

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ. ШУМЫ И ВИБРАЦИЯ

УДК 534-7

О ГЕНЕРАЦИИ ЗВУКА ПОЕЗДАМИ МЕТРО ПРИ ТОРМОЖЕНИИ И МЕТОД ЕГО ПОДАВЛЕНИЯ

© 2023 г. С. Г. Сучков^{а, **}, В. Я. Явчуновский^б, А. И. Тимофеев^б, В. А. Николаевцев^{а, *},
Д. С. Сучков^а, В. В. Третинников^б

^аСаратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
ул. Астраханская 83, Саратов, 410012 Россия

^бНПФ Этна Плюс, ул. Вишневая 11, Саратов, 410040 Россия

*e-mail: nikolaevcev@ya.ru

**e-mail: suchkov.s.g@mail.ru

Поступила в редакцию 29.05.2022 г.

После доработки 18.10.2022 г.

Принята к публикации 22.12.2022 г.

Проанализированы причины акустического шума, возникающего при торможении электротранспорта, в частности, метро. Измерен спектр такого шума и показано, что высокочастотные дискретные тоны возбуждаются тормозными резисторами, применяемыми для электродинамического торможения электротранспорта. Рассмотрены три возможных механизма электромеханического взаимодействия в фехральной пластине, являющейся элементом тормозного резистора: сила Ампера, линейная и нелинейная магнитострикция. Показано, что преобладание нечетных гармоник свидетельствует о наличии у фехрального сплава значительного пьезомагнитного эффекта и обратного к нему эффекта линейной магнитострикции. На основе феноменологического подхода рассчитаны элементы пьезомагнитного тензора фехраля. Проведенные методом конечных элементов расчеты показали, что введение в пластину несимметричных разрезов может привести к значительному снижению интенсивности возбуждаемых тормозным резистором акустических колебаний.

Ключевые слова: тормозной резистор, акустический шум, пьезомагнитный эффект, магнитострикция, сила Ампера, фехраль

DOI: 10.31857/S0320791923600191, **EDN:** QRSQXLX

ВВЕДЕНИЕ

Все, кто пользуется услугами российского метрополитена, ощущают неприятное звуковое воздействие при приближении поезда метро к станции. Это связано как с высокой амплитудой звукового воздействия, так и с тем, что спектр звукового давления содержит широкий спектр частот звуковых колебаний — от инфразвуковых и низких звуковых частот (в виде сплошного спектра) до высоких частот в виде дискретных узкополосных тонов на кратных частотах от 1200 до 6000 Гц и выше. В закрытых помещениях, каковыми являются станции метро, акустический шум оказывает негативное влияние на пассажиров. В электропоездах, а также и в других видах электротранспорта, торможение производится электродинамическим способом, при котором электродвигатели поездов переключаются из режима потребления тока в режим генерации тока (режим рекуперации). Частично генерируемый ток может рекуперироваться системой электропитания поездов, но мощность генерации столь высока (до несколь-

ких МВт), что оставшуюся часть мощности (сила тока до 1500 А [1]) направляют в тормозные резисторы (ТР) для ее рассеяния в виде тепла. Поэтому источником мощного акустического шума при торможении метropоезда, а также железнодорожных электропоездов, трамваев, троллейбусов наряду с механическими процессами в ходовой части, являются электромеханические процессы в ТР.

На рис. 1 представлены измеренные авторами спектры акустического шума при торможении метropоезда на станции метро “Павелецкая” (штриховая кривая) и излучаемого звука отдельным тормозным резистором при протекании в нем тормозного тока (сплошная кривая) в лабораторных условиях. В каждом метropоезде находится 6 тормозных резисторов, и генерируемая ими акустическая мощность весьма высока (около 100 дБ на перроне метровокзала). В лабораторных условиях для выявления причины появления дискретного спектра исследуется один тормозной резистор с амплитудой силы тока 50 А, поэтому

