

## ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННО-ФАЗОВЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ФОНОВОГО ШУМА НЕФТЯНОГО ТЕРМИНАЛА \*

А. А. Клещев<sup>1</sup>, В. М. Колыхалин<sup>2</sup>, В. С. Майоров<sup>3</sup>,  
С. А. Пересёлков<sup>4</sup>, С. А. Ткаченко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> – Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;

<sup>2</sup> – Петербургский нефтяной терминал;

<sup>3</sup> – Крыловский государственный научный центр;

<sup>4</sup> – Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 02.02.2021 г.

**Аннотация.** В настоящей работе рассматривается реализация компенсационного способа снижения электромагнитного шума пары идентичных электродвигателей, размещенных в камере малого объема с максимальным волновым размером половины длины волны в воздухе, с удвоенной частотой питающей электрической сети совместно с эффектом отрицательной корреляции колебаний внешней поверхности магнитопроводов статора на частоте  $100 \pm \Delta f$  Гц и противофазных колебаний каналов излучателей (резонаторов Гельмгольца). Анализируется взаимодействие колебаний магнитопровода статора и отверстия-излучателя, проявляющегося в формировании их общего сопротивления излучения  $r_{из}$ , которое можно определить выразив звуковую мощность  $W_1$ , излучаемую совместно магнитопроводом статора и отверстием-излучателем, через колебательную скорость одного магнитопровода статора. Дается количественная оценка интерференции колебаний внешней поверхности магнитопровода статора электродвигателя на частоте  $100 \pm \Delta f$  Гц и противофазных колебаний каналов-излучателей. Колебательные системы моделируются четырехполюсником с коэффициентом, учитывающим разницу площадей излучателей и коэффициент трансформации.

**Ключевые слова:** магнитный шум, электродвигатель, резонатор Гельмгольца, микрофон, магнитопровод, корреляция.

## APPLICATION OF CORRELATION PHASE EFFECTS FOR DECREASE IN BACKGROUND NOISE OF THE OIL TERMINAL

A. A. Kleshchev, V. M. Kolykhalin, V. S. Mayorov, S. A. Pereselkov, S. A. Tkachenko

**Abstract.** Realization of compensatory effect of electromagnetic noise decrease of a pair of identical electric motors placed into of the small volume chamber with the maximal wave size a half of length of the wave in air with double frequency of electric network together with effect of negative correlation of fluctuations of an external stator surface on frequency  $100 \pm \Delta f$  Hz and antiphase fluctuations of influence channels (resonators Helmholtz) is considered. Interaction between of stator core fluctuation and resonators shown in formation of their general radiation resistance which can be defined having expressed the sound capacity  $W_1$  radiated in common of the stator core and the resonators by oscillatory speed stator core is analyzed. The quantitative interference estimation between external surface stator core fluctuations and antiphase resonator fluctuations is given. Oscillatory systems by the two - port network with

---

\* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект 19–29–06075 и проект 19–08–00941).

© Клещев А. А., Колыхалин В. М., Майоров В. С., Пересёлков С. А., Ткаченко С. А., 2021

the factor considering a difference between of radiator areas and factor of transformation are modeled.

**Keywords:** magnetic noise, electric motor, resonator Helmholtz, microphone, stator core, correlation.

## ВВЕДЕНИЕ

С увеличением в последние годы объема перевозки нефтепродуктов через морские порты Российской Федерации увеличилось количество перевалочных нефтяных терминалов, ориентированных на выгрузку из железнодорожных цистерн, хранение и погрузку на танкеры нефтепродуктов различных марок. Существующая практика контроля объема твердых остатков нефтепродуктов, смеси с водой и другими реагентами в буферных и накопительных резервуарах терминалов обеспечивается дистанционным мониторингом посредством радиолокационных приборов (радаров), сканирующих уровень плоских поверхностей жидких нефтепродуктов. Однако, например, для регистрации объемов шлама со сложной формой поверхности на днище буферных резервуаров; остатков мазута в торцах железнодорожных цистернах после его выгрузки в зимнее время на эстакадах слива; твердых остатков смеси парафинов и серы в дизельном топливе при температуре транспортировки и хранения в накопительных резервуарах ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ , с учетом значительных изменений плотности, влажности, температуры такие системы не пригодны. Обычный визуальный контроль в этом случае приводит к значительным затратам времени и не обеспечивает необходимой точности.

Некоторые технические средства на основе акустических измерений, например, твердого остатка нефтепродуктов в торцах железнодорожных цистерн уже разработаны [1], однако их практическую реализацию существенно ограничивают помехи, связанные, прежде всего, с повышенным уровнем фонового шума на эстакадах слива.

