

ОПТИМИЗАЦИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ЭМУ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

М. Л. Костырев, А. И. Скороспешкин

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Для внедрения автоматизированных систем на повышенной частоте 100—400 гц необходимы регулируемые источники, в качестве которых может использоваться бесконтактный электромашинный усилитель — (БЭМУ) [1]. Усилитель состоит из синхронного генератора и асинхронного преобразователя частоты, совмещенных в одном магнитопроводе и вращаемых приводным двигателем. Для получения жестких внешних характеристик и высоких динамических свойств в усилителе применено фазовое компаундирование [2].

В результате исследований, выполненных на кафедре электрических машин ТПИ, разработана теория работы БЭМУ и методика его проектирования [2, 3, 7]. В настоящей статье поставлена задача оптимизации БЭМУ.

Как известно, задача нахождения оптимума относится к разделу прикладной математики — математическому (или оптимальному) планированию и заключается в определении значений независимых переменных, при которых критерий оптимальности имеет минимально (или максимально) возможную величину при условии, что переменные принимают лишь положительные значения и выполняются условия ограничения.

Если число независимых переменных не превышает 3—4, то поиск оптимума можно осуществить обходом в определенном порядке узлов многомерной сетки в пространстве независимых переменных. При большем числе переменных применяют метод случайных проб, градиентные и другие методы [4, 5].

Из известных критериев оптимальности применительно к БЭМУ наиболее целесообразны:

1. Минимум затрат на изготовление и эксплуатацию (минимум стоимости).

2. Минимум габаритов и веса.

Второй критерий более важен, если БЭМУ предназначен для работы на передвижных установках.

С учетом особенностей БЭМУ как элемента автоматизированной системы рекомендуются следующие условия ограничения:

1. Температура перегрева обмотки статора и ротора не должна превышать допустимую

$$\theta_{\text{Cus}} \leq \theta_{\text{доп}}, \quad \theta_{\text{CuR}} \leq \theta_{\text{доп}}$$

2. Коэффициент усиления по мощности должен быть не менее заданного

$$K_y \geq K_{\text{удоп}}$$

3. Быстродействие усилителя должно быть не хуже заданного

$$T \leq T_{\text{доп.}}$$

4. Суммарное реактивное сопротивление рассеяния обмоток БЭМУ должно быть не более допустимого из условий динамической перегрузочной способности [2, 3, 7].

$$\sum X_{\sigma} \leq X_{\sigma \text{доп.}}$$

5. Индукции на стальных участках магнитопровода не должны превышать заданные из условий форсировки напряжения на выходе

$$B_{a1} + B_{a2} \leq B_{a \text{ доп.}}$$

$$B_{z1} + B_{z2} \geq B_{z \text{ доп.}}$$

6. Технологические условия. Например, ширина зубцов и высота ярма не должны быть меньше допустимых. С учетом конкретных условий производства и эксплуатации могут быть введены дополнительные ограничения (например, ограничение по маховому моменту при работе от дизеля).

Проведенные ранее исследования особенности проектирования БЭМУ совмещенного типа [3], а также использование известного опыта по проектированию асинхронных двигателей на ЦВМ [6] позволили разработать методику расчета — поиска оптимальных вариантов БЭМУ. Методика рекомендуется для машин закрытого обдуваемого исполнения мощностью 0,5—5 квт, частотой 100—400 гц.

Согласно методике [7], в качестве независимых переменных приняты: суммарные электромагнитные нагрузки A , B , b , коэффициент распределения индукций между каскадами C_B , плотности токов в обмотках статора и ротора Δ_s , Δ_r , диаметр расточки статора D и высоты пазов статора и ротора h_{ps} , h_{pr} .

Предварительно по заданной частоте и скорости вращения ротора выбираются с учетом совмещения числа пар полюсов каскадов, число фаз ротора, схемы обмоток, их шаги и обмоточные коэффициенты, а также числа и форма пазов статора и ротора, воздушный зазор. Внешний диаметр статора выбирается из условий унификации или из ряда нормализованных диаметров, а диаметр вала под пакетом ротора из условий механической прочности.

Основные параметры усилителя рассчитываются на основании формул, предложенных в [3]. Потери и перегрев обмоток рассчитываются по известной методике [8]. При расчете стоимости БЭМУ капитальные затраты K приводятся к эксплуатационным C_1 по известной формуле

$$C = C_1 + E_n K,$$

где

$E_n = 0,15—0,2$ — коэффициент экономической эффективности.

Расходы на транспортировку, монтаж и обслуживание при расчетах не учитываются, так как они относительно невелики и почти не зависят от использования материалов, т. е. не влияют на положение оптимума.