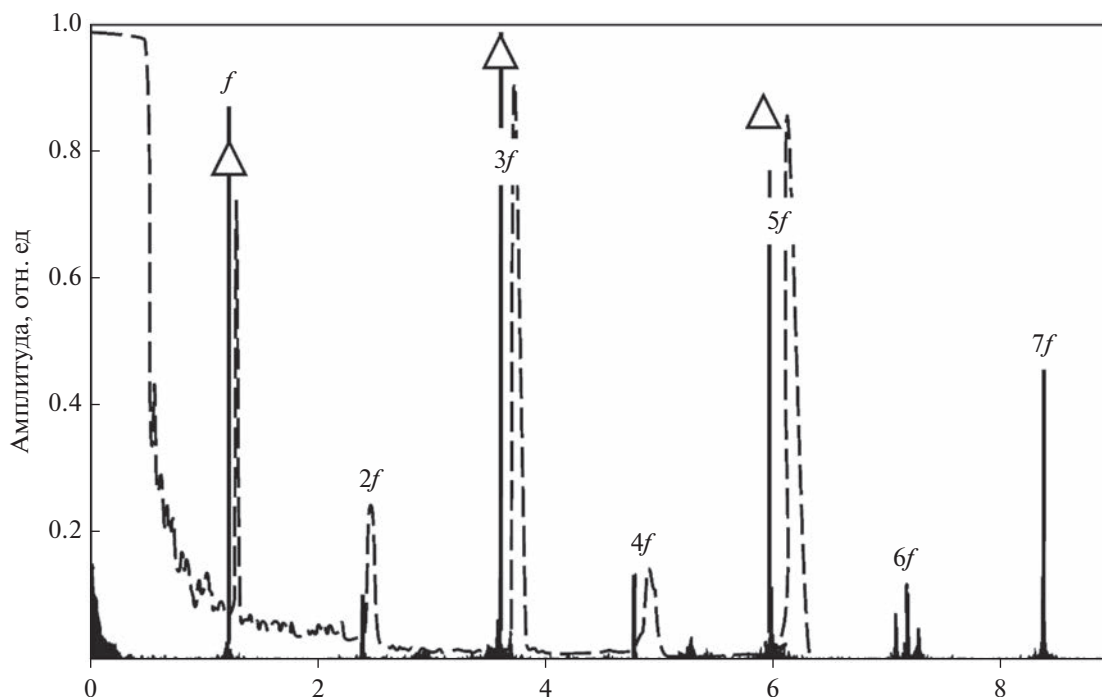


Рис. 1. Спектр акустического шума при торможении метропоезда (штриховая кривая) и спектр звука, возбуждаемого отдельным ТР (сплошная кривая).

для сравнения на рис. 1 спектры приведены в относительных единицах, поскольку требуется информация о частотах дискретных составляющих, а не об их амплитудах. На станции метро акустический шум записывался на мобильный телефон, и потом полученная звуковая запись шума метропоезда оцифровывалась с помощью программного пакета Matlab R2014b. В лабораторных условиях генерируемый ТР звук записывался на персональный компьютер с помощью микрофона AMIC-10 программным пакетом Nero Wave Editor.

Сравнение спектров на рис. 1 показывает, что в общем акустическом шуме дискретные спектральные составляющие на кратных частотах возбуждаются именно тормозными резисторами, а источником дискретных составляющих являются электромеханические процессы в тормозных резисторах, в которых протекает переменный тормозной ток с основной частотой 1200 Гц. При этом также тормозные резисторы дают относительно небольшой вклад и в инфразвуковой области. Небольшое частотное смещение спектра акустического шума метропоезда, идущего с торможением, относительно спектра неподвижного отдельного тормозного резистора, есть проявление доплеровского смещения частоты. С этим же связано уширение дискретных частотных составляющих излучаемого звука при замедлении метропоезда.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ЛЕНТОЧНОМ ТОРМОЗНОМ РЕЗИСТОРЕ

ТР представляет собой ленту из материала с высоким удельным электрическим сопротивлением, чаще всего фехраля (сплав Fe(70%) + Cr(22%) + Al(5%)) [2], свернутую в виде змейки из 22 пластин (рис. 2) [3].

В режиме торможения по ленте течет переменный ток, форма которого близка к меандру

$$I(t) = I_0(t) \operatorname{sign}(\sin(2\pi ft)), \quad (1)$$

где частота $f = 1200$ Гц, а амплитуда тока I_0 может достигать 1500 А [1]. Разложение в ряд Фурье переменного тока в виде меандра (1) имеет вид [4]:

$$I(t) = \frac{4I_0(t)}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2\pi(2k-1)ft)}{2k-1} \approx \frac{4I_0(t)}{\pi} \times \left\{ \sin(2\pi ft) + \frac{1}{3} \sin(6\pi ft) + \frac{1}{5} \sin(10\pi ft) + \dots \right\}, \quad (2)$$

откуда следует, что в ленточных элементах ТР течет переменный ток в виде суммы нечетных гармоник частоты $f = 1200$ Гц.