Так при оценке объема твердых остатков мазута в цистернах на основе структуры звукового поля с ударным источником возбуждения колебаний основные помехи при акустических измерениях вносят: ударный шум колес о стыки рельс железнодорожного транспорта в диапазоне  $20 \div 40$  Гц [2] и насосные агрегаты с электроприводом, установленные непосредственно на эстакадах слива.

По известной классификации шума ЭД обычно выделяются составляющие магнитного, механического и аэродинамического происхождения. Отмеченные составляющие шума по существу являются производными магнитной составляющей, как первичным источником, формирующим исходное силовое электромагнитное возмущающее поле.

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

$$F_{\text{ЭД}} = B_m l I_m. \quad (1)$$

Данные силы, действуя на плечи, равные половине диаметра ротора, приводят его в периодическое вращение. Линейная зависимость  $F_{\text{ЭД}}(B, I)$  и постоянство вращения ротора во времени нарушаются наличием высших гармоник и подгармоник (разностных частот), обусловленных изменениями в распределении токовой нагрузки из-за флуктуаций дискретности размещения обмоток и пространственной периодичности индукции.

Интенсивность магнитной индукции  $B$  зависит от воздушного зазора между якорем и полюсами ЭД. Наличие пазов для обмотки на поверхности якоря при его вращении обуславливает непрерывное периодическое изменение величины зазора. Полный цикл изменения магнитной индукции происходит за промежуток времени, в течение которого якорь повернется

на величину зубцового шага. Тогда с такой же частотой и по такому же закону изменяются магнитная индукция и магнитная сила.

Линейную токовую нагрузку в уравнении (1) выражают через индукцию. Модуль этой величины рассчитывается по выражению

$$|I_i| = \frac{i\delta}{\mu_0 R} |B_i|, \quad (2)$$

где  $i$  — порядок индукционной волны  $B_i$ ;  $\delta$  — средний воздушный зазор;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость;  $R$  — радиус ротора.

Электромагнитные силы Максвелла действуют на поверхности статора и ротора и направлены в любой точке перпендикулярно к поверхности металла. Их амплитудные значения определяются выражением

$$F_{эм} = B_m^2 S / 2\mu_0, \quad (3)$$

где  $S$  — общая площадь сечения статора и ротора, разделенных воздушным зазором.

Интенсивность магнитной индукции  $B$  зависит от зазора между полюсами двигателя и якорем, имеющем на поверхности пазы для обмотки. Тогда при его вращении происходит непрерывное периодическое изменение величины воздушного зазора в любой точке. При повороте якоря на величину зубцового шага произойдет полный цикл изменения магнитной индукции. С такой же частотой изменяется и возмущающая магнитная сила  $F$ , которая может быть разложена на радиальную  $F_r$  и тангенциальную  $F_t$  составляющие. Однако силы, образующиеся в поле воздушного зазора вращающейся электрической машины, направлены преимущественно радиально [4]:

$$F_r = \nu B_\nu^2 \frac{\sin \pi z_\alpha}{\pi z_\alpha}, \quad (4)$$

где  $z_\alpha$  — количество пазов в полюсной дуге;  $\nu$  — коэффициент пропорциональности для рассматриваемой машины.

Магнитоэстрикционные 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 пропорционально квадрату приложенного напряжения  $U_{m.i}$  к обмотке статора с учетом числа витков  $n$  и может быть найдено из соотношения

$$F_{мс.i} = \pi a_i S_{СТ} B_{m.i}^2 = \pi a_i S_{СТ} \left( \frac{U_{m.i}}{n\omega_i} \right)^2, \quad (5)$$

где  $S_{СТ} = (R_H - R_B)h$  — площадь сечения магнитопровода статора ( $R_H$  и  $R_B$  — соответственно наружный и внутренний радиусы,  $h$  — его длина);  $a_i$  — магнитоэстрикционная постоянная стали (Па/Тл или а/м);  $\omega_i$  — угловая частота колебаний, кратная целым числам от частоты сети.

