

**РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРООПОРЫ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ЭКВИВАЛЕНТА С УЧЕТОМ ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ ЖИДКОСТИ
В ДРОССЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ ¹**

Доктор техн. наук, профессор, Главный научный сотрудник **Гордеев Б.А.**

(Институт проблем машиностроения Российской академии наук)

Кандидат физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник **Охулков С.Н.**

(Институт проблем машиностроения Российской академии наук)

Кандидат техн. наук, доцент **Титов Д.Ю.**

(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

Младший научный сотрудник **Ермолаев А. И.**

(Институт проблем машиностроения Российской академии наук)

Ведущий электроник **Ванягин А.В.**

(Институт прикладной физики Российской академии наук)

**CALCULATION OF HYDRAULIC SUPPORT PARAMETERS BY ELECTROMECHANICAL
EQUIVALENT METHOD TAKING INTO ACCOUNT THE ADDED MASS OF THE LIQUID
IN THE THROTTLE CHANNELS**

Doctor (Tech), Professor, Ch. Researcher **Gordeev B.A.**

(Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Sciences. IPM RAS)

Ph. D. (Phys.-Math.), Senior Researcher (IPM RAS), Associate Professor (NSTU) **Ohulkov S.N.**

(Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences. IPM RAS)

Ph. D. (Tech), Senior Researcher, Associate Professor (NSTU) **Titov D. Yu.**

(Nizhny Novgorod State Technical University. R. E. Alekseev. NSTU)

Junior researcher **Ermolaev A. I.**

(Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences. IPM RAS)

Leading electronics engineer **Vanyagin A.V.**

(Institute of applied physics of the Russian Academy of Sciences, IAP RAS)

Виброзащита, МР-гидроопора, магнитоареологический трансформатор, электромеханический подход, Simulink, передаточная функция, динамическая вязкость, коэффициент диффузии, присоединенная масса, возбуждающий электромагнит (ВЭ), амплитудно-частотная характеристика (АЧХ).

Vibration protection, Mr-hydraulic support, magnetorheological transformer, Electromechanical approach, Simulink, transfer function, dynamic viscosity, diffusion coefficient, attached mass, exciting electromagnet (FE), amplitude-frequency response (AFC).

В статье рассмотрено влияние присоединенной массы магнитоареологической жидкости (МРЖ), обладающей неньютоновскими свойствами, на характеристики магнитоареологической гидроопоры (МР-гидроопоры) с магнитоареологическим трансформатором (МРТ). Рассчитаны амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) МР-гидроопоры при различных температурах с изменяющимися присоединенными массами МРЖ в дроссельных каналах МР-гидроопоры.

In article influence of added masses of magnetorheological fluid (MRF) having non-Newtonian properties on characteristics of magnetorheological hydraulic support (Mr-hydraulic support) optional transformer (MRI). Calculated amplitude-frequency characteristic (AFC) Mr-hydraulic support at different temperatures with varying attached masses MRF in the throttle channel Mr-hydraulic support.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2019-2022 гг. по теме № 0035-2019-0026 (№ госрегистрации 01201458049).

¹ The work was carried out within the Russian state task for fundamental scientific research for 2019-2022 (the topic No. 0035-2019-0026, the state registration No. 01201458049).

Введение

Из активных средств виброзащиты и защиты от ударов при транспортировке крупногабаритных грузов применяются гидропоры с МРТ. Важнейшей задачей при проектировании МР-гидропоры с МРТ является оптимальный для данных условий выбор МРЖ. Технические характеристики МР-гидропоры зависят от рабочей МРЖ. При тепловом движении ферромагнитные частицы МРЖ в жидкости-носителе подчиняются молекулярно-кинетическим законам. Их движение может быть различным и зависит от размера частиц [1]. Ферромагнитные частицы коллоидной МРЖ перемещаются поступательно в разнообразных направлениях, так как испытывают многочисленные удары соседних частиц с различных сторон [2].

1. Моделирование АЧХ магнитоуправляемых гидропор в среде программирования Simulink программного пакета Matlab

1.1. Электрическая схема замещения МР-гидропоры с МРЖ как заграждающий фильтр-пробка и её передаточная функция

Нагруженная гидропора с инерционным трансформатором (ИТ) представляется, по методу электроаналогий, как заграждающий фильтр – пробка, основным элементом которого является последовательный колебательный контур. Схема гидропоры с ИТ как четырёхполюсника – заграждающего фильтра - приведена на рисунке 1 [4, 5, 8].

