

РАСЧЕТ МАГНИТНЫХ ВИБРАЦИЙ И ШУМА ЭМУ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ

Ю. В. ГОРСТ, П. Т. МАЛЬЦЕВ

(Рекомендовано семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Вопросы расчета предполагаемого уровня вибрации и шума при проектировании электрических машин приобретают все большую актуальность в связи с постоянно повышающимися требованиями к современным изделиям по их виброакустическим параметрам. Это особенно важно при конструировании малошумных электрических машин, так как в процессе проектирования желательна хотя бы ориентировочно определить расчетным путем ожидаемые уровни их вибраций и шума. Оценку общего уровня шума можно производить по методике, предложенной в [1]. Но среди многих компонент в спектрах вибрации и шума, предопределяющих общие уровни, интерес представляют вибрации и шум магнитного происхождения, так как они зачастую являются доминирующими и имеют место почти в любой электрической машине.

Вопросам расчетного определения магнитных вибраций и шума электрических машин посвящен ряд работ, например [2, 5, 7] — для асинхронных электродвигателей и [3, 4, 8] — для машин постоянного тока. В связи с бурным развитием автоматики перед современным электромашиностроением стоит проблема создания малошумных электромашинных усилителей. Поскольку в ЭМУ, как и в ряде других электрических машин, в общих уровнях определяющими являются составляющие вибрации и шума магнитного происхождения, в первую очередь возникает задача по их расчетному определению в процессе конструирования.

Согласно методикам расчета магнитного шума, изложенным в технической литературе, асинхронный электродвигатель рассматривается как сферический излучатель, а машина постоянного тока — как цилиндрический излучатель звуковых волн.

Расчет мощности звукового излучения сферической поверхности в зависимости от порядка колебаний производится по формулам [2, 7]:

$$\begin{aligned} \text{при } i = 0 \quad P_{зв} &= 1,03 \cdot 10^{-3} \cdot R_c^2 f_B^2 U_{вр}^2 \frac{(kR_c)^2}{1 + (kR_c)^2}; \\ \text{при } i = 1 \quad P_{зв} &= 0,34 \cdot 10^{-3} \cdot R_c^2 f_B^2 U_{вр}^2 \frac{(kR_c)^4}{4 + (kR_c)^4}; \\ \text{при } i = 2 \quad P_{зв} &= 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot R_c^2 f_B^2 U_{вр}^2 \frac{(kR_c)^2}{\left[4 - \frac{9}{(kR_c)^2}\right]^2 + \left[kR_c - \frac{9}{kR_c}\right]^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где

R_c — средний радиус упругой осевой линии кольца статора;
 f_B — частота возмущающих радиальных сил;

$k = \frac{2\pi}{\lambda_{зв}}$ — волновое число;

$\lambda_{зв} = \frac{v_{зв}}{f_B}$ — длина звуковой волны;

$v_{зв}$ — скорость звука в воздухе;

$U_{вр}$ — величина амплитуды динамической вращающейся деформации статора:

$$U_{вр} = 0,0543 \frac{C_{п} F_{уд} f_c}{\sqrt{f_c + 2,5(f_B - f_c)^2}}, \quad (2)$$

где

f_c — частота собственных колебаний статора;

$C_{п} = 6 \cdot 10^{-2} \frac{R_c^4}{b_c^3}$ — коэффициент, определяющий жесткость

сплошного кольца статора при статической нагрузке, периодически распределенной на его окружности (для единичной длины);

b_c — толщина спинки кольца статора;

$F_{уд} = 0,407 \cdot 10^{-7} B_0^2$ — удельная сила, вызывающая колебания статора и приходящаяся на 1 см^2 площади его расточки.

Значение квадрата индукции в воздушном зазоре (B_0^2) определяется из выражения, приведенного в [7], а функция $f(kR_c)$, зависящая от отношения размеров излучателя к длине излучаемой волны для $i=2$, приведена там же, на рис. 7-1.

Мощность звукового излучения цилиндрической поверхности определяется из выражения [4, 8]:

$$P_{зв} = \frac{1}{2} \gamma_a x_0^2, \quad (3)$$

где

x_0 — скорость колебаний на корпусе машины;

γ_a — акустическое сопротивление корпуса в воздухе, которое может быть определено по формуле [8]:

$$\gamma_a = \pi R_c l_c \rho v_{зв} \varphi_1, \quad (4)$$

l_c — длина корпуса машины;

$\rho v_{зв} = 41,3$ — удельное акустическое сопротивление воздуха.