Радиальная деформация кольцевых пластин стали и в целом деформация статора приводит к многопериодическим изменениям флуктуации магнитопровода, что является источником вибраций. Из (4) следует, что именно постоянная (дифференциальная)  $a_i$  устанавливает взаимосвязь амплитуды колебательного смещения  $\xi_m$ , например, внешнего контура (окружности  $Q_H$ ) цилиндрического магнитопровода статора с известным феноменологическим эффектом — зависимости модуля упругости  $E_B$  (магнитной упругости) стали от амплитуды и направления поля индукции:

$$a_i \approx \frac{E_B}{B_{m.i}} \cdot \frac{\Delta Q_H}{Q_H}, \text{ откуда } \xi_m = \frac{a_i B_{m.i} R_H}{E_B}, \quad (6)$$

где  $\Delta Q_n/Q_n$  — относительная наружная флуктуация зазора магнитопровода статора, достигающая для электротехнической стали  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  при  $B_m \approx 1,5$  Тл, а  $\xi_m$  — амплитуда колебательного смещения наружного контура магнитопровода, непосредственно характеризующая вибрационную мощность ЭД.

Таким образом, силы, образующиеся в поле воздушного зазора вращающейся электрической машины и воздействующие на статор, направлены преимущественно радиально, зачастую к ним добавляются аксиальные составляющие.

Для уменьшения магнитной составляющей шума, создаваемого электродвигателями, эффективно применение известного способа, когда в качестве элементов шумоглушения используются сами электродвигатели, размещаемые в камере малого объема с максимальным линейным размером не более  $1/2$  длины волны в воздухе, возбуждаемой удвоенной частотой питающей электрической сети [5].

## 1. ОБЪЕКТ И ЦЕЛЬ НАУЧНОЙ РАБОТЫ

В данной работе рассматривается реализация вышеприведенного способа снижения шума пары ЭД в КМО совместно с новым эффектом, основанным на отрицательной корреляции колебаниях внешней поверхности магнитопровода статора ЭД на частоте  $(100 \pm \Delta f)$  Гц и противофазных колебаний каналов излучателей (резонаторов Гельмгольца) [6].

Воздушное пространство внутри корпуса ЭД рассматривается в виде замкнутого объема, образованного обмоткой статора и части шихтованного сердечника с учетом элементов ротора. В магнитопроводе статора ЭД просверливаются сквозные отверстия, выполняющие роль горла резонаторов Гельмгольца, объем воздуха, в котором определяется толщиной стенки магнитопровода. Отверстия можно дополнять отрезками туб. Колебания внутренней стороны магнитопровода статора с частотой  $100 \pm \Delta f$  Гц, возбуждающие шум, который через гибкость внутреннего объема двигателя передается на соответствующую массу воздуха в горле резонаторов, колебания которых находятся в противофазе колебаниям внешней стороны магнитопровода статора. Резонаторы выбирается таким образом, чтобы их резонансные частоты были как можно ближе к частоте  $100 \pm 5$  Гц. Тогда колебания массы воздуха в горле резонатора, а также соколеблющейся с ней массы воздуха внутри КМО и эквивалентной массы воздуха во внутреннем объеме ЭД, происходит с наибольшей амплитудой и излучение отверстия в объем КМО достигает максимального значения. В этом случае достигается наибольший компенсационный эффект уменьшения магнитного шума ЭД, установленного внутри КМО [7, 8].

Измерительная установка для экспериментальной оценки рассмотренных положений состояла из камеры малого объема  $V = 0,12$  м<sup>3</sup> с линейными размерами:  $0,6 \times 0,5 \times 0,4$  м.

Применение просверленного в магнитопроводе ЭД воздушного канала в качестве трубки резонатора позволяет форсировать излучение звука в области резонансной частоты резонатора, определяемой соотношением

$$f_p = \frac{1}{\sqrt{m_2 \cdot c_b}}. \quad (7)$$

Здесь  $m_2 = m_b + m_{\text{сок}}$ ;  $m_b$  — массы воздуха в горле резонатора и эквивалентной массы, учитывающей кинетическую энергию колебаний воздуха во внутреннем воздушном объеме ЭД;  $m_{\text{сок}}$  — масса воздуха внутри КМО, соколеблющаяся с массой  $m_b$ ;  $c_b$  — гибкость воздуха во внутреннем воздушном объеме ЭД, приведенная к площади горла резонатора  $S_2$ . Площадь первого излучателя (внешней поверхности магнитопровода статора ЭД) обозначена  $S_1$ . Колебания внутренней поверхности магнитопровода, служащей вторым излучателем, через гибкость  $c_b$  передаются на массу  $m_2$ .

