

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ В БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ЭМУ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Э. Ф. ОБЕРГАН, Ш. С. РОИЗ

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Одними из основных показателей любого электромашинного усилителя являются коэффициент усиления, коэффициент полезного действия. Для их определения необходимо знать мощности входа, выхода и приводного двигателя.

Нами разрабатываются усилители постоянного и переменного тока.

Принципиальная схема бесколлекторного усилителя регулируемой частоты, поясняющая его принцип работы, представлена на рис. 1.

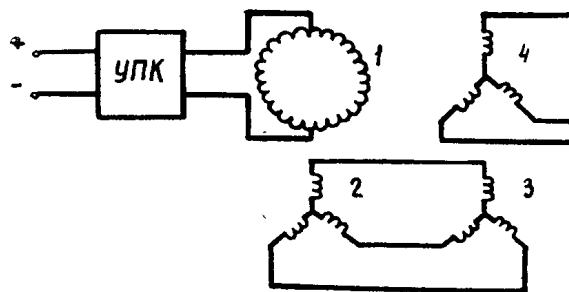


Рис. 1. Принципиальная схема усилителя регулируемой частоты.

Обмотки 1 и 2 относятся к первому каскаду, обмотки 3 и 4 — ко второму. Число полюсов обмоток первого каскада  $2p_1$ , второго —  $2p_2$ . На входе первого каскада устанавливается полупроводниковый коммутатор (УПК), необходимый для получения вращающегося поля обмотки 1.

Вращение преобразователя осуществляется с помощью асинхронного двигателя с числом полюсов  $2p_1$ .

Аналитическая зависимость  $f_{\text{вых}} = f(f_{\text{вх}})$  частоты выхода от частоты входа выражается уравнением

$$f_{\text{вых}} = -\frac{(p_2 \pm p_1) n}{60} \pm \frac{pn}{60} \quad (1)$$

Знаки ( $\pm$ ) в скобках определяют порядок чередования фаз обмоток 2 и 3.

Знаки ( $\pm$ ) перед выражением  $\frac{p_1 n_1}{60}$  определяют направление вращения поля обмотки 1.

$p$  и  $p_1$  — скорости вращения приводного двигателя и потока обмотки 1.

На рис. 2 приведена частотная характеристика, причем отношение чисел пар полюсов  $\frac{P_2}{P_1}$  принято равным 3.

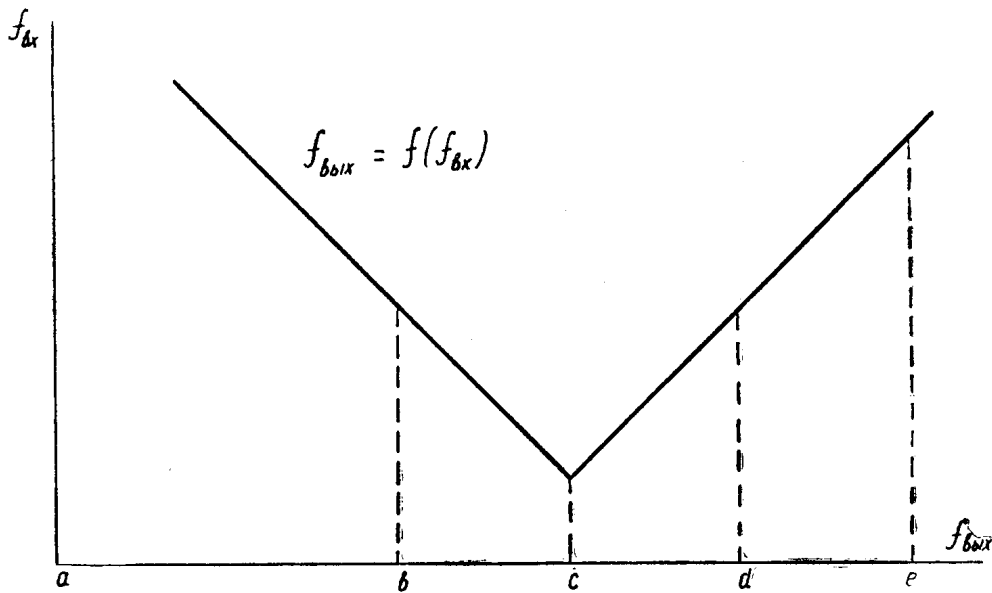


Рис. 2. Частотная характеристика (зависимость  $f_{\text{вых}} = f(f_{\text{вх}})$ )

