

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534.232

ВИБРАЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С МАГНИТНОЙ ЛЕВИТАЦИЕЙ

© 2015 г. А. В. Гладилин*, В. А. Пирогов*, И. П. Голямина*, Ю. В. Кулаев**,
П. А. Курбатов**, Е. П. Курбатова**

*Акустический Институт им. акад. Н.Н. Андреева

**Национальный Исследовательский Университет “МЭИ”

E-mail: KurbatovPA@mpei.ru

Поступила в редакцию 09.10.2014 г.

В статье приведены математические модели, результаты расчетно-теоретических исследований и выполнено обоснование возможностей создания вибрационного преобразователя с полной магнитной левитацией в подвесе из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП). Осевая и радиальная устойчивость активной части преобразователя обеспечивается за счет взаимодействия магнитного поля кольцевых постоянных магнитов и полого цилиндра из керамического ВТСП-материала. Вынуждающее усилие создается системой катушек с током, магнитное поле которых поляризуется полем постоянных магнитов и взаимодействует с индуцированными токами в сверхпроводящем цилиндре. Рассмотрен случай перехода в сверхпроводящее состояние ВТСП-материала в поле постоянных магнитов (режим FC). Представленные данные подтверждают перспективность предлагаемых технических решений.

Ключевые слова: вибрационный преобразователь, ВТСП-подвес, левитация, математические модели, конструкция, расчетные оценки параметров преобразователя.

DOI: 10.7868/S0320791915030077

ВВЕДЕНИЕ

Магнитный подвес в вибрационном преобразователе позволяет отказаться от трущихся опор и упругих элементов для подвижных частей и тем самым снизить паразитные шумы и потери, повысить ресурс устройства, что весьма важно при построении систем активного гашения шумов [1], гидроакустических и атмосферных излучателей и приемников звука низкой частоты, генераторов инфразвука [2]. Возможность создания эффективных колебательных систем с левитацией в магнитной жидкости показана в [3]. Однако колебание тел в магнитной жидкости сопровождается потерями на трение в жидкости. Бесконтактный пассивный магнитный подвес с полной устойчивой левитацией возможен при использовании сверхпроводящих материалов, которые в магнитном поле ведут себя как диамагнетики, т.е. магнитные моменты индуцированных от внешних воздействий токов сохраняют магнитное состояние, полученное до этих воздействий, после достижения сверхпроводящего состояния при охлаждении. Например, если поместить постоянный магнит вблизи соизмеримого по габаритам сверхпроводника и после этого перевести материал в сверхпроводящее состояние, охладив его до требуемой температуры перехода, то в объеме сверх-

проводника установившееся магнитное поле будет удерживаться при перемещениях постоянного магнита. Будут возникать силы взаимодействия поля постоянного магнита с индуцированными токами в сверхпроводнике, которые стремятся вернуть его в исходное состояние.

Катушки с током, размещенные вблизи сверхпроводника, составляют необходимые элементы для построения электромеханического преобразователя индукционного типа, действие которых аналогично взаимодействию переменного магнитного поля с обычными электропроводящими материалами, но с практически бесконечной удельной электропроводностью. Таким образом, индукционные преобразователи с высокотемпературными сверхпроводниками (ВТСП) должны обладать большим КПД.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследований составлена модельная конструкция вибрационного преобразователя с ВТСП-подвесом, изображенная на рис. 1.

Преобразователь состоит из внешнего полого цилиндра из ВТСП-материала (YBaCuO-керамика) с радиальной осью анизотропии. Эта часть преобразователя охлаждается в жидком азоте.