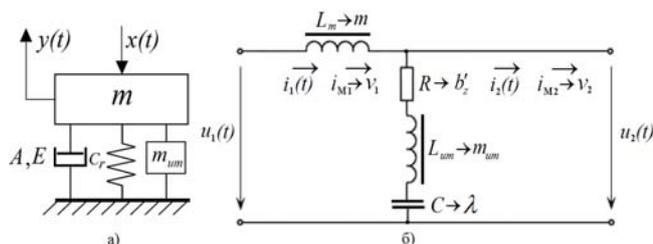


Рис. 1. Модель гидропоры при силовом возбуждении на неподвижном основании (а); Электрическая схема замещения гидропоры с МРЖ как заграждающий фильтр – пробка во временной форме без действия МРТ (б)

На рисунке 1 показаны: а) m – масса нагрузки, кг; m_{um} – присоединённая масса ИТ; c_r – жесткость упругого элемента Н/м; A – площадь поршневого действия, м²; E – емкость дополнительной камеры;

б) Напряжение u – сила F ; электрический ток i – скорость v ; общая индуктивность $L + L_{um}$ – общая масса $m + m_{um}$; электрическое сопротивление R – коэффициент демпфирования $b'_z = b_z + b_z(j\omega)$; емкость C – податливость λ .

Схема замещения (см. рис. 1, б) является последовательным RLC -электрическим контуром МР-гидропоры с МРЖ без действия внешнего магнитного поля в МРТ.

Нагруженная гидропора с ИТ, как заграждающий фильтр, в виде электрической цепи на основе последовательного контура (см. рис. 1, б) имеет передаточную функцию [4,8]:

$$H(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{R + (j\omega L_{um} - 1/(j\omega C))}{R + [j\omega(L + L_{um}) - 1/(j\omega C)]}. \quad (1)$$

В операторной форме записи данная передаточная функция нагруженной гидропоры с ИТ как заграждающего фильтра представлена в виде [4, 8]:

$$H(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{R + (sL_{um} - 1/(sC))}{R + [s(L + L_{um}) - 1/(sC)]}, \quad (2)$$

где s - переменная преобразования Лапласа.

Передаточная функция нагруженной гидропоры с ИТ в виде механической цепи представлена в виде [1, 2]:

$$H(j\omega) = \frac{F(j\omega)}{F_m(j\omega)} = \frac{b'_z + (j\omega m_{um} - c/j\omega)}{b'_z + [j\omega(m + m_{um}) - c/j\omega]}. \quad (3)$$

В операторной форме записи передаточная функция нагруженной гидропоры с ИТ как заграждающего фильтра на основе механической схемы замещения представляется в виде [4, 8]:

$$H(s) = \frac{F(s)}{F_m(s)} = \frac{b'_z + (sm_{um} - c/s)}{b'_z + [s(m + m_{um}) - c/s]}. \quad (4)$$

Получив передаточную функцию гидропоры с ИТ как заграждающего фильтра, далее переходят к имитационной модели МР-гидропоры.

1.2. Имитационная модель гидропоры с МРТ и входные параметры

На рисунке 2 показана имитационная модель гидропоры с МРТ [4, 5, 8].

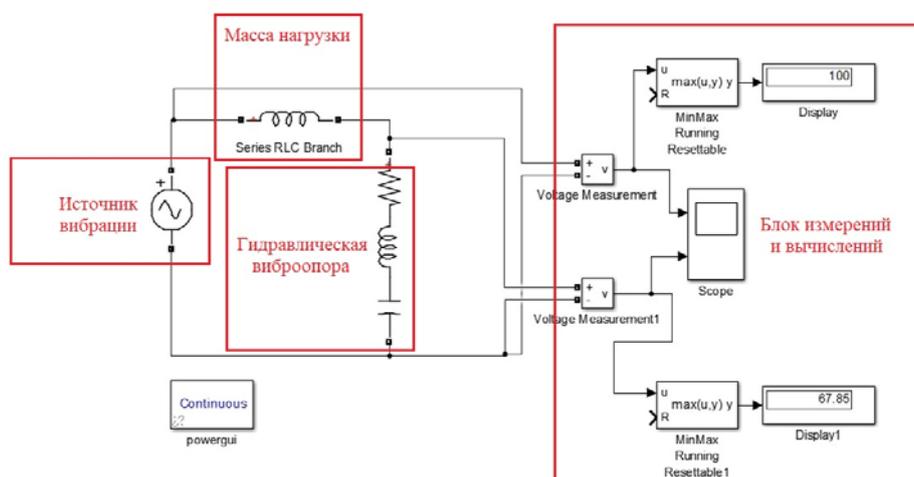


Рис.2. Имитационная модель гидропоры с МРТ

При моделировании учитывались изменение динамической жесткости (таблица 1) и коэффициента демп-

фирования МР-гидроопоры ОМГ-50 при нагрузке массой 50 кг в зависимости от частоты (таблица 2) [2, 6].

Таблица 1.