На частоте  $\omega = \omega_p$  (или частотах близких к резонансным  $\omega_p$ ), благодаря резонансу, колебания массы  $m_2$  происходят с большой амплитудой и излучение отверстия во внешнюю сре-

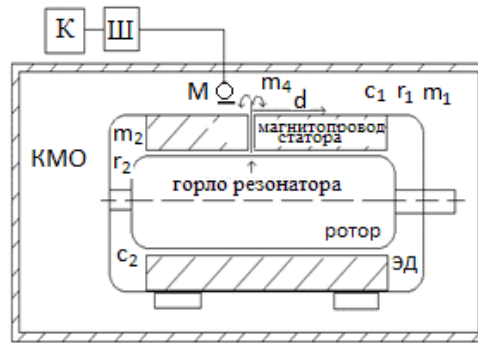


Рис. 1. Измерительная установка для регистрации эффекта шумогашения ЭД: М – микрофон, ЭД – электродвигатель, Ш – шумомер, КМО – камера малого объема, К – компьютер,  $m$ ,  $r$ ,  $c$  – масса, упругое сопротивление и гибкость воздуха соответственно.

ду достигает максимума. Взаимодействие магнитопровода статора и отверстия-излучателя моделирует четырехполосник с коэффициентом передачи  $b_{21} = \frac{\dot{\xi}_3}{\dot{\xi}_2} = \frac{S_1}{S_2} e^{-jkd} = n_{21} e^{-jkd}$ , учитывающий разницу площадей магнитопровода статора  $S_1$  и отверстия-излучателя  $S_2$  с помощью коэффициента трансформации  $n_{21}$  и запаздывания потока  $\dot{\xi}_2 S_2$  из отверстия на пути  $d$  (рис. 1) с помощью фазового члена  $e^{-jkd}$  [9].

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОМ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Эквивалентная электрическая схема рассматриваемой системы представлена на рис. 2, позволяющая оценить количественно взаимодействие колебаний магнитопровода статора и отверстия-излучателя внутри КМО, в результате которого образуется групповое сопротивление излучения  $r_{из}$ .

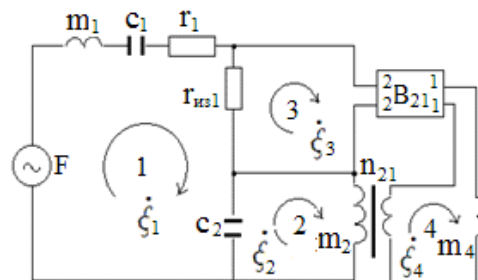


Рис. 2. Эквивалентная четырехконтурная электрическая схема, моделирующая взаимодействие колебаний магнитопровода статора и отверстия-излучателя в КМО.

Контур 1 на рис. 2 – первый источник возбуждения колебаний внешней стороны магнитопровода ЭД с колебательной скоростью  $\dot{\xi}_1$  и параметрами  $m_1, c_1, r_1$  – соответственно массы, гибкости и упругого сопротивления воздуха.

Контур 2 – второй источник, передающий через гибкость  $c_2$  колебания на массу  $m_2$  со скоростью  $\dot{\xi}_2$ . Контур 3 моделирует взаимодействие колебаний внешней стороны магнитопровода ЭД и колебаний воздуха внутри КМО со скоростью  $\dot{\xi}_3$  посредством введения в схему сопротивления излучения  $r_{из1}$ .

Контур 4 моделирует взаимодействие колебаний со скоростью  $\dot{\xi}_4$  суммы массы воздуха в горле резонатора и эквивалентной массы, учитывающей кинетическую энергию колебаний

воздуха во внутреннем воздушном объеме ЭД с колебаниями внешней стороны магнитопровода.

Рассмотрим следующие для случая одного резонатора. Параметры схемы на рис. 2: сопротивление излучения магнитопровода статора  $r_{из1}$  (в данном случае цилиндра) при работе без отверстия-излучателя и включенное параллельно с ним выходное сопротивление четырехполосника образуют групповое сопротивление  $r_{из}$ . Таким же, но увеличенным в  $n_{21}^2$ , будет входное сопротивление между точками 1-1. Следовательно, при пересчете в контур 2 с колебательной скоростью  $\dot{\xi}_2$  активное сопротивление будет  $r_{из}$ , а реактивное  $-\omega m_2 = \omega m_4 n_{12}^2$ . Здесь  $\dot{\xi}_2$  — скорость, определяемая отверстием  $S_2$ . Отношение колебательных скоростей определится следующим образом:

$$\frac{\dot{\xi}_2}{\dot{\xi}_1} = \frac{1}{j\omega c_a (r_f + j\omega m_2 + 1/j\omega c_a)} = \frac{1}{j\omega c_a Z}, \quad (8)$$

где  $Z = r_f + j\omega m_2 + 1/j\omega c_a$ .