Из представленного на рис. 1 измеренного спектра звукового давления, возбуждаемого ТР в лабораторных условиях, видно, что он имеет преимущественно дискретный характер, где основ-

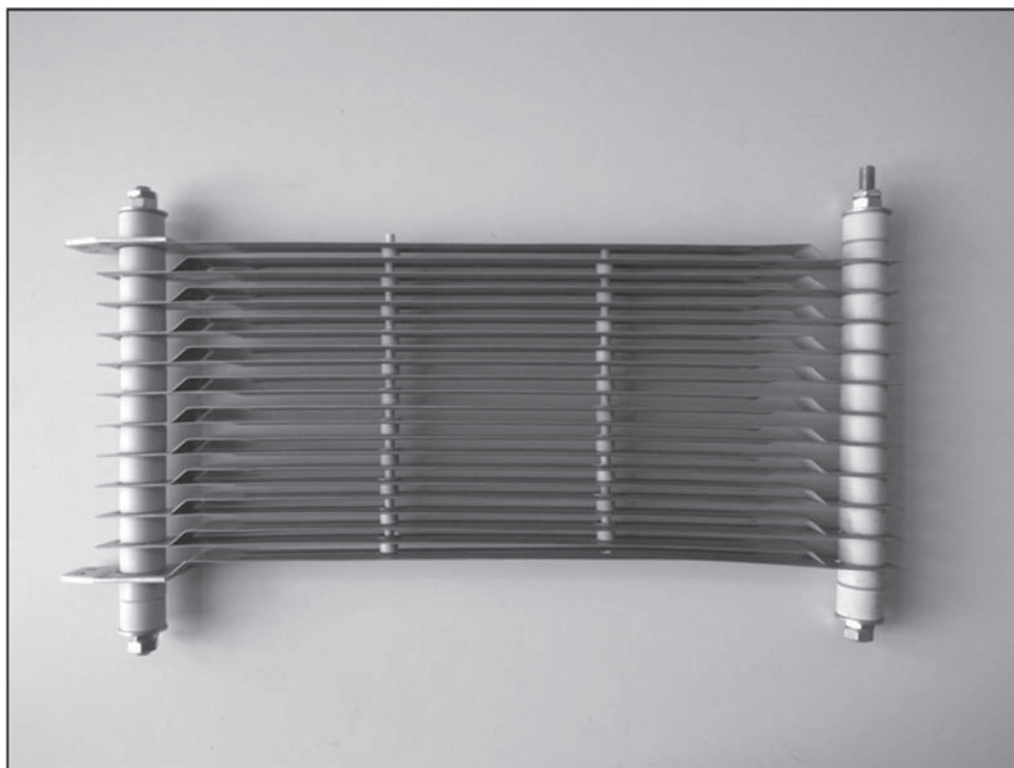


Рис. 2. ТР ленточного типа.

ная мощность излучается на частотах, являющихся гармониками частоты $f = 1200$ Гц, причем не только нечетных, но также и четных. Кроме того, заметно возбуждение инфразвука. Для объяснения механизмов возбуждения звука с таким спектром в ленточном ТР из фехрала, являющегося ферромагнетиком, рассмотрим проявления электромагнито-механических взаимодействий в виде силы Ампера, линейной и нелинейной магнитострикции.

ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ЛЕНТОЧНОМ ТОРМОЗНОМ РЕЗИСТОРЕ СИЛОЙ АМПЕРА

В ленточном проводнике ТР (рис. 2) в соседних секциях ток течет в противоположных направлениях. Таким образом, на ток в каждой секции действуют магнитные поля от соседних секций, направленные навстречу друг другу. Поэтому в центральной части ТР суммарные магнитные поля, взаимодействующие с током в секции, малы, а ближе к краям ТР — нарастают. Для математического моделирования электромагнитных и акустических процессов в тормозном резисторе используется программный комплекс COMSOL Multiphysics®.

Взаимодействие магнитного поля с током проявляется в виде силы Ампера $dF = Idl \times B$ (B —

магнитная индукция, dl — элемент длины проводника), действующей по всей площади ленточного проводника, преимущественно перпендикулярно плоскости ленты, и вызывающей ее упругие деформации. В средней части ТР магнитные поля от соседних секций (и силы Ампера) практически компенсируются, и упругие деформации малы. Нескомпенсированные магнитные поля и силы Ампера существенны только на крайних и ближайших к ним секциях ТР.