Значения динамической жесткости одной МР-гидроопоры ОМГ – 50 до частоты 100 Гц при входном СКО 50 м/с²

Частота, Гц	3,1	6,1	12,2	18,3	24,4	30,5	36,6	42,7	48,8	54,9	61,0	67,1	73,2	79,3	85,4	91,6	97,7	103,8
$C(f)$, кН/м	993,86	649,99	836,34	740	105,61	290,20	324,115	483,66	33,623	32,042	281,877	44,336	6,399	0,251	1,399	119,41	70,976	20,759

Расчет и построение АЧХ МР-гидроопоры при массе нагрузки в 27 кг выполнялись для двух режимов работы дроссельных каналов магнитореологического трансформатора:

- 1) при напряженности магнитного поля $H = 0$ кА/м;
- 2) при напряженности магнитного поля $H = 252$ кА/м.

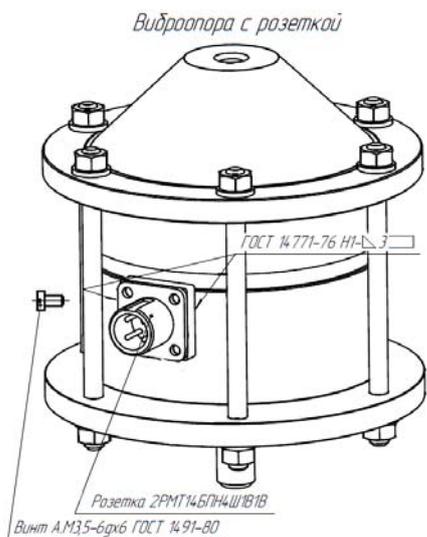
Таблица 2.

Обобщенные гидравлические коэффициенты трения в дроссельных каналах длиной $l = 15$ мм в зоне полюсов ВЭ ОМГ – 50 для частот возбуждения при $H = 252$ кА/м и температурах 20°C, 30°C, 40°C, 60°C

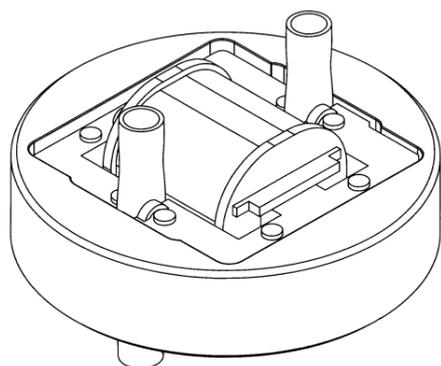
Температура MRF-132DG			Жесткость ОМГ-50	20°C	30°C	40°C	60°C
i	f_i , Гц	ω_i , рад/с	$C(f)$, Н/м (50 м/с ²)	$b^{(252)}_{zi}$, кг/с	$b^{(252)}_{zi}$, кг/с	$b^{(252)}_{zi}$, кг/с	$b^{(252)}_{zi}$, кг/с
1	3,1	19,477858	993863,3913	650,422	648,77	647,3123	644,2018
2	6,1	38,327398	649992,5722	740,585	737,483	734,4659	728,3453
3	12,2	76,654796	836339,0859	863,769	857,6323	851,5307	839,2896
4	18,3	114,98219	740947,3041	959,2241	950,1153	940,8665	922,5052
5	24,4	153,30959	105604,1521	1042,489	1030,265	1018,012	993,53
6	30,5	191,63699	290198,0526	1118,756	1103,414	1088,161	1057,558
7	36,6	229,96439	324105,5693	1190,441	1172,231	1153,726	1117,003
8	42,7	268,29179	483661,751	1258,873	1237,38	1216,039	1173,195
9	48,8	306,61918	33623,89291	1324,868	1300,53	1275,914	1226,95
10	54,9	344,94658	32041,51141	1388,962	1361,347	1333,889	1278,805
11	61	383,27398	281876,9047	1451,53	1420,83	1390,34	1329,133
12	67,1	421,60138	44335,6412	1512,845	1479,31	1445,532	1378,209
13	73,2	459,92878	6399,602417	1573,108	1536,461	1499,678	1426,232
14	79,3	498,25617	250,5318779	1632,478	1592,611	1552,929	1473,362
15	85,4	536,58357	1399,081435	1691,077	1648,094	1605,409	1519,721
16	91,6	575,53929	119403,0702	1749,949	1703,967	1658,061	1566,153
17	97,7	613,86669	70976,24084	1807,276	1758,117	1709,269	1611,24
18	103,8	652,19408	20758,59681	1864,08	1811,933	1759,954	1655,805

1.3. Присоединённые и общие массы МРТ гидроопоры

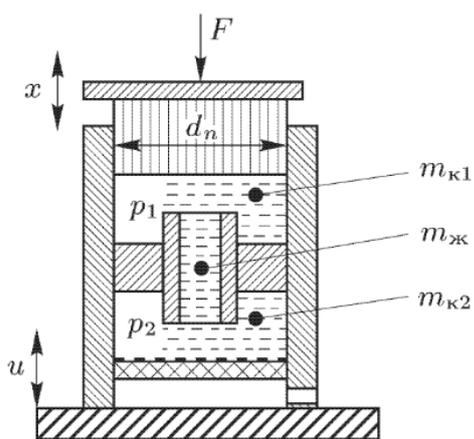
Для настройки на рабочую частоту МР-гидроопоры ОМГ-50 (рис. 3, а) необходимо создать инерционность по относительному перемещению [1-3].