Разделение всего частотного диапазона на ряд участков (ab, bc, cd и de), как показано на рис. 2, позволяет более просто рассматривать энергетические соотношения усилителя регулируемой частоты при его работе на всей частотной характеристике.

Выходная мощность усилителя  $P_4$  равна:

$$P_4 = P_{\psi_4} - p_{\text{Cu4}}, \quad (2)$$

где  $P_{\psi_4}$  — электромагнитная мощность выходной обмотки 4 усилителя;

$p_{\text{Cu4}}$  — потери в меди обмотки 4.

Электромагнитная мощность  $P_{\psi_4}$  для любого частотного диапазона в общем случае определяется следующим выражением:

$$P_{\psi_4} = M\omega_4 = M(\omega + \omega_3) = P_{m_2} + P_{\psi_3}, \quad (3)$$

где  $P_{\psi_3} = M \cdot \omega_3$  — электромагнитная мощность обмотки 3;

$P_{m_2} = M \cdot \omega$  — электромагнитная мощность обмотки 4, равная механической мощности на валу 2-го каскада;

$M$  — электромагнитный момент, обусловленный взаимодействием потока  $\Phi_3$  и тока  $I_4$ ;

$\omega$  — угловая скорость ротора усилителя;

$\omega_3 = (\omega \pm \omega_1) \frac{P_1}{P_2}$  — угловая скорость вращения потока  $\Phi_3$  относительно ротора;

$\omega_4 = \omega \pm \omega_3$  — угловая скорость вращения потока  $\Phi_3$  относительно статора.

Выразим мощности  $P_{\psi_3}$  и  $P_{m_2}$  через электромагнитную мощность  $P_{\psi_4}$ :

$$P_{\psi_3} = P_{\psi_4} \cdot S_4, \quad (4a)$$

$$P_{m_2} = P_{\psi_4}(1 - S_4), \quad (4б)$$

$$\text{где } S_4 = \frac{\omega_4 - \omega}{\omega_4} = \frac{\pm \omega_2}{\omega_4} = \frac{1}{1 \pm \frac{\omega p_2}{(\omega \pm \omega_1) p_1}} \quad \text{— скольжение}$$

поля обмотки 4 относительно обмотки 3.

Для рассматриваемого усилителя для диапазонов ab и bc  $S_4 < 0$ , для cd и de  $S_4 > 0$ . Это вытекает из того, что для диапазонов ab и bc  $\omega > \omega_3$ .

Электромагнитная мощность обмотки 2 с учетом потерь для диапазонов ab и bc определяется следующим выражением:

$$P_{\psi_2} = P_{\psi_4} \cdot S_4 + \sum p_3 - p_{Cu_2}. \quad (5a)$$

Для диапазонов cd и de

$$P_{\psi_2} = P_{\psi_4} \cdot S_4 + \sum p_3 + p_{Cu_2}, \quad (5b)$$

где  $\sum p_3 = p_{Cu_3} + p_{Fe_3}$  — сумма потерь в меди обмотки 3 и потерь в стали, обусловленных полем  $\Phi_3$ ;

$p_{Cu_2}$  — потери в меди обмотки 2.

Отличие выражений (5a) и (5b) состоит в том, что при работе усилителя в диапазонах ab и bc обмотка 2 по отношению к обмотке 3 является нагрузкой, а в диапазонах cd и de — наоборот.