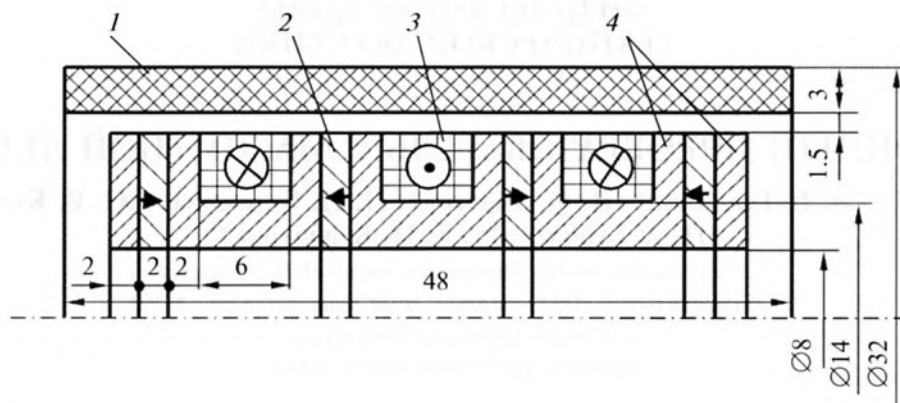


Рис. 1. Вибрационный преобразователь с ВТСП-подвесом (модельная задача): 1 – полый цилиндр из ВТСП-материала; 2 – постоянные магниты; 3 – катушки с током; 4 – элементы магнитопроводов из магнетомягкого материала.

Внутри цилиндра расположена магнитная система, состоящая из периодически расположенных постоянных магнитов с осевой намагниченностью из сплава NdFeB, катушек с переменным током и деталей из магнетомягкого материала. Направление вектора намагниченности постоянных магнитов и токов в катушках имеет чередующиеся знаки.

Приведение преобразователя в рабочее состояние происходит следующим образом. До охлаждения ВТСП-цилиндра, т.е. когда материал находится не в электропроводящем состоянии, магнитную систему помещают внутрь в центральное положение. Катушки отключены от источника питания. Магнитное поле, созданное постоянными магнитами, проникает в ВТСП-цилиндр и частично рассеивается в воздухе. После этого ВТСП-цилиндр, находящийся в камере с теплоизоляцией, охлаждают жидким азотом. Для этих целей используются криосистемы замкнутого цикла. После достижения температуры перехода в сверхпроводящее состояние, около 90 К, ВТСП-цилиндр “запоминает” свое магнитное состояние (эффект “вмороженного” поля). Теперь вся магнитная система находится в состоянии искусственной левитации в магнитном поле – любое ее смещение вызовет индуцированные токи в ВТСП-цилиндре, которые при взаимодействии с магнитным полем постоянных магнитов вызовут возвращающую в исходное положение силу [4, 5]. Такое устойчивое равновесие невозможно получить, оперируя только постоянными магнитами, в силу известного принципа Ирншоу.

Появление тока в катушках вызывает искажение поля постоянных магнитов в ВТСП-цилиндре и также приводит к возникновению сил взаимодействия между внутренней магнитной системой и внешним цилиндром. При соосном расположении этих частей устройства сила будет направлена по оси.

Размер зазора между внутренней поверхностью ВТСП-цилиндра и магнитной системой определяется габаритами теплоизолирующей камеры криосистемы. Для эффективного снижения теплообмена с окружающей средой и источниками теплоты в катушках с током в камере с ВТСП создается глубокий вакуум. Известные конструктивные решения, например, для магнитных подшипников с ВТСП-элементами, имеют зазор между стенкой камеры и ВТСП порядка 1 мм. Охлаждение ВТСП жидким азотом производится по каналам, расположенным на внешней поверхности цилиндра. Материал теплоизолирующей камеры должен быть не электропроводящим, чтобы в ней не возникали индуцированные токи.

МЕТОД РАСЧЕТА

Сложность расчетов магнитных систем с ВТСП-элементами заключается в необходимости учета влияния нелинейных анизотропных электрофизических свойств сверхпроводящих материалов при работе в магнитных полях в сверхпроводящем состоянии и дальнейшего их взаимодействия с магнитной системой. Основными явлениями, которые следует рассматривать при моделировании ВТСП, являются:

- переход между сверхпроводящим и нормальным состоянием;
- неполный эффект Мейснера (замораживание поля);
- экранирующие токи;
- анизотропия;
- гистерезисные явления.