а)



б)



в)

Рис. 3. Внешний вид МР-гидроопоры ОМГ-50 (а); перегородка МРТ с возбуждающим электромагнитом и двумя дроссельными каналами (б); принципиальная схема инерционного дроссельного канала (в)

При определении инерционности рабочей МРЖ в дроссельных каналах МР-гидроопоры необходимо знать, какие диссипативные и инерционные параметры присущи МРЖ при её абсолютном и относительном движении в дроссельных каналах МРТ.

На рисунке 3, в рассматривается принципиальная схема инерционного вертикального дроссельного канала, (по движению рабочей МРЖ при воздействии на поршень силы F), где x и u - перемещения поршня МР-гидроопоры и основания.

Относительное перемещение обеспечивается отношением квадратов площадей поршневого действия обечайки $S_{\text{П}}^2 = S_{\text{Об}}^2$ и эквивалентного дроссельного канала $S_{\text{К.К}}^2$ [1]. Принимаем площадь поршневого действия обечайки равной $S_{\text{Об}} = \pi \cdot R_{\text{Об}}^2 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, а площадь эквивалентного дроссельного канала равной $S_{\text{К.К}} = \pi \cdot R_{\text{К.К}}^2 = 31,976 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Первоначально считаем, что МРЖ в дроссельном канале $m_{\text{МЖ}}$ работает как твердый стержень без деформаций.

Без действия внешнего магнитного поля присоединённую массу МРТ $m_{\text{МРТ}}$, которая превышает реальную массу МРЖ в дроссельных каналах МР-гидроопоры, можно определить по [1-3]:

$$m_{\text{МРТ}}^{(H=0,t)} = m_{\text{ит.}} = \frac{(\pi \cdot R_{\text{Об}}^2)^2}{(\pi \cdot R_{\text{К.К}}^2)^2} \cdot m_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} \quad [\text{кг}], \quad (5)$$

$$m_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} = \rho_{\text{МЖ}}^{(H=0,t)} \cdot l \cdot \pi \cdot R_{\text{К.К}}^2,$$

где $m_{\text{МЖ}}$ – масса рабочей МРЖ; $m_{\text{МРТ}} = m_{\text{ит.}}$ – приведенная масса МРТ, равная приведенной массе $m_{\text{ит.}}$ без действия внешнего магнитного поля; l – длина эквивалентного дроссельного канала, м; $\rho_{\text{МЖ}} = 2950 \text{ кг/м}^3$ – плотность рабочей МРЖ при температуре нагрева 20°C и без действия внешнего магнитного поля.

Вычисление массы $m_{\text{МЖ}}$ МРЖ в дроссельном канале МР-гидроопоры при действии температуры и магнитного поля производят по выражению:

$$m_{\text{МЖ}}^{(H,t)} = \rho_{\text{МЖ}}^{(H,t)} \cdot l \cdot \pi \cdot R_{\text{К.К}}^2 = \frac{\eta_{ij}^{(t)}}{\nu_{1.1}^{(20^\circ)}} \cdot l \cdot \pi \cdot R_{\text{К.К}}^2 \quad [\text{кг}]. \quad (6)$$

где $\eta_{ij}^{(t)} / \nu_{1.1}^{(20^\circ)} = \rho_{\text{МЖ}}$ – плотность МРЖ при j -ой температуре; $\eta_{ij}^{(t)}$ – динамическая вязкость j -ой температуры МРЖ; $\nu_{1.1}^{(20^\circ)}$ – кинематическая вязкость при температуре 20°C и наименьшей напряжённости магнитного поля $H = 9 \text{ кА/м}$.

В таблице 3 приведены значения вязкости рабочей МРЖ MR Fluid MRF-132DG в зависимости от изменения температуры в диапазоне от 20°C до 60°C и изменения напряжённостей магнитного поля от $9,0 \text{ кА/м}$ до 252 кА/м .

Числовые значения вязкости рабочей МРЖ MR Flujd MRF-132DG в зависимости от изменения температуры в диапазоне от 20 °С до 60 °С и изменения напряжённостей магнитного поля от 9,0 кА/м до 252 кА/м.

