

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ РАЗРАБОТКИ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ (БЭМУ)

А. С. БАТУРИН, А. И. СКОРОСПЕШКИН, Э. Н. ПОДБОРСКИЙ

(Рекомендована семинарами кафедр электрических машин и экономики промышленности и организации предприятий)

Широко применяемые в схемах автоматики коллекторные электромашинные усилители (ЭМУ) имеют весьма существенные недостатки, обусловленные наличием коллекторно-щеточного аппарата.

Эти недостатки снижают надежность ЭМУ, ухудшают характеристики, ограничивают области их применения.

Исходя из этого, на кафедре электрических машин Томского политехнического института ведется разработка и исследование различных видов бесколлекторных электромашинных усилителей (БЭМУ) с целью повышения надежности работы и улучшения характеристик усилителей.

В данной статье приводятся результаты технико-экономического анализа разработки бесколлекторного электромашинного усилителя (БЭМУ-12А). Сравнение ведется с серийным усилителем ЭМУ-12А.

Важнейшими требованиями, предъявляемыми к новым конструкциям, являются: техническое совершенство, экономичность при изготовлении и эксплуатации. Окончательные выводы об экономической эффективности делаются в результате комплексной оценки показателей перечисленных выше требований. В этой последовательности и будет осуществлен технико-экономический анализ БЭМУ-12А.

Поскольку в процессе анализа мы будем сравнивать БЭМУ-12А с ЭМУ-12А, приведем технико-экономические показатели по обоим усилителям.

Таблица 1

**Технико-экономические показатели коллекторного (ЭМУ-12А) и бесколлекторного (БЭМУ-12А) электромашинных усилителей**

№ пп.	Наименование количественного или качественного показателя	Ед. изм.	Значение показателя для	
			ЭМУ-12А	БЭМУ-12А
1	2	3	4	5

### А. Технические показатели

1	Потребляемая мощность приводного двигателя	Вт	1900	1945
2	Скорость вращения	об/мин	2900	2900
3	Род тока приводного двигателя	—	3-фазн.	3-фазн.
4	Напряжение приводного двигателя	В	127/220; 220/380	127/220; 220/380;

1	2	3	4	5
5	Коэффициент мощности (cosφ) приводного двигателя	—	0,82	0,82
6	Мощность усилителя на выходе	вт	1200	1200
7	Напряжение на выходе усилителя	в	115	115
8	Номинальный ток усилителя	а	10,4	10,4
9	Коэффициент усиления	—	2000	2000
10	Допустимая перегрузка агрегата	раз	2,5	2,5
11	Коэффициент полезного действия (к.п.д.) агрегата	%	63	62
12	Габаритные размеры:			
	а) длина	м	0,605	0,605
	б) ширина	м	0,323	0,323
	в) высота	м	0,255	0,255
13	Вес агрегата	кг	69	69
14	Постоянная времени	сек	0,10	0,10
15	Уровень радиопомех	—	значит.	небольшой
16	Потери электрической энергии:			
	а) суммарные потери холостого хода без сигнала управления	вт	168	108
	б) суммарные потери холостого хода при номинальном сигнале управления	вт	220	160
	в) суммарные потери при номинальной нагрузке	вт	700	745
17	Условия безотказной эксплуатации	—	нормальн.	нормальные и трудные
18	Род тока на выходе	—	постоян.	постоян.

### Б. Экономические показатели

#### 1. При изготовлении

19	Себестоимость изготовления	руб/шт	218,51	220,80
20	Трудоемкость изготовления	ч-час шт	74,98	63,23
21	Снижение трудоемкости	%	—	15,8
22	Повышение производительности труда	%	—	18,7
23	Количество высвобождаемых рабочих	чел.	—	25
24	Расход меди на усилитель	кг/шт	14,415	12,63
25	Экономия меди на усилитель	кг/шт	—	1,785
26	Экономия латуни ЛС-59-1 на усилитель	кг/шт	—	2,314
27	Экономия меди в год	кг/год	—	7200

