

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ И ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК СЕРИЙНЫХ ЭМУ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ  
И ЭМУ С ГЛАДКИМ ЯКОРЕМ**

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Г. Г. КОНСТАНТИНОВ, Ю. В. ГОРСТ

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Развитие современных средств автоматики, высокочувствительной измерительной аппаратуры предъявляет все более высокие требования к величине пульсаций и виброакустическим характеристикам электрических машин. В настоящее время эти характеристики являются одним из основных показателей, характеризующих техническое совершенство электрических машин.

Напряжение генераторов постоянного тока состоит из постоянной и переменной составляющих. Величина переменной составляющей у большинства генераторов находится в пределах 1—2 проц., а у отдельных до 3 проц. и выше. Вибрации и шум также достигают значительных величин.

В настоящей работе исследуются источники и причины пульсаций, повышенных уровней вибраций и шума в электромашинах усилителях поперечного поля. Предлагаются способы снижения основных видов пульсаций и улучшения виброакустических характеристик за счет конструктивных изменений ЭМУ.

Исследования были проведены на ряде серийных усилителей типа ЭМУ-12 и ЭМУ-5 как с прямым пазом, так и со скосом паза на одно зубцовое деление, а также на разработанных нами [1, 2] электромашинах усилителях с гладким якорем.

Основными видами пульсаций, из которых складывается переменная составляющая напряжения генератора постоянного тока, являются: фазовая, зубцовая, пульсация от анизотропии магнитных свойств стали, пульсация, вызванная производственно-эксплуатационными допусками, пульсация от коммутации и другие [3].

Известными источниками вибраций и шума электрических машин являются: механические, аэродинамические и магнитные.

В результате сопоставления расчетных частот основных возмущающих сил и экспериментально полученных частотных спектров пульсаций, вибраций и шума было установлено, что доминирующими в частотном спектре пульсаций ЭМУ являются зубцовые и фазовые, а в частотном спектре вибраций и шума — магнитные составляющие вибрации и шума.

В связи с этим основное внимание в работе было уделено на исследование наиболее рационального пути снижения уровня зубцовых и фазовых пульсаций, а также магнитных составляющих вибраций и шума электромашинах усилителей.

## Зубцовые и фазовые пульсации в ЭМУ поперечного поля

Зубцовая пульсация вызывается поперечными и продольными колебаниями магнитного потока, возникающими при вращении зубчатого якоря вследствие периодического изменения магнитной проводимости зубцовой зоны.

Магнитная проводимость зубцовой зоны зависит от взаимного расположения, формы, соотношения, геометрических размеров и конструктивных элементов магнитной цепи, создающих профиль воздушного зазора, как-то: зубцового деления, ширины полюсного наконечника, коэффициента скоса паза, ширины прорези паза и величины воздушного зазора.

Частота зубцовой пульсации подсчитывается по формуле

$$f_z = z \cdot n \quad [\text{Гц}], \quad (1)$$

где

$z$  — число реальных пазов якоря,  
 $n$  — скорость вращения якоря (об/мин).

Для ослабления поперечных пульсаций магнитного потока рекомендуется проводить скос паза якоря на одно зубцовое деление по оси полюсного наконечника. Для ослабления продольных пульсаций магнитного потока целесообразно брать число пазов на пару полюсов нечетным, так как при этом изменение магнитного сопротивления под одним полюсом заметно компенсируется изменением этого сопротивления под другим.

Все эти конструктивные изменения позволяют лишь несколько уменьшить зубцовые пульсации. Применение же гладкого якоря позволяет полностью избавиться как от поперечных, так и продольных пульсаций магнитного поля.

Фазовая пульсация возникает вследствие конечного числа секций обмотки якоря и расположения их относительно оси полюсов.

Частота и величина этой пульсации определяется параметрами многоугольника э.д.с. Пульсации происходят в больших пределах, если многоугольник э.д.с. состоит из четного числа сторон [4]:

$$\frac{\Delta E}{E_{\text{ср}}} \cdot 100 = \text{tg}^2 \frac{\alpha}{4} \quad [\%]; \quad (2)$$

и в меньших пределах при нечетном числе сторон

$$\frac{\Delta E}{E_{\text{ср}}} \cdot 100 = \text{tg}^2 \frac{\alpha}{\delta}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — фазовый угол и определяется по формуле

$$\alpha = \frac{2\pi}{m} = \frac{2\pi t}{z}, \quad [3]$$

здесь  $t$  — общий наибольший делитель для  $z$  и  $p$ ,

$p$  — число пар полюсов.