H , кА/м	9	39	67	89	128	152	179	219	252
η_T , мПа·с	$\eta_{H1}(9)$	$\eta_{H2}(39)$	$\eta_{H3}(67)$	$\eta_{H4}(89)$	$\eta_{H5}(128)$	$\eta_{TH6}(152)$	$\eta_{H7}(179)$	$\eta_{H8}(219)$	$\eta_{H9}(252)$
$\eta_{T1}(20^\circ)$	530	710	830	880	920	950	990	1015	1030
$\eta_{T2}(25^\circ)$	512,6	686,9	803,1	851,5	890,2	919,2	957,9	982,1	996,6
$\eta_{T3}(30^\circ)$	495,7	663,9	776,2	822,9	860,4	888,4	925,8	949,2	963,2
$\eta_{T4}(35^\circ)$	478,5	640,9	749,3	794,5	830,6	857,6	893,8	916,3	929,9
$\eta_{T5}(40^\circ)$	461,3	617,9	722,4	765,9	800,7	826,9	861,7	883,4	896,5
$\eta_{T6}(45^\circ)$	444,1	594,9	695,5	737,4	770,9	796,1	829,6	850,5	863,1
$\eta_{T7}(50^\circ)$	426,9	571,5	668,6	708,9	741,1	765,3	797,5	817,6	829,7
$\eta_{T8}(55^\circ)$	409,8	548,9	641,7	680,4	711,3	734,5	765,4	784,8	796,4
$\eta_{T9}(60^\circ)$	392,6	525,9	614,8	651,86	681,49	703,71	733,34	751,89	762,97

Исследования динамической вязкости МРЖ проводились на установке с ротационным вискозиметром Брукфильда «Digital Viscometer RVDV-1» с магнитной системой соленоидов и термостатом в исследовательской лаборатории «Управляемая виброзащита электротехнических комплексов» НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Плотность МРЖ определяют как отношение динамической вязкости рабочей МРЖ $\eta_{мж}$ к коэффициенту кинематической вязкости $\nu_{мж}$ [10]:

$$\rho_{мж} = \eta_{мж} / \nu_{мж}, \quad (7)$$

и если считать МРЖ ньютоновской жидкостью, то при всех температурах её нагрева в однофазном режиме её плотность всегда постоянна:

$$\begin{aligned} \rho_{мж} &= \eta_{ij}^{(t)} / \nu_{ij}^{(t)} = \eta_{1.1}^{(20^\circ)} / \nu_{1.1}^{(20^\circ)} = \eta_{2.3}^{(30^\circ)} / \nu_{2.3}^{(30^\circ)} = \\ &= \eta_{3.5}^{(40^\circ)} / \nu_{3.5}^{(40^\circ)} = \dots = \eta_{i.9}^{(60^\circ)} / \nu_{i.9}^{(60^\circ)} = const \end{aligned} \quad (8)$$

Так как масса МРЖ определяется через произведение её плотности $\rho_{мж}$ на объём дроссельного канала, то приведённую массу МРТ в дроссельных каналах МР-гидропоры (присоединённую инерционную массу к нагрузке МР-гидропоры) при действии магнитного поля и температуры вычисляют с учётом плотности МРЖ при j -ой температуре из выражения:

$$m_{мрт}^{(H,t)} = \frac{(\pi \cdot R_{об}^2)^2}{(\pi \cdot R_{к.к}^2)^2} \cdot m_{мж}^{(H,t)} = \frac{\eta_{ij}^{(H,t)}}{\nu_{1.1}^{(20^\circ)}} \cdot l \cdot \pi \cdot R_{к.к}^2 \cdot \frac{(\pi \cdot R_{об}^2)^2}{(\pi \cdot R_{к.к}^2)^2} \quad [\text{кг}]. \quad (9)$$

Динамическая вязкость МРЖ при j -ой температуре определяется как:

$$\eta_{ij}^{(t)} = \left(\frac{\nu_{ij}^{(t)}}{\nu_{1.1}^{(20^\circ)}} \right) \cdot \eta_{1.1}^{(20^\circ)} = \rho_{мж} \nu_{ij}^{(t)} \quad [\text{кг/мс}], \quad (10)$$

где $\nu_{ij}^{(t)} / \nu_{1.1}^{(20^\circ)}$ – относительный температурный коэффициент вязкости МРЖ определяемый с учётом реперной точки при температуре в 20 °С и $H = 9$ кА/м:

$$k_{ij}^{(t)} = \nu_{ij}^{(t)} / \nu_{1.1}^{(20^\circ)} = \eta_{ij}^{(t)} / \eta_{1.1}^{(20^\circ)}; \quad k_{ij}^{(t)} \neq k_{1.1}^{(20^\circ)}; \quad k_{1.1}^{(20^\circ)} = 1, \quad (11)$$

где $\eta_{1.1}^{(20^\circ)}$ – динамическая вязкость при температуре 20°С и наименьшей напряжённости магнитного поля $H = 9$ кА/м (см. таблицу 3).