Электромагнитная мощность  $P_{\psi_2}$  обмотки 2 равна произведению электромагнитного момента  $M_1$ , обусловленного взаимодействием потока  $\Phi_1$  и тока  $I_2$ , на угловую скорость вращения  $\omega_2$  потока  $\Phi_1$  относительно обмотки 2.

$$P_{\psi_2} = M_1 \cdot \omega_2 = M_1 (\omega_1 + \omega) = P_{\psi_1} + P_{m_1}, \quad (6)$$

где  $P_{\psi_1} = M_1 \cdot \omega_1$  — электромагнитная мощность обмотки 1;

$P_{m_1} = M \cdot \omega$  — электромагнитная мощность обмотки 2, равная механической мощности на валу 1-го каскада.

Выразим мощности  $P_{\psi_1}$  и  $P_{m_1}$  через электромагнитную мощность  $P_{\psi_2}$

$$P_{\psi_1} = P_{\psi_2} \cdot \frac{1}{S_1}, \quad (7a)$$

$$P_{m_1} = P_{\psi_2} \left( 1 - \frac{1}{S_1} \right), \quad (7b)$$

где  $S_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_1 \pm \omega}{\omega_1}$  — скольжение поля  $\Phi_1$  относительно

обмотки 2.

Для диапазонов bc и cd  $S_1 < 0$ , для диапазонов ab и de  $S_1 > 0$ . Это справедливо для рассматриваемого усилителя, так как  $\omega > \omega_1$ .

Используя выражения 2, 3, 4, 3a, 5b, 6, 7a, 7b, построим энергетические диаграммы усилителя для каждого из диапазонов (ab, bc, cd и de).

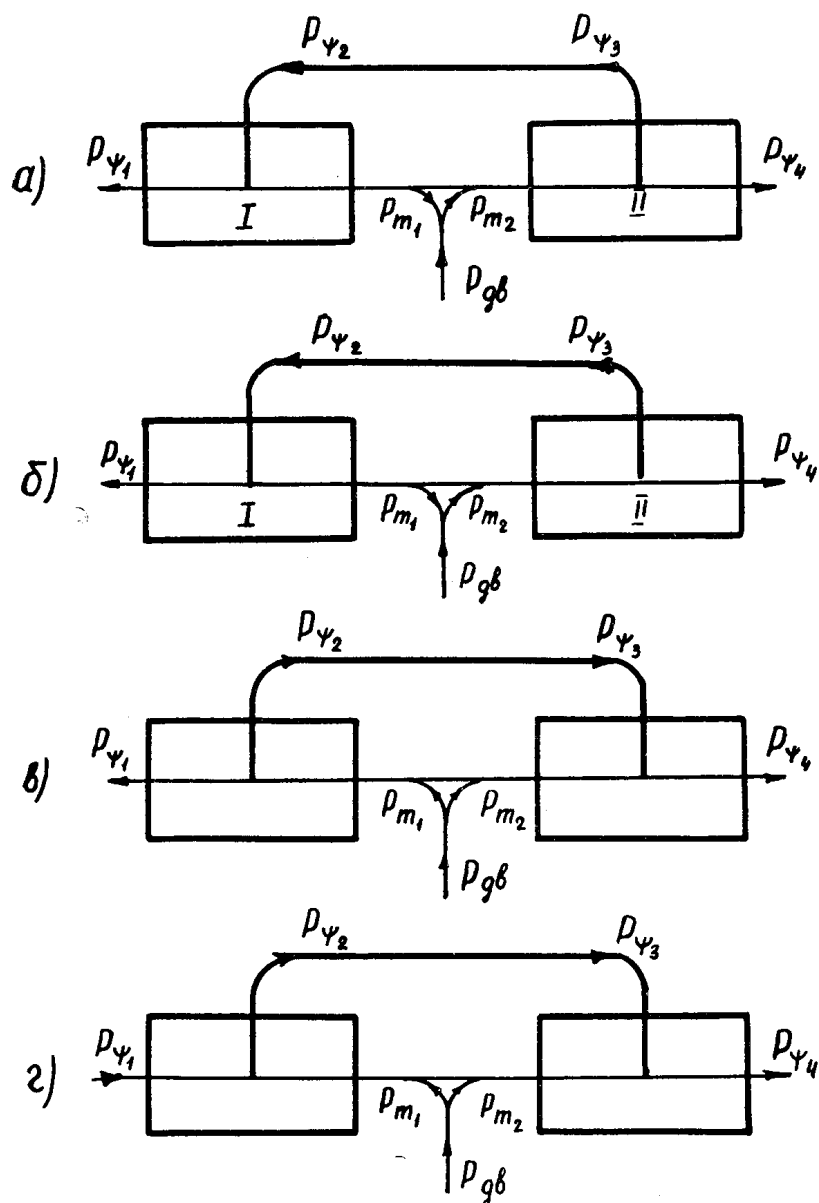
На рис. 3 (а, б, в, г) представлены энергетические диаграммы усилителя при его работе в диапазонах ab, bc, cd и de.