Взаимодействие колебаний магнитопровода статора и отверстия-излучателя проявляется в формировании их общего сопротивления излучения  $r_{из}$ , которое можно определить выразив звуковую мощность  $W_1$ , излучаемую совместно магнитопроводом статора и отверстием-излучателем, двумя способами: через колебательную скорость  $\dot{\xi}_1$  одного магнитопровода статора и через разностную скорость  $(\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_3)$ . Тогда

$$W_1 = \dot{\xi}_1^2 \cdot r_{из} = (\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_3)^2 \cdot r_{из1}, \text{ откуда } r_{из} = r_{из1} \left(1 - \frac{\dot{\xi}_3}{\dot{\xi}_1}\right)^2. \quad (9)$$

С другой стороны, приняв  $e^{-jkd} \approx 1 - jkd$ , имеем:  $\dot{\xi}_4 \approx \dot{\xi}_3 / (1 - jkd)$ . Следовательно,

$$1 - \frac{\dot{\xi}_3}{\dot{\xi}_1} = \frac{r_{из} + j\omega m_4 + kd/\omega c_a}{Z}. \quad (10)$$

Величина  $\frac{kd}{\omega c_a} = \frac{d}{c_0 c_a} = \rho_0 c_0 \frac{d \cdot S_1^2}{V} \gg r_{из}$ . Здесь  $V$  — объем КМО,  $c_0$  — скорость звука в воздухе,  $c_a$  — гибкость воздуха внутри ЭД.

Подставляя (9) в (8), получим

$$r_{из} = r_{из1} \frac{(d/c_0 c_a)^2 + (\omega m_4)^2}{r_{из}^2 + (\omega m_4 - 1/\omega c_a)^2}. \quad (11)$$

Полагая  $\omega m_4 > \frac{d}{c_0 c_a}$  в формуле (10), имеем упрощенное выражение для нахождения общего сопротивления излучения [5]:

$$r_{из} \approx \sqrt[3]{r_{из1} \cdot \omega_p^2 m_2^2}. \quad (12)$$

Для экспериментального определения уровней среднеквадратичных значений давления шума в КМО использовались два идентичных коллекторный ЭД переменного тока и мощностью 800 Вт. На рис. 3 представлена спектрограмма уровней шума в КМО при установке пары ЭД без отверстий в магитопроводах, а на рис. 4 — пара ЭД с отверстиями в магитопроводах.

На оси абсцисс отложена частота звуковых колебаний (Гц), на оси ординат — относительный уровень звукового давления  $\Delta N_i$ , (дБ). Измерительная установка состояла из тех же компонентов, как и в прежних работах [3,4]. Из сравнительного анализа спектрограмм, представленных на рис. 3,4 следует, что при включении ЭД с эффектом отрицательной корреляции колебаний внешней поверхности магнитопровода статора и противофазных колебаний каналов-излучателей (резонаторов Гельмгольца) в явном виде проявляется антикорреляционный эффект между основными магнитными составляющими 100 Гц и соответствующими

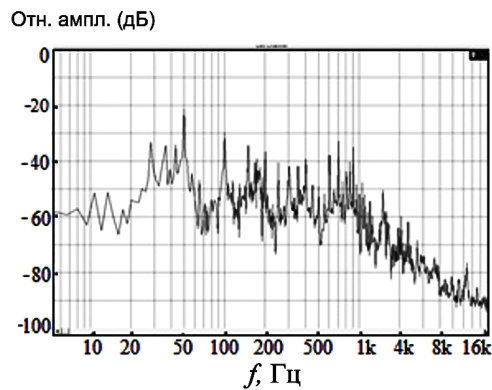


Рис. 3. Распределение звукового давления шума пары ЭД внутри КМО при установке ЭД без каналов-излучателей.

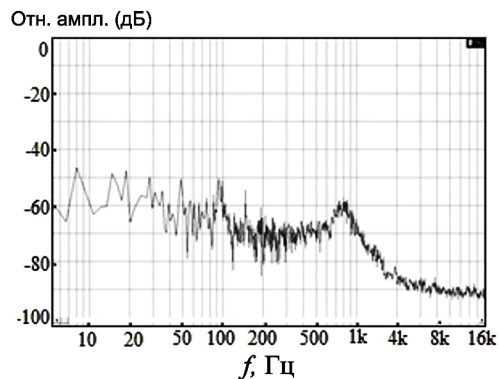


Рис. 4. Распределение звукового давления шума пары ЭД внутри КМО при установке ЭД с каналами-излучателями (резонаторами).