Частота фазовой пульсации определяется по формулам, согласно [3]: при четном числе фаз

$$f_{\text{ф.ч}} = p \cdot m \cdot n \quad [\text{Гц}] \quad \text{и} \quad (4)$$

при нечетном числе фаз

$$f_{\text{ф.н}} = 2p \cdot m \cdot n \quad [\text{Гц}] \quad (5)$$

Величина и частота фазовой пульсации в ЭМУ поперечного поля с гладким якорем определяется по формулам (2, 4) и (3, 5), учитывая при этом, что число фаз в этом случае равно числу секций обмотки якоря

Во всех усилителях с гладким якорем применена простая петлевая обмотка с диаметральным шагом. В табл. 1 приведены некоторые конструктивные данные серийного усилителя и усилителя с гладким якорем, необходимые для расчета частот и величин зубцовой и фазовой пульсаций.

В табл. 2 приведены в относительных единицах результаты экспериментального исследования пульсаций этих усилителей.

На рис. 1 и 2 показаны амплитудные значения частотных составляющих спектра пульсаций выходного напряжения серийного усилителя и усилителя с гладким якорем при номинальной нагрузке и на холостом ходу.

Таблица 1

№ п.п.	Типы ЭМУ п/п	$P_n$ , квт	$U_n$ , в	$n$ , об/мин	$Z$	$2P$	$K$
1	ЭМУ-12А без скоса паза	1,0	60	2900	29	2	87
2	ЭМУ-12А со скосом паза на одно зубцовое деление	1,0	60	2900	29	2	87
3	ЭМУ с гладким якорем	0,7	50	2900	—	2	81

Таблица 2

№ п.п.	Тип ЭМУ п/п	Зубцовая пульсация в % от $U_n$	Фазовая пульсация в % от $U_n$	Общий уровень пульсаций в % от $U_n$
1	ЭМУ-12А без скоса паза	2,5	0,715	3,3
2	ЭМУ-12А со скосом паза на одно зубцовое деление	0,55	0,45	1,15
2	ЭМУ с гладким якорем	0	0,02	0,6

Осциллограмма (рис. 3) иллюстрирует характер и величины этих пульсаций при номинальной нагрузке. Осциллографирование проводилось на двухлучевом осциллографе С1=18 одновременно на обоих каналах при одинаковых положениях ручек управления усилителей У-I и У-II.

Как видно из табл. 2, рис. 1, 2 и 3, в усилителях с гладким якорем нет зубцовых пульсаций ( $f_z=1400$  гц), резко уменьшается величина и возрастает частота фазовых пульсаций ( $f_\phi=7830$  гц). Общий уровень пульсаций выходного напряжения по сравнению с серийными усилителями со скошенным пазом уменьшается почти в 2 раза, а с прямым пазом более чем в 5 раз.

### Магнитные вибрации и шум в ЭМУ поперечного поля

Физическая природа вибраций и шума магнитного происхождения в ЭМУ поперечного поля та же, что и в асинхронных электродвигателях и машинах постоянного тока. Причина магнитных вибраций и шума — переменность магнитных сил вследствие изменения магнитной проводимости воздушного зазора при вращении зубчатого якоря. Кроме того, причинами вибраций и шума могут быть односторонние магнитные усилия, вызываемые неравномерностью воздушного зазора, несиммет-

