

Давыдов В. В., канд. техн. наук, проф.,

Кольхалин В. М., канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения

О МЕТОДЕ КОМПЕНСАЦИИ ШУМА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

cap-007@mail.ru

Рассматривается магнитная составляющая шума электродвигателей переменного тока. Эффект магнитострикции сердечников роторов и статоров обуславливает практически магнитную зависимость звукового давления шума в воздухе от вибраций в широком диапазоне частот. Анализируется метод компенсации шума при размещении пары идентичных электродвигателей в камере малого объема с максимальным линейным размером, не превышающим половину длины волны звука в воздухе удвоенной частоты электрической сети.

Ключевые слова: магнитный шум, электродвигатель, магнитострикция, корреляция, микрофон.

При эксплуатации электрических машин производственного и особенно бытового назначения большое внимание уделяется вопросам шумовой и вибрационной безопасности, в первую очередь на этапах проектирования и разработки опытных образцов. Так, например, по известной классификации шума электродвигателей (ЭД) обычно выделяются составляющие магнитного, механического и аэродинамического происхождения.

Отмеченные составляющие шума по существу являются производными магнитной составляющей, как первообразной, формирующей исходное силовое электромагнитное поле и, соответственно, полную мощность ЭД. Однако, в литературе [1...3 и др.] обычно оперируют с ее активной частью, которая вместе с габаритами и скоростью вращения ЭД определяет условные нормы на уровне вибрации и шума без установления более или менее определенной взаимосвязи с акустическими параметрами. Последние в первую очередь зависят от развиваемой вибрационной мощности, возбуждаемой известными электродинамическими, электромагнитными и магнитострикционными силами [1, 4, 5].

Так электродинамические силы (Лоренца) действуют тангенциально на проводники с общей длиной l обмотки, равномерно распределенной по всей окружности ротора, в которой протекает аксиально направленный ток I под действием радиального поля магнитной индукции B статора. Амплитудные значения этих сил определяются выражением

$$F_{эд} = B_m l I_m . \quad (1)$$

Следовательно, данные силы, действуя на плечи, равные половине диаметра ротора, приводят его в периодическое вращение. Вместе с тем кажущаяся линейность зависимости $F_{эд}$ (B, I) и постоянство вращения ротора во времени могут быть нарушены за счет высших гармоник и подгармоник (разностных частот), обусловленных изменениями в распределении токовой нагрузки из-за дискретности размещения обмо-

ток и запаздывания пространственной периодичности индукции. Аксиальные электромагнитные силы (Максвелла) действуют перпендикулярно на торцевые поверхности статора и ротора ЭД. Их амплитудные значения можно найти по формуле

$$F_{эм} = B_m^2 S / 2\mu_0 , \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн / м – магнитная проницаемость вакуума(воздуха); S – общая площадь сечения статора и ротора, разделенных воздушным зазором.

Магнитострикционные силы (Джоуля) вызывают радиальную деформацию кольцевых пластин электротехнической стали магнитопровода статора под действием его переменного магнитного поля, силовые линии которого располагаются по окружностям с центрами по оси колец. Амплитудное значение этих сил, как временных функций $B_{m,i}^2$, пропорционально квадрату приложенного напряжения $U_{m,i}$ к обмотке статора с числом витков n может быть найдено из соотношения [4, 7, 8]

$$F_{мс,i} = \pi a_i S_{ст} B_{m,i}^2 = \pi a_i S_{ст} \left(\frac{U_{m,i}}{n\omega_i} \right)^2 , \quad (3)$$

где $S_{ст} = (R_n - R_e)h$ – площадь сечения магнитопровода статора (R_n и R_e – соответственно наружный и внутренний радиусы, h – его длина); a_i – магнитострикционная постоянная стали (Па/Тлила/м); ω_i – угловая частота колебаний, кратная целым числам от частоты сети.

При представлении статора (корпуса) электрической машины цилиндрическим кольцом, толщина и высота которого малы сравнительно с радиусом, можно считать амплитуды колебаний вдоль любого радиуса одинаковыми и рассматривать кольцо как простейший осциллятор. Тогда пространственные колебания статора возбуждаются электромагнитными силами, деформируемыми магнитопровод: за каждый полупериод переменного поля цилиндр будет ис-

пытывать полный цикл сжатия (растяжения) и возвращения к исходным габаритам.