Сила Ампера, действующая на элементы ленточного ТР, определяется током, гармонически зависящим от времени (2), и созданным этим же током магнитным полем от соседних секций. Поэтому действующая сила Ампера изменяется во времени пропорционально квадрату тока $I^2(t)$, т.е. она имеет как постоянную составляющую, порождающую инфразвуковые частоты, так и высокочастотные составляющие (четные гармоники) на частотах $2f = 2400$, $4f = 4800$, $6f = 7200$ Гц. Более высокие частоты не рассматриваем, так как они имеют малую амплитуду и слабее воспринимаются человеческим ухом.

Таким образом, электромагнитное взаимодействие противоположно направленных токов в крайних секциях ленточного проводника ТР приводит к возникновению нескомпенсированных сил отталкивания (сил Ампера), направленных наружу из ТР. При этом отталкивание происхо-

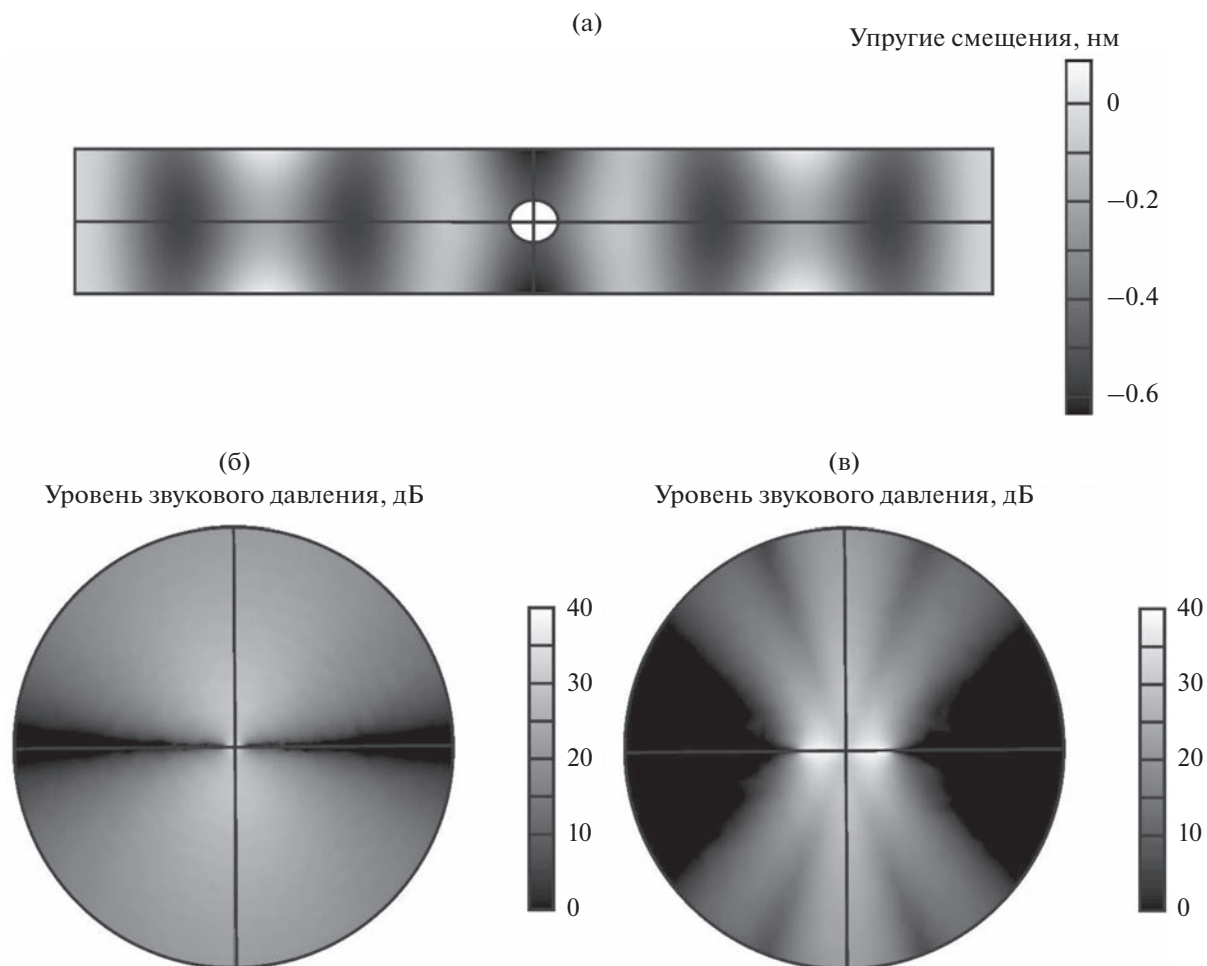


Рис. 3. (а) — Картина колебаний пластины и угловой спектр излучения звука в (б) — поперечной плоскости и (в) — в сагиттальной плоскости на четной гармонике 2400 Гц.

