

## К ПРОЕКТИРОВАНИЮ БЕСКОНТАКТНОГО ЭМУ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

М. Л. КОСТЫРЕВ, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Рекомендована научным семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Бесконтактный электромашинный усилитель БЭМУ переменного тока состоит из синхронного генератора и асинхронного преобразователя частоты, вращаемых приводным двигателем [1, 2]. БЭМУ дает повышенную частоту на выходе, имеет хорошие регулировочные и динамические свойства и может использоваться в качестве автономного генератора или усилителя — преобразователя частоты.

Для снижения габаритов и веса усилителя его каскады совмещаются в одном магнитопроводе. Проектированию одномашинных преобразователей, где совмещены генератор и приводной двигатель, посвящены работы В. С. Новокшенова, В. М. Павлинина, В. С. Нерсисяна и ряд других [3, 4, 5]. В БЭМУ совмещаются каскады генераторной части. Такое совмещение, а также учет специфических требований к усилителю налагают ряд особенностей на его проектирование.

В предлагаемой статье основное внимание уделено выбору электромагнитных нагрузок БЭМУ.

Распределение электромагнитных нагрузок между совмещенными каскадами характеризуется коэффициентами

$$C_B = \frac{B_{\delta_2}}{B_{\delta}}, \quad C_A = \frac{A_2}{A}. \quad (1)$$

Примечание. 1. Все формулы даны в системе единиц СИ. Условные обозначения приведены в конце статьи.

2. Здесь и далее индекс 1 относится к 1 каскаду, индекс 2 — ко 2 каскаду.

По конструкции БЭМУ аналогичен серийным асинхронным двигателям. Однако в отличие от последних в тепловом отношении наиболее загружены роторные обмотки БЭМУ. Поэтому под суммарной линейной нагрузкой БЭМУ следует понимать линейную нагрузку обмоток ротора. Она выбирается в пределах, соответствующих асинхронным двигателям такой же мощности и исполнения.

Магнитная индукция в зазоре БЭМУ может выбираться пониженной с учетом требуемой форсировки напряжения. Например, при 1,5-кратной форсировке индукция выбирается около 2/3 от индукции соответствующего асинхронного двигателя.

Коэффициент  $C_B$  может варьироваться при проектировании. Покажем, что в этом случае коэффициент  $C_A$  нельзя выбирать произвольно.

Действительно, из условия равенства числа фаз и токов роторных обмоток вытекает соотношение

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{W_{R_1}}{W_{R_2}} \quad (2)$$

С другой стороны, отношение э. д. с. роторных обмоток

$$\frac{E_{R_1}}{E_{R_2}} = K_E = \frac{W_{R_1} K_{\omega_1} P_2 B_{\delta_2}}{W_{R_2} K_{\omega_2} P_1 B_{\delta_2}} \quad (3)$$

Из выражений (1, 2, 3) получим

$$C_A = \frac{1 - C_B}{1 - C_B(1 - K_1)} \quad (4)$$

где

$$K_1 = \frac{K_E K_{\omega_2} P_1}{K_{\omega_1} P_2} \cdot$$

Последнее выражение (4) совпадает с полученным В. С. Новокшеновым [3], но коэффициент  $K_1$  имеет другое содержание.

Итак, задавшись суммарной линейной нагрузкой ротора, индукцией в зазоре и коэффициентом  $C_B$ , определяем по формулам (1, 4) электромагнитные нагрузки каскадов БЭМУ.

Рассмотрим влияние коэффициента  $C_B$ , характерного для совмещенных машин, на основные параметры БЭМУ.

Определим параметры усилителя при заданных размерах.

Полная мощность БЭМУ.

$$P_{\text{ВЫХ}}^1 = \frac{\pi^2 K_{\omega_s}}{\sqrt{2} K_{E_s}} D^2 l A_s B_{\delta_2} n_s \quad (5)$$

Из векторной диаграммы (рис. 1), пренебрегая углом  $\gamma$ , определяем

$$F_s = \sqrt{F_{R_2}^2 - (F_2 \cos \varphi)^2} - F_2 \sin \varphi.$$

Отсюда линейная нагрузка выходной обмотки

$$A_s = A_2 \frac{K_{\omega_2} F_s}{K_{\omega_s} r_{R_2}} = \frac{K_{\omega_2}}{K_{\omega_s}} \left[ \sqrt{A_2^2 - \left( \frac{K_2 B_{\delta_2} \cos \varphi}{D} \right)^2} - \frac{K_2 B_{\delta_2} \sin \varphi}{D} \right],$$