Функция φ_1 зависит от эффективного радиуса цилиндра

$$\frac{2\pi R_c}{\lambda_{зв}}$$

и порядка колебаний и может быть определена из рис. 6 [4].

Амплитуда изгибных колебаний статора асинхронного электродвигателя в зависимости от порядка колебаний рассчитывается по формуле [5]:

$$A_i = \frac{P_i i}{\sqrt{\left(1 - \frac{f_B^2}{f_c^2}\right)^2 + n_T^2 \frac{f_B^2}{f_c^2}}} x_{p,i}, \quad (5)$$

где

P_i — амплитуда удельных радиальных сил, созданных от взаимодействия роторных и статорных зубцовых гармоник;

Π_i — податливость статорного кольца при действии сил i -го порядка;

p_t — коэффициент, учитывающий внутреннее трение в металле;

χ_p (χ_v) — коэффициент скоса паза на роторе (статоре).

Для машины постоянного тока амплитуда радиальных изгибных колебаний корпуса определяется по формуле [3]:

$$A_i = \frac{izR_c^4 B_0^2 \cdot 10^{-5}}{4\pi_2 \cdot 9,81 E I_x} \cdot \frac{\left[pR_k - \frac{r+p^2(R_c-r)}{R_c} S_k \right] \frac{\sin \pi C}{\pi C}}{\left[(i^2 + 1) \frac{\mu R_c^4}{E I_x} (2\pi f_B)^2 - i^2(i^2 - 1) \right]}, \quad (6)$$

где

z — число пазов якоря;

E — модуль упругости материала корпуса;

I_x — момент инерции поперечного сечения корпуса относительно оси, перпендикулярной плоскости изгиба;

p — число пар главных полюсов;

r — радиус расточки полюсов;

μ — масса корпуса вместе с главными и добавочными полюсами на единицу длины нейтральной линии;

C — скос пазов якоря или полюса в долях пазового деления якоря;

R_k, S_k — расчетные коэффициенты, определяемые в зависимости от соотношений ширины зубца и пазового деления, ширины паза и длины воздушного зазора, коэффициента воздушного зазора по формулам [3];

i — порядок колебаний.

Вопрос, какая из двух методик расчета магнитных вибраций и шума более правильно отражает картину, происходящую в ЭМУ поперечного поля, до сих пор в технической литературе не нашел отражения. Электромашинный усилитель отличается от других типов электрических машин рядом конструктивных особенностей. Являясь, как правило, машиной постоянного тока, ЭМУ поперечного поля имеет статор с неявно выраженными полюсами. По своей конструкции он аналогичен статору асинхронного электродвигателя. Кроме того, в конструктивном отношении ЭМУ изготавливаются в двух исполнениях: агрегатном и однокорпусном (со встроенным двигателем). Эти особенности накладывают свой отпечаток на методику расчета магнитных вибраций и шума. Очевидно, применительно к ЭМУ поперечного поля не может быть однозначного решения данного вопроса. Это положение подтвердилось при расчете уровней магнитных вибраций и шума выпускаемых серийных электромашинных усилителей.

Рассмотрим отдельно ЭМУ в агрегатном и однокорпусном исполнениях. В электромашинном усилителе агрегатного исполнения (приводной двигатель выполнен отдельно) пакет железа статора мало отличается от пакета железа статора асинхронного двигателя. По своим линейным размерам ЭМУ вписывается в сферу с небольшими отклонениями. Необходимо отметить, что в данном случае размеры машины, как правило, малы по сравнению с длинами волн излучаемого магнитного шума. Следовательно, ЭМУ поперечного поля агрегатного исполнения в первом приближении можно рассматривать как сферический источник звука и расчет мощности звукового излучения его в зависимости от порядка колебаний производить по формулам (1).

Из тех же соображений, по всей вероятности, расчет амплитуды изгибных колебаний на корпусе ЭМУ может быть произведен по методике, разработанной для асинхронных электродвигателей, т. е. по формуле (5).

При расчете частот собственных колебаний (f_c) статорного кольца ЭМУ, его податливости (Π_i), коэффициента жесткости (C_n) наиболее целесообразно руководствоваться рекомендациями и формулами, изложенными в [5, 7]. Однако в связи с некоторыми особенностями конструкции статорного кольца ЭМУ вопрос по определению вышеперечисленных параметров нельзя считать решенным. И хотя в данной работе исходим из предположения, «что парциальные частоты колебаний корпуса и пакета стали статора значительно отличаются друг от друга, а коэффициент связи системы наибольший, поэтому собственные частоты системы близки к парциальным» [5], тем не менее оно также требует дальнейшего уточнения.

