

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.

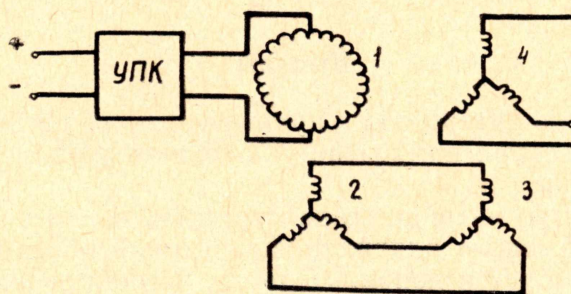


Рис. 1. Принципиальная схема усилителя регулируемой частоты.

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.

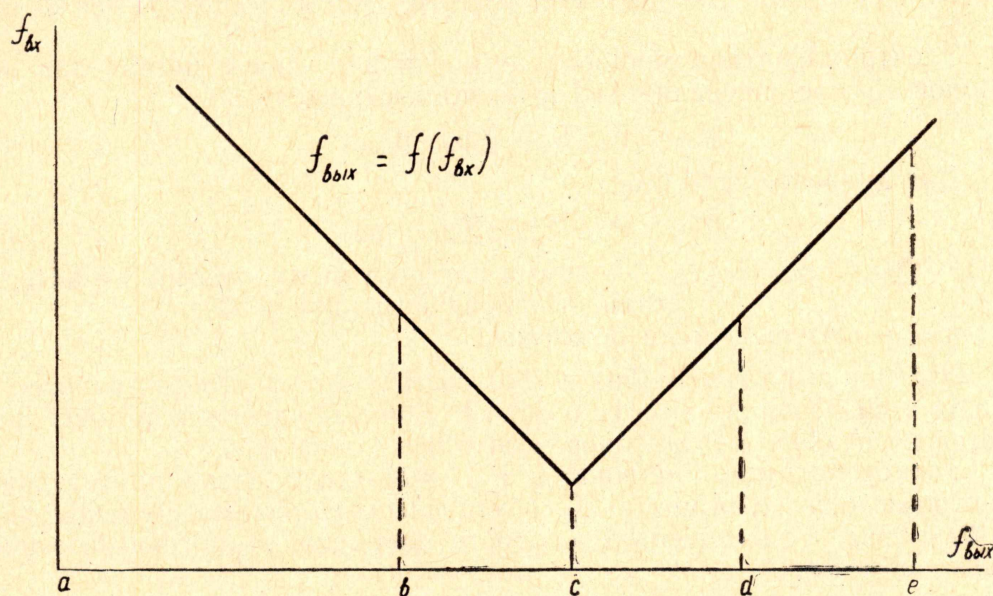


Рис. 2. Частотная характеристика (зависимость $f_{\text{вых}} = f(f_{\text{вх}})$)

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:

$$P_4 = P_{\psi 4} - P_{\text{Cu}4}, \quad (2)$$

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

$P_{\text{Cu}4}$ — потери в меди обмотки 4.

Электромагнитная мощность $P_{\psi 4}$ для любого частотного диапазона в общем случае определяется следующим выражением:

$$P_{\psi 4} = M\omega_4 = M(\omega + \omega_3) = P_{m2} + P_{\psi 3}, \quad (3)$$

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

$P_{m2} = M \cdot \omega$ — электромагнитная мощность обмотки 4, равная механической мощности на валу 2-го каскада;

M — электромагнитный момент, обусловленный взаимодействием потока Φ_3 и тока I_4 ;

ω — угловая скорость ротора усилителя;

$\omega_3 = (\omega \pm \omega_1) \frac{P_1}{P_2}$ — угловая скорость вращения потока Φ_3 относительно ротора;

$\omega_4 = \omega \pm \omega_3$ — угловая скорость вращения потока Φ_3 относительно статора.