По разработанной методике на ЦВМ «М-20» были рассчитаны оптимизированные варианты БЭМУ. Машинное время расчета одного варианта составило около 2 сек.

Оптимум определялся методом Гаусса—Зайделя [5]. В качестве критерия использовался как минимум веса, так и минимум стоимости. При оптимизации по стоимости вводились ограничения по температуре, относительному рассеянию и максимальным индукциям на стальных участках магнитопровода.

Результаты расчетов (без приводного двигателя) при оптимизации по стоимости приведены в табл. 1. Для расчетов были взяты следующие исходные данные: $n = 3000$ об/мин., $\cos \varphi_n = 0,8$, $D_n = 208$ мм, $\delta = 0,4$ мм, $d_B = 0,48$ мм.

Таблица 1

			1	2	3	4
Мощность	$P_{\text{вых}}$	кВа	3	3	3	3
Частота	t_2	ц	200	300	400	400
Число полюсов	$2p_1$	—	2	2	2	4
	$2p_2$	—	6	10	14	12
Число пазов	z_s	—	36	30	42	36
	z_R	—	24	20	28	24
Коэффициент	C_B	—	0,47	0,57	0,54	0,45
Индукция	$B\delta$	тл	0,5	0,55	0,5	0,44
Линейная нагрузка	A	а/см	197	183	200	165
Диаметр расточки	D	мм	140	145	150	150
Длина пакета	l	мм	144	144	139	224
Высота паза	$h_{пс}$	мм	16	17	16	18
	$h_{пR}$	мм	27	28	26	26
Плотность тока	Δ_s	а/мм ²	4,1	3,8	4,45	3,3
	Δ_R	а/мм	3,96	3,7	4	3,3
Ширина зубца	b_{zs}	мм	3,7	5	3,9	4,8
	b_{zR}	мм	5,5	7,4	5,2	6
Вес меди	$G_{\text{сн}}$	кг	10,7	10,1	8,2	11,7
Вес БЭМУ	G	кг	66	66	65	100
К.п.д.	η	—	0,85	0,84	0,84	0,82
Перегрев обмотки	$\theta_{\text{снR}}$	°С	67	67	67	59
Рассеяние обмоток	X_δ	—	0,49	0,49	0,5	0,5
Оптовая цена	K_1	руб.	101	100	92	130

Сталь Э42, 0,35 мм, обмоточный провод ПЭВ-2, изоляция класса Е.

При расчете стоимости принималось, что время работы БЭМУ под нагрузкой в течение срока службы 5—7 лет при коэффициенте загрузки по мощности $K_n=0,7$ $t=10000$ час.

Расчеты на оптимум показали, что для указанных мощностей, частот и исполнения оптимальные нагрузки БЭМУ лежат в пределах $B\delta=0,4—0,6$ тл, $A=150—200$ а/см, $\Delta=3—5$ а/мм². Оптимальные значения

$C_B=0,35—0,55$, отношение диаметра к длине $\frac{D}{l}=0,6—1,1$. Параметры

$C_B \frac{D}{l}$ увеличиваются с ростом отношения полюсов $\frac{p_2}{p_1}$.

Потери на возбуждение в оптимизированных машинах составили 2—3% от мощности выхода, к.п.д. достаточно высок $\eta=0,77—0,85$.

Расчеты на оптимум показали, что основные параметры БЭМУ, в том числе вес, стоимость, с ростом отношения $\frac{p_2}{p_1}$ улучшаются.

В табл. 2 оптимизированные по стоимости БЭМУ сравниваются с серийными генераторами повышенной частоты. Как видно, в диапазоне частот до 400 гц разработанные БЭМУ имеют более высокий к.п.д., на 30% легче и в 1,5—1,6 раза дешевле по сравнению с серийными бесконтактными генераторами повышенной частоты. Кроме этого, БЭМУ обладают высокими динамическими и регулировочными свойствами, что дает им дополнительные преимущества для применения в автоматизированных системах.

Таблица 2

		12ГИС-2	БЭМУ	16ГИС2	БЭМУ	ГПЧ12/400
Мощность	кВа	3,75	3	3,75	3	15
$\cos\varphi_n$	—	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Скорость	об/мин	3000	3000	3000	3000	1500
Частота	гц	300	300	400	400	400
К.п.д.	—	0,83	0,84	0,82	0,84	
Вес	кг	110	66	110	65	280
	кг/кВа	29,3	22	29,3	21,7	18,5
Цена	руб.	192	100	192	92	1770
	руб/кВа	51,2	33,3	51,2	30,7	118
Исполнение	—	закрытое		бесконтактное		конт. защ.
AU	%	—	10	—	10	2
K_y	—	—	1000	—	1000	—
T	сек.	—	0,05	—	0,05	—

В табл. 3 и 4 БЭМУ в агрегатном исполнении сравниваются с известными электромашинными и статическими преобразователями. В качестве приводного двигателя БЭМУ принят двигатель АОЛ2-31-2.