В электромашинном усилителе однокорпусного исполнения характерной особенностью является то, что его длина оказывается значительно больше (в 2,5-3 раза) диаметра. Поэтому, несмотря на то, что при одинаковой мощности ЭМУ обоих исполнений источник магнитных вибраций и шума остается неизменным, размеры и форма излучающей поверхности ЭМУ однокорпусного исполнения значительно отличаются от ЭМУ агрегатного исполнения. В связи с этим, очевидно, наиболее правильно представить ЭМУ однокорпусного исполнения как цилиндрический источник звука и расчет магнитного шума вести по формуле (3). Высказанные предположения были проверены экспериментами. На рис. 1 представлена характеристика направленности звукового излучения для ЭМУ агрегатного исполнения, а на рис. 2 — для однокорпусного исполнения.

Для расчета скорости колебаний на корпусе ЭМУ воспользуемся

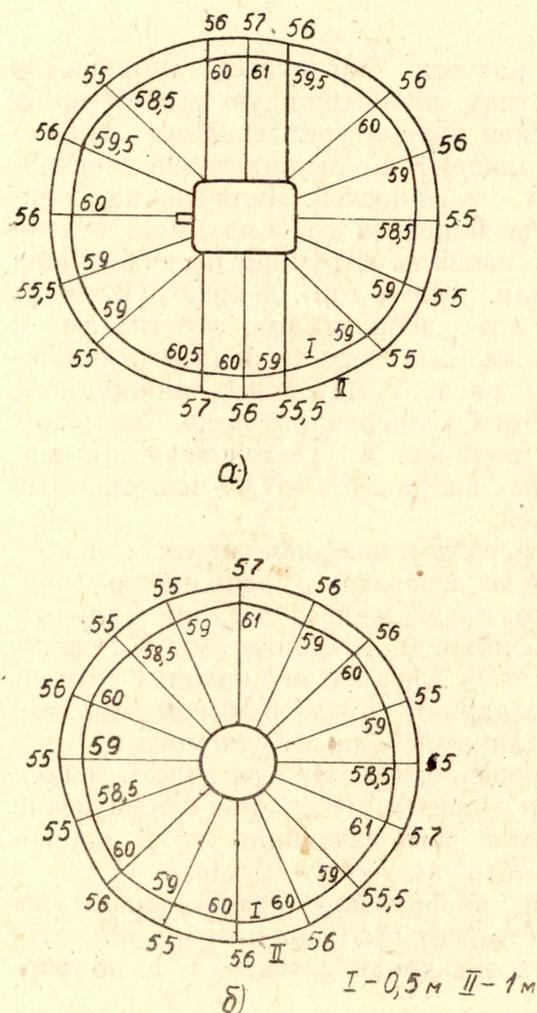


Рис. 1. Характеристика направленности звукового излучения ЭМУ агрегатного исполнения: а) в плоскости, проходящей через вал ЭМУ; б) в плоскости, перпендикулярной валу ЭМУ

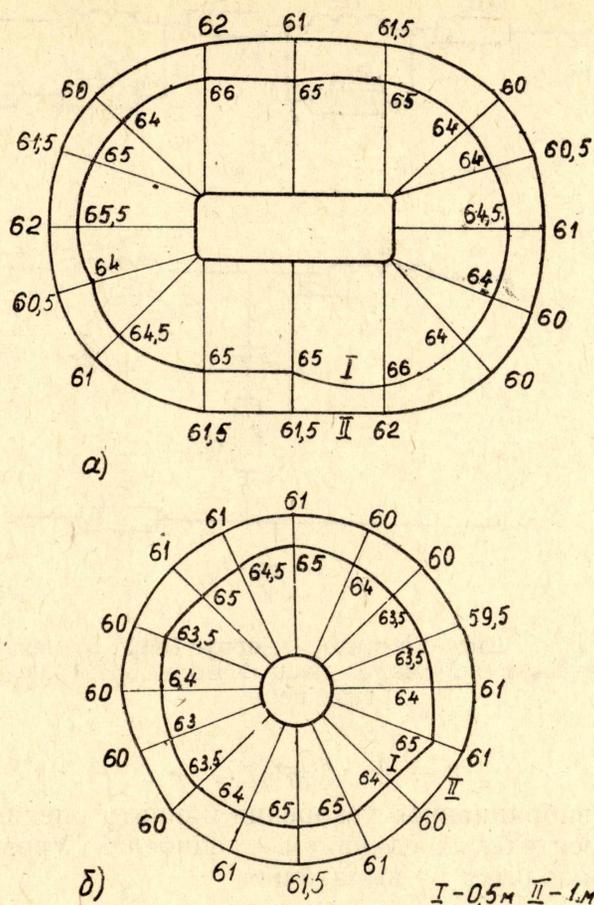


Рис. 2. Характеристика направленности звукового излучения ЭМУ однокорпусного исполнения: а) в плоскости, проходящей через вал ЭМУ; б) в плоскости, перпендикулярной валу ЭМУ