Для представления электрофизических свойств ВТСП-материала составлена следующая резистивная модель [6, 7]:

$$\rho(H, J, T_R) = \frac{\rho_0}{2} \left(1 + \operatorname{th} \left(-\frac{K_J(H, J, T_R)}{2\delta_J} \right) \right), \quad (1)$$

где принято

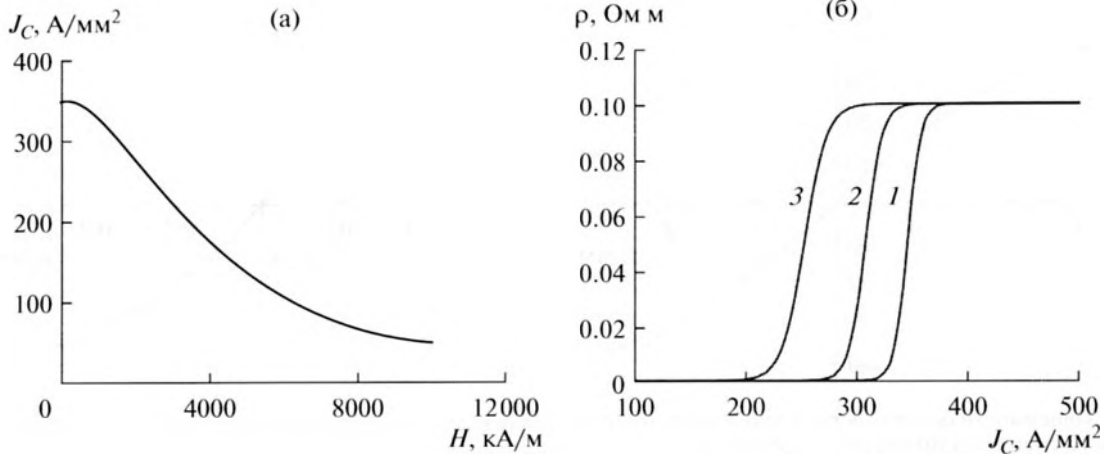


Рис. 2. Характерные зависимости критической плотности тока J_C от магнитной индукции (а) и удельного электрического сопротивления ρ от плотности тока (б) при $T_C = 90$ К, $T = 72$ К, $\delta = 0.003$, $\rho_0 = 0.1$ Ом · м, $H_C = 4000$ кА/м: 1 – $H = 500$ кА/м, 2 – $H = 1500$ кА/м, 3 – $H = 2500$ кА/м.

$$K(H, J, T_R) = (1 - T_R) \left(1 - \frac{|H|}{H_C(T_R)} \right) \left(1 - \frac{|J|}{J_C(H, T_R)} \right),$$

ρ и ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала в сверхпроводящем и обычном состояниях; H – напряженность магнитного поля; J – плотность тока; J_C – критическая плотность тока, т.е. максимально достижимая при данных внешних условиях; H_C – критическая напряженность магнитного поля, при которой происходит потеря сверхпроводимости; $T_R = T/T_C$ – относительная температура; T_C – критическая температура, при которой происходит потеря сверхпроводимости.

Зависимость критической плотности тока от напряженности магнитного поля аппроксимирована формулой следующего вида:

$$J_C(H, T_R) = \frac{J_{C\max}(T_R)}{\left(1 + \left| \frac{H}{H_C(T_R)} \right|^\alpha \right)^\beta}, \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет, назначая соответствующие значения параметров α и β , получить наилучшие варианты приближений к экспериментальным данным [8, 9]. На рис. 2 приведены характерные зависимости критической плотности тока J_C от магнитной индукции и удельного электрического сопротивления ρ от плотности тока.

Зависимости критических параметров от относительной температуры представлены в экспоненциальном виде:

$$\begin{cases} H_C(T_R) = H_{C0} e^{-cT_R}, \\ J_{C\max}(T_R) = J_{C0} e^{-dT_R}, \end{cases} \quad (3)$$

где H_{C0} и J_{C0} – постоянные коэффициенты. Выражения (3) отражают уменьшение критических параметров при росте температуры.

Предполагается наличие структурной, т.е. не изменяющейся в ходе процесса, анизотропии. Это позволяет задать фиксированное направление главной оси анизотропии. Проекция вектора напряженности магнитного поля на главную ось анизотропии определяет компоненту, участвующую в формулах (1)–(3). Также принимается, что плоскость, перпендикулярная к главной оси анизотропии, определяет плоскость растекания токов. При этом в плоскости растекания предполагается изотропный характер связи плотности тока и напряженности электрического поля. В системе координат анизотропии закон Ома можно записать с учетом (1) в виде

$$\mathbf{E}_{\parallel} = \rho(H_{\perp}, |\mathbf{J}_{\parallel}|, T_R) \cdot \mathbf{J}_{\parallel}, \quad (4)$$

где \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля; значок “ \parallel ” означает компоненты в плоскости растекания токов, а значок “ \perp ” – проекцию вектора на главную ось анизотропии, перпендикулярную указанной плоскости.