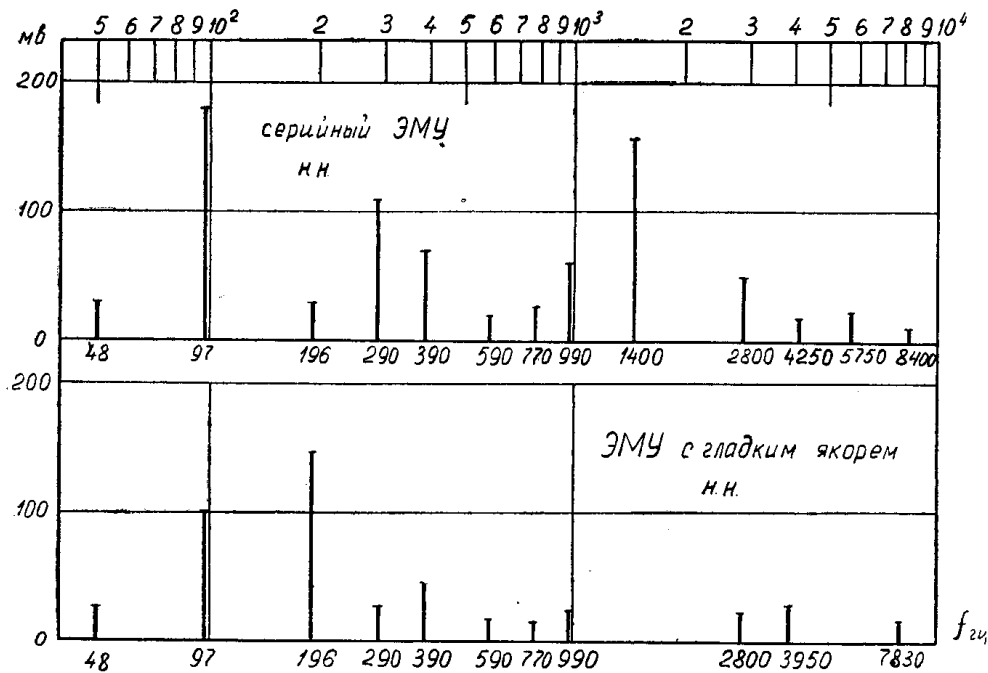


Рис. 1. Спектры пульсаций выходного напряжения ЭМУ при номинальной нагрузке

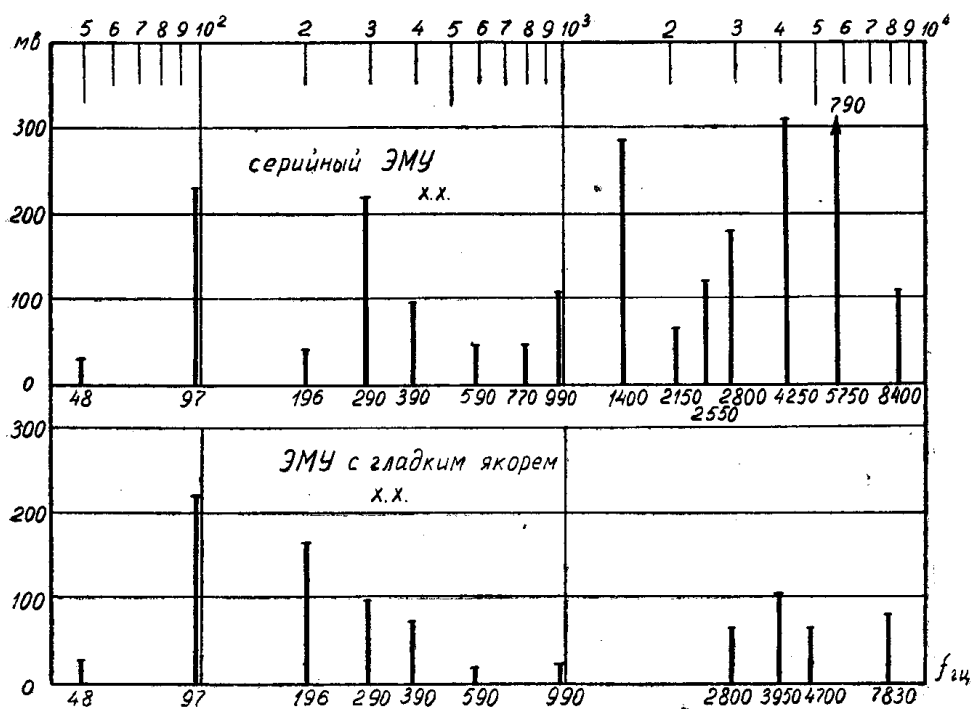


Рис. 2. Спектры пульсаций выходного напряжения ЭМУ на холостом ходу

ричность в размещении полюсов, щеток, обмоток, неправильно выбранные соотношения чисел пазов, а также различные технологические факторы.