Выразим мощности $P_{\psi 3}$ и P_{m2} через электромагнитную мощность $P_{\psi 4}$:

$$P_{\psi 3} = P_{\psi 4} \cdot S_4, \quad (4a)$$

$$P_{m2} = P_{\psi 4}(1 - S_4), \quad (4б)$$

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

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:

$$P_{\psi_2} = P_{\psi_4} \cdot S_4 + \sum p_3 - p_{Cu2}. \quad (5a)$$

Для диапазонов cd и de

$$P_{\psi_2} = P_{\psi_4} \cdot S_4 + \sum p_3 + p_{Cu2}, \quad (5б)$$

где $\sum p_3 = p_{Cu3} + p_{Fe3}$ — сумма потерь в меди обмотки 3 и потерь в стали, обусловленных полем Φ_3 ;

p_{Cu2} — потери в меди обмотки 2.

Отличие выражений (5a) и (5б) 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_{ψ_2} обмотки 2 равна произведению электромагнитного момента M_1 , обусловленного взаимодействием потока Φ_1 и тока I_2 , на угловую скорость вращения ω_2 потока Φ_1 относительно обмотки 2.

$$P_{\psi_2} = M_1 \cdot \omega_2 = M_1 (\omega_1 + \omega) = P_{\psi_1} + P_{m1}, \quad (6)$$

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

$P_{m1} = M \cdot \omega$ — электромагнитная мощность обмотки 2, равная механической мощности на валу 1-го каскада.

Выразим мощности P_{ψ_1} и P_{m1} через электромагнитную мощность P_{ψ_2}

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

$$P_{m1} = P_{\psi_2} \left(1 - \frac{1}{S_1} \right), \quad (7б)$$

где $S_1 = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_1 \pm \omega}{\omega_1}$ — скольжение поля Φ_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, 5б, 6, 7a, 7б, построим энергетические диаграммы усилителя для каждого из диапазонов (ab, bc, cd и de).

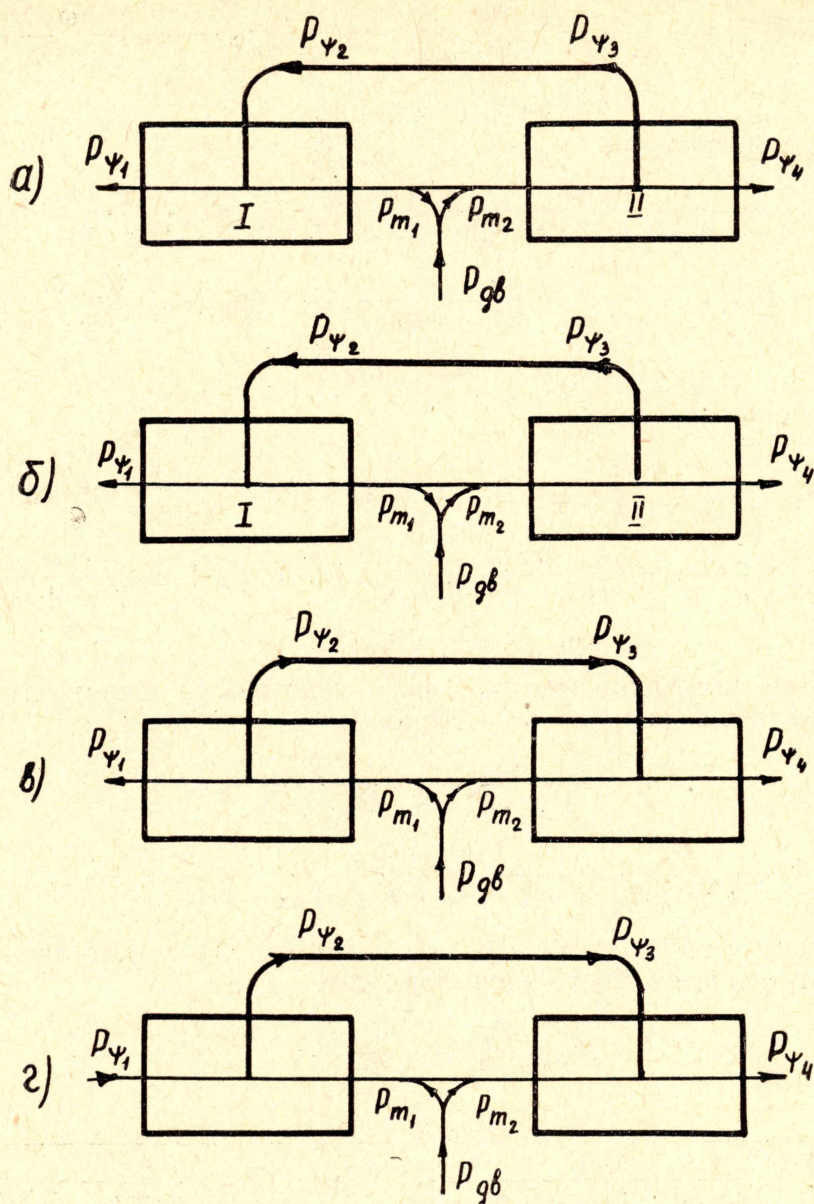
На рис. 3 (а, б, в, г) представлены энергетические диаграммы усилителя при его работе в диапазонах ab, bc, cd и de.