Радиальная деформация кольцевых пластин стали и в целом деформация статора приводит к многопериодическим изменениям геометрических размеров его магнитопровода как по внутреннему ($Q_{в} = 2\pi R_{в}h$), так и по наружному ($Q_{н} = 2\pi R_{н}h$) контурам со следствием – вибрациями. Из (3) следует, что именно постоянная (дифференциальная) a_i устанавливает взаимосвязь амплитуды колебательного смещения ξ_m , например, внешнего контура (окружности $Q_{н}$) цилиндрического магнитопровода статора с известным феноменологическим эффектом – зависимости модуля упругости E_B (магнитной упругости) стали от амплитуды и направления поля индукции, т.е.

$$a_i \approx \frac{E_B}{B_{m,i}} \cdot \frac{\Delta Q_{н}}{Q_{н}},$$

откуда

$$\xi_m = \frac{a_i B_{m,i} R_{н}}{E_B}, \quad (4)$$

где $\Delta Q_{н}/Q_{н}$ – относительная наружная деформация магнитопровода статора, достигающая для электротехнической стали $10^{-4} \dots 10^{-5}$ при $B_m \approx 1,5$ Тл, а ξ_m – амплитуда колебательного смещения наружного контура магнитопровода, непосредственно характеризующая вибрационную мощность ЭД.

Рассмотренные частотные зависимости магнитных сил с заметным спадом (3...6 дБ) в области вч, действующих в разных направлениях, еще раз подтверждают сложность диагностики результирующей вибрации даже с использованием трехмерных датчиков скорости или ускорений. Благодаря известной корреляционной связи эффекта акустической эмиссии вибрирующими элементами в широком диапазоне частот [9] последние нормативные документы [10, 11, 13] регламентируют оценку вибрационной мощности ЭД по результатам измерений возбуждаемого ими шума. Однако, измерения шума ЭД, например, в заглушенных камерах требует значительных экономических и временных затрат. При сокращении времени измерений в реверберационных камерах возникает погрешность из-за маскирования диффузными отражениями пространственного влияния самого ЭД и его основания, проявляющихся в производственных помещениях при жесткой связи с полом. Кроме того, отсутствие в таких камерах, особенно большого объема, требуемой вибро- и звукоизоляции приводит к проникновению зна-

чительного уровня низкочастотных и инфразвуковых помех.

В более полной мере исследование, например, магнитной составляющей шума ЭД по вибрации магнитопровода, особенно в области низких звуковых и инфразвуковых частот, можно осуществить в камере малого объема (КМО) с максимальным линейным размером не более 1/2 длины волны в воздухе наиболее интенсивной составляющей типового спектра с удвоенной частотой сети. Такие камеры получили распространения при градуировке измерительных микрофонов, а в последнее время – используются для оценки звукоизоляции малых кабин и кожухов, ослабляющих шум путем полного или частичного экранирования источников [12].

В таких камерах избыточное (относительно атмосферного P_0) звуковое давление p определяется из закона Гука по относительному изменению $\Delta\rho/\rho_0$ плотности воздуха в объеме V или, более наглядно, – по относительной объемной деформации $\Delta V/V$, т.е.

$$p = E_V \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = -E_V \frac{\Delta V}{V}. \quad (5)$$

Модуль объемной упругости воздуха может быть найден из адиабатического уравнения состояния Пуассона

$$E_V = \gamma P_0, \quad (6)$$

где $\gamma = 1,4$ – постоянная адиабаты.

Тогда из (5) с учетом (6) получим окончательно для амплитуды давления

$$p_m = -\gamma P_0 \Delta V_m / V. \quad (7)$$

Здесь знак минус означает, что положительному приращению (увеличению) ΔV_m соответствует отрицательное приращение (уменьшение) звукового давления.

В замкнутом объеме КМО процесс считается статистическим [3], когда во всех точках камеры уровень звукового давления один и тот же и не зависит от координаты. Однако, это справедливо до тех пор, пока резонансные частоты камеры «лежат» значительно выше частот исследуемых колебаний.

Рассмотрим принцип действия системы с использованием КМО, представляемой в виде короткой трубы квадратного сечения длиной l с размещением на ее концах двух идентичных однофазных коллекторных электродвигателей переменного тока (рис.1). В интересующем нас частотном диапазоне электродвигатели (ЭД1, ЭД2), как пульсирующие цилиндры, обеспечивают возбуждение в трубе плоских звуковых волн.