Не все известные рекомендации [6—9] по снижению или ликвидации магнитных вибраций и шума электрических машин дают положительные результаты применительно к ЭМУ, а некоторые из них в связи

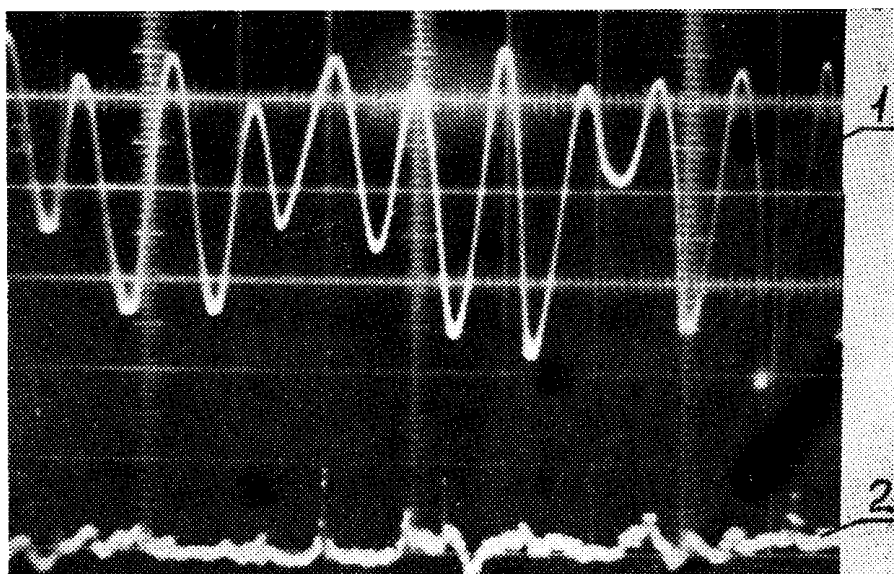


Рис. 3. Осциллограмма пульсаций выходного напряжения ЭМУ.  
1 — серийный ЭМУ, 2 — ЭМУ с гладким якорем

с особенностями конструкции ЭМУ поперечного поля совершенно неприемлемы.

Например, рекомендованные для асинхронных электродвигателей оптимальные соотношения чисел пазов статора и ротора в ЭМУ неприемлемы. То же самое можно сказать о рекомендациях по увеличению воздушного зазора и о ряде других. Для уменьшения магнитного шума и пульсационных потерь в [10] рекомендуется выполнить условие, при котором бы зубцовые деления компенсационных пазов и пазов якорной обмотки отличались друг от друга на  $\pm 5$  проц. Но соблюдением только одного условия невозможно добиться значительного снижения магнитных вибраций и шума. В связи с малым воздушным зазором ЭМУ поперечного поля даже относительно небольшие отклонения отдельных деталей и узлов от их номинальных размеров и геометрической формы могут существенно ухудшить его виброакустические характеристики и, в частности, привести к резкому повышению уровней вибрации и шума магнитного происхождения. Но чрезмерное ужесточение допусков на изготовление деталей и узлов связано с общеизвестными трудностями производственного характера. Поэтому наиболее целесообразно добиваться снижения магнитных составляющих вибрации и шума ЭМУ за счет конструктивных изменений, к которым можно отнести: увеличение воздушного зазора, укорочение шага обмоток, закрытие и выбор правильной формы паза, скос паза и др. Влияние скоса паза якоря в ЭМУ поперечного поля на уровень магнитных вибраций и шума рассмотрено в работе [11]. Но ликвидировать полностью эти составляющие вибрации и шума введением скоса паза на одно пазовое деление не представляется возможным, так как радиальные магнитные силы не уничтожаются, а происходит их перераспределение по длине якоря. Находясь в противофазе по длине якоря, радиальные магнитные силы возбуждают скручивающие вибрации корпуса, частота которых также равна или кратна зубцовой.