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

$$P_1 = P_{\psi_4} \left[-\frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) - \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 - p_{Cu2}) \frac{\omega_1}{\omega + \omega_1} + p_{Fe1} + p_{Cu1}, \quad (8a)$$



Р и с. 3. Энергетические диаграммы усилителя регулируемой частоты

p_{Cu1} — потери в меди обмотки 1,

p_{Fe1} — потери в стали, обусловленные вращением поля Φ_1 ,

$$P_{дв} = P_{m1} + P_{m2} + p_{Fe4} + p_{Fe2} + p_{мх} =$$

$$= P_{\psi_4} \left[1 + \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) - \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 - p_{Cu2}) \frac{\omega}{\omega + \omega_1} + p_{Fe4} + p_{Fe2} + p_{мх}, \quad (86)$$

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

Для диапазона bc

$$P_1 = P_{\psi_4} \left[\frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) + \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 - p_{Cu2}) \frac{\omega_1}{\omega_1 - \omega} + p_{Fe1} + p_{Cu1}, \quad (9a)$$

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

Для диапазона cd

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

$$P_{дв} = P_{\psi_4} \left[1 + \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 - p_1) - \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 + p_{Cu_2}) \frac{\omega}{\omega - \omega_1} + \\ + p_{Fe_4} + p_{Fe_2} + p_{MX}. \quad (10б)$$

Для диапазона de

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

$$P_{дв} = P_{\psi_4} \left[1 - \frac{\omega_1 p_1}{\omega (p_2 + p_1) + \omega_1 p_1} \right] + (\sum p_3 + p_{Cu_2}) \frac{\omega}{\omega + \omega_1} + \\ + p_{Fe_4} + p_{Fe_2} + p_{MX}. \quad (11б)$$

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

$$\eta = \frac{P_{вых}}{P_{дв} + P_{вх}} = \frac{P_4}{P_{дв} + P_{вх}} = \\ = \frac{P_{\psi_4} - p_{Cu_4}}{P_{\psi_4} + (\sum p_3 \pm p_{Cu_2}) + p_{Ee_2} + p_{Fe_4} + p_{MX} + p_{Cu_1} + p_{Ee_1}}. \quad (12)$$

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_{ψ_3} , P_{m_2} , P_{ψ_2} , P_{m_1} , P_{ψ_1} определяются по следующим формулам:

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

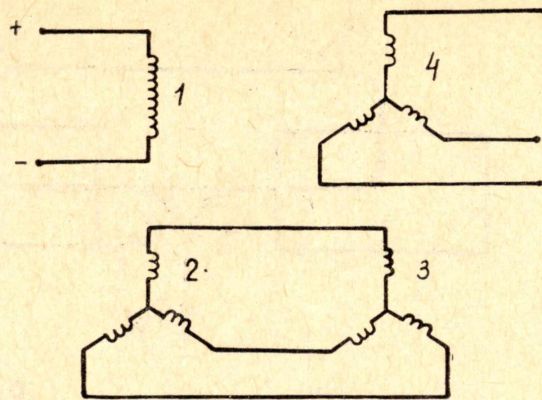


Рис. 4. Принципиальная схема фазочувствительного усилителя переменного тока.