1	2	3	4	5
28	Экономия латуни в год	кг/год	—	9256
29	Общая экономия цветных металлов в год	кг/год	—	16456
30	Возможное высвобождение основных фондов	руб.	—	5000
<b>II. При эксплуатации</b>				
31	Ремонтные расходы на усилитель в год	<u>руб.</u> шт. год	90,5	81
32	Категория ремонтной сложности [5]	ремонт. условн. един.	3,8	3,4
33	Трудоемкость ремонтных работ на усилитель в год [5]	<u>н-час</u> шт.год	50	44,5
34	Снижение трудоемкости ремонта	%	—	11
35	Повышение производительности труда при ремонте	%	—	12,4
36	Стоимость потерь электрической энергии в год на усилитель	<u>руб.</u> шт. год	13,16	12,56
37	Годовая амортизация на усилитель	<u>руб.</u> шт. год	25,65	25,8
38	Суммарный годовой экономический эффект (экономия)	<u>руб</u> год	—	39674
<b>III. Эффективность затрат на разработку</b>				
39	Приведенные затраты на разработку	руб.	—	24460
40	Срок окупаемости затрат на разработку	год	—	0,62
41	Коэффициент экономической эффективности затрат на разработку	<u>руб.</u> руб. год	—	1,62

Основываясь на данных таблицы технико-экономических показателей (табл. 1) и литературных источников, проведем оценку технического совершенства БЭМУ-12А. Сравнение основных технических показателей вновь разработанного БЭМУ-12А и базового образца ЭМУ-12А показывает, что большинство данных у них совпадает. Важнейшими качественными показателями электромашинных усилителей являются: коэффициент усиления, быстродействие. У сравниваемых усилителей они одинаковы. Добротность усилителей (20000) также одинакова. Исключение составляет большая потребляемая мощность приводного двигателя (1945 вт > 1900 вт) и связанный с этим более низкий к.п.д. БЭМУ-12А (62% < 63%). Однако при этом у новой конструкции усилителя потери холостого хода на 60 вт меньше по сравнению с базовым образцом. Поэтому экономичность того или иного усилителя зависит от соотношения времени работы при номинальной нагрузке и холостом ходе, а также от общего времени работы в течение года. Решение этого вопроса будет дано при определении эксплуатационных расходов.

Новый усилитель имеет ряд очень важных принципиальных отличий от базового образца ЭМУ-12А.

Если ЭМУ-12А является обычным электромашинным усилителем поперечного поля, то БЭМУ-12А состоит из двух синхронных генераторов, совмещенных в одном магнитопроводе. Обмотка возбуждения выходного каскада БЭМУ питается через выпрямители (полупроводниковые диоды Д215А) от первого синхронного генератора. Таким образом, удалось исключить скользящий контакт в схеме. Это является главным преимуществом новой конструкции, обеспечивающим более высокую надежность работы, стабильность характеристик на выходе и более широкую область его применения.

Наряду с этим конструкция нового электромашинного усилителя за счет исключения коллекторно-щеточного узла упростилась, стала более технологичной в изготовлении, и, кроме того, она будет иметь лучшие показатели в эксплуатации, так как введение в схему полупроводниковых диодов сокращает потребность в ремонтах.

Важным преимуществом БЭМУ-12А является и то, что новый усилитель может безотказно работать не только в нормальных условиях, но и при неблагоприятных условиях эксплуатации (работа в запыленных помещениях с повышенной влажностью, пониженным давлением, в атмосфере, загрязненной агрессивными газами, парами и т. п.)

Одним из технических преимуществ БЭМУ-12А является возможность увеличения коэффициента усиления и улучшения быстродействия. Этого можно достигнуть путем включения на выходе параллельно обмоткам статора трех конденсаторов по 20 мкф марки МБГО-3. Последнее мероприятие позволит при меньшем токе управления получать достаточные мощности на выходе с лучшим быстродействием. Удорожание БЭМУ-12А за счет этого составляет около 2,5 руб. [8].