Энергетические диаграммы наглядно показывают распределение мощностей в усилителе, обмен энергии между каскадами, направление мощностей в том или ином каскаде.

Для расчета мощностей входа  $P_1$ , приводного двигателя  $P_{QВ}$  для каждого диапазона получены их выражения.

Для диапазона ab

$$P_1 = P_{\psi_4} \left[ -\frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) - \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 - p_{Cu_2}) \frac{\omega_1}{\omega + \omega_1} + p_{Fe_1} + p_{Cu_1}, \quad (8a)$$



Р и с. 3. Энергетические диаграммы усилителя регулируемой частоты

$P_{Cu1}$  — потери в меди обмотки 1,

$P_{Fe1}$  — потери в стали, обусловленные вращением поля  $\Phi_1$ ,

$$P_{дв} = P_{m1} + P_{m2} + P_{Fe4} + P_{Fe2} + P_{Mx} =$$

$$= P_{\psi 4} \left[ 1 + \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) - \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 - P_{Cu2}) \frac{\omega}{\omega + \omega_1} + P_{Fe4} + P_{Fe2} + P_{Mx}, \quad (86)$$

где  $P_{Fe2}$ ,  $P_{Fe4}$  — потери в стали, покрываемые за счет приводного двигателя.

Для диапазона bc

$$P_1 = P_{\psi 4} \left[ \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) + \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 - P_{Cu2}) \frac{\omega_1}{\omega_1 - \omega} + P_{Fe1} + P_{Cu1}, \quad (9a)$$

$$P_{дв} = P_{\psi_4} \left[ 1 - \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) + \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 - p_{Cu_2}) \frac{\omega}{\omega - \omega_1} + \\ + p_{Fe_4} + p_{Fe_2} + p_{МХ}. \quad (96)$$

Для диапазона cd

$$P_1 = P_{\psi_4} \left[ - \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) + \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 + p_{Cu_2}) \frac{\omega}{\omega_1 - \omega} + \sum p_1, \quad (10a)$$

$$P_{дв} = P_{\psi_4} \left[ 1 + \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) - \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 + p_{Cu_2}) \frac{\omega}{\omega - \omega_1} + \\ + p_{Fe_4} + p_{Fe_2} + p_{МХ}. \quad (106)$$

Для диапазона de

$$P_1 = P_{\psi_4} \left[ \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) + \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 + p_{Cu_2}) \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega} + \sum p_1, \quad (11a)$$

$$P_{дв} = P_{\psi_4} \left[ 1 - \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 + p_1) + \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 + p_{Cu_2}) \frac{\omega}{\omega + \omega_1} + \\ + p_{Fe_4} + p_{Fe_2} + p_{МХ}. \quad (116)$$

Значение коэффициента полезного действия в общем случае для любого диапазона определяется выражением

$$\eta = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{дв} + P_{ВХ}} = \frac{P_4}{P_{дв} + P_{ВХ}} = \\ = \frac{P_{\psi_4} - p_{Cu_4}}{P_{\psi_4} + (\sum p_3 \pm p_{Cu_2}) + p_{Fe_2} + p_{Fe_4} + p_{МХ} + p_{Cu_1} + p_{Fe_1}}. \quad (12)$$

