

**СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ, ВЕКТОРНАЯ И КРУГОВАЯ ДИАГРАММЫ
БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ЭМУ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
РЕГУЛИРУЕМОЙ ЧАСТОТЫ**

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Ш. С. РОЙЗ, Б. И. КОСТЫЛЕВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Бесколлекторный ЭМУ переменного тока регулируемой частоты представляет собой двухкаскадную электрическую машину, каскады которой совмещены в одном магнитопроводе с выполнением условий совмещения. Принципиальная схема такого БЭМУ представлена на рис. 1. Обмотки А и В представляют собой первый каскад с числом полюсов $2p_1$, а обмотки С и D — второй каскад с числом полюсов $2p_2$. Обмотки А и D расположены на статоре, обмотки В и С соединены между собой и расположены на вращающемся роторе. При этом обмотка А, являющаяся входной, выполнена по типу обмоток машин постоянного тока, и вращение ее поля достигается с помощью управляемого полупроводникового коммутатора (УПК). Остальные обмотки выполнены по типу статорных обмоток машин переменного тока.

Предполагая изменение взаимоиндуктивностей по синусоидальному закону и принимая во внимание только первые гармонические токов в обмотках, для контуров схемы рис. 1 в установившемся режиме на основе уравнений Лагранжа-Максвелла можно получить следующие уравнения равновесия напряжений [1].

Для первых фаз обмоток В и С

$$0 = I_{mBC} [(r_B + r_C) \sin(\omega_B t + \alpha_1) + 1,5 (L_B + L_C) \cos(\omega_B t + \alpha_1)] + \\ + I_A M_{AB} \omega_B \cos(\omega_B t) + \frac{3}{2} I_{mD} \cos(\omega_B t \pm \alpha_2) M_{CD} \omega_D \quad (1)$$

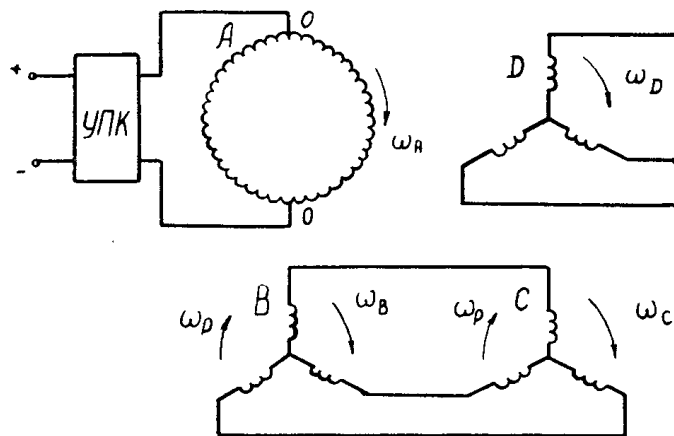


Рис. 1. Принципиальная схема бесколлекторного ЭМУ регулируемой частоты.

Для первой фазы обмотки D

$$U_{D1} = -I_{mD} [r_D \cdot \sin(\omega_D t + \alpha_2) + 1,5L_D \omega_D \cos(\omega_D t \pm \alpha_2)] - \frac{3}{2} I_{mBC} M_{CD} \cos(\omega_D t \pm \alpha_1) \omega_D, \quad (2)$$

где $\omega_B = \pm \omega_A - \omega_p$ — угловая частота изменения токов ротора и взаимноиндуктивностей первого каскада;

$\omega_D = \omega_m \pm \omega_B$ — угловая частота изменения токов выходной обмотки;

ω_A и ω_p — составляющие угловой частоты ω_B обусловленные соответственно вращением поля обмотки A и ротора;

$\omega_m = \omega_p \frac{P_2}{P_1}$ — угловая частота изменения взаимноиндуктивностей второго каскада.

За положительное направление принято направление вращения ротора. Знаки \pm перед α_1 и α_2 в (1) и (2) соответствуют согласному и встречному вращению поля обмотки C и ротора.