Тогда приведённая масса МРТ при действии магнитного поля и температуры определяется через отношение динамических вязкостей:

$$\begin{aligned} m_{мрт}^{(H,t)} &= k_{ij}^{(t)} \cdot \frac{(\pi \cdot R_{об}^2)^2}{(\pi \cdot R_{к.к}^2)^2} \cdot m_{мж}^{(H=0,t)} = \\ &= \frac{\eta_{ij}^{(t)}}{\eta_{1.1}^{(20^\circ)}} \cdot \frac{(\pi \cdot R_{об}^2)^2}{(\pi \cdot R_{к.к}^2)^2} \cdot m_{мж}^{(H=0,t)} \end{aligned} \quad [\text{кг}], \quad (12)$$

Выражение (12) для расчёта приведённой массы МРТ при действии магнитного поля и температуры можно представить в виде:

$$m_{мрт}^{(H,t)} = k_{ij}^{(t)} \cdot \rho_{мж} \cdot \frac{S_{п}^2}{S_{к.к}} \cdot \ell = \frac{\eta_{ij}^{(t)}}{\eta_{1.1}^{(20^\circ)}} \cdot \rho_{мж} \cdot \frac{S_{п}^2}{S_{к.к}} \cdot \ell \quad [\text{кг}]. \quad (13)$$

Вычисление приведённой массы $m_{мрт}$ МРЖ в эквивалентном дроссельном канале при действии магнитного поля и температуры и значениях динамической вязкости производим по формулам (12).

В эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм приведённая масса МРЖ MRF-132DG в зоне полюсов ВЭ МРТ при напряжённости магнитного поля $H = 0$ кА/м, температуре 20°С и $\rho_{мж} = 2950$ кг/м³ равна:

$$m_{\text{мрт.1.1}} = \frac{\eta_{1.1}^{(20^\circ)}}{\eta_{1.1}^{(20^\circ)}} \cdot (\rho \cdot l_1) \frac{S_{\text{п}}^2}{S_{\text{кк}}} =$$

$$= 1,0 \cdot (2950 \cdot 0,015) \frac{4,5^2 \cdot 10^{-6}}{31,976 \cdot 10^{-6}} = 28,023 \text{ кг.} \quad (14)$$

Также были вычислены и другие значения приведённой массы МРТ при напряжённости магнитного поля $H = 0$ кА/м для температур 40°C и 60°C при $\rho_{\text{мж}} = 2950 \text{ кг/м}^3$ (таблица 4).

В эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм приведённая масса МРЖ MRF-132DG в зоне полюсов ВЭ МРТ при напряжённости магнитного поля $H = 252$ кА/м, температуре 20°C и $\rho_{\text{мж}} = 2950 \text{ кг/м}^3$ равна:

$$m_{\text{мрт.9.1}} = \frac{\eta_{9.1}^{(20^\circ)}}{\eta_{1.1}^{(20^\circ)}} \cdot (\rho \cdot l_1) \frac{S_{\text{п}}^2}{S_{\text{кк}}} =$$

$$= 1,943 \cdot (2950 \cdot 0,015) \frac{4,5^2 \cdot 10^{-6}}{31,976 \cdot 10^{-6}} = 54,448 \text{ кг.} \quad (15)$$

В эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм приведённая масса МРЖ MRF-132DG в зоне полюсов ВЭ МРТ при напряжённости магнитного поля $H = 252$ кА/м, температуре 30°C и $\rho_{\text{мж}} = 2950 \text{ кг/м}^3$ равна:

$$m_{\text{мрт.9.3}} = \frac{\eta_{9.3}^{(30^\circ)}}{\eta_{1.1}^{(20^\circ)}} \cdot (\rho \cdot l_1) \frac{S_{\text{п}}^2}{S_{\text{кк}}} =$$

$$= 1,817 \cdot (2950 \cdot 0,015) \frac{4,5^2 \cdot 10^{-6}}{31,976 \cdot 10^{-6}} = 50,917 \text{ кг.} \quad (16)$$

В эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм приведённая масса МРЖ MRF-132DG в зоне полюсов ВЭ при напряжённости магнитного поля $H = 252$ кА/м, температуре 40°C и $\rho_{\text{мж}} = 2950 \text{ кг/м}^3$ равна:

$$m_{\text{мрт.9.5}} = \frac{\eta_{9.5}^{(40^\circ)}}{\eta_{1.1}^{(20^\circ)}} \cdot (\rho \cdot l_1) \frac{S_{\text{п}}^2}{S_{\text{кк}}} =$$

$$= 1,691 \cdot (2950 \cdot 0,015) \frac{4,5^2 \cdot 10^{-6}}{31,976 \cdot 10^{-6}} = 47,3909 \text{ кг.} \quad (17)$$

В эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм приведённая масса МРЖ MRF-132DG в зоне полюсов ВЭ МРТ при напряжённости магнитного поля $H = 252$ кА/м, температуре 60°C и $\rho_{\text{мж}} = 2950 \text{ кг/м}^3$ равна:

$$m_{\text{мрт.9.9}} = \frac{\eta_{9.9}^{(60^\circ)}}{\eta_{1.1}^{(20^\circ)}} \cdot (\rho \cdot l_1) \frac{S_{\text{п}}^2}{S_{\text{кк}}} =$$

$$= 1,439 \cdot (2950 \cdot 0,015) \frac{4,5^2 \cdot 10^{-6}}{31,976 \cdot 10^{-6}} = 40,3322 \text{ кг.} \quad (18)$$

Значения приведённых и общих масс при напряжённости магнитного поля $H = 0$ кА/м и $H = 252$ кА/м при температурах МРЖ MRF-132DG в 20°C, 40°C и 60°C приведены в таблице 4.