Значение коэффициента усиления в общем случае для любого диапазона определяется следующей формулой

$$K_y = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}} = \frac{P_4}{P_1} = \\ = \frac{P_{\psi_4} - p_{Cu_4}}{P_{\psi_4} \left[ \pm \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 \pm p_1) \pm \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 \pm p_{Cu_2}) \frac{\omega_1}{\omega_1 \pm \omega} + \sum p_1}. \quad (13)$$

Таким образом, энергетические соотношения, полученные нами, позволяют правильно определять мощность полупроводникового коммутатора (УПК), мощность приводного двигателя  $P_{дв}$ , а выражения (12) и (13) позволяют рассчитать коэффициент усиления и коэффициент полезного действия.

Другим усилителем переменного тока является усилитель повышенной частоты (фазочувствительный). Принципиальная схема, поясняющая принцип его работы, представлена на рис. 4.

Для построения энергетических диаграмм воспользуемся уравнениями 2—11б.

Мощности  $P_{\psi_3}$ ,  $P_{m_2}$ ,  $P_{\psi_2}$ ,  $P_{m_1}$ ,  $P_{\psi_1}$  определяются по следующим формулам:

$$P_{\psi_3} = P_{\psi_4} \cdot S_4 = P_{\psi_4} \cdot \frac{1}{1 \pm \frac{p_2}{p_1}}, \quad (14a)$$

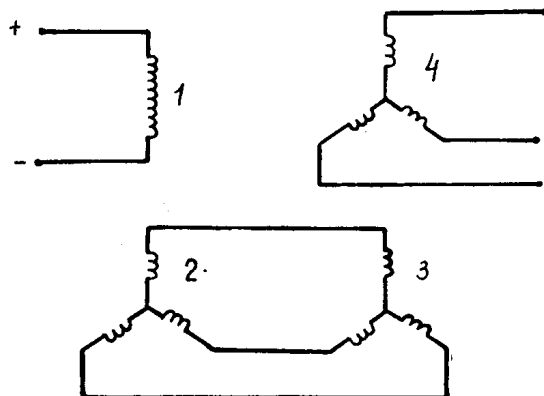


Рис. 4. Принципиальная схема фазочувствительного усилителя переменного тока.

$$P_{m2} = P_{\psi_4}(1 - S_4) = P_{\psi_4} \left( 1 - \frac{1}{1 \pm \frac{P_2}{P_1}} \right), \quad (14б)$$

$$P_{\psi_2} = P_{\psi_4} \cdot S_4 + (\sum P_3 \pm r_{Cu2}), \quad (15а)$$

$$P_{\psi_1} = 0, \quad (15б)$$

$$P_{m1} = P_{\psi_2}, \quad (15в)$$

$$\sum P_3 = r_{Cu3}. \quad (16)$$

Из выражения (15в) следует, что мощность синхронного генератора (первый каскад) равна механической мощности на валу 1-го каскада. Мощность обмотки 1 равна потерям в меди  $P_1 = r_{Cu1}$ .

Мощность приводного двигателя определяется по следующей формуле:

$$P_{дв} = P_{m2} + P_{m1} + r_{Fe2} + r_{Fe4} = P_{\psi_4} + r_{Cu3} \pm r_{Cu2} + r_{Fe2} + r_{Fe4} + P_{МХ}. \quad (17)$$

Используя уравнения (14а—17), построим энергетические диаграммы.

Энергетическая диаграмма, представленная на рис. 5а, относится к случаю, когда обмотки 2 и 3 имеют прямой порядок чередования фаз.

Энергетическая диаграмма, представленная на рис. 5б, относится к обратному порядку чередования фаз.

Коэффициент усиления и к.п.д. подсчитываются по следующим выражениям:

$$K_y = \frac{P_{\psi_4} - r_{Cu4}}{r_{Cu1}}, \quad (18)$$

$$\eta = \frac{P_{\psi_4} - r_{Cu4}}{P_{\psi_4} + r_{Cu3} \pm r_{Cu2} + r_{Fe2} + r_{Fe4}}. \quad (19)$$

Сравнивая выражения (12) и (13) для усилителя регулируемой частоты и (18), (19) для фазочувствительного, можно сделать вывод:

Коэффициент усиления и к.п.д. фазочувствительного усилителя выше, чем для усилителя регулируемой частоты.