Уравнения (1) и (2) в символической форме с переходом к действующим значениям токов и напряжений запишутся в виде:

$$0 = I_{BC} [(r_B + r_C) + j1,5\omega_B(L_B + L_C)] + jI_A \omega_{M1} M_{AB} + j \frac{3}{2} I_D \omega_B M_{CD}. \quad (3)$$

$$U_{D1} = -I_D (r_D + j1,5\omega_D L_D) - j \frac{3}{2} I_{BC} \omega_D M_{CD}. \quad (4)$$

Обозначив отношение $\frac{\omega_B}{\omega_D}$ через S и проделав некоторые преобразования, получим

$$0 = I_B \left[\frac{r_B}{S} + j(1,5L_B - M_{AB}) \omega_D \right] + (I_A + I_B) j M_{AB} \omega_D + I_{BC} \left[\frac{r_C}{S} + j1,5(L_C - M_{CD}) \omega_D \right] + (I_{BC} + I_D) j M_{CD} 1,5\omega_D, \quad (5)$$

$$U_{D1} = -I_D \cdot [r_D + j1,5(L_D - M_{CD}) \omega_D] - (I_D + I_{BC}) j M_{CD} \cdot 1,5\omega_D, \quad (6)$$

где

$$Z_B = \frac{r_B}{S} + jx_{zB} \text{ — полное сопротивление обмотки B,}$$

$$Z_C = \frac{r_C}{S} + jx_{zC} \text{ — полное сопротивление обмотки C,}$$

$$Z_D = r_D + jx_{zD} \text{ — полное сопротивление обмотки D,}$$

$$Z_{01} = r_{01} + jx_{01} \text{ — полное сопротивление намагничивающего контура первого каскада;}$$

$$X_{01} = M_{AB} \omega_D \text{ — сопротивление взаимной индукции,}$$

$$Z_{02} = r_{02} + jx_{02} \text{ — полное сопротивление намагничивающего контура второго каскада,}$$

$$X_{02} = M_{CD} \cdot 1,5\omega_D \text{ — сопротивление взаимной индукции,}$$

$$I_{01} = (I_A + I_{BC}) \text{ — намагничивающий ток первого каскада,}$$

$$I_{02} = (I_{BC} + I_D) \text{ — намагничивающий ток второго каскада.}$$

Уравнениям (5) и (6) соответствуют схема замещения и векторная диаграмма, представленные на рис. 2, 3.

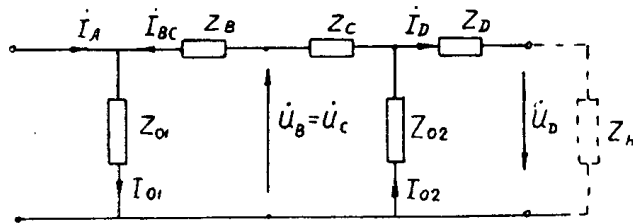


Рис. 2. Схема замещения БЭМУ-РЧ.

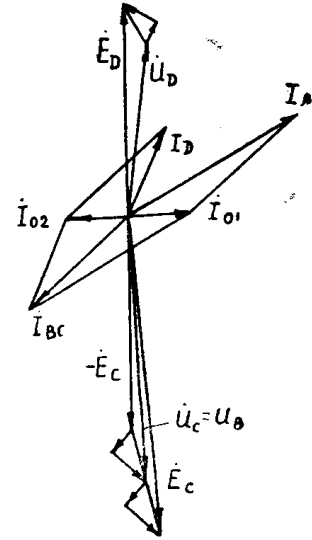


Рис. 3. Векторная диаграмма БЭМУ-РЧ.

Для БЭМУ регулируемой частоты можно построить и круговую диаграмму, которая позволяет определять необходимые параметры с изменением частоты.

Построение круговой диаграммы проводится следующим образом.

Обозначив отношение $\frac{\omega_B}{\omega_P}$ через S_1 и $\frac{\omega_D}{\omega_P} = \frac{P_2}{z_1} \pm S_1'$, уравнения (3)

и (4) запишутся в следующем виде:

$$0 = I_{BC} \left[\frac{r_B + r_C}{S_1} + j1,5\omega_P(L_B + L_C) \right] + jI_A\omega_P M_{AB} + jI_D\omega_P M_{CD} \quad (7)$$

$$U_{D1} = -I_D \left[\frac{r_D}{\alpha \pm S_1} + j1,5\omega_P L_D \right] - jI_{BC}\omega_P M_{CD} \cdot 1,5 \quad (8)$$

Преобразуем (7) и (8)

$$E_{01} = I_{BC} \left[\frac{R_{BC}}{S_1} + jX_{\sigma BC} \right] + (I_{BC} + I_D)Z_{02} + I_{BC} \cdot Z_{01} \quad (9)$$

$$U_{D1} = -I_D \left[-\frac{r_D}{\alpha \pm S_1} + jX_{\sigma D} \right] - (I_{BC} + I_D)Z_{01}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} E_{01} &= -I_A\omega_P M_{AB}, \\ \frac{R_{BC}}{S_1'} &= \frac{r_B + r_C}{S_1}, \\ X_{\sigma BC} &= X_{\sigma B} + X_{\sigma C}. \end{aligned}$$

По (9) и (10) построена схема замещения, представленная на рис. 4, а. Преобразованная схема замещения с вынесенным контуром представлена на рис. 4, б.