гармониками. При этом средний интегральный уровень в широкой полосе 8 Гц..16 кГц уменьшается с 87 дБ (без канала-излучателя) до 81 дБ (с каналом-излучателем).

### 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО ЭФФЕКТА

Компьютерное моделирование дипольного (компенсационного) эффекта, полученного путем формирования когерентной пары монополярных противофазных источников — двух идентичных коллекторный ЭД переменного тока и мощностью 800 Вт, совместно с эффектом отрицательной корреляции колебаний внешней поверхности магнитопровода статора ЭД и канала-излучателя выполнено с помощью программы “Comsol” и изображено на рис. 5. Здесь обе модели ЭД представлены как цилиндр 2 (ротор) в цилиндре 1 (контур магнитопровода статора) с отверстием 3. Явно выраженные эффекты отрицательной корреляции (резонатор Гельмгольца) и дипольный (компенсационный) на примере распределение звукового давления шума противофазных колебаний на частоте 100 Гц в плоскости 4 поперечного сечения КМО изображено изменением цветовой гаммы по шкале уровней в цвете 5.

Спектрограмма, представленная на рис. 4, получена при включении пары ЭД с двумя резонаторами в каждом электродвигателе. Однако эффект отрицательной корреляции колебаний внешней поверхности магнитопровода статора ЭД и пары резонаторов может быть существенно усилен, если просверлить  $K$  идентичных резонаторов в магнитопроводе статора радиуса  $r_0$  равномерно вдоль окружности сечения с осевой координатой  $x_0$  (угловые координаты

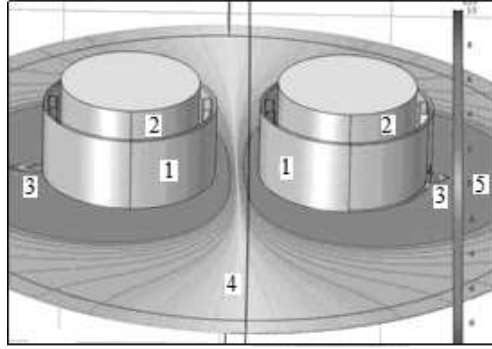


Рис. 5. Распределение звукового давления шума внутри КМО при установке пары ЭД с каналами-излучателями.

ты резонаторов равны  $\varphi_l = 2\pi l/K$ , где  $l = 0, \dots, K-1$ , и эти источники излучают гармонический звук одинаковой частоты и одинакового сдвига по фазе  $\Delta\varphi$  между соседними резонаторами, тогда суммарное звуковое поле резонаторов можно представить в виде следующей суммы [10]:

$$p = p_0 Q(0, K, \Delta\varphi) + \sum_{m=1}^{\infty} [p_m Q(m, K, \Delta\varphi) \exp(im\varphi) + p_{-m} Q(-m, K, \Delta\varphi) \exp(-im\varphi)], \quad (13)$$

где

$$p_m = p_m(r, x | r_0, x_0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{m,n}(r, r_0) \exp(i\chi_{m,n}(x - x_0)), \quad (14)$$

$$Q(m, K, \Delta\varphi) = \sum_{l=0}^{K-1} \exp(il(\Delta\varphi - m\frac{2\pi}{K})) = \frac{1 - \exp(iK\Delta\varphi)}{1 - \exp(i(\Delta\varphi - \frac{2\pi m}{K}))}, \quad (15)$$

Если сдвиг фаз между соседними резонаторами имеет вид  $\Delta\varphi = 2\pi m_0/K$ , где  $m_0$  – номер выбранной азимутальной моды, то выражение (15) приобретает следующую форму:

$$Q(m, K, \Delta\varphi) = \begin{cases} 0, & \text{при } m \neq m_0 \pm nK. \\ K, & \text{при } m = m_0 \pm nK, \end{cases} \quad (16)$$

где  $n$  – произвольное целое число.

Из выражения (13) при условии (16) видно, что, меняя дискретно сдвиг фаз  $\Delta\varphi$  от  $2\pi/K$  до  $2\pi(K-1)/K$ , можно генерировать азимутальные моды, имеющие по модулю номера от первого до  $(K-1)$ -го. При этом наряду с данными модами будут генерироваться моды с азимутальными номерами  $m = m_0 + nK$ , где  $n$  – любое целое число, причем они будут иметь одинаковые амплитуды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Частоты резонаторов определяются дисперсией частоты электродвигателя  $\Delta f$ . Тогда колебания массы воздуха в горле резонатора, а также соколеблющейся с ней массы воздуха внутри камеры малого объема (КМО) и эквивалентной массы, учитывающей колебания воздуха во внутреннем воздушном объеме ЭД, происходит с наибольшей амплитудой и излучение отверстия в объем КМО достигает максимального значения. В этом случае достигается наибольший компенсационный эффект уменьшения магнитного шума ЭД в широком диапазоне частот.