Для расчетов электромагнитного поля в магнитных системах, содержащих в общем случае катушки с током, детали из ферромагнитных и ВТСП-материалов, применен метод пространственных интегральных уравнений для источников поля [10]: объемной плотности токов \mathbf{J} , плотностей зарядов ξ и векторов намагниченности ферромагнитных деталей \mathbf{M} . ВТСП-материал представлен немагнитной нелинейной анизотропной электропроводящей средой. В квазистационарном приближении для напряженностей электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} полей и магнитной индукции $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ использована система уравнений Максвелла следующего вида:

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J}, & \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, & \nabla \cdot \mathbf{J} &= 0, \end{aligned}$$

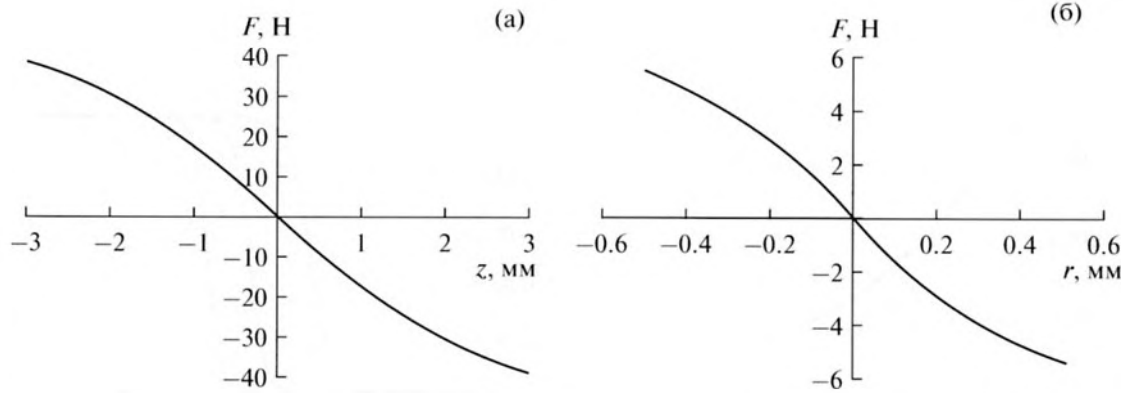


Рис. 3. Зависимости осевой составляющей силы от осевого перемещения (а) и радиальной составляющей силы от радиального смещения (б) без тока в катушках.

где $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$; γ – удельная электрическая проводимость материала (в общем случае тензор); $\mathbf{E} = \mathbf{E}_n + \mathbf{E}_{ст} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ – результирующий вектор напряженности электрического поля, равный сумме индуцированной и сторонней составляющих, а также составляющей от движения в магнитном поле со скоростью \mathbf{v} .

В магнитной системе для векторного магнитного потенциала \mathbf{A} ($\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$) справедливо интегральное выражение

$$\mathbf{A}(t) = \mathbf{A}^{внш}(t) + \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\int_V \frac{\mathbf{J}(t) + \nabla \times \mathbf{M}(t)}{r} dV - \oint_S \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{M}(t)}{r} dS \right], \quad (5)$$

где $\mathbf{A}^{внш}$ – векторный потенциал, созданный внешними источниками; V – объем электропроводящих и ферромагнитных деталей; S – площадь поверхности ферромагнитных деталей; r – расстояние от точки интегрирования до точки наблюдения.

Напряженность электрического поля \mathbf{E} в электропроводящей среде определяется через векторный магнитный потенциал, скалярный электрический потенциал и магнитную индукцию:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi_e + \mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (6)$$

Источники потенциальной составляющей $\mathbf{E}^n = -\nabla \varphi_e$ – электрические заряды. Объемные электрические заряды возникают из-за неоднородности электрических свойств материалов. У ВТСП удельная электрическая проводимость имеет нелинейный анизотропный характер зависимостей от параметров поля, и объемные электрические заряды могут существенно влиять на распределение электромагнитного поля. Уравнения для расчетов источников поля составляются из (5), (6). Умножив (6) на электрическую проводимость среды γ , в которой находится точка на-

блюдения, получим уравнение для распределенного в объеме проводника тока:

$$\mathbf{J} = -\gamma \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} + \gamma \mathbf{E}^n + \gamma \mathbf{v} \times \mathbf{B},$$

где $\gamma = f(T, B, J)$ – в общем случае, в том числе для ВТСП-материала, есть функция температуры T , магнитной индукции B и плотности тока J .