Исключение скользящего контакта из схемы БЭМУ-12А открывает потенциальные возможности создания более быстроходной и экономичной конструкции, а небольшой уровень радиопомех позволяет работать в непосредственной близости от электронных схем, не вызывая больших помех аппаратуры. Таковы технические преимущества БЭМУ-12А.

Рассмотрим экономичность новой конструкции при изготовлении (табл. 1, раздел Б, подраздел I). Важным показателем экономичности при изготовлении является себестоимость производства. Так как при изготовлении БЭМУ-12А используется большое число деталей и узлов базового образца ЭМУ-12А, для определения себестоимости нового усилителя использован наиболее приемлемый в этих условиях метод коррективов. Из себестоимости базового образца (ЭМУ-12А) исключены затраты, которые не будут иметь места в новой конструкции, и добавлены затраты, которые возникают в связи с дополнением и изменением деталей и узлов. В результате была получена себестоимость изготовления БЭМУ-12А. Для сравнения приводим табл. 2, в которой даны цифры по себестоимости обеих конструкций.

Как видно из табл. 2, себестоимость БЭМУ-12А увеличилась на 1% против базового образца ЭМУ-12А. Повышение себестоимости вызвано в основном за счет полупроводниковых диодов Д215А [7]. В результате чего удельный вес затрат на основные материалы и покупные изделия в новой конструкции возрос на 5,2%.

Одним из важных показателей эффективности при изготовлении является трудоемкость производства. В новой конструкции достигнуто снижение трудоемкости изготовления по сравнению с ЭМУ-12А на 15,8%, что вызывает рост производительности труда на 18,7%. При ожидаемом выпуске на второй год после освоения БЭМУ-12А—4000 шт. в год возможно высвободить 25 человек рабочих.

Таблица 2

## Себестоимость изготовления ЭМУ-12А и БЭМУ-12А

№ пп.	Наименование статей затрат	Базовый образец ЭМУ-12А		Исключаемые затраты, руб.	Дополнит. затраты, руб.	Новый образец БЭМУ-12А	
		руб.	%			руб.	%
1	Основные материалы и покупные изделия	78,87	36	48,33	60,35	90,89	41,2
2	Зарплата производственных рабочих	32,89	15	3,515	1,08	30,455	13,8
3	Цеховые расходы	67,42	30,8	7,2	2,21	62,43	28,2
4	Общезаводские расходы	32,23	14,8	3,43	1,06	29,86	13,5
	Фабрично-заводская себестоимость	211,41	—	62,47	64,70	213,64	—
5	Внепроизводственные расходы	7,10	3,4	2,10	2,16	7,16	3,3
	Полная коммерческая себестоимость	218,51	100	64,57	66,86	220,8	100

Наряду с этим эффективность при изготовлении электрических машин характеризует расход цветных металлов, которые являются дефицитными материалами. Общая экономия цветных металлов (при выпуске 4000 шт/год) при изготовлении БЭМУ-12А составляет 16456 кг/год. Кроме того, при переходе на изготовление БЭМУ-12А возможно высвобождение основных фондов на сумму около 5000 руб.

Все перечисленные выше изменения при изготовлении БЭМУ-12А вызваны исключением из конструкции узла коллектора и щеточного механизма, которые требуют больших затрат труда и значительного количества дефицитных цветных металлов. [2].

Наибольшей эффективностью будет обладать БЭМУ-12А при эксплуатации. Самая высокая экономия получается на ремонтных расходах, так как принципиальное изменение конструкции сокращает категорию ремонтной сложности БЭМУ-12А до 3,4 условных ремонтных единицы против 3,8 для ЭМУ-12А. Ремонтные расходы за год, подсчитанные на основе нормативов ППР [5], сокращаются почти на 10%. Кроме того, сокращается трудоемкость ремонтных работ на 11%, за счет чего поднимается производительность труда при ремонтах на 12,4%. Все это объясняется тем, что в новой конструкции не требуется смена щеток и их притирка, а также проточка и продоразивание коллектора. Причем все расчеты приведены для двусменной работы в нормальных условиях. Для трудных условий эксплуатации абсолютная величина экономии на ремонтных расходах увеличивается с 9,5 руб/год в нормальных условиях до 24 руб/год в трудных условиях.