Значения присоединённых и общих масс МРТ МР-гидроопоры при $H = 0$ кА/м и $H = 252$ кА/м для температур 20°C, 40°C и 60°C

Без магнитного поля (0 кА/м)		При магнитном поле (252 кА/м)	
Приведённые массы МРТ, кг	Общие массы МРТ, кг	Приведённые массы МРТ, кг	Общие массы МРТ, кг
$m_{\text{ит}}(20^\circ\text{C}) = 28,023$	$m + m_{\text{ит}}(20^\circ\text{C}) = 55,023$	$m_{\text{мрт}}(20^\circ\text{C}) = 54,448$	$m + m_{\text{мрт}}(20^\circ\text{C}) = 81,448$
$m_{\text{ит}}(40^\circ\text{C}) = 24,391$	$m + m_{\text{ит}}(40^\circ\text{C}) = 51,391$	$m_{\text{мрт}}(40^\circ\text{C}) = 47,3909$	$m + m_{\text{мрт}}(40^\circ\text{C}) = 74,3909$
$m_{\text{ит}}(60^\circ\text{C}) = 20,760$	$m + m_{\text{ит}}(60^\circ\text{C}) = 47,760$	$m_{\text{мрт}}(60^\circ\text{C}) = 40,3322$	$m + m_{\text{мрт}}(60^\circ\text{C}) = 67,3322$

1.4. Значения частот настроек МР-гидроопоры

Без действия внешнего магнитного поля при $H = 0$ кА/м частота настройки гидроопоры с МРТ определяется по [1-3]:

$$f_{\text{нас.}}^{H=0} = (1/2\pi) \sqrt{C_{\text{об}} / (m + m_{\text{ит}})} \quad [\text{Гц}], \quad (19)$$

где $C_{\text{об}} = C_{01}(f_{01}) = 740 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$ – статическая жёсткость МР-гидроопоры – минимальная динамическая жесткость на основной резонансной частоте при массе нагрузки в 27 кг при максимальных перемещениях в ± 4 мм (см. таблицы 1 и 2).

При внешнем магнитном поле при ($H = 252$ кА/м) частота настройки МР-гидроопоры определяется по [1-3]:

$$f_{\text{нас.}}^{H=252} = (1/2\pi) \sqrt{C_{\text{об}} / (m + m_{\text{мрт}})} \quad [\text{Гц}]. \quad (20)$$

Значения частот настроек МР-гидроопоры при $H = 0$ кА/м и $H = 252$ кА/м для температур рабочей МРЖ в 20°C, 40°C, 60°C приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Значения частот настроек МР-гидроопоры при $H = 0$ кА/м и $H = 252$ кА/м для температур температурах рабочей МРЖ в 20°C, 40°C, 60°C

Без магнитного поля (0 кА/м)			При внешнем магнитном поле (252 кА/м)		
Общие массы	Частоты настройки		Общие массы	Частоты настройки	
$m + m_{\text{ит}}(20^\circ\text{C})$	55,02 кг	18,46 Гц	$m + m_{\text{мрт}}(20^\circ\text{C})$	81,44 кг	15,18 Гц
$m + m_{\text{ит}}(40^\circ\text{C})$	51,39 кг	19,10 Гц	$m + m_{\text{мрт}}(40^\circ\text{C})$	74,39 кг	15,87 Гц
$m + m_{\text{ит}}(60^\circ\text{C})$	47,76 кг	19,81 Гц	$m + m_{\text{мрт}}(60^\circ\text{C})$	67,33 кг	16,69 Гц

При отсутствии магнитного поля в дроссельных каналах МРТ при температуре 20°C масса $m_{\text{мрт}} = 28,023$ кг меньше общей массы нагрузки, равной 55,023 кг, в 1,963 раза. Можно записать, что $m + m_{\text{мрт}} = 1,963 \cdot m_{\text{мрт}}$.

Следовательно, циклические частоты можно выразить:

$$f_{1i} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_i}{m_{\text{мрт}}(t^\circ\text{C})}} \quad \text{и} \quad f_{2i} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_i}{1,963 m_{\text{мрт}}(t^\circ\text{C})}}. \quad (21)$$

Можно сказать, что между частотами имеется соотношение $f_{i1} = 1,216 \cdot f_{2i}$.

1.5. Амплитудно-частотные характеристики МР-гидроопоры

При произведенном расчёте АЧХ МР-гидроопоры учитывалась только основная гармоника входящего вибросигнала. Гармоники более высокого порядка не учитывались.