где

$$K_2 = \frac{\sqrt{2} \delta' K_{\mu_2} P_2}{\mu_0 K_{\omega_2}} \cdot$$

Коэффициент усиления БЭМУ без обратной связи

$$K_y = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{i_f^2 R_f} \cdot$$

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

$$K_y = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{\pi(e + \tau_1) D j A_f \rho} \quad (6)$$

Из векторной диаграммы усилителя

$$A_f = \frac{2\sqrt{2} K_{\omega_1}}{\pi K_f} A_1 \sqrt{1 + \left( \frac{K_3 B_{\delta_1}}{A_1 D} \right)^2 + \frac{2K_3 B_{\delta_1} \cos \varphi_R}{A_1 D}},$$

где

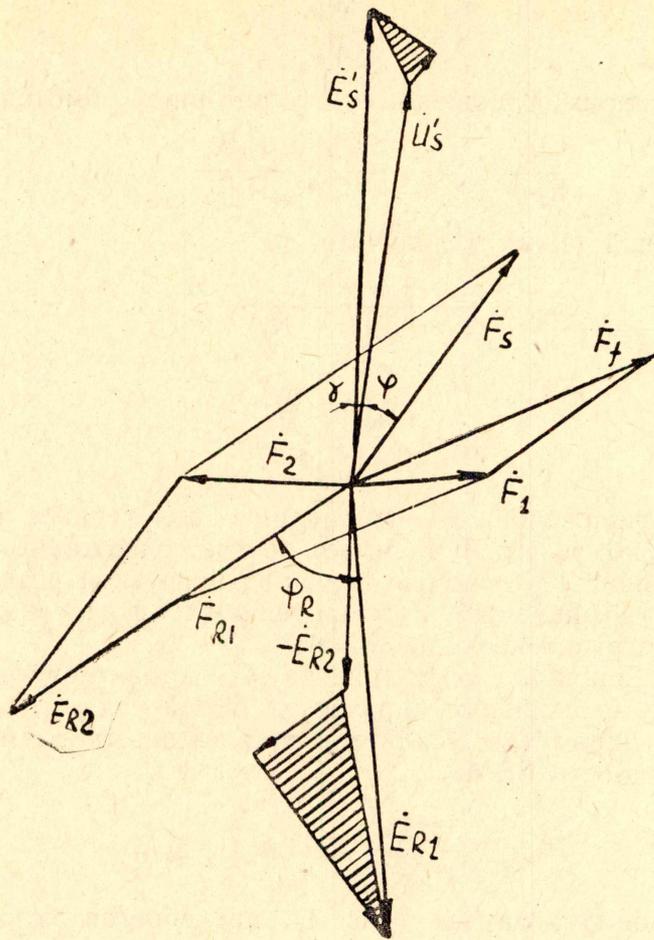


Рис. 1. Векторная диаграмма БЭМУ

$$\cos \varphi_R = \sqrt{1 - \left( \frac{K_{fs} A_s}{K_{\omega_2} A_2} \right)^2},$$

$$K_3 = \frac{\sqrt{2} \delta' K_{\mu_1} P_1}{\mu_0 K_{\omega_1}}.$$

Быстродействие усилителя характеризуется эквивалентной постоянной времени [6]

$$T = \frac{\pi^2 \mu_0 K_f^2 A_f D^2 e}{32 \delta' K_{\mu_1} P_1^2 \left[ 1 + \left( \frac{C_B K_E}{1 - C_B} \right)^2 \right] (e + \tau_1) j \rho}. \quad (7)$$

Добротность усилителя без обратной связи

$$D = \frac{K_y}{T}. \quad (8)$$

Потери и к. п. д. БЭМУ рассчитываются по известным методам [3].

Динамическая перегрузочная способность усилителя определяется сопротивлением рассеяния его обмоток [7]. В относительных единицах

$$X_{\sigma} = X_{\sigma_s} + X_{\sigma R_1} + X_{\sigma R_2} =$$

$$= \frac{4\pi\mu_0 p_2 K_{ES} A_S}{\sqrt{2} K_{\omega_s} B_{\delta_2}} \left[ \frac{\sum \lambda_s}{z_s} + \frac{\sum \lambda_1}{z_R} \left( \frac{A_1 K_{\omega_s}}{A_2 K_{\omega_2}} \right)^2 + \frac{\sum \lambda_2}{z_R} \left( \frac{K_{\omega_s}}{K_{\omega_2}} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

Из выражений (5—9) видно, что основные параметры БЭМУ существенно зависят от распределения электромагнитных нагрузок между каскадами.