Основной магнитной составляющей шума соответствует максимальное значение уровня на всех спектрограммах (рис. 3, 4), что выделяет магнитную составляющую как бы первообразной широкополосного шума ЭД. Таким образом, эффект магнитострикции сердечников роторов и статоров обуславливает практически магнитную зависимость звукового давления шума в воздухе от вибраций в широком диапазоне частот. Для усиления эффекта отрицательной корреляции шумогашения пары ЭД эффективно добавление нескольких ( $K$ ) резонаторов с необходимым учетом сохранения прочностно-механических и электродинамических характеристик ЭД.

Как следует из изложенного выше, предложенный метод компенсации магнитных составляющих шума электродвигателей обеспечивает достаточно эффективное уменьшение шума в широком частотном диапазоне и вполне доступен для практического применения с целью снижения влияния помех при измерении спектральных характеристик конструкций нефтяных терминалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колыхалин В. М., Давыдов В. В. Способ определения объема остатка твердого нефтепродукта в железнодорожном вагоне-цистерне. Патент на изобретение РФ № 2348015, М. : Федерал. служ. по интелект. собст., патен. и товар. знакам, RU 2348015 С1, Заявл. 2007, опубл. 27.02.2009. Бюл. № 6.
2. Колыхалин В. М., Давыдов В. В., Иванов И. Н. Способ снижения шума колесных пар рельсового транспорта о стыки рельс. Патент на изобретение РФ № 2434987. М. : Федерал. служ. по интелект. собст., патен. и товар. знакам, RU 2434987 С2. Заявл. 2009, Опубл. 27.11.2011. Бюл. № 33.
3. Клюкин, И. И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией / И. И. Клюкин. — Л. : Судостроение, 1971, С. 245–248.
4. Колыхалин В. М., Давыдов В. В. Устройство компенсации шума электродвигателей. Патент на изобретение РФ № 2528552, М. : Федерал. служ. по интелект. собст., патен. и товар. знакам, RU 2528552 С1, Заявл. 2013, опубл. 20.09.2014. Бюл. № 26.
5. Давыдов, В. В. О методе компенсации шума электродвигателей / В. В. Давыдов, В. М. Колыхалин // Вестник БГТУ. — 2014. — № 2. — С. 184–188.
6. Handbook of Noise and Vibration Control / Edited by Malkolm J. Crocker. — New York, John Wiley and Sons Inc., 2007. — 1569 p.
7. Баженов, Д. В. Глушитель шума в виде резонатора Гельмгольца на выходе воздуховода конечной длины / Д. В. Баженов, Л. А. Баженова, А. В. Римский-Корсаков // Акустический журнал. — 2000. — Т. 46, № 3. — С. 306–308.
8. Tang, S. R. On Helmholtz resonators with tapered necks / S. R. Tang // J. Sound Vib. — 2005. — V. 279. — С. 101.
9. Вахитов, Я. Ш. Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура / Я. Ш. Вахитов. — М. : Искусство, 1982. — 377 с.
10. Излучение звука из открытого конца канала, моделирующего воздухозаборник авиадвигателя в статических условиях и в потоке / В. Ф. Копьев и др. // Акустический журнал. — 2019. — Т. 65, № 1. — С. 59–73.

### REFERENCES

1. Kolykhalin V.M., Davydov V.V. Method for determining the volume of solid oil residue in a railway tank. Patent for the invention № 2348015, M. Federal serv., RU 2348015 S1, published 27.02.2009, bul. 6. [Kolykhalin V.M., Davydov V.V. Sposob opredeleniya ob'ema ostatka tverdogo nefteprodukta v zheleznodorozhnom vagone-cisterne. Patent na izobretenie RF № 2348015, Moskva, Federal. sluzh. po intellekt. subst., peten. i tovar. znakam, RU 2348015 S1, Zayavl. 2007,

opubl. 27.02.2009. Byul. № 6].

2. Kolykhalin V.M., Davydov V.V., Ivaniv I.N. The method of noise decrease of wheel pairs of rail transport. Patent for the invention № 2434987. Russian Federation. The federal service of intelligence property. RU 2434987 S2, published. 27.11.2011, bull. 33. [Kolykhalin V.M., Davydov V.V., Ivanov I.N. Sposob snizheniya shuma kolesnykh par rel'sovogo transporta o styki rel's. Patent na izobretenie RF № 2434987. Moskva, Federal. sluzh. po intellekt. sobst., peten. i tovar. znakam. RU 2434987 S2. Zayavl. 2009, opubl. 27.11.2011. Byul. № 33].