Следовательно, непременным условием ликвидации магнитных составляющих вибрации и шума электрической машины является устранение их источника, т. е. зубчатого строения якоря. Одним из решений

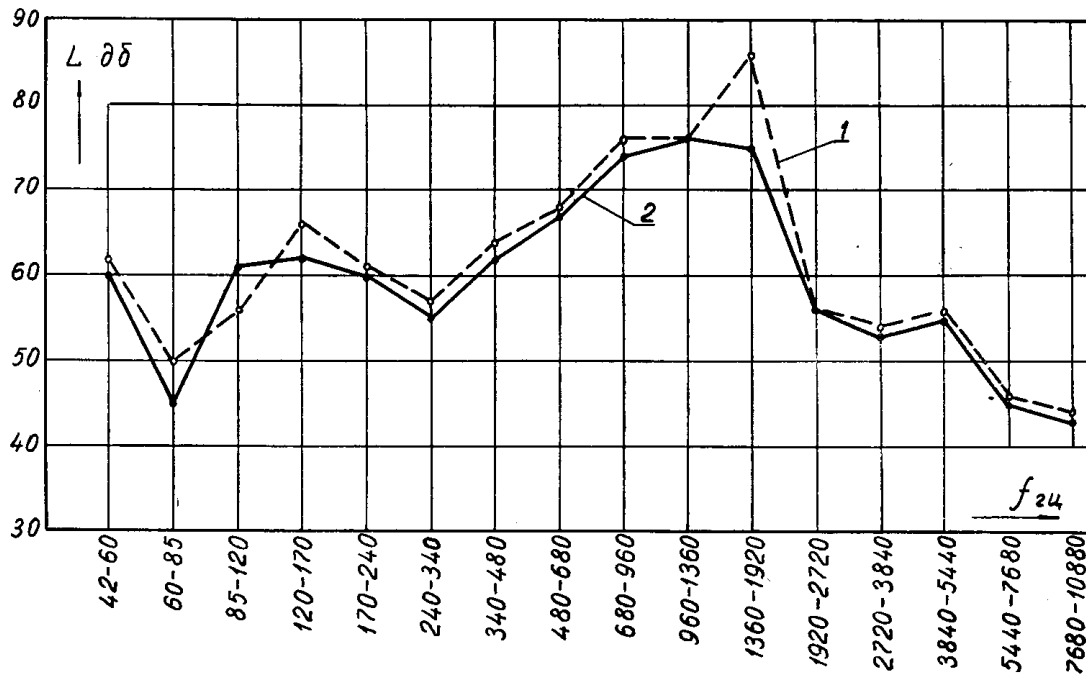


Рис. 4. Спектрограммы вибраций ЭМУ: 1 — серийный ЭМУ, 2 — ЭМУ с гладким якорем

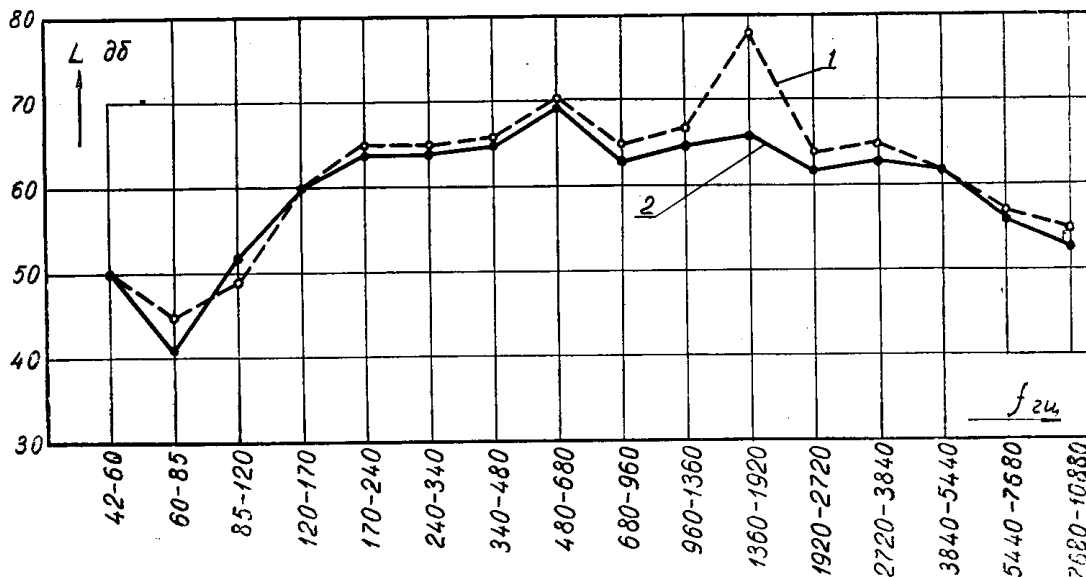


Рис. 5. Спектрограммы шума ЭМУ: 1 — серийный ЭМУ, 2 — ЭМУ с гладким якорем

этого вопроса может быть изготовление электрической машины с гладким якорем.

Результаты исследования частотного состава вибрации и шума ЭМУ поперечного поля, выполненного с гладким якорем, представлены на рис. 4 и 5. Измерения вибрации производились виброметром типа ИВПШ, а шума — шумомером типа Ш-63. Частотный анализ шума и вибраций проводился полуоктавным фильтром типа ПФ-1 и анализатором спектра типа С4-7. Из сравнения спектрограмм вибрации (рис. 4) и шума (рис. 5) ЭМУ с гладким якорем и серийного ЭМУ видно, что уровень магнитных вибраций и шума у ЭМУ с гладким якорем ниже на 11 и 12дБ соответственно. Необходимо отметить, что исследования

проводились на ЭМУ однокорпусного исполнения. Это накладывает свой отпечаток на частотный состав вибраций и шума, так как сказывается влияние встроенного двигателя. Измерения вибрации и шума, проведенные при отключенном генераторе ЭМУ, показали, что их спектральный состав практически не отличается от спектрограмм ЭМУ с гладким якорем (кривые 2, рис. 4 и 5). Из сказанного выше следует, что в ЭМУ с гладким якорем возможно добиться полной ликвидации магнитных вибраций и шума на зубцовой частоте.

### Выводы

1. В частотных спектрах вибраций, шума и пульсаций доминирующими являются магнитные вибрации и шум, а также зубцовые и фазовые пульсации.