На ЦВМ «Проминь» были рассчитаны параметры БЭМУ в железе серийного двигателя А02-42 при  $n=3000$  об/мин,  $\cos\varphi=1$ ,  $A=210$  а/см,  $B_{\delta_2}=0,5$  тл,  $2\rho_1=2$ ,  $2\rho_2=6$ ,  $f_{\text{вых}}=200$  гц. Как видно из рис. 2, максимум к. п. д. совпадает с максимумом выходной мощности, что соответствует известному положению о совпадении оптимума по объему и потерям для совмещенных машин [3]. При увеличении  $C_B$  снижается коэффициент усиления и улучшается быстродействие. Динамическая перегрузочная способность также возрастает, поскольку снижается относительная реактивность рассеяния.

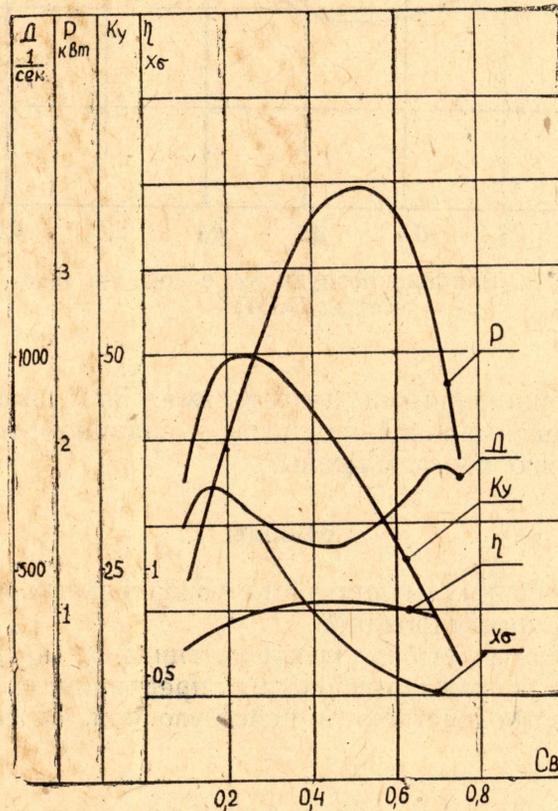


Рис. 2. Влияние  $C_B$  на параметры БЭМУ

При совмещении двигатель-генераторной части оптимальное с точки зрения объема и потерь значение  $C_B$  колеблется в узких пределах  $C_{B\text{опт}}=0,33-0,5$  [3]. Как видно из рис. 2, для БЭМУ  $C_{B\text{опт}}=0,4-0,6$ , а для увеличения добротности и перегрузочной способности нужно выбирать еще большее значение  $C_B$ .

Влияние воздушного зазора на мощность и добротность БЭМУ показано на рис. 3. Основные данные усилителя такие же, как и для рис. 2.

При изменении зазора в широких пределах максимальная мощность и добротность изменяются незначительно. Максимум добротности сдвигается в сторону меньших значений  $C_B$  при увеличении зазора, приближаясь к максимуму мощности. В связи с этим в БЭМУ целесообразно несколько увеличивать воздушный зазор по сравнению с со-