Еще одним усилителем переменного тока является усилитель фиксированной частоты. Принципиальная схема, поясняющая принцип работы, представлена на рис. 6.

Значение мощностей  $P_4$ ,  $P_{\psi_3}$ ,  $P_{\psi_2}$ ,  $r_{m1}$ ,  $r_{m2}$  и  $P_1$  определяются по следующим выражениям:

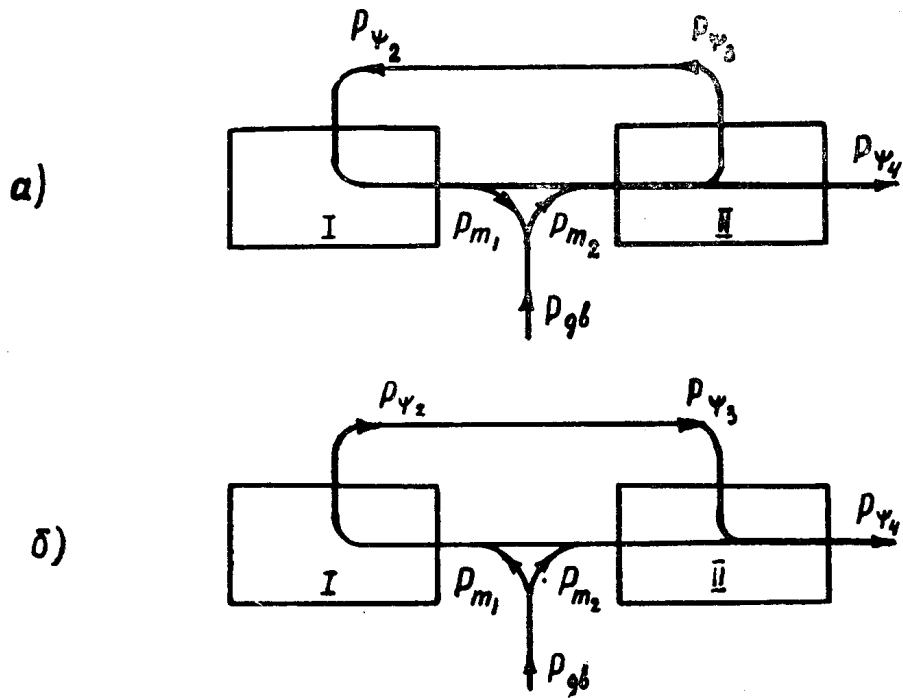


Рис. 5. Энергетические диаграммы фазочувствительного усилителя переменного тока.

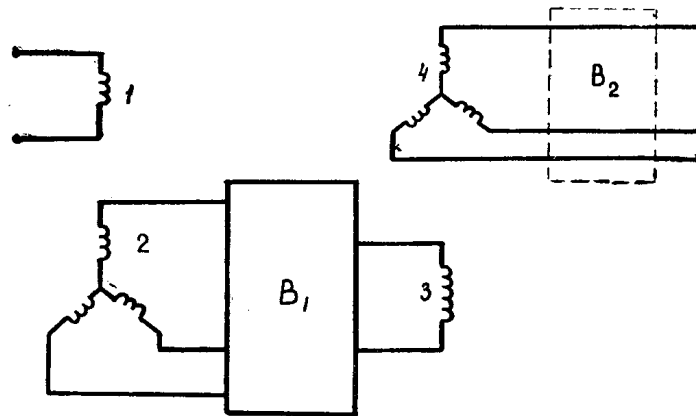


Рис. 6. Принципиальная схема усилителя переменного тока фиксированной частоты и усилителя постоянного тока.