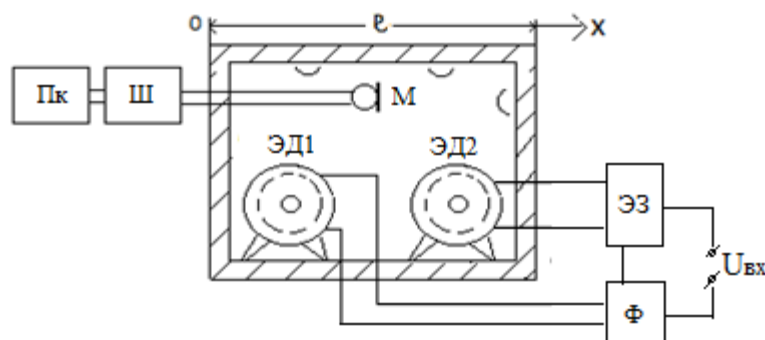


Рис. 1. Структурная схема установки с использованием КМО: ЭД1, ЭД2 – электродвигатели; ЭЗ – цепь электрической задержки; Ф – фазосдвигающая цепь; Ш – шумомер; ПК – компьютер, М - микрофон где А и В – некоторые постоянные

Процесс шумоглушения обеспечивается одновременной реализацией двух эффектов: корреляционным взаимодействием пары идентичных электродвигателей как по акустическому пространству камеры малого объема (КМО), так и по электрической цепи. Так электрическая аддитивность двух напряжений с частотой 50 Гц и сдвига по фазе 90° приводит к уменьшению их суммарного эффекта и соответствующего шума за счет взаимной компенсации основных составляющих магнитного шума ($f = 100$ Гц). В свою очередь электрическая частотно-зависимая линия задержки с малой постоянной τ_e , равная акустической задержке τ_a , обеспечивает получения эффекта плоской бегущей волны с целью демпфирования в камере резонансных явлений, снижающих эффективность компенсации составляющих магнитного шума.

При принятых условиях волновое поле в камере будет одномерным, поскольку все характеристики звуковых волн, возбуждаемых электродвигателями, будут зависеть, кроме времени (t), только от координаты (x). Тогда волновое уравнения в частных производных для потенциала колебательной скорости φ частиц воздуха будет иметь вид

$$\partial^2 \varphi / \partial t^2 = c^2 \partial^2 \varphi / \partial x^2. \quad (8)$$

Из общего решения для φ с учетом прямой и отраженной волн

$$\varphi = A \exp[j\omega(t - x/c)] + B \exp[j\omega(t + x/c)]$$

получим выражение для избыточного давления

$$p = \rho \partial \varphi / \partial t = j\omega A \exp[j\omega(t - x/c)] + j\omega B \exp[j\omega(t + x/c)] \quad (9)$$

и колебательной скорости

$$v = - \partial \varphi / \partial x = j\omega A \exp[j\omega(t - x/c)] / c - j\omega B \exp[j\omega(t + x/c)] / c, \quad (10)$$

С учетом равенства $\tau_e = \tau_a$ фаза колебаний сердечника статора ЭД1 будет отлична от фазы колебаний ЭД2 на величину $\omega l/c = kl$ ($k = \omega/c$ – волновое число, c – скорость звука), что определяет граничные условия, например, для амплитуды скорости колебаний

$$v_m(x=0) = \dot{\xi}_m \exp(jkl)$$

и

$$v_m(x=l) = \dot{\xi}_m = j\omega \xi_m, \quad (11)$$

где $\dot{\xi}_m$ и ξ_m – соответственно, амплитуды колебательной скорости и смещения колебаний сердечников статоров ЭД без учета временных множителей.

Подставляя в (10) граничные условия (11) получим значения постоянных коэффициентов: $A = 0$, $B = - \dot{\xi}_m c$, которые позволяют найти выражения для результирующих амплитуд давления и скорости в виде суперпозиции

$$\dot{Z}_{неп} = p_m(0) / v_m(l) = \rho c / \exp(jkl) = \rho c (\cos kl - j \sin kl). \quad (13)$$

колебаний двух ЭД, например, при $x = 0$, т.е. $p_m(0) = -j\omega \xi_m \exp(jkl) \rho c$,

$v_m(0) = -j\omega \xi_m \exp(jkl)$ и, как следствие, для входного сопротивления воздуха в камере

$$Z_{вх} = p(0) / v(0) = \rho c. \quad (12)$$

Соотношение (12) иллюстрирует акустический эффект взаимодействия ЭД в камере, когда ее входное сопротивление оказывается равным волновому сопротивлению воздуха для плоской бегущей волны, а давление и скорость колебаний частиц воздуха в любом сечении совпадают по фазе.