методом электромеханической аналогии, изложенным в [4, 6]. На рис. 3 представлена механическая система статор—корпус ЭМУ и эквивалентная ей электрическая цепь. Определив полное сопротивление механической системы, находим вибрационную скорость на корпусе ЭМУ. Зная величину виброскорости (x_0), по формуле (3) рассчитываем мощность звукового излучения.

При расчете магнитных вибраций на корпусе ЭМУ однокорпусного исполнения на первый взгляд, казалось бы, можно воспользоваться методикой, принятой для агрегатного исполнения, с той лишь разницей, что масса системы увеличивается и, следовательно, уровень магнитных вибраций уменьшается. Однако сопоставление результатов расчета и эксперимента показывает несостоятельность этого предположения. Причина несовпадения результатов расчета и экспериментов, очевидно, заключается в том, что жесткость статора ЭМУ не оказывает существенного влияния на жесткость всей системы статор—корпус, так как длина корпуса значительно (в 3–4 раза) превышает длину статора.

По-видимому, в данном случае наиболее приемлема методика расчета магнитных вибраций для машин постоянного тока и, следовательно, амплитуда радиальных изгибных колебаний корпуса ЭМУ поперечного поля может быть определена по формуле (6).

Зная амплитуду колебаний на корпусе, можем определить величину эффективного вибрационного ускорения

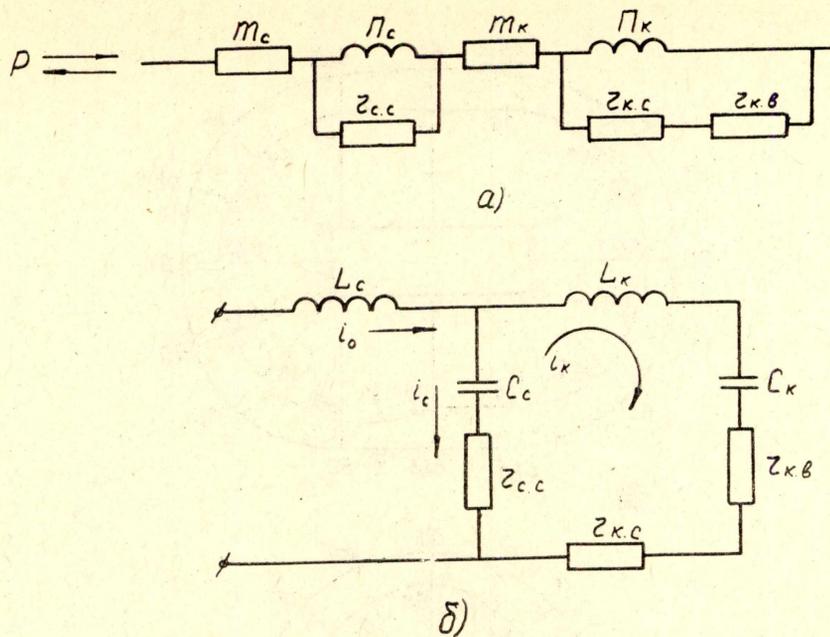


Рис. 3. Система статор—корпус ЭМУ; а) механическая система; б) эквивалентная электрическая цепь

$$a = A_1 \cdot (2\pi f_B)^2. \quad (7)$$

В технике вибрационное ускорение принято оценивать не в абсолютных, а в относительных единицах — децибелах. Уровень вибрационного ускорения находится из выражения

$$L = 20 \operatorname{tg} \frac{a}{a_0}, \text{ дб}, \quad (8)$$

где

$a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$ м/сек² — постоянная величина, соответствующая нулевому уровню и принимаемая за начало отсчета.