дит в каждом полупериоде переменного тока в ТР, т.е. на крайние секции ТР оказывается однонаправленное механическое воздействие. Длительность импульса торможения составляет около 14 секунд, он имеет приблизительно трапецидальную форму, поэтому это механическое воздействие не постоянно во времени и приводит к возникновению колебаний ленточных проводников по длине в инфразвуковой области частот. Из приведенного на рис. 1 спектра звука, возбуждаемого ТР, видно, что интенсивность инфразвука не велика по сравнению с интенсивностью звука, возбуждаемого на нечетных гармониках, и не оказывает существенного физиологического воздействия на пассажиров.

На рис. 3 представлены расчетные картина колебаний и угловой спектр вынужденных колебаний на частоте 2400 Гц крайней секции ТР. Колебания пластины (рис. 3а) под действием силы Ампера несимметричны относительно плоскости пластины ввиду преобладания отталкивания и возбуждают в воздушной среде звуковые волны.

Угловой спектр мощности излучаемого звука в поперечной и сагиттальной плоскостях представлен на рис. 3б, 3в. Для проведения расчетов методом конечных элементов на расстоянии 0.7 м от центра пластины расположен поглотитель. Мощность звуковых колебаний дана в дБ по отношению к пороговой чувствительности человека [5] и относится к колебаниям одной пластины. Расчет проведен для амплитуды силы тока 1500 А.

Таким образом, в области высоких частот сила Ампера возбуждает колебания пластин в ТР на четных гармониках, амплитуда которых меньше, но сравнима с амплитудами нечетных гармоник спектра (рис. 1).

ВОЗБУЖДЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ЛЕНТОЧНОМ ТОРМОЗНОМ РЕЗИСТОРЕ ВСЛЕДСТВИЕ МАГНИТОСТРИКЦИИ

Кроме действия силы Ампера, колебания на четных гармониках ленточных элементов ТР могут возбуждаться за счет нелинейного магнито-стрик-

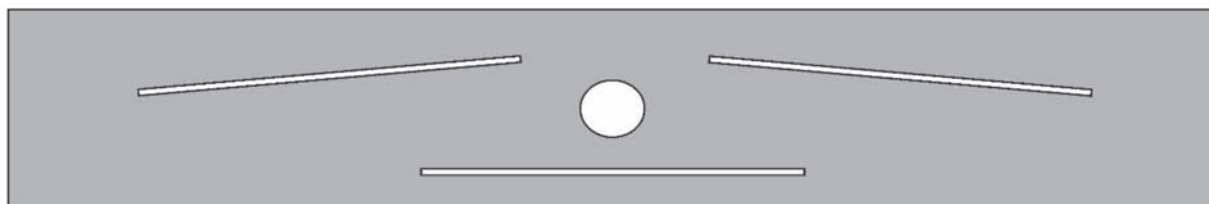


Рис. 4. Конфигурация асимметричных неоднородностей пластины ТР в виде разрезов.