Эффективность при эксплуатации электрических машин характеризует стоимость потерь электрической энергии, которая для рассматриваемых усилителей может быть определена по формулам:

$$\begin{cases} C_{\text{п}} = t_1 \Pi_{\text{н}} K_{\text{м}} S + t_2 \Pi_{\text{х}} S \\ T = t_1 + t_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{п}}$  — стоимость потерь электрической энергии, руб./год;  
 $t_1$  — время работы при номинальной нагрузке, час/год;  
 $\Pi_{\text{н}}$  — суммарные потери при номинальной нагрузке, квт;  
 $K_{\text{м}}$  — коэффициент использования мощности;  
 $K_{\text{м}} = 0,7$  [4];  
 $S$  — стоимость 1 квт. ч. электрической энергии, 0,01 руб./квт. ч [4];

$t_2$  — время работы в холостом режиме (работает двигатель, а генератор энергии не выдает), час/год;

$P_x$  — потери в режиме холостого хода, квт;

$T$  — общее время работы ЭМУ в год, час/год.

Для двусменного режима работы, который наиболее характерен, общее время работы оборудования с учетом улучшения его использования  $T=4000$  час.

Подставляя соответствующие числовые значения в систему уравнений (1), получим:

для ЭМУ-12А

$$C_{п1} = t_1 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,01 + t_2 \cdot 0,168 \cdot 0,01; \quad 4000 = t_1 + t_2; \quad (2)$$

для БЭМУ-12А

$$C_{п2} = t_1 \cdot 0,745 \cdot 0,7 \cdot 0,01 + t_2 \cdot 0,108 \cdot 0,01; \quad 4000 = t_1 + t_2; \quad (3)$$

после преобразований будем иметь

$$\begin{aligned} C_{п1} &= 0,0049 t_1 + 0,00168 t_2 \\ 4000 &= t_1 + t_2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} C_{п2} &= 0,0052 t_1 + 0,00108 t_2 \\ 4000 &= t_1 + t_2 \end{aligned} \quad (3)$$

Используя уравнения (2) и (3), построим график стоимости потерь электрической энергии в координатах  $C_{п}$  и  $t_1$  (рис 1.)

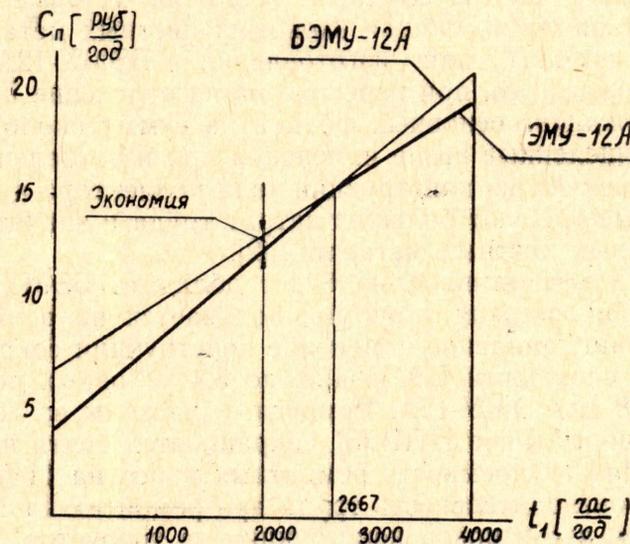


Рис. 1.

