оберган. Электромашинный усилитель с управляемым полупроводниковым коммутатором, «Изв. ТПИ», т 212.
2. Ш. И. Лутидзе. Основы теории электрических машин с управляемым полупроводниковым коммутатором. М., «Наука», 1968.