Чтобы рассчитать неизвестное распределение намагниченности в ферромагнитных деталях, выражение для магнитной индукции дополнено магнитной характеристикой материала:

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \\ \mathbf{M} = f(\mathbf{B}). \end{cases}$$

В плоскопараллельных конструкциях и при наличии осевой симметрии исключаются заряды, так как граничные условия для \mathbf{E} выполняются автоматически.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В расчетных моделях использованы наиболее низкие значения параметров выпускаемых промышленностью ВТСП-материалов с целью более четкого проявления нелинейных и гистерезисных характеристик. Максимальная критическая плотность тока принята $J_{сmax} = 200 \text{ А/мм}^2$, критическая напряженность магнитного поля $H_c = 4000 \text{ кА/м}$. Для оценки осевой жесткости ВТСП-подвеса выполнены расчеты зависимости осевой составляющей силы от осевого смещения магнитной системы относительно ВТСП-цилиндра при отсутствии тока в катушках. Полученные результаты показаны на рис. 3а. В пределах смещений $\pm 0.5 \text{ мм}$ эта зависимость практически линейная, и осевая жесткость подвеса составляет 18.3 Н/мм . При больших смещениях наблюдается заметное снижение жесткости.

Тренд этой зависимости аппроксимирован полиномом $F_z = -0.0389z^5 + 0.9533z^3 - 18.319z$. Мас-

са магнитной системы без дополнительных конструктивных элементов составляет около 90 г. При приложении силы тяжести вдоль оси магнитной системы смещение будет 0.05 мм, что вполне допустимо, так как для ожидаемой механической мощности 2 Вт при частоте 50 Гц требуемая амплитуда колебаний не будет превышать 1.0 мм.

Рассчитанная зависимость радиальной силы от радиального смещения ВТСП-подвеса при отсутствии тока приведена на рис. 36. Тренд этой зависимости аппроксимирован полиномом $F_r = -86.185r^5 + 44.135r^3 - 16.446r$. Жесткость составила 16.4 Н/мм, т.е. соизмерима с осевой жесткостью и достаточна для удержания в статическом режиме магнитной системы.

Расчет электромагнитной силы выполнен в центральном положении магнитной системы и со смещением на 1 мм с амплитудой магнитодвижущей силы каждой катушки 270 А. При пренебрежении потерями из-за индуцированных токов в деталях магнитной системы частота тока не влияет на эту характеристику, которая приведена на рис. 4. Зависимость силы от времени в центральном положении имеет синусоидальный характер, повторяющий форму тока в катушках $F_{ЭМ} = 6.5 \sin(\omega t)$. В отличие от электромагнитных преобразователей, сила изменяет знак при изменении направления тока. Максимальное значение силы 6.5 Н достаточно для достижения требуемой механической мощности преобразователя.

Зависимость силы от времени при смещении магнитной системы рассчитана при следующих условиях. Перевод ВТСП-цилиндра в сверхпро-

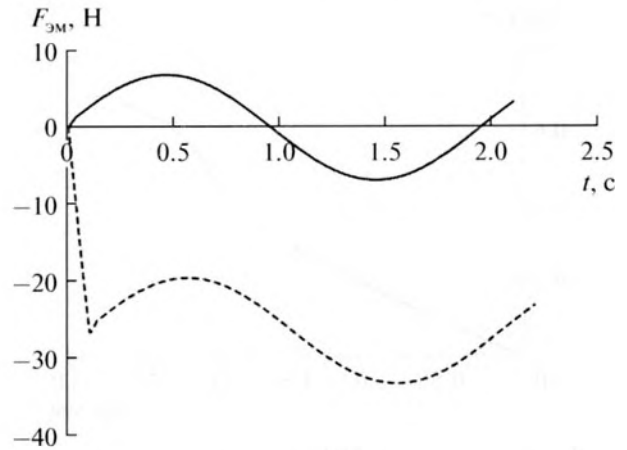


Рис. 4. Зависимость осевой составляющей электромагнитной силы от времени. Сплошная линия – в центральном положении магнитной системы, пунктирная – при смещении магнитной системы от центра на 1 мм.