Другой важный параметр – переходное сопротивление, характеризующее передачу звука, например от ЭД1 к ЭД2, определяется из (9) и (10) с подстановкой (11) как отношение «входного» давления $p_m(0)$ к «выходной» колебательной скорости $v_m(l)$, есть

Комплексное содержание $\dot{Z}_{пер}$ показывает обмен энергиями реактивного характера между ЭД с их диссипацией активной составляющей ρc , как на частотах резонанса воздуха в камере $f_{p,n} = (2n + 1)/4l$, так и на частотах антирезонанса $f_{a,n} = nc/2l$ (n - числа натурального ряда) с ослаблением амплитуд основного тона и четных гармоник.

Измерительная установка для экспериментальной оценки рассмотренных положений состояла из камеры малого объема $V = 0,12 \text{ м}^3$ с линейными размерами $0,6 \times 0,5 \times 0,4 \text{ м}$ (разрез на рис. 1). Контроль сетевого питания по I и U пары идентичных однофазных коллекторных двигателей от дрелей $TD-800-13$ (фирмы «Matrix») мощностью $0,8 \text{ кВт}$ с демонтированными вентиляционными крыльчатками осуществлялся по переключаемым вольтметру и осциллографу, уровень шума в КМО измерялся калиброванным микрофоном $M102$ шумомера $RTF0024$ с фиксацией результатов в специальной программе компьютера. Все электрические вводы в КМО и ее съемная крышка при измерениях были максимально герметизированы.

Для ослабления возможного воздействия внешнего (фонового) шума и помех измерительная установка с КМО размещалась в специальной полузаглушенной (с отражающим полом) комнате кафедры акустики СПбГУКиТ сравнительно небольших размеров: $4 \times 3,5 \text{ м}$ в плане и без окна. Стенки и потолок обработаны достаточно эффективным звукопоглотителем из перфорированных плит АГШ с зазором $0,1 \text{ м}$, заполненным минеральной ватой так, что высота подвесного потолка составила $2,5 \text{ м}$. Данная акустическая обработка с имеющейся звукоизо-

ляцией обеспечила время реверберации в диапазоне $125 \dots 4000 \text{ Гц}$ около $0,4 \text{ с}$ при проникающем интегральном уровне шума не более 30 дБ , начиная с полосы $31,5 \text{ Гц}$.

В рабочем режиме ЭД1 и ЭД2 подключаются к сети ($U = 220 \text{ В}$) через линию электрической задержки и фазосдвигающую цепь (рис.1). На гЭД1 подается питание частотой 50 Гц через фазосдвигающую цепь со сдвигом по фазе по отношению к ЭД 2 на 90° . Через промежуток времени $\tau_a = l/c$ (l - расстояние между электродвигателями, c - скорость звука в воздухе) волновой процесс достигает второго электродвигателя и на это же время задерживается электрический сигнал, подаваемый на ЭД2 с помощью линии электрической задержки.

Используемая фазосдвигающая цепь обеспечивает постоянную величину фазового сдвига, равную 90° для основной частоты сети 50 Гц и нечетных гармоник и 180° - для четных гармоник, что позволяет реализовать эффект шумоглушения пары электродвигателей за счет взаимной компенсации основных составляющих магнитного шума.

Для определения уровней среднеквадратичных значений спектральных составляющих мощности шума в КМО как для синфазного (без линии электрической задержки и фазосдвигающей цепи) так и для фазированного включения двигателей использовался режим минимальной скорости вращения роторов (100 об/мин). Сравнительные спектрограммы $\Delta N_i, \text{ дБ}$ составляющих, полученные с использованием фильтров с постоянством полосы пропускания $4 \dots 6 \text{ Гц}$, представлены на рис. 2, 3.