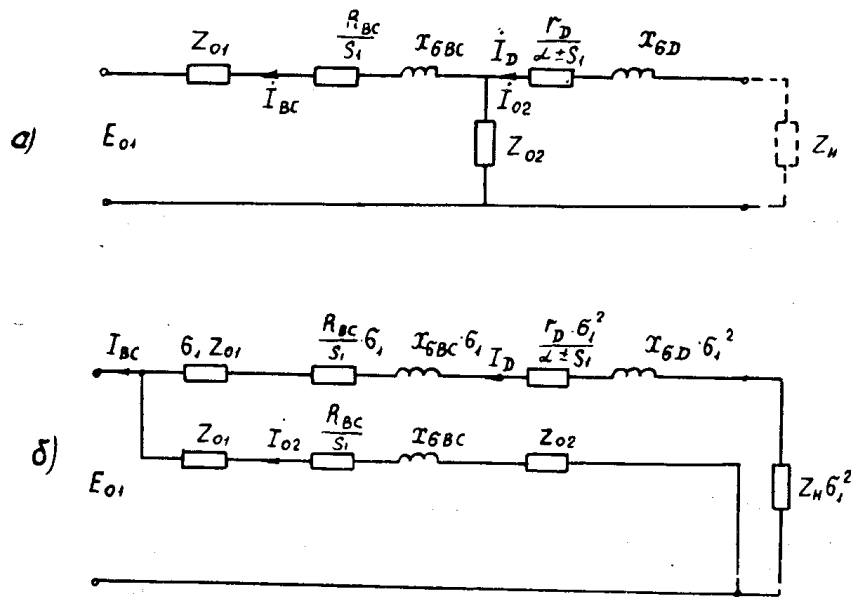


Рис. 4. а) Преобразованная схема замещения БЭМУ-РЧ;
б) схема замещения БЭМУ-РЧ

Выражение для тока I_D из схемы замещения запишется

$$I_D = E_{01} \frac{S_1(\alpha \pm S_1)}{\sigma_1 \cdot R_{BC}\alpha + (\Gamma_D\sigma_1^2 + \Gamma_{01}\sigma_1\alpha + \Gamma_H\sigma_1^2\alpha \pm R_{BC}\sigma_1)S_1 + (\Gamma_{01}\sigma_1 + \Gamma_H\sigma_1^2)S_1^2 + j(\sigma_1 X_{01} + \sigma_1 X_{BC} X_H \sigma_1^2 + X_{BD}\sigma_1^2)} = E_{01} \frac{B \cdot S_1' + C \cdot S_1^2}{D + E \cdot S + FS^2}, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} B &= \alpha, \\ C &= \pm 1, \\ D &= \sigma_1 R_{BC}\alpha, \\ E &= \Gamma_D\sigma_1^2 + \Gamma_{01}\sigma_1\alpha + \Gamma_H\sigma_1^2\alpha \pm R_{BC}\sigma_1, \\ F &= \Gamma_{01}\sigma_1 + \Gamma_H\sigma_1^2. \end{aligned}$$

Диаметр круга

$$D_1 = \frac{E_{01}}{\sigma_1 X_{01} + B_1 X_{BC} + X_H \sigma_1^2 + X_{BD} \sigma_1^2} \quad (12)$$

Уравнение (11) является уравнением бициркулярной кривой, имеющей окружность с двойными значениями параметра.

Выражение для тока I_{02}

$$I_{02} = \frac{E_{01}}{\left[(\Gamma_{01} + \Gamma_{02}) + \frac{R_{BC}}{S_1'} \right] + j(X_{01} + X_{BC} + X_{02})}. \quad (13)$$

Диаметр круга

$$D_2 = \frac{E_{01}}{X_{01} + X_{BC} + X_{02}}. \quad (14)$$

Уравнение (13) есть уравнение круга.

Используя (11)–(13), построим круговую диаграмму. Последняя представлена на рис. 5.

Построенные схемы замещения, векторная и круговая диаграммы позволяют определить необходимые параметры при любом режиме усилителя.