водящее состояние производится при центральном положении магнитной системы с выключенным током. Далее магнитная система смещается на 1 мм, и включается переменный ток. Анализ результатов показывает, что при смещении без большой погрешности можно считать, что результирующая сила равна сумме сил подвеса в смещенном положении и электромагнитной силы в центральном положении магнитной системы при вариации тока, т.е. допустимо использовать принцип наложения для линейных систем.

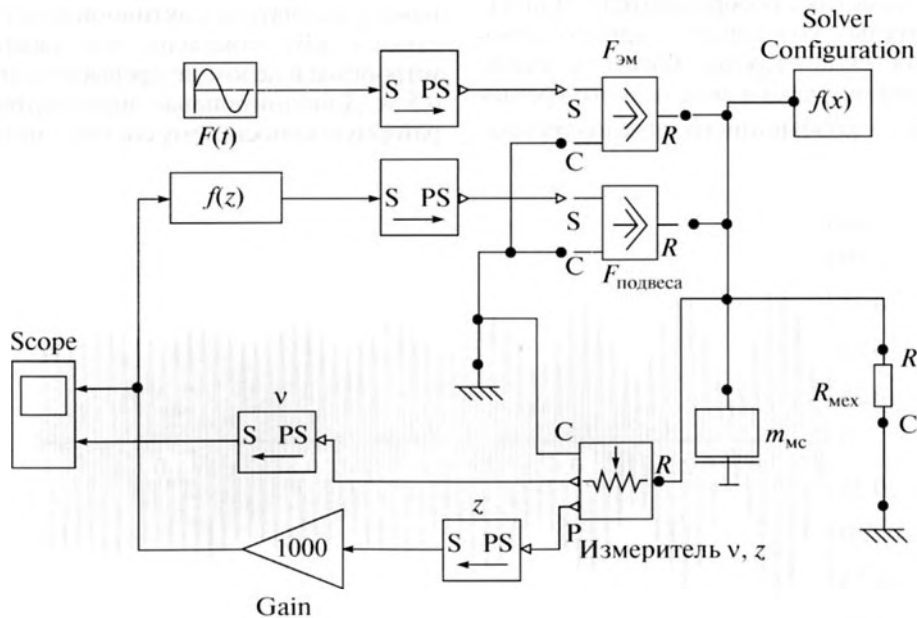


Рис. 5. Упрощенная модель механической подсистемы преобразователя для анализа нелинейных искажений.

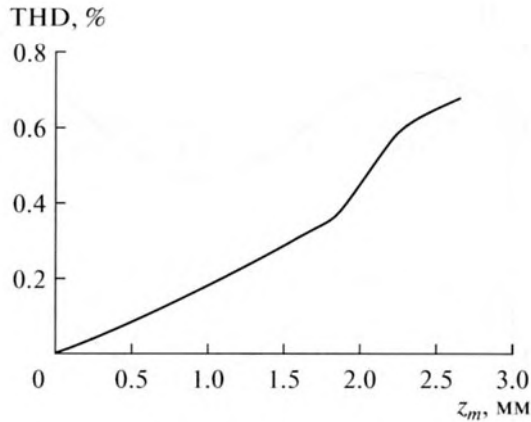


Рис. 6. Зависимости THD от амплитуды колебаний.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Для анализа динамики работы преобразователя составлена модель в программной среде *Matlab Simulink (Simscape)* (см. рис. 5). В ней предполагается, что ВТСП-цилиндр закреплен на неподвижном основании. На подвижную часть – магнитную систему с массой $m = 0.2$ кг – действуют две силы: внешняя синусоидальная электромагнитная сила с регулируемой амплитудой и частотой и нелинейная сила подвеса $F_{\text{подвеса}}$ в осевом направлении в соответствии с зависимостью рис. 3а. Целью расчетов было исследование нелинейных искажений колебаний в ВТСП-подвесе при вариациях амплитуды колебаний, анализ временных зависимостей скорости движения и амплитудно-частотных характеристик преобразователя. Для изменения амплитуды колебаний варьировалась электромагнитная сила. Кроме массы в схему включена активная нагрузка в виде вязкого трения $R_{\text{мех}} = 1/k_{\text{тр}}$, где $k_{\text{тр}}$ – коэффициент вязкого трения.