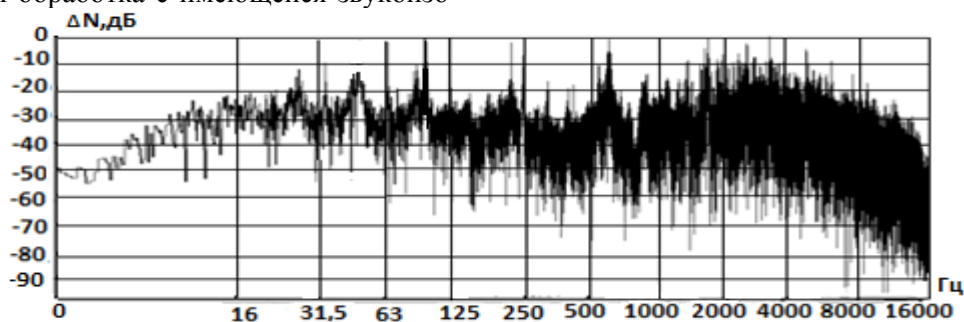


Рис. 2. Спектрограмма шума синфазного включения пары ЭД в КМО

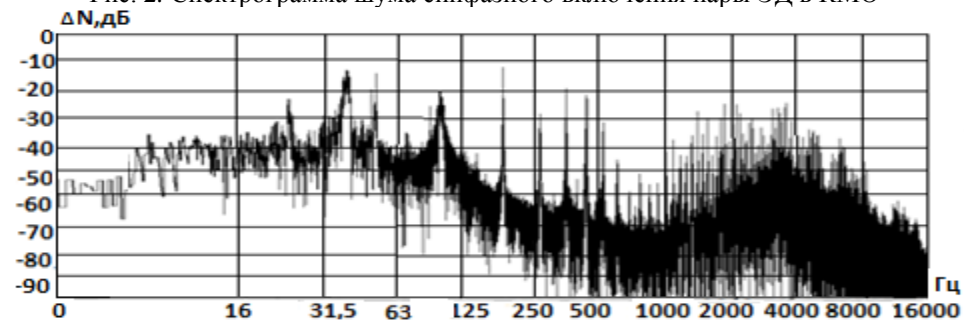


Рис. 3. Спектрограмма шума фазированного включения пары ЭД в КМО

Из сравнения спектрограмм следует, что при фазированном включении ЭД в явном виде проявляется антикорреляционный эффект между основными магнитными составляющими 100 Гц и соответствующими гармониками при их большей разряженности. При этом общий интегральный уровень в широкой полосе 3 Гц...16 кГц уменьшается с 88 дБ (синфазное включение) до 81 дБ (фазированное включение).

Как следует из изложенного, предложенный метод компенсации магнитных составляющих шума электродвигателей обеспечивает достаточно эффективно шумогашение в широком частотном диапазоне и вполне доступен для реализации на производстве и в проектных организациях по разработке более малошумных ЭД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электротехнический справочник. Т.1. Общие вопросы / Под ред. В.Л.Герасимова и др. - М.: МЭИ, 2003.
2. Кучер В.Я. Вибрация и шум электрических машин. - СПб.: Изд. СЗЗГУ, 2004.
3. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. 2-е изд. - Л.: Энергия, 1986.
- Справочник по технической акустике: Пер. с нем./Под ред. М. Хекла и А.Мюллера – Л.: Судостроение, 1980.
4. Барков А.В., Баркова Н.А., Борисов А.А. Вибрационная диагностика электрических машин в установившихся режимах работы. – СПб.: Изд. СЗУЦ, 2006.
5. Некоторые вопросы прикладной акустики. Сб. статей под ред. И.Д. Ричардсона Пер. с англ. – М.: Воениздат, 1962.
6. Харкевич А.А. Теория электроакустических аппаратов. – М., Л.: Гос. изд. по вопросам связи и радио, 1940.
7. Свердлин Г.М. Гидроакустические преобразователи и антенны. – Л.: Судостроение, 1980.
8. Вибрация энергетических машин. Справочное пособие. / Под ред. Н.В.Григорьева. – Л.: Машиностроение, 1974.
9. ГОСТ Р 51401-99. Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума по звуковому давлению. – М.: Госстандарт РФ, 1998.
10. ГОСТ 11929-87. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний. – М.: Госкомстандарт, 1986.
11. МС ГОСТ 31326-2006. Шум. Руководство по снижению шума кожухами и кабинами. – М.: Стандартинформ, 2005.
12. ГОСТ 12.2030-2000. Машины ручные. Шумовые характеристики. Нормы, методы испытаний. – М.: Госстандарт РФ, 1999.
13. Проблемы механики и виброакустики./Под ред. д.т.н. В.Я. Геча. – М.: ВНИЭМ, 2005.
14. Давыдов В.В., Караниколов А.В. Устройство для градуировки микрофонов. Авт. свид. SU №710110, опубл. 15.01.80, Бюл. №2.