$$P_4 = P_{\psi_4} - r_{Cu4}, \quad (20)$$

$$P_{m2} = P_{\psi_4} + r_{Fe4}, \quad (21)$$

$$P_{\psi_3} = 0, \quad P_3 = r_{Cu3}, \quad (22)$$

$$P'_2 = r_{Cu2} + r_{Cu3} + r_{вентиль1}, \quad (23)$$

$$P_{m1} = P_2 + r_{Fe2} = r_{Cu2} + r_{Cu3} + r_{вентиль1} + r_{Ее2} + r_{Fe1}, \quad (24)$$

$$P_1 = r_{Cu1}. \quad (25)$$

Мощность приводного двигателя подсчитывается по формуле

$$P_{дв} = P_{\psi_4} + r_{Cu2} + r_{Cu3} + r_{вентиль1} + r_{Ее2} + P_{мх}. \quad (26)$$

К.п.д. усилителя равен

$$\eta = \frac{P_{\psi_4} - r_{Cu4}}{P_{\psi_4} + r_{Cu2} + r_{Cu3} + r_{вентиль1} + r_{Fe2} + P_{мх} + r_{Cu1} + r_{Fe1}}. \quad (27)$$

Энергетическая диаграмма усилителя представлена на рис. 7.

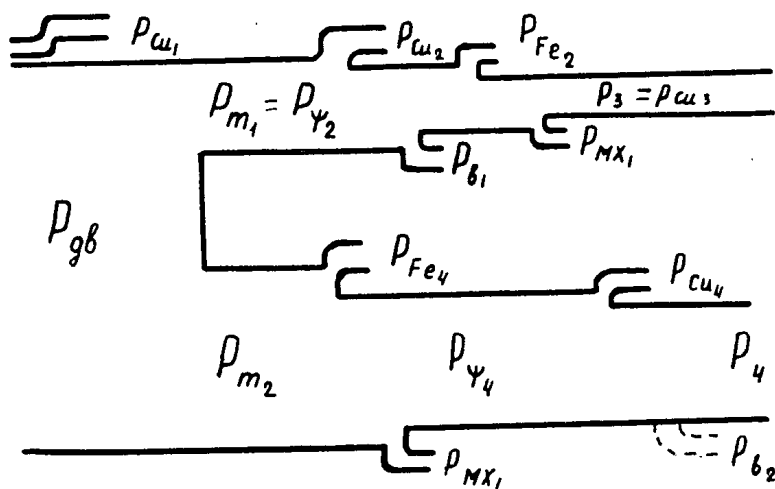


Рис. 7.

Коэффициент усиления определяется по выражению

$$K_y = \frac{P_{\psi_4} - P_{Cu4}}{P_{Cu1}}. \quad (28)$$

Усилителем постоянного тока является усилитель, схема которого представлена на рис. 6. На выходе усилителя постоянного тока устанавливается блок выпрямителей (пунктирная линия).

Энергетическая диаграмма усилителя постоянного тока представлена на рис. 7 (потери  $P_{вент.2}$  показаны пунктиром).

Значение коэффициента усиления и к.п.д. определяем по формулам

$$K_y = \frac{P_{\psi_4} - P_{Cu4} - P_{вент.2}}{P_{Cu1}}, \quad (29)$$

$$\eta = \frac{P_{\psi_4} - P_{Cu4} - P_{вент.2}}{P_{\psi_4} + P_{Cu2} + P_{Cu3} + P_{вент.1} + P_{Fe2} + P_{Fe4} + P_{MX}}. \quad (30)$$

Значение  $K_y$  и  $\eta$  для усилителя фиксированной частоты, выше нежели для усилителя постоянного тока. Это видно из выражений (29) и (30).

Таким образом, полученные аналитические выражения для мощностей,  $\eta$  и  $K_y$  позволяют произвести расчет этих величин, а приведенные энергетические диаграммы наглядно показывают распределение мощностей при различных режимах работы рассматриваемых бесколлекторных электромашинных усилителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Новокшенов. Исследования асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. Диссертация, Томск, 1960.
2. П. А. Кялян. Энергетические соотношения в бесконтактной машине переменного тока, работающей с переменной скоростью вращения, ИВУЗ, Энергетика, № 11, 1965.