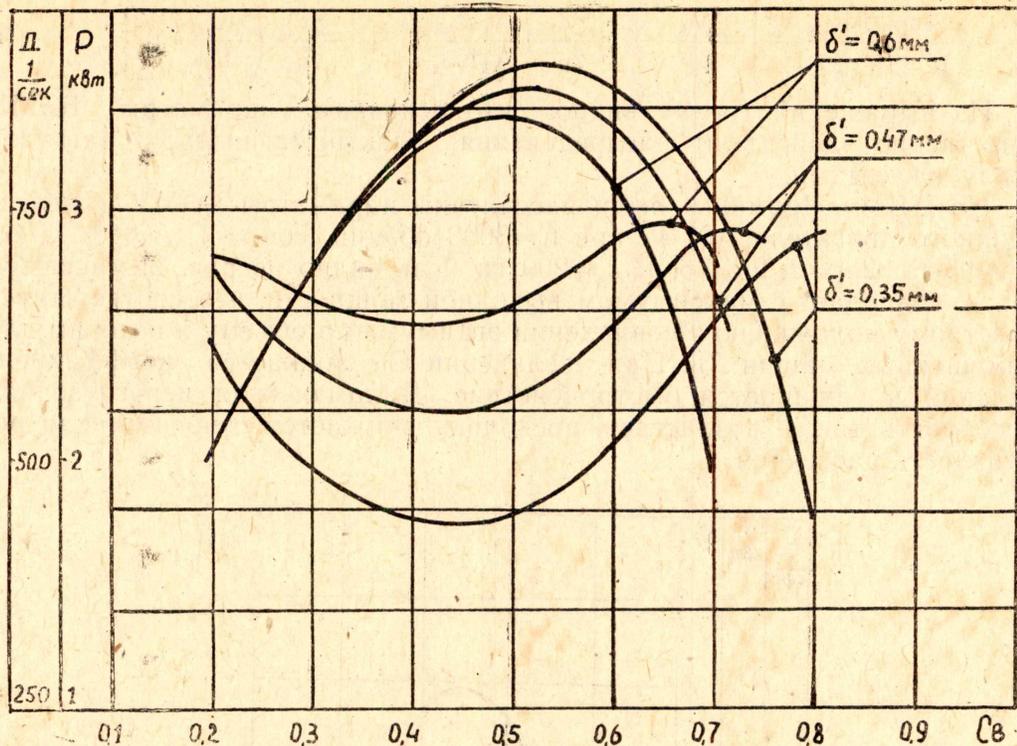


Рис. 3. Влияние воздушного зазора на параметры БЭМУ

ответствующими асинхронными двигателями. Это дает увеличение добротности при максимальной мощности в заданном объеме, а также приводит к снижению шума машины.

### Выводы

1. Предложены формулы для учета усилительных и динамических свойств БЭМУ при проектировании.
2. Показано, что на выбор электромагнитных нагрузок каскадов БЭМУ существенно влияют требования, предъявляемые к коэффициенту усиления, быстродействию и перегрузочной способности усилителя.

### Условные обозначения

- $A$  — суммарная линейная нагрузка ротора,
- $A_1, A_2, A_s, A_f$  — линейные нагрузки обмоток БЭМУ,
- $B^\delta$  — суммарная магнитная индукция в воздушном зазоре,
- $B_{\delta 1}, B_{\delta 2}$  — амплитуды первых гармонических индукций каскадов БЭМУ,
- $W_{R1}, W_{R2}$  — числа последовательных витков в фазе роторных обмоток,
- $K_{w1}, K_{w2}, K_{ws}$  — обмоточные коэффициенты роторных и выходной обмоток,
- $p_1, p_2$  — число пар полюсов.
- $K_{Es}$  — коэффициент, равный отношению э. д. с. к напряжению выходной обмотки,
- $\cos \varphi$  — коэффициент мощности, нагрузки,
- $F_{R1}, F_{R2}, F_s, F_f$  — н. с. обмоток БЭМУ,
- $F_1, F_2$  — результирующие н. с.,

$D, e$  — диаметр расточки и расчетная длина пакета статора,  
 $n_s$  — скорость вращения поля второго каскада относительно статора,  
 $\delta^1$  — приведенный воздушный зазор,  
 $K_{M1}, K_{M2}$  — коэффициент насыщения стали магнитопровода,  
 $M_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{ГН}}{\text{М}}$  — магнитная проницаемость воздуха,  
 $\rho$  — удельное сопротивление меди,  
 $\tau_1$  — полюсное деление первого каскада,  
 $j$  — плотность тока,  
 $K_f$  — коэффициент формы поля обмотки возбуждения,  
 $Z_s, Z_R$  — числа пазов статора и ротора.  
 $\Sigma\lambda_s, \Sigma\lambda_1, \Sigma\lambda_2$  — магнитные проводимости рассеяния на единицу длины машины,  
 $\eta$  — к. п. д. усилителя (без приводного двигателя).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент. США, № 2966623, 27, 12, 1960.
2. М. Л. Костырев, А. И. Скороспешкин. Фазовое компаундирование БЭМУ переменного тока. Известия ТПИ, т. 172, 1967.
3. В. С. Новокшенов. Исследование асинхронного бесщеточного преобразователя частоты. Диссертация, Томск, 1960.
4. В. М. Павлинин, Н. С. Сиунов. Свойства и эффективность ОПЧ. ИВУЗ — Электромеханика, № 1, 1960.
5. В. С. Нерсисян. Элементы расчета одномашинных бесконтактных преобразователей частоты. Труды Горьковского политехнического института, т. 19, вып. 3, 1963.
6. М. Л. Костырев, А. И. Скороспешкин. Вопросы теории бесконтактного ЭМУ переменного тока. В настоящем сборнике.
7. М. Л. Костырев, А. И. Скороспешкин. Изменение напряжения бесконтактного ЭМУ переменного тока при включении индуктивной нагрузки. В настоящем сборнике.