2. В ЭМУ с гладким якорем общий уровень пульсаций выходного напряжения по сравнению с серийным ЭМУ со скошенным пазом уменьшается почти в 2 раза, а с прямым пазом — более чем в 5 раз.

3. В частотном спектре пульсаций ЭМУ с гладким якорем исчезает зубцовая составляющая, резко уменьшается амплитуда и возрастает частота фазовой составляющей.

4. В ЭМУ с гладким якорем полностью устраняются вибрации и шум магнитного происхождения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Скороспешкин, Ю. А. Степанов. ЭМУ поперечного поля с гладким якорем. «Электромеханика», № 10, 1964.
2. А. И. Скороспешкин, Г. Г. Константинов. Некоторые результаты исследования характеристик и коммутации ЭМУ поперечного поля с гладким якорем. Известия ТПИ, том 160, 1967.
3. И. М. Водяхо. Фазовая пульсация. «Электричество», № 10, 1966.
4. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины, ч. 1, «Энергия», 1964.
5. А. Я. Бергер. О числе фаз короткозамкнутого ротора АД (и якоря МПТ). Изв. ВЭТА, т. XXII, 1940.
6. Н. П. Ермолин. Магнитный шум машины постоянного тока. Известия ЛЭТИ, вып. 28, 1955.
7. Э. Р. Кучер, А. Г. Койре, Н. И. Муркес. Экспериментальное исследование магнитного шума и вибраций электродвигателей. Труды ВНИИЭМ, т. 20, «Энергия», 1965.
8. В. Г. Шпрингман. Магнитный шум электрических машин. Сб. «Шумы электрических машин», изд. АН СССР, 1939.
9. Ю. П. Рылов. Исследование вибраций асинхронных двигателей, вызванных магнитными силами. «Вестник электропромышленности», № 5, 1959.
10. Ф. А. Горяинов. Электромашинные усилители. Госэнергоиздат, 1962.
11. Ю. В. Горст, П. Т. Мальцев, А. Г. Молодых. Снижение составляющих вибрации и шума магнитного происхождения ЭМУ поперечного поля. Сб. «Электромеханические устройства и системы. Электронные приборы», «Энергия», 1967.