Таблица 3

		БЭМУ	ВПЧ-150	МПЧ-1	С-572	ОПЧ-3	И-165
$P_{вых}$	кВа	3	2,7	2,1	1,2	5,3	3,75
f_2	гц	200	200	200	200	200	200
n	об/мин	3000	3000	3000	3000	3000	3000
$\cos\varphi_n$	—	0,8	0,7	0,85	0,7	0,75	0,8
$\eta_{агр}$	—	0,72	0,52	0,585	0,577	0,71	0,52
$\cos\varphi_1$	—	0,89	0,4	0,89	0,47	0,92	0,5
Вес	кг	96	330	130	36	140	73
	кг/кВа	32	150	62	30	26,4	19,5
Цена	руб.	145	520	—	48	195	135
	руб./кВа	48	193	—	40	37	36
AU	%	10	—	—	30	13	30
K_y	—	1000	—	—	—	—	—
T	сек	0,05	—	—	—	—	—
Исполнение	—	закр.	взрывобез. бесконтактное		защ.	защ.	закр. контактное

		БЭМУ	АЛА-3,5	АТТ-2-400 ПЧ-8	УЧ СПЧ		
$P_{\text{вых}}$	кВа	3	4,38	2,5	8	1	1,57
f_2	Гц	400	427	400	500	400	400
n	об/мин	3000	2850	3000	3000	статические	
$\cos\varphi_H$	—	0,8	0,8	0,8	0,8	1	0,7
m	—	3	1	3	3	1	3
$\eta_{\text{агр}}$	—	0,71	0,55	0,515	0,75	0,6	0,7
$\cos\varphi_1$	—	0,88	—	0,85	1	—	0,7
Вес	кг	95	170	152	325	55	30
					40,7	(без С)	
Цена	кг/кВа	31,7	39,7	60,7	—	55	28
	руб.	135	255	—	—	—	2300
	руб/кВа	45	58,2	—	—	—	1460
ΔU	%	10	—	2	—	25	$\pm 5\%$
K_y	—	1000	—	—	—	—	—
T	сек.	0,05	—	—	—	—	—

Как видно из технико-экономического сравнения, в диапазоне частот до 400 Гц БЭМУ могут успешно конкурировать, особенно при работе на резкопеременную, преимущественно двигательную нагрузку, с известными бесконтактными преобразователями, в том числе с ферромагнитными умножителями частоты (УЧ) и статическими полупроводниками преобразователя (СПЧ) [9, 10]. Последние значительно уступают БЭМУ по стоимости и надежности.

Выводы

1. Разработанная методика расчета—поиска оптимальных вариантов бесконтактных электромашинных усилителей повышенной частоты 100—400 Гц позволила спроектировать усилители с хорошими весовыми и энергетическими показателями, а также высокими динамическими и регулировочными свойствами.

2. Разработанные усилители могут успешно конкурировать с известными бесконтактными генераторами и преобразователями повышенной не регулируемой частоты, особенно при работе на двигательную нагрузку.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Л. Костырев, А. И. Скороспешкин. Электромашинный усилитель-преобразователь. «Электричество», 1969, № 1.
2. М. Л. Костырев, А. И. Скороспешкин. Вопросы теории бесконтактного ЭМУ переменного тока Известия ТПИ, т. 190, 1968.
3. М. Л. Костырев, А. И. Скороспешкин. К проектированию бесконтактного ЭМУ переменного тока. Известия ТПИ, т. 190, 1968.
4. Т. М. Тер-Микаэлян, Б. М. Каган. Решение инженерных задач на цифровых вычислительных машинах. Изд. «Энергия», 1964.
5. Д. Уайльд. Методы поиска экстремума. «Наука», 1967.
6. Л. М. Артамонова, Ю. В. Мордвинов, Е. В. Пламодьяло, Т. Г. Сорокер. Расчет серии асинхронных двигателей на ЦВМ. Издательство ЦИТИ ЭП, 1962.
7. М. Л. Костырев. Разработка и исследование бесконтактных электромашинных усилителей повышенной частоты. Диссертация, Томск, 1968.
8. И. М. Постников. Проектирование электрических машин. ГЭИ. 1960.
9. А. М. Бамдас и др. Новейшие ферромагнитные умножители частоты. Сб. «Бесконтактные электрические машины», часть III, Информстандартэлектро, 1967.
10. М. Б. Коновалов. Статические преобразователи трехфазного переменного тока на плоскостных транзисторах. Диссертация, Томск. 1963.