$$P_{m2} = P_{\psi 4}(1 - S_4) = P_{\psi 4} \left(1 - \frac{1}{1 \pm \frac{P_2}{P_1}} \right), \quad (14б)$$

$$P_{\psi 2} = P_{\psi 4} \cdot S_4 + (\sum P_3 \pm p_{Cu2}), \quad (15а)$$

$$P_{\psi 1} = 0, \quad (15б)$$

$$P_{m1} = P_{\psi 2}, \quad (15в)$$

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

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 $P_1 = p_{Cu1}$.

Мощность приводного двигателя определяется по следующей формуле:

$$P_{дв} = P_{m2} + P_{m1} + p_{Fe2} + p_{Fe4} = P_{\psi 4} + p_{Cu3} \pm p_{Cu2} + p_{Fe2} + p_{Fe4} + P_{мх}. \quad (17)$$

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:

$$K_y = \frac{P_{\psi 4} - p_{Cu4}}{p_{Cu1}}, \quad (18)$$

$$\eta = \frac{P_{\psi 4} - p_{Cu4}}{P_{\psi 4} + p_{Cu3} \pm p_{Cu2} + p_{Fe2} + p_{Fe4}}. \quad (19)$$

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 , $P_{\psi 3}$, $P_{\psi 2}$, p_{m1} , p_{m2} и P_1 определяются по следующим выражениям:

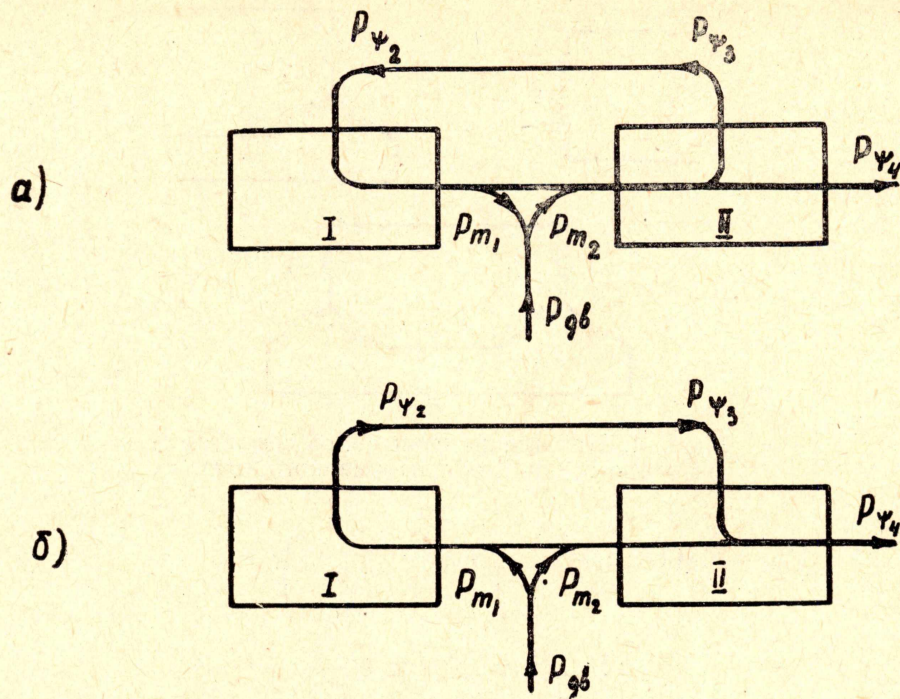


Рис. 5. Энергетические диаграммы фазочувствительного усилителя переменного тока.

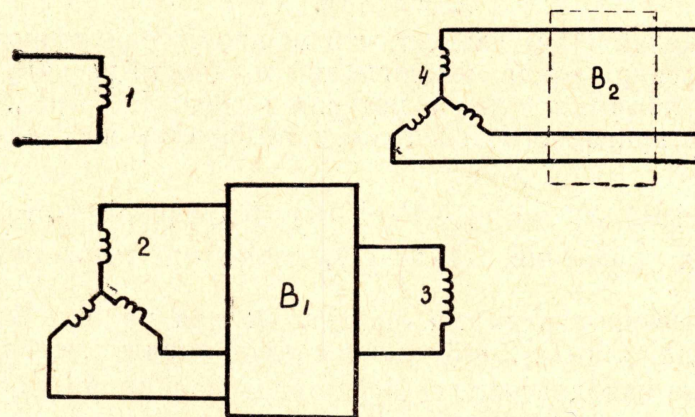


Рис. 6. Принципиальная схема усилителя переменного тока фиксированной частоты и усилителя постоянного тока.

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

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

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

$$P_2 = p_{Cu2} + p_{Cu3} + p_{\text{вентиль}_1}, \quad (23)$$

$$P_{m1} = P_2 + p_{Fe2} = p_{Cu2} + p_{Cu3} + p_{\text{вентиль}_1} + p_{Fe2} + p_{Fe4}, \quad (24)$$

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

Мощность приводного двигателя подсчитывается по формуле

$$P_{\text{дв}} = P_{\psi_4} + p_{Cu2} + p_{Cu3} + p_{\text{вентиль}_1} + p_{Fe2} + p_{\text{мх}}. \quad (26)$$

К.п.д. усилителя равен

$$\eta = \frac{P_{\psi_4} - p_{Cu4}}{P_{\psi_4} + p_{Cu2} + p_{Cu3} + p_{\text{вентиль}_1} + p_{Fe2} + p_{\text{мх}} + p_{Cu1} + p_{Fe4}}. \quad (27)$$

Энергетическая диаграмма усилителя представлена на рис. 7.

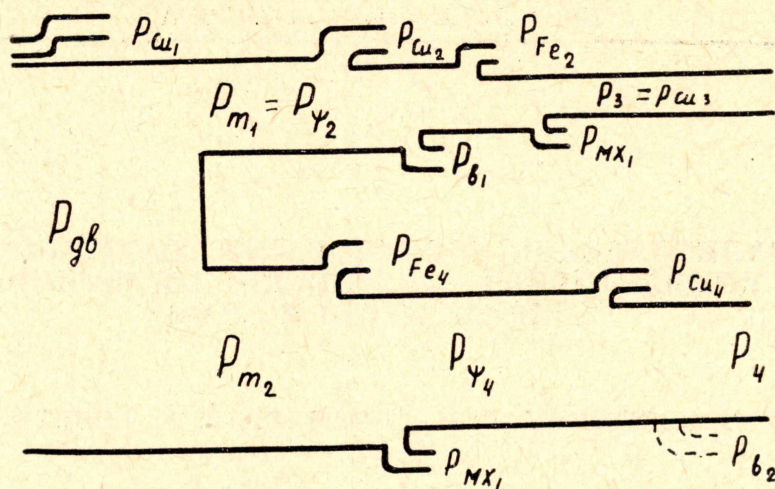


Рис. 7.

Коэффициент усиления определяется по выражению

$$K_y = \frac{P_{\psi_4} - P_{Cu_4}}{P_{Cu_1}}. \quad (28)$$

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

$$K_y = \frac{P_{\psi_4} - P_{Cu_4} - P_{вент.2}}{P_{Cu_1}}, \quad (29)$$

$$\eta = \frac{P_{\psi_4} - P_{Cu_4} - P_{вент.2}}{P_{\psi_4} + P_{Cu_2} + P_{Cu_3} + P_{вент.1} + P_{Fe_2} + P_{Fe_4} + P_{MX}}. \quad (30)$$

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

Таким образом, полученные аналитические выражения для мощностей, η 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.