На рисунках 4 - 7 приведены расчётные зависимости логарифмических АЧХ МР-гидроопоры от частоты возбуждения $f_{в1}$ при напряжённости магнитного поля $H = 252$ кА/м в дроссельных каналах для температур МРЖ в 20°C, 40°C и 60°C, построенные при помощи среды программирования Simulink программного пакета Matlab.

1. Амплитудно-частотные характеристики МР-гидроопоры при входном среднеквадратичном отклонении в 50 м/с² при температуре рабочей МРЖ 20°C приведены на рисунке 4.

Из амплитудно-частотных характеристик МР-гидроопоры (см. рис. 4) видно, что входной вибросигнал в виде белого шума ослабляется на 7 дБ без магнитного поля ($H = 0$ кА/м) в диапазоне частот от 25 до 42 Гц и на 10,5 дБ при внешнем магнитном поле ($H = 252$ кА/м).

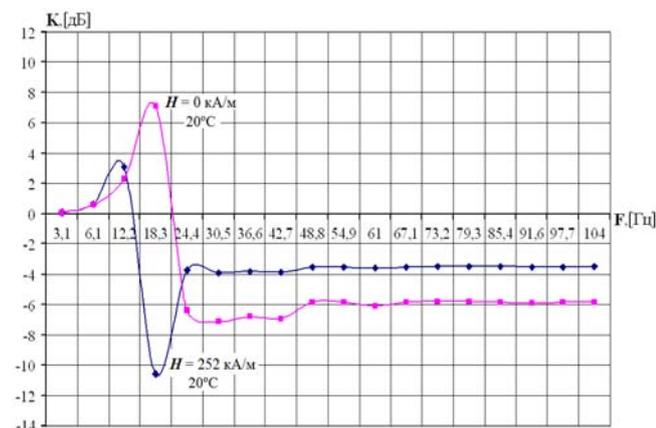


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики МР-гидроопоры при температуре рабочей МРЖ 20°C и $H = 252$ кА/м

Передаточная функция МР-гидроопоры имеет вид [1-3,7]:

$$H(s) = \frac{m_{\text{мрт}(20)}s^2 + b_{(20)}(i)s + c(i)}{(m + m_{\text{мрт}(20)})s^2 + b_{(20)}(i)s + c(i)}. \quad (22)$$

Причём при 20°C и внешнем магнитном поле ($H = 252$ кА/м) наблюдается уход резонансной частоты $f_{\text{нас}}^{H=0} = 26,173$ Гц на частоту $f_{\text{нас}}^{H=252} = 18,3$ Гц. Кроме того, при внешнем магнитном поле на АЧХ МР-гидроопоры имеется горизонтальный участок на уровне -4 дБ в диапазоне частот от 25 Гц до 100 Гц.

Данный горизонтальный участок в диапазоне частот от 25 Гц до 100 Гц можно объяснить через представление передаточных функций (4) и (22) в виде произведения передаточных функций (последовательного соединения) форсирующего и колебательного звеньев второго порядка [7]. Получаемые логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) этих последовательно соединённых звеньев, складываются, но так как результирующая АЧХ в логарифмических масшта-

бах относительно не нулевого, исходного уровня отображаются зеркально, то в полосе частот от 25 Гц до 100 Гц информация теряется. Поэтому наиболее эффективная работа МРТ наблюдается в полосе частот до 25 Гц (см. рис.4), так как наблюдается наибольший магнитореологический эффект МРЖ по выходному сигналу.

2. Амплитудно-частотные характеристики МР-гидроопоры при входном среднеквадратичном отклонении в 50 м/с² при температуре рабочей МРЖ 40°C приведены на рисунке 5.

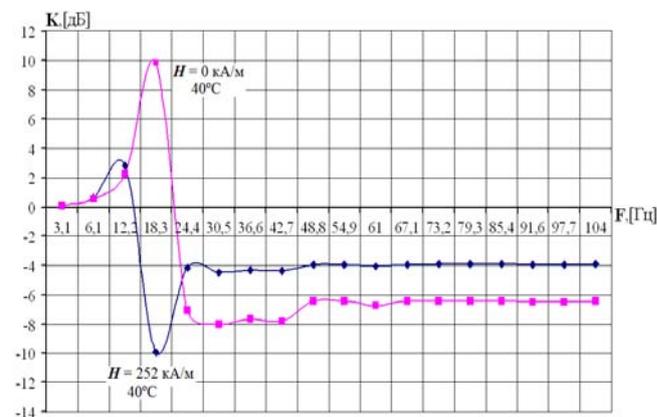


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики МР-гидроопоры при температуре рабочей МРЖ 40°C и $H = 252$ кА/м

Передаточная функция МР-гидроопоры имеет вид [1-3,7, 9]:

$$H(s) = \frac{m_{\text{мрт}(40)}s^2 + b_{(40)}(i)s + c(