3. Klyukin I.I. Struggle against noise and sound vibration. [Klyukin I.I. Bor'ba s shumom i zvukovoyj vibraciej]. Leningrad, 1971, pp. 245–248.

4. Kolykhalin V.M., Davydov V.V. Device of the electric motor noise compensation. Patent of the Russian Federation № 2528552. Russian Federation. The federal service of intelligence property. RU 2528552 S1, published 20.09.2014 Bul. 26. [Kolykhalin V.M., Davydov V.V. Ustroystvo kompensacii shuma elektrodvigatelej. Patent na izobretenie RF № 2528552, Moskva, Federal. sluzh. po intellekt. sobst., peten. i tovar. znakam, RU 2528552 S1, Zayavl. 2013, opubl. 20.09.2014 Byul. № 26].

5. Davydov V.V., Kolykhalin V.M. About compensation method of the electric motor noise. [Davydov V.V., Kolykhalin V.M. O metode kompensacii shuma elektrodvigatelej]. *Vestnik BGTU* – *Vestnik BGTU*, 2014, no. 2, pp. 184–188.

6. HandBook of noise and vibration control. Edited by Malkolm J. Crocker. New York, John Wiley and Sons Inc., 2007, 1569 p.

7. Bazhenov D.V., Bazhenova L.A., Rimskiy-Korsakov A.B. The muffler of noise in the form of resonator Gelmgolts on the air line output of final length. [Bazhenov D.V., Bazhenova L.A., Rimskiy-Korsakov A.V. Glushitel' shuma v vide rezonatora Gel'mgol'ca na vыхode vozduxovoda konechnoj dliny]. *Akusticheskij zhurnal – Acoustical Physics*, 2000, vol. 46, no. 3, pp. 306–308.

8. Tang S.R. On Helmholtz resonators with tapered necks. *J. Sound Vib.*, 2005, vol. 279, p. 101.

9. Vahitov Ya.Sh. Theoretical bases of electroacoustics and the electro-acoustic equipment. [Vahitov Ya.Sh. Teoreticheskie osnovy elektroakustiki i elektroakusticheskaya apparatura]. Moscow, 1982, 377 p.

10. Kopyev V.F. et. al. Sound radiation from the open end of the channel modelling an air inlet of an aircraft engine in static conditions and in a stream. [Kop'ev V.F. i dr. Izluchenie zvuka iz otkrytogo konca kanala, modeliruyushhego vozduhozabornik aviadvigatelya v staticheskix usloviyax i v potoke]. *Akusticheskij zhurnal – Acoustical Physics*, 2019, vol. 65, no. 1, pp. 59–73.

*Клещев Александр Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, Санкт-Петербург, Россия*  
*E-mail: alexalex-2@yandex.ru*

*Kleshchev Alexandr Alexandrovich, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation*  
*E-mail: alexalex-2@yandex.ru*

*Колыхалин Виталий Михайлович, кандидат технических наук, начальник смены, Петербургский нефтяной терминал, Санкт-Петербург, Россия*  
*E-mail: cap-007@mail.ru*

*Kolykhalin Vitaly Mihaylovich, Candidate of Technical Sciences, Manager of the Department operative, St. Petersburg Oil Terminal, St. Petersburg, Russian Federation*  
*E-mail: cap-007@mail.ru*

*Майоров Василий Семенович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, ФГУП “Крыловский государственный научный центр”, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: fizika@smtu.ru*

*Mayorov Vasily Semenovich, D. Sc., Senior Scientist, Head of Acoustic Laboratory at the Department of the Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation  
E-mail: fizika@smtu.ru*

*Пересёлков Сергей Алексеевич, доктор физ.-мат. наук, заведующий кафедрой математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия  
E-mail: pereselkov@yandex.ru*

*Pereselkov Sergey Alexeevich, Head of the Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia  
E-mail: pereselkov@yandex.ru*

*Ткаченко Сергей Александрович, аспирант кафедры математической физики и информационных технологий ВГУ, Воронеж, Россия  
E-mail: sega-tk@mail.ru*

*Tkachenko Sergey Alexanderovich, Postgraduate Student Department of Mathematical Physics and Information Technology, Voronezh State University, Voronezh, Russia  
E-mail: sega-tk@mail.ru*