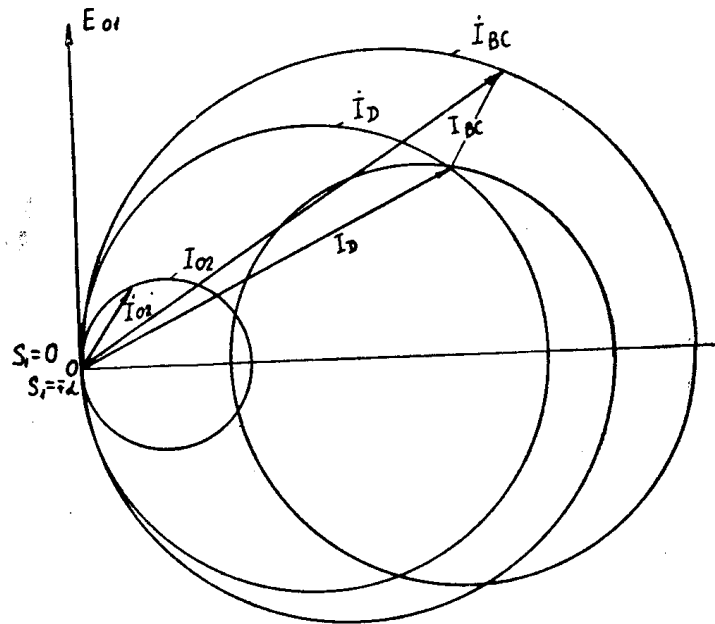


Рис. 5. Круговая диаграмма БЭМУ-РЧ.

Уравнение (6) является уравнением внешней характеристики. Прделав некоторые преобразования, получим уравнение внешней характеристики в более приемлемом виде

$$\dot{U}_{D1} = \dot{E}_D - \dot{I}_D(Z_D + Z'_{02}), \quad (15)$$

где

$$\dot{E}_{D1} = \frac{\dot{I}_A Z_{01} Z_{02}}{(Z_{01} + Z_{02} + Z_B + Z_C)}, \quad (16)$$

$$Z'_{02} = Z_{02} \cdot \frac{Z_{01} + Z_B + Z_C}{Z_{01} + Z_{02} + Z_B + Z_C}. \quad (17)$$

Коэффициент усиления БЭМУ равен отношению мощностей выхода и входа, т. е.

$$K_y = \frac{P_D}{P_A}, \quad (18)$$

где P_D — мощность трех фаз обмотки D,

P_A — мощность обмотки управления.

Мощность одной фазы обмотки D равна

$$P_{D1} = U_{D1} \cdot I_D = E_{D1} \cdot I_D - I_D^2(Z'_{02} + Z_D). \quad (19)$$

Максимальное значение мощности получится, если $\frac{\partial P}{\partial I_D}$ приравнять нулю.

При этом

$$I_D = \frac{E_{D1}}{2(Z_D + Z'_{02})}, \quad (20)$$

$$U_{D1} = \frac{E_{D1}}{2} \quad (21)$$

Максимальная мощность трех фаз обмотки D равна

$$P_{D_{\max}} = 3P_{D_{\max}} = 3 \frac{E_{D1}^2}{4(Z_D + Z'_{02})}. \quad (22)$$

Мощность управления равна

$$P_A = I_A U_A. \quad (23)$$

Напряжение обмотки управления в общем виде запишется

$$U_A = I_A \Gamma_A - E_A. \quad (24)$$

Составляющая E_A обусловлена тем, что результирующий поток вращается относительно неподвижной обмотки A с частотой ω_A и сдвигается относительно точек подключения с изменением нагрузки.

Коэффициент усиления с учетом (22), (23) и (24) равен

$$K_y = \frac{3}{4} \frac{Z_{01}^2 Z_{02}^2}{(Z_D + Z'_{02}) (Z_{01} + Z_{02} + Z_B + Z_C)^2 \left(\Gamma_A - \frac{E_A}{I_A} \right)} \quad (25)$$

Таким образом, рассматривая бесколлекторный ЭМУ переменного тока регулируемой частоты с точки зрения общей теории электрических машин, можно получить все необходимые уравнения и параметры, характеризующие режимы работы усилителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Скороспешкин. Вопросы общей теории электрических машин применительно к бесколлекторным электромашинным усилителям (БЭМУ) переменного тока. Известия ТПИ, т. 145, 1966.
2. А. Г. Каплянский. Введение в общую теорию электрических машин. ГЭИ, 1941.
3. Г. Н. Петров. Электрические машины. ГЭИ, 1963.
4. М. П. Костенко. Электрические машины. Спецчасть, ГЭИ, 1949.