На рис. 6 представлена рассчитанная зависимость THD (*Total Harmonic Distortion*) от амплитуды колебаний. Результаты расчетов указывают на обычно допустимые искажения синусоидального сигнала преобразователя в диапазоне амплитуд колебаний до 2.5 мм ($\text{THD} \leq 1\%$). Для расширения диапазона амплитуд требуется увеличение габаритов преобразователя.

Переходный процесс при подключении преобразователя с нагрузкой $R_{\text{мех}} = 1/k_{\text{тр}} = 1.0$ с/кг к источнику силы с амплитудой 6.5 Н и частотой 50 Гц показан на рис. 7. Поскольку частота источника силы не совпадает с резонансной частотой преобразователя, то в переходном процессе наблюдаются характерные пульсации амплитуды колебаний. Время переходного процесса зависит от механической нагрузки. При увеличении $R_{\text{мех}}$ время переходного процесса увеличивается.

Жесткость ВТСП-подвеса при больших амплитудах колебаний имеет заметный нелинейный характер, поэтому следует ожидать искажения амплитудно-частотной характеристики вблизи резонанса. На рис. 8 показаны рассчитанные зависимости активной, реактивной мощностей и амплитуды колебаний подвижной части преобразователя при вариациях частоты для значения амплитуды электромагнитной силы 6.5 Н, которая поддерживалась неизменной. Механическая нагрузка $R_{\text{мех}} = 0.1$ с/кг. Резонансная частота составляет $f_{\text{рез}} = 43.7$ Гц. Добротность колебательной системы при заданной механической нагрузке составляет 5.5.

Расчетные оценки возможности создания на рассматриваемом принципе гидроакустического поршневого излучателя с активной акустической мощностью 1 кВт показали, что габаритные размеры устройства в целом не превысят длину 1 м и диаметр 0.5 м. Дополнительные энергозатраты на рефрижераторную криосистему составят не более 500 Вт.

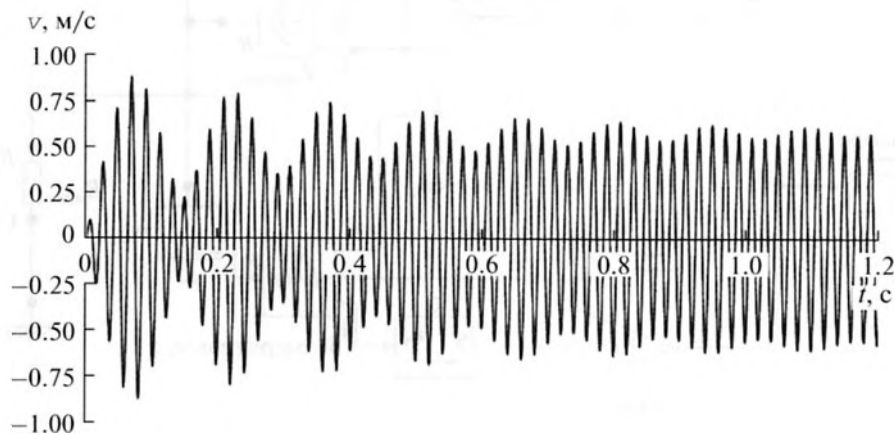


Рис. 7. Временная зависимость скорости движения подвижной части преобразователя в переходном процессе включения.