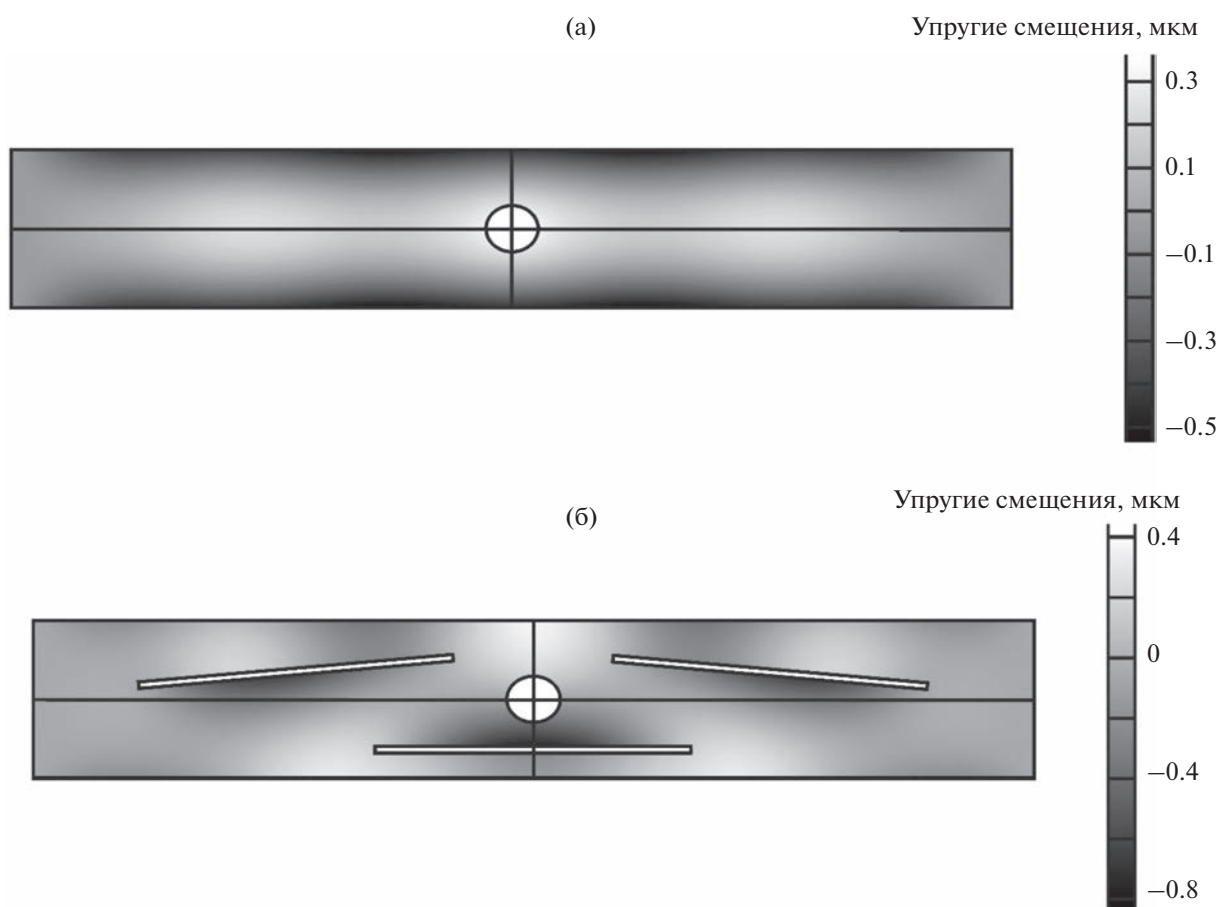


Рис. 5. Картины вынужденных колебаний в (а) — сплошной и (б) — разрезанной пластинах на частоте 1200 Гц.

ционного эффекта [6] в фехрелевых ленточных проводниках. Магнитострикционный эффект выражается в удлинении магнитострикционного образца в направлении действия магнитного поля, причем его величина одинакова при противоположных направлениях магнитного поля. Такие вынужденные деформации по ширине совершаются на четных гармониках $2f = 2400$, $4f = 4800$ и $6f = 7200$ Гц. На спектре звука, возбуждаемого ТР, приведенном на рис. 1, видно возбуждение на этих частотах с невысокой относительно нечетных гармоник интенсивностью.

Но особый интерес представляют весьма интенсивные звуковые колебания на нечетных гар-

мониках: $f_1 = 1200$, $f_2 = 3600$, $f_3 = 6000$ Гц (рис. 1). Причиной возбуждения звука на таких частотах может быть только линейный по току (магнитному полю) процесс. Таким физическим процессом в рассматриваемой структуре ТР может быть только линейная магнитострикция в ферромагнитном сплаве — фехрале.

В последние 20 лет многие авторы указывают на проявление линейной магнитострикции (обратного явления пьезомагнитному эффекту) не только в кристаллах, но и в ферромагнитных сплавах [7–10]. Линейная связь между механическим напряжением σ , деформацией ϵ , напряжен-