По известной мощности звукового излучения представляется возможным определить величину звукового давления, создаваемого излучателем в помещении [7]:

$$P_1 = 40,8 \sqrt{\frac{P_{зв}}{\sum \alpha S}}, \text{ н/м}^2, \quad (9)$$

где

$\sum \alpha S$ — полное звукопоглощение в помещении в сэбинах;

α — коэффициент поглощения звука;

S — площадь поверхностей помещения.

Уровень звукового давления в относительных логарифмических единицах равен [7].

$$L = 20 \operatorname{tg} \frac{P_1}{P_0}, \text{ дб}, \quad (10)$$

или

$$L = 20 \operatorname{lg} 2 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{P_{зв}}{\sum \alpha S}}, \text{ дб},$$

где

$P_0 = 2,04 \cdot 10^{-5}$ н/м² — звуковое давление на пороге слышимости.

Измерение уровня звукового давления обычно производится на каком-то определенном расстоянии от корпуса электрической машины. По этой причине возникает необходимость расчетного определения уровня звукового давления в зависимости от расстояния от источника звука. Согласно [4, 9] звуковое давление обратно пропорционально расстоянию от источника звука. Следовательно, уровень звукового давления равен

$$L = 201 \text{ г}2 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{P_{\text{ЗВ}}}{4\pi(R_c + d)^2 \Sigma \alpha S}}, \quad (11)$$

где

d — расстояние от микрофона до поверхности электрической машины.

Экспериментальная проверка производилась на специально изготовленных электромашинных усилителях однокорпусного и агрегатного исполнений. Во избежание шума приводного двигателя в обоих случаях был использован вибро- и шумоизолированный привод, описанный в [10]. Измерение и анализ частотного состава вибраций и шума осуществлялись виброметром типа ИВПШ, шумомером Ш-63 и полуоктавным фильтром типа ПФ-1. Зубцовая частота опытных ЭМУ как для однокорпусного, так и для агрегатного исполнения составляет $f_B = 1280$ гц.

Результаты расчета уровней магнитных вибраций и шума и данные эксперимента приведены в таблице (при $d=0,5$ м).

Таблица 1

	Вибрация, дб		Шум, дб	
	расчет	эксперим.	расчет	эксперим.
Однокорпусное исполнение	81,2	81,6	66	65
Агрегатное исполнение	77	76	60	60,5

Из таблицы видно, что расхождение между результатами расчета и экспериментальными данными находится в пределах погрешности измерительных приборов (1—2 дб). При этом необходимо отметить, что экспериментальные данные, приведенные в таблице, получены после математической обработки результатов 10—15 измерений для каждой точки.

Выводы

1. Расчет магнитных вибраций и шума ЭМУ поперечного поля необходимо производить с учетом его исполнения.

2. В результате анализа существующих методик расчета магнитных вибраций и шума установлено, что для ЭМУ агрегатного исполнения приемлема методика, разработанная применительно к асинхронным электродвигателям, а для однокорпусного исполнения — методика, принятая для машин постоянного тока. Расчет магнитных вибраций и шума ЭМУ агрегатного исполнения следует вести по формулам (1), (5), а однокорпусного исполнения — по формулам (3) и (6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Р. Кучер, Н. И. Муркес. Общий уровень шума самовентилируемых электрических машин. Тр. ВНИИЭМ, т. 20, изд. «Энергия», 1965.

2. Э. Р. Кучер. Об основах метода расчета магнитного шума трехфазного к. з. асинхронного электродвигателя. «Вестник электропромышленности», № 12, 1956.
3. Н. П. Ермолин. Магнитный шум машин постоянного тока. «Известия ЛЭТИ», 1955, вып. 28.
4. И. Г. Шубов. Определение уровня магнитного шума машин постоянного тока методом электромеханической аналогии. «Электричество», № 4, 1953.
5. Ю. П. Рылов. Исследование вибраций асинхронных двигателей, вызванных магнитными силами. «Вестник электропромышленности», 1959, № 5.
6. В. В. Фурдуев. Акустические основы вещания. Связьиздат, 1960.
7. Б. Б. Воронежский, Э. Р. Кучер. Магнитный шум асинхронных электродвигателей. Госэнергоиздат, 1957.
8. Schmidt K., Gehäuseschwingungen von Gleichstrommaschinen als Ursache magnetische Geräusches, A. F. E., 1938, V. 32, N. 8.
9. В. К. Иофе. Электроакустика. Связьиздат, 1954.
10. Ю. В. Горст, П. Т. Мальцев, А. Т. Молодых. Влияние нагрузки на вибрацию и шум электрических машин постоянного тока малой мощности. Известия ТПИ, т. 172, 1967.