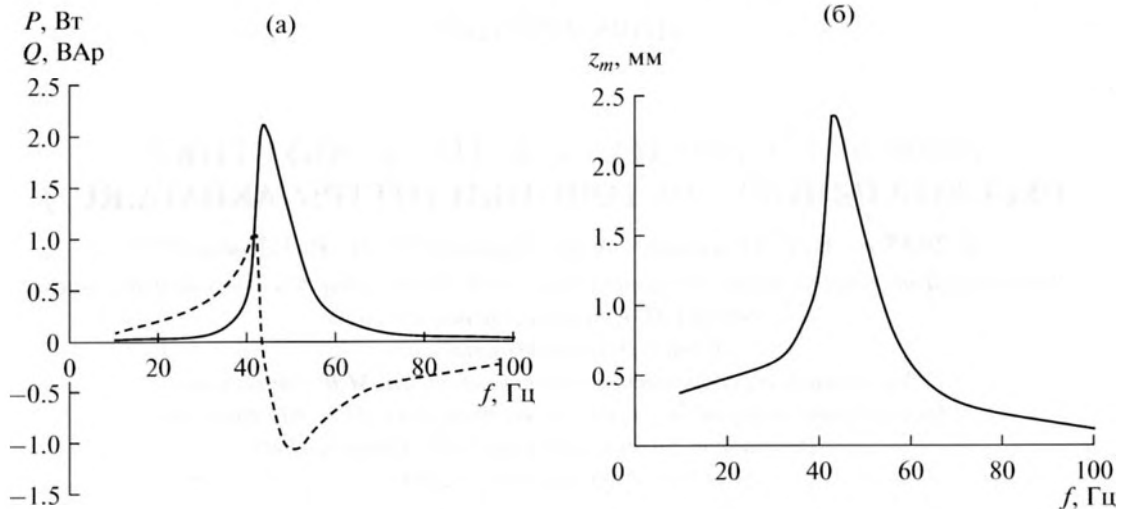


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики преобразователя: (а) мощность; (б) амплитуда колебаний. Сплошная линия – активная мощность, пунктирная линия – реактивная мощность.

ВЫВОДЫ

Выполненные расчетно-теоретические исследования модельной конструкции вибрационного преобразователя с ВТСП-подвесом показали:

1. Основными элементами такого преобразователя должны быть детали из ВТСП-материала, охлаждаемого жидким азотом, постоянные магниты, обеспечивающие статическую левитационную устойчивость подвижных частей, катушки с током, создающие переменное магнитное поле и переменную электромагнитную силу.

2. ВТСП-подвес обеспечивает пространственную стабилизацию положения в пределах 50 мкм, что удовлетворяет конструктивным ограничениям устройства.

3. Удельные электромагнитные усилия в рассмотренном устройстве достигают 30–50 Н/кг, что соизмеримо с преобразователями электромагнитного и магнитоэлектрического типов, имеющих близкие по размеру зазоры. При оптимизации конструкции преобразователя удельные электромагнитные силы могут быть существенно увеличены.

4. Допустимые нелинейные искажения (THD = 1%) обеспечиваются в пределах амплитуд колебаний до 2.0 мм. Для расширения линейного диапазона необходимо увеличивать габариты преобразователя.

Статья подготовлена с использованием материалов работы, выполняемой в рамках ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57414X0071.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В.Д., Мигун Ю.Г., Орлов А.И. Гибридный активно-пассивный звукопоглотитель // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 419–424.
2. Краснов В.М., Кулешов Ю.В. Изменение спектра инфразвукового сигнала при распространении волн от земной поверхности до высот ионосферы // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 1. С. 21–30.
3. Полушин В.М., Боев М.Л., Тан Мью Мин, Карпова Г.В., Рослякова Л.И. Упругие свойства магнитной жидкости с воздушной полостью, удерживаемой силами левитации // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 1. С. 63–69.
4. Tang J., Fang J., Tong W. Superconducting magnetic bearings and active magnetic bearings in attitude control and energy storage flywheel for spacecraft // IEEE Trans. Applied Supercond. 2012. V. 22. № 6. P. 1–9.
5. Werfel F.N., Floegel-Delor U., Rothfeld R., Riedel T., Goebel B., Wippich D., Schirrmeister P. Superconductor bearings, flywheels and transportation // Supercond. Sci. Technol. 2012. № 25. P. 1–16.
6. Кулаев Ю.В., Курбатов П.А., Курбатова Е.П., Полущенко О.Л. Расчет магнитного подвеса на основе высокотемпературных сверхпроводников для кинетического накопителя энергии // Электротехника. 2012. № 7. С. 38–42.
7. Грибанов С.В., Кулаев Ю.В., Матвеев В.А., Нижельский Н.А., Полущенко О.Л. Расчет магнитных систем с элементами из высокотемпературных сверхпроводящих материалов // Электричество. 2009. № 2. С. 51–57.
8. Ruiz-Alonso D., Coombs T.A., Campbell A.M. Numerical analysis of high-temperature superconductors with the critical state model // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2004. V. 14. № 4. P. 2053–2063.
9. Chun Y.-D., Kim Y.-H., Lee J., Hong J.-P., Lee J.-W. Finite element analysis of magnetic field in high temperature bulk superconductor // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001. V. 11. № 1. P. 2000–2003.
10. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 167 с.