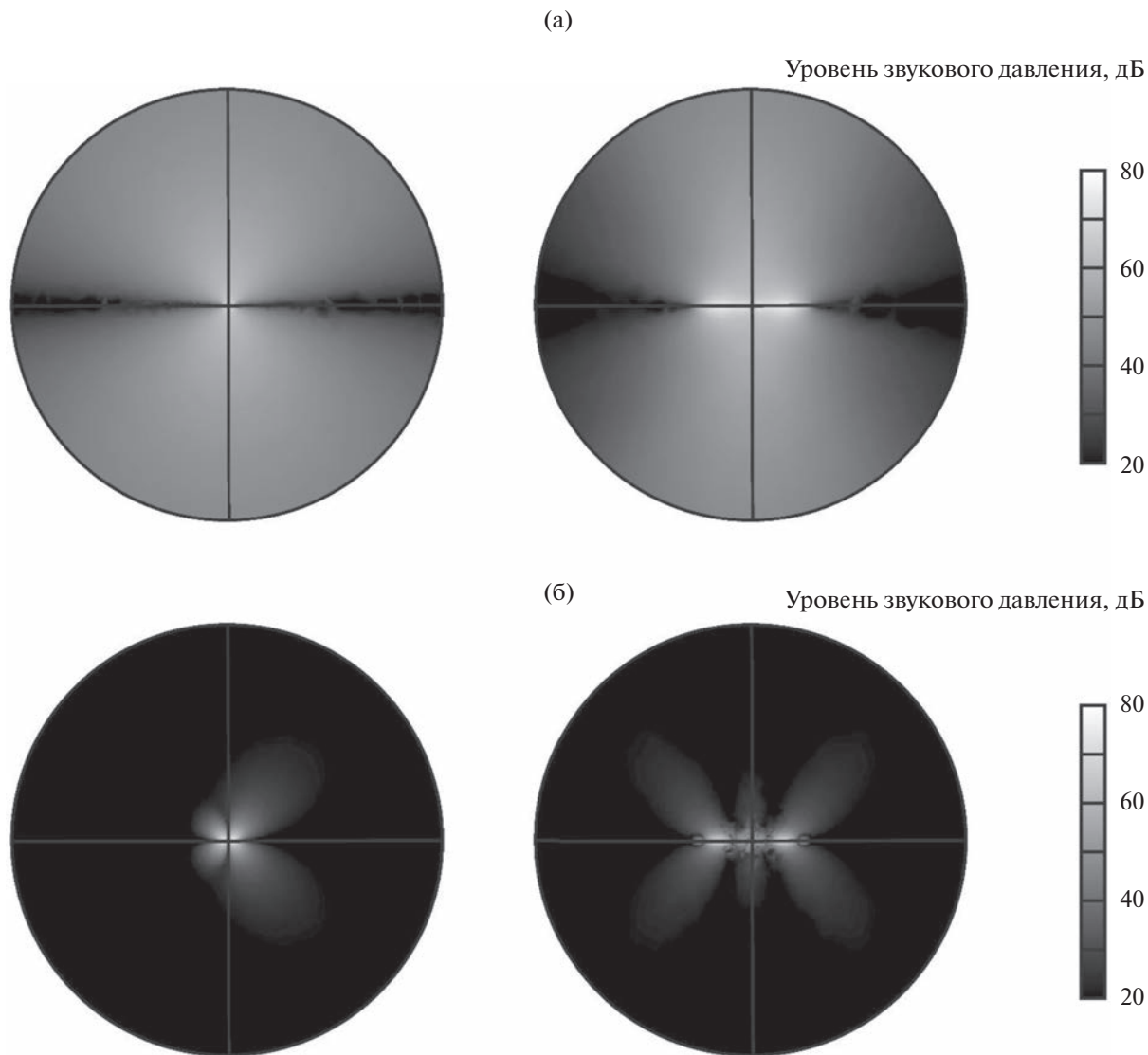


Рис. 6. Угловые спектры излучения звука (а) – сплошной и (б) – разрезанной пластинами ТР на частоте 1200 Гц.

ностью магнитного поля H и магнитной индукцией B определяется уравнениями связи [8]

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl}\sigma_{kl} + d_{kij}H_k, \quad B_i = d_{ikl}\sigma_{kl} + \mu_0\mu_{ik}H_k, \quad (3)$$

где s – тензор модулей податливости, d – тензор пьезомагнитных модулей, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, μ – тензор магнитной проницаемости. Расчеты вынужденных колебаний фехральной пластины в магнитном поле, образуемом токами в рассматриваемой и близлежащих пластинах ТР, проведены при совместном решении уравнений Максвелла и уравнений теории упругости с уравнениями связи (3) методом конечных элементов в системе COMSOL Multiphysics®. Для расчетов использовались следующие параметры фехрали [2]: модуль Юнга $E = 220$ ГПа, плотность $\rho = 7210$ кг/м³. Частотная зависимость магнитной проницаемости фехральной ленты

определялась экспериментально резонансным методом в диапазоне частот от 0 до 10000 Гц. В результате получено следующее соотношение

$$\mu(f) = 14.37 - 3.54 \times 10^{-3}f + 6.1 \times 10^{-7}f^2 - 3.9 \times 10^{-11}f^3.$$

Для пьезомагнитных модулей фехрали в доступных источниках информации данные отсутствуют, поэтому пьезомагнитные модули рассматривались как феноменологические параметры и определялись из сравнения результатов расчета спектральных составляющих возбуждаемого звука с экспериментальными данными (рис. 1). Расчетные значения представлены на рис. 1 значком Δ . В результате получены следующие значения элементов тензора пьезомагнитных модулей: $d_{15} = 3.9 \times 10^{-9}$ м/А, $d_{31} = -1 \times 10^{-9}$ м/А, $d_{33} = 2 \times 10^{-9}$ м/А.

МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА ТОРМОЗНЫХ РЕЗИСТОРОВ

Для подавления мощных дискретных составляющих акустического шума ТР на частотах нечетных гармоник нужно ввести в структуру ленточных проводников асимметричные неоднородности, нарушающие условия резонансов многочисленных акустических мод в пластине. Одна из наиболее эффективных конфигураций таких неоднородностей представлена на рис. 4, где в качестве неоднородностей служат прорезы в пластинах шириной 1 мм; отверстие в центре является технологическим.

На рис. 5 представлены рассчитанные по модели линейной магнитострикции (3) картины вынужденных колебаний на частоте 1200 Гц в сплошных (рис. 5а) и разрезанных (рис. 5б) пластинах ТР, а на рис. 6 приведены угловые спектры излучения звука соответственно в поперечной и сагиттальной плоскостях при амплитуде силы тока 1500 А.

Проведенные расчеты показали, что введение указанных разрезов снижает максимальную мощность излучения звука одной пластиной ТР, вычисленную по сфере радиусом 0.7 м, с 80 до 48 дБ. На третьей гармонике влияние разрезов снижает максимальную мощность излучения с 88 до 81 дБ, а на пятой гармонике максимальная мощность излучения остается практически неизменной на уровне 93 дБ. Для подавления колебаний на пятой гармонике могут быть введены дополнительные разрезы меньшего размера.

Из рис. 6а видно, что акустическая мощность, возбуждаемая сплошной пластиной на первой гармонике, составляет около 80 дБ вблизи вагона на перроне. Поскольку линейная магнитострикция действует одинаково во всем ТР, то полная акустическая мощность от всего ТР составляет около 93 дБ, от всего метropоезда — около 100 дБ на перроне. Введение разрезов в пластины ТР позволяет снизить составляющую акустического шума метropоезда на частоте 1200 Гц до 68 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ измеренного спектра излучения акустического шума ТР, возникающего при электродинамическом торможении метropоезда, показал,

что наибольший вклад в интенсивность высокочастотного излучаемого звука вносят колебания на нечетных гармониках частоты тормозного тока. Это свидетельствует о наличии у фехралевого сплава значительного пьезомагнитного эффекта и обратного к нему эффекта линейной магнитострикции. Проведенные расчеты показали, что значительно снизить интенсивность возбуждаемых ТР акустических колебаний можно введением в пластину несимметричных разрезов (рис. 4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплект электрооборудования асинхронного тягового привода вагонов метрополитена КАТП-4: Руководство по эксплуатации 7651.39.00.001 РЭ, 2018. 274 с.
2. Каталог фирмы Avek Global (URL: <https://avglob.org/spiral-fehral-h23yu5t.html>). Дата обращения 18.03.2023 г.)
3. Тимофеев А.И., Машков И.В., Корнев И.А., Соколов М.А., Бессонова Н.С. Силовой резистор // Патент России № 2685224С1. 2019. Бюл. № 11.
4. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
5. Fletcher H., Munson W.A. Loudness, its definition, measurement and calculation // J. Acoust. Soc. Am. 1933. V. 5. № 5. P. 82–108. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1933.tb00403.x>
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 621 с.
7. Davino D., Giustiniani A., Visone C., Adly A. Experimental analysis of vibrations damping due to magnetostrictive based energy harvesting // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. № 7. 07E509. <https://doi.org/10.1063/1.3545798>
8. Colussia M., Bertoa F., Morib K., Naritac F. Strain Energy Density Based Assessment of Cracked Terfenol-D Specimens Under Magnetic Field and Different Loading Rates // Procedia Structural Integrity. 2016. V. 2. P. 1837–1844. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.231>
9. Balke H., Suchanek G. Commentary: On the linear coupling of mechanical and magnetic fields in magnetoelectrical composites // AIP Advances. 2017. V. 7. 060901. <https://doi.org/10.1063/1.4986212>
10. Dapino M.J. Magnetostrictive Materials: Their Use in Smart Structure Applications. Chapter in book: Encyclopedia of Smart Materials, 2002. 39 p. <https://doi.org/10.1002/0471216275.esm051>