Как видно из графика, в области, где  $t_1 < 2667$  часов, стоимость потерь электрической энергии БЭМУ-12А меньше, чем у ЭМУ-12А, при  $t_1 > 2667$  часов наоборот. Во всех случаях равенство потерь имеет место в точке, где  $t_1 = 2t_2$ , то есть ЭМУ-12А имеет меньшие потери только в том случае, когда работа под нагрузкой составляет свыше 66,67% общего времени функционирования в год. Однако длительная работа при номинальной нагрузке нехарактерна для подавляющего большинства ЭМУ. Отсутствие статистических данных затрудняет точное решение этого вопроса. Для определения стоимости потерь электрической энергии примем  $t_1 = t_2$ . При этом допущении получим:

$$C_{п1} = 0,0049 \cdot 2000 + 0,00168 \cdot 2000 = 13,16 \text{ руб./год} \quad (2)$$

$$C_{п2} = 0,0052 \cdot 2000 + 0,00108 \cdot 2000 = 12,56 \text{ руб./год} \quad (3)$$

Эти потери и примем за расчетные.

Величина амортизационных отчислений определяется, исходя из годовой нормы — 10,2% [6] и первоначальной стоимости (с учетом прибыли предприятия, расходов на транспортировку и монтаж — 1,15) ЭМУ.

Подставляя данные, получим:

$$\text{для ЭМУ — 12А — } 10,2 \cdot \frac{218,51}{100} \cdot 1,15 = 25,65 \text{ руб./год;}$$

$$\text{для БЭМУ — 12А — } 10,2 \cdot \frac{220,80}{100} \cdot 1,15 = 25,8 \text{ руб./год.}$$

В связи с тем, что cosφ и к.п.д. сравниваемых ЭМУ либо равны, либо отличаются незначительно, а также, имея в виду небольшую потребляемую мощность, не рассматриваем ни дополнительной стоимости статических конденсаторов и потерь в них, ни дополнительных капитальных вложений в электрические станции для компенсации этих потерь.

Имея все перечисленные данные, можно подсчитать годовой экономический эффект (экономия) от внедрения БЭМУ-12А. При определении экономии исходим из того, что в нашем случае имеем незначительное увеличение себестоимости и улучшение качества БЭМУ-12А. Но так как у изготовителя БЭМУ-12А является оборотными фондами, а у потребителя — основными фондами, суммировать экономический эффект у изготовителя и потребителя нельзя. Исходя из этого, определим экономический эффект у потребителя, где учтем также и проведенные затраты изготовителя [3]:

$$\begin{aligned} \Delta_r &= [C_1' + E_n'(C_1 + E_n K_1)] - [C_2' + E_n'(C_2 + E_n K_2)] = \\ &= C_1' - C_2' + E_n'[C_1 - C_2 + E_n(K_1 - K_2)] = \\ &= [90,5 + 13,16 + 25,65] - (81 + 12,56 + 25,8) \cdot 4000 + \\ &+ 0,15[(218,5 - 220,8) \cdot 4000 + 0,2 \cdot 5000] = 39674 \text{ руб./год,} \end{aligned}$$

- где  $\Delta_r$  — годовой экономический эффект у потребителя, руб./год;  
 $C_1'$  — эксплуатационные расходы в год для ЭМУ-12А, руб./год;  
 $E_n'$  — коэффициент сравнительной экономической эффективности потребителя,  $E_n' = 0,15$  1/год [3];  
 $C_2'$  — эксплуатационные расходы в год для БЭМУ-12А, руб./год;  
 $C_1$  — себестоимость годового выпуска ЭМУ-12А, руб.;  
 $C_2$  — то же для БЭМУ-12А, руб.;  
 $E_n$  — коэффициент сравнительной экономической эффективности изготовителя ЭМУ,  $E_n = 0,2$  1/год [3];  
 $K_1$  — капитальные затраты при изготовлении ЭМУ-12А, руб.;  
 $K_2$  — то же для БЭМУ-12А, руб.

Таким образом, суммарный ожидаемый экономический эффект от внедрения БЭМУ-12А составляет 39674 руб./год.

Наряду с этим необходимо проверить эффективность затрат на разработку научно-исследовательской темы по БЭМУ-12А.

