

## ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЭМУ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А. И. Скороспешкин, Э. Н. Подборский, Е. К. Дергобузова

(Рекомендована научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

В настоящей статье рассматриваются вопросы выбора электромагнитных нагрузок, определения максимальной выходной мощности и максимального коэффициента усиления в бесколлекторных ЭМУ постоянного тока. Согласно [1] бесколлекторные ЭМУ постоянного тока представляют две электрические бесконтактные машины постоянного тока, совмещенные в одном магнитопроводе.

При проектировании электрических машин, совмещенных в одном магнитопроводе, важное значение имеет рациональное распределение электромагнитных нагрузок между каскадами. Причем если магнитные индукции каскадов  $B_{\delta 1}$  и  $B_{\delta 2}$  заданы, то линейные нагрузки должны быть вполне определенными.

Согласно основному расчетному уравнению электрической машины [2], величина  $D^2l$ , пропорциональная весу активных материалов, может быть выражена, с одной стороны, через мощность и электромагнитные нагрузки первого каскада:

$$D^2l = \frac{P_1}{\pi^2 \alpha_1 n A_1 B_{\delta 1}} = \frac{P_1}{\pi^2 \alpha_1 n (1 - c_A) \sum A (1 - c_B) \sum B_{\delta}}, \quad (1)$$

с другой — через мощность и электромагнитные нагрузки второго каскада

$$D^2l = \frac{P_3}{\pi^2 \alpha_2 n A_2 B_{\delta 2}} = \frac{P_3}{\pi^2 \alpha_2 n c_A \sum A c_B \sum B_{\delta}}. \quad (2)$$

Здесь

$P_1$  и  $P_3$  — мощности соответственно выходной обмотки первого каскада  $W_{p1}$  и выходной обмотки второго каскада  $W_3$ ;

$n$  — скорость вращения ротора БЭМУ;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты полюсной дуги обоих каскадов;

$A_1$  — линейная нагрузка обмотки  $W_{p1}$  в  $a/cm$ ;

$A_2$  — линейная нагрузка обмотки  $W_3$ , равная линейной нагрузке обмотки компенсации, лежащей на роторе, в  $a/cm$ ;

$\sum A = A_1 + A_2$  — суммарная линейная нагрузка обмоток  $W_{p1}$  и  $W_3$ ;

$B_{\delta 1}$ ,  $B_{\delta 2}$  — магнитные индукции в воздушном зазоре магнитных полей  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  в  $гс$ ;

$\sum B_{\delta} = B_{\delta 1} + B_{\delta 2}$  — суммарная магнитная индукция;

$c_B = \frac{B_{\delta 2}}{\sum B_{\delta}}$ ,  $c_A = \frac{A_2}{\sum A}$  — коэффициенты, характеризующие распре-

деление электрической и магнитной нагрузок между обмотками.

Уравнения (1) и (2) позволяют получить зависимость между коэффициентами  $c_A$  и  $c_B$ . Приравняв правые части уравнений (1) и (2), после некоторых преобразований получим



$$c_A = \frac{1 - c_B}{1 - c_B(1 - k)}, \quad (3)$$

где

$$k = \frac{P_1 \alpha_2}{P_3 \alpha_1}. \quad (4)$$

Выражение (3) аналогично уравнению в [3], но коэффициент  $k$  имеет другое содержание.

Рассмотрим, как влияет распределение электромагнитных нагрузок на мощность, коэффициент усиления и к.п.д. БЭМУ.

Согласно [2] выходная мощность БЭМУ

$$P_{\text{вых}} = \pi^2 \alpha_2 n D^2 l B_{\delta 2} A_2 = \pi^2 D^2 l \alpha_2 n \sum B_{\delta} \cdot c_B \cdot A_2. \quad (5)$$

Здесь надо учесть, что на роторе, кроме выходной обмотки первого каскада  $W_{p1}$  и компенсационной обмотки  $W_k$ , создающих линейные нагрузки  $A_1$  и  $A_2$ , уложена еще обмотка возбуждения второго каскада  $W_{p2}$ , которая создает свою линейную нагрузку  $A_{p2}$ .

Следовательно, суммарная линейная нагрузка, определяющая тепловое состояние машины, которой задаемся при проектировании, равна

$$\Sigma A^1 = A_1 + A_2 + A_{p2} = \Sigma A + A_{p2}.$$

Чтобы выяснить влияние коэффициентов  $c_A$  и  $c_B$  на мощность БЭМУ, необходимо выразить  $A_2$  через  $\Sigma A^1$ .

$$A_2 = c_A (\Sigma A^1 - A_{p2}).$$

Выразим магнитные индукции каскадов через линейные нагрузки обмоток возбуждения:

$$B_{\delta 1} = \frac{\lambda_1 A_y}{2 p_1 \alpha_1 l k_{\mu 1} k_{E1}}, \quad (7a)$$

$$B_{\delta 2} = \frac{\lambda_2 A_{p2}}{2 p_2 \alpha_2 l k_{\mu 2} k_{E2}}, \quad (7b)$$

где

$p_1$  и  $p_2$  — число пар полюсов соответственно первого и второго каскадов;

$A_y$  — линейная нагрузка обмотки управления;

$k_{\mu 1}$  и  $k_{\mu 2}$  — коэффициенты насыщения первого и второго каскадов;

$\lambda_1 = \frac{\alpha_1 \tau_1 l}{\delta'} \mu_0$ ,  $\lambda_2 = \frac{\alpha_2 \tau_2 l}{\delta'} \mu_0$  — проводимость воздушного зазора для потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ .

Отношение индукций первого и второго каскадов с учетом значений  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ :

$$\frac{B_{\delta 1}}{B_{\delta 2}} = \frac{1 - c_B}{c_B} = \frac{A_y p_2 k_{\mu 2} k_{E2}}{A_{p2} p_1 k_{\mu 1} k_{E1}}.$$

Отсюда

$$A_{p2} = A_y \frac{c_B p_2 k_{\mu 2} k_{E2}}{(1 - c_B) p_1 k_{\mu 1} k_{E1}}. \quad (8)$$

Из уравнения внешней характеристики первого каскада БЭМУ [1]

$$U_2 + \frac{c_1 \lambda_1 W_{p1} I_2^2}{16 F_y} = E_2$$

получим значение  $A_y$



$$A_y = A_1 \sqrt{\frac{k_{E1}}{2k_{E1}(k_{E1} - 1)}} \quad (9)$$

Здесь

$$E_2 \text{ — эдс первого каскада;}$$

$$U_2 = \frac{E_2}{k_{E1}} \text{ — напряжение первого каскада;}$$

$$c_1 = 4f_1 w_{p1},$$

$F_y$  — н. с. обмотки возбуждения первого каскада;

$I_2$  — ток обмотки возбуждения второго каскада.

Подставляя (9) в (8), получим выражение для  $A_{p2}$

$$A_{p2} = A_1 \frac{c_B k_{p2} k_{E2} p_2}{(1 - c_B) k_{p1} \sqrt{2k_{E1}(k_{E1} - 1)} \cdot P_1} \quad (10)$$

Из (3) и (4) получим

$$A_1 = \frac{c_B k}{1 - c_B} A_2 \quad (11)$$

Окончательно с учетом (3), (6), (11) формула для  $A_2$  примет вид

$$A_2 = \sum A' \frac{(1 - c_B)^2}{(1 - c_B)[1 - c_B(1 - k)] + c_B^2 m k} \quad (12)$$

где

$$m = \frac{p_2 k_{p2} k_{E2}}{p_1 k_{p1} \sqrt{2k_{E1}(k_{E1} - 1)}} \cdot$$

Подставив (12) в (15), получим формулу мощности

$$P_{\text{ВЫХ}} = \pi^2 D^2 l n \alpha_2 \sum B_\delta \sum A' \cdot \frac{c_B(1 - c_B)^2}{(1 - c_B)[1 - c_B(1 - k)] + c_B^2 m k} \quad (13)$$

Уравнение (13) является одним из основных расчетных уравнений БЭМУ постоянного тока.

### Коэффициент усиления БЭМУ

$$k_y = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{i_y^2 r_y}$$

Выразив ток и сопротивление обмотки управления через удельные нагрузки и размеры машины, получим

$$k_y = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{\pi(l + \tau_1)D j_y A_y \rho} \quad (14)$$

где  $\tau_1 = \frac{\pi D}{2p_1}$  — полюсное деление первого каскада БЭМУ,

$j_y$  — плотность тока в обмотке управления.

Из (7а) имеем

$$A_y = \frac{2k_{p1} k_{E1} \delta'}{\rho_0 \tau_1} (1 - c_B) \sum B_\delta$$

Подставив значение  $A_y$  в (14), получим окончательное выражение для  $k_y$



$$k_y = \frac{\pi^2 D^2 n \alpha_2 \sum A' \mu_0}{4\rho (1 + \beta_1) p_1 j_y k_{p1} k_{E1} \delta'} \cdot \frac{c_B (1 - c_B)}{(1 - c_B) [1 - c_B (1 - k)] + c_B^2 k m}, \quad (15)$$

где

$$\beta_1 = \frac{\tau_1}{l}.$$

Из уравнений (13) и (15) видно, что мощность и коэффициент усиления БЭМУ существенно зависят от распределения электромагнитных нагрузок между каскадами.

На рис. 1 и 2 представлены зависимости мощности и коэффициента усиления БЭМУ от  $c_B$  при различных  $k$ . Расчет был произведен для

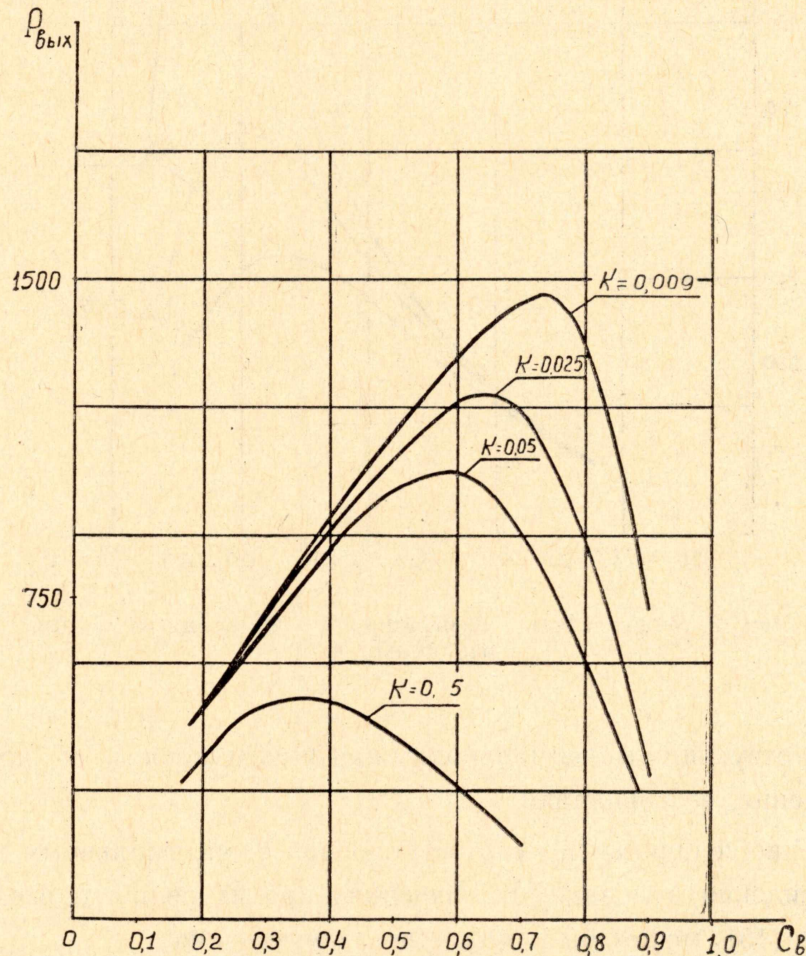


Рис. 1. Зависимость выходной мощности от  $c_B$  при различных  $k$

БЭМУ, имеющего данные

$$D = 12,2 \text{ см},$$

$$l = 11,5 \text{ см},$$

$$\Sigma V_{\delta} = 3200 \text{ гс},$$

$$\Sigma A' = 140 \text{ а/см},$$

$$n = 3000 \text{ об/мин},$$

$$2p_1 = 2, 2p_2 = 8$$

Как видно из рисунков, при уменьшении  $k$  мощность и коэффициент усиления БЭМУ растут, а при изменении  $c_B$  от нуля до единицы значения  $P_{\text{вых}}$  и  $k_y$  изменяются от нуля до некоторого максимального значения, а затем опять при  $c_B \rightarrow 1$  приближаются к нулю. Причем, значения



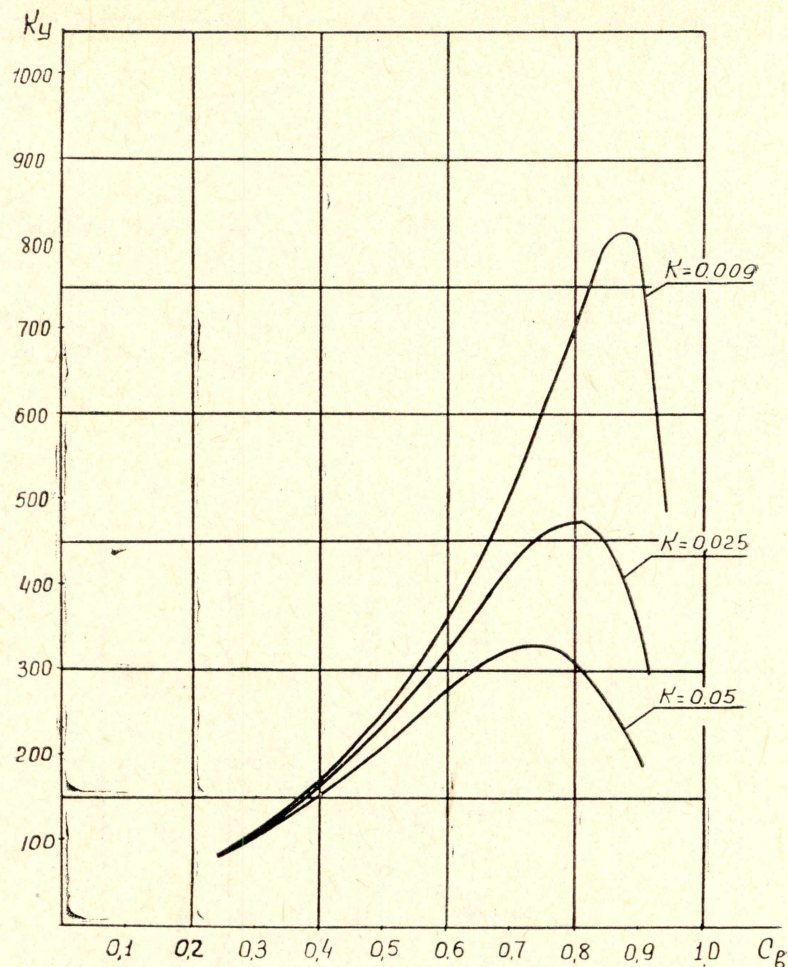


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от  $c_b$  при различных  $k$

$c_b$ , соответствующие максимальному значению мощности и коэффициенту усиления, не совпадают.

Значение величины  $c_b$ , соответствующее максимальному коэффициенту усиления при заданных значениях прочих величин, входящих в уравнение (15), может быть получено из уравнения

$$\frac{\partial k_y}{\partial c_b} = 0. \quad (16)$$

Подставив в (16) значение  $k_y$ , выраженное уравнением (15), после некоторых преобразований получим

$$c_{bм} = \frac{1 - \sqrt{mk}}{1 - mk}. \quad (17)$$

На рис. 3 в пределах возможных в БЭМУ значений  $k$  представлены зависимости  $c_{bм} = f(k)$  из условия максимума коэффициента усиления (кривая 1) и из условия максимума выходной мощности (кривая 2).

При изменении  $k$  от 0,005 до 0,02  $c_b$ , соответствующее максимальному значению коэффициента усиления, меняется в пределах 0,925—0,83.



Случаю максимальной выходной мощности при изменении  $k$  в тех же пределах соответствуют значения  $c_B = 0,75 - 0,67$ .

Таким образом,  $c_B$  следует выбирать в области, ограниченной кривыми 1 и 2 на рис. 3, либо исходя из требования максимального коэффициента усиления, либо максимальной мощности.

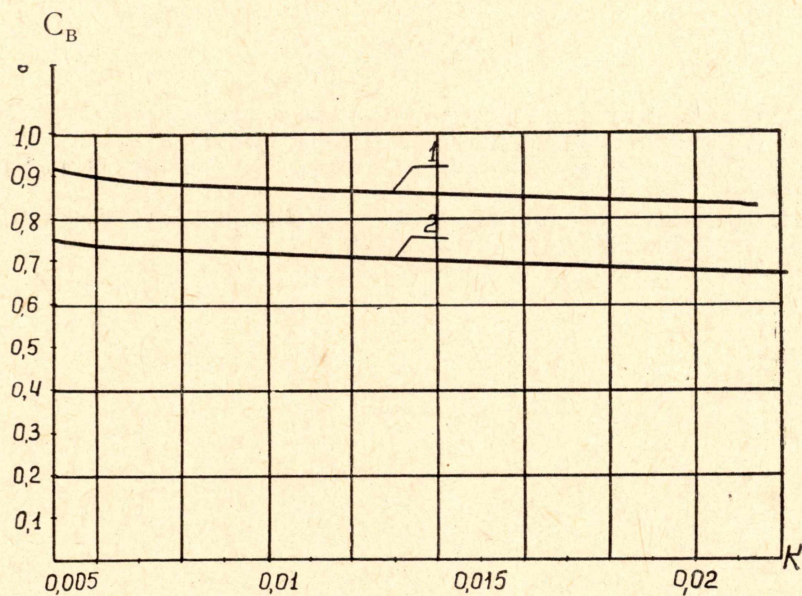


Рис. 3

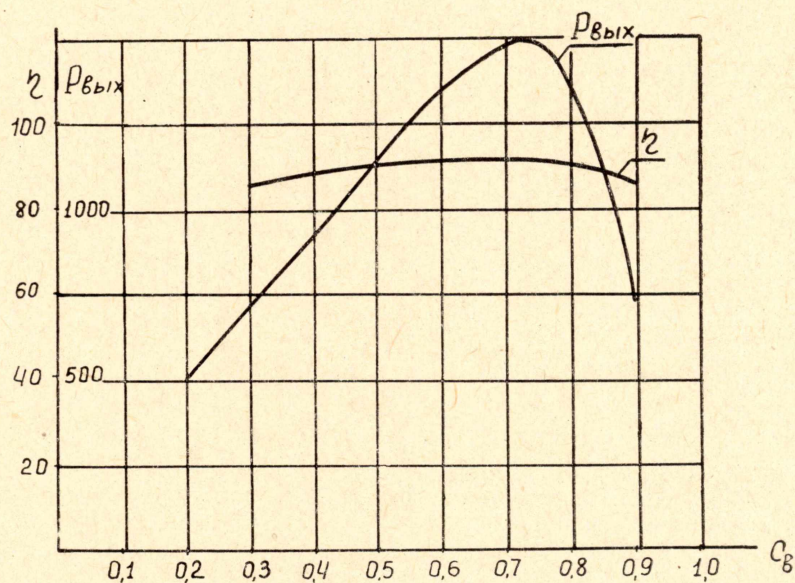


Рис. 4. Зависимость  $\eta = f(c_B)$  и  $P_{\text{вых}} = f(c_B)$  при  $k = 0,009$

На рис. 4 представлена зависимость к.п.д. в функции от  $c_B$  для  $k = 0,009$ , максимум которой совпадает с максимумом выходной мощности, что соответствует известному положению о совпадении оптимума по объему и к.п.д. [3].

Таким образом, в результате проведенных исследований



1) получены соотношения  $s_A$  и  $s_B$ , позволяющие учесть наиболее рациональное распределение электромагнитных нагрузок с учетом особенности БЭМУ постоянного тока;

2) показано, что распределение электромагнитных нагрузок между каскадами существенно влияет на мощность и коэффициент усиления БЭМУ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Н. Подборский. Разработка и исследование бесколлекторного электромашинного усилителя постоянного тока. Диссертация, Томск, 1968.

2. И. М. Постников. Проектирование электрических машин. Гостехиздат УССР, 1956.

3. В. Новокшенов. Исследование асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. Диссертация, Томск, 1960.

---