Затраты на разработку по годам составили 1964—2000 руб., 1965—2000 руб., 1966 — 2160, 1967 — 15.000 руб. (план). Приведенные затраты на разработку:

$$K_{пр} = \sum_{i=1}^t k_i (1+E)^t = 2000(1+0,1)^4 + 2000(1+0,1)^3 + 2160(1+0,1)^2 + 15000(1+0,1) = 24460 \text{ руб.,} \quad (4)$$

где  $K_{пр}$  — суммарные приведенные затраты на разработку БЭМУ-12А при освоении в 1968 году, руб.;

$k_i$  — затраты на разработку БЭМУ-12А по соответствующим годам, руб.;

$t$  — число лет, в течение которых  $k_i$  не давали эффекта;

$E$  — коэффициент экономической эффективности для приведения затрат,  $E = 0,1$  1/год [3].

Окупаемость затрат на разработку БЭМУ-12А:

$$\frac{K_{\text{пр}}}{\text{Э}_r} = \frac{24460}{39674} = 0,62 \text{ года.}$$

Коэффициент экономической эффективности затрат на разработку БЭМУ-12А:

$$\frac{\text{Э}_r}{K_{\text{пр}}} = \frac{39674}{24460} = 1,62 \text{ 1/год,}$$

то есть на каждый затраченный рубль при разработке БЭМУ-12А ожидается получить 1,62 руб. экономии в год. Полученная эффективность близка к средней фактической величине эффективности научных разработок по стране.

### Выводы

1. Разработанный электромашинный усилитель БЭМУ-12А имеет преимущества, присущие бесколлекторным электрическим машинам. Основные характеристики такие же, как и у серийных усилителей типа ЭМУ-12А.

2. Новый усилитель более технологичен в изготовлении, так как не имеет коллектора и щеточного механизма. Трудоемкость изготовления снижается на 15,8%. Экономия цветных металлов составляет 16456 кг/год. При разработке БЭМУ-12А использовано большое число деталей и узлов ЭМУ-12А, что обеспечит быстрое его освоение в производстве. Однако себестоимость изготовления БЭМУ-12А возросла на 1% в основном за счет полупроводниковых диодов Д215А.

3. Большой экономический эффект будет получен от применения БЭМУ-12А в эксплуатации. Особенно резко сокращаются ремонтные расходы. Причем преимущества БЭМУ-12А по сравнению с серийной конструкцией наиболее резко проявляются в трудных условиях работы. При нормальных условиях эксплуатации ремонтные расходы сокращаются на 10%, трудоемкость ремонта снижается на 11%. БЭМУ-12А имеет также более низкую стоимость потерь электрической энергии.

4. Суммарный экономический эффект (экономия) от внедрения БЭМУ-12А ожидается 39674 руб./год.

5. Срок окупаемости затрат на научную разработку БЭМУ-12А составляет 0,62 года, эффективность затрат на научную разработку равна 1,62 1/год, что близко к средней фактической величине для научных разработок в стране.

6. Предложена методика технико-экономического обоснования разработки бесколлекторных электромашинных усилителей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Радин. Электромашинные усилители. Гссэнергоиздат, 1962.
2. П. А. Бабаджанян, Б. И. Люсин. Конструкция и производство коллекторов электрических машин. Госэнергоиздат, 1960.
3. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений. М., 1966.
4. Г. И. Дудко. Основные положения методики определения экономической эффективности электрических машин и аппаратов. Сб. Вопросы экономики и организации производства на предприятиях электротехнической промышленности. М., 1963.
5. Единая система планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий. М., 1964.
6. П. Р. Филиппов. Новые нормы амортизации. М. 1963.
7. Прейскурант № 16-03. Оптовые цены на полупроводниковые приборы. Часть 2. М., 1966.
8. Прейскурант № 16-01. Оптовые цены на аппаратуру радиосвязи и радио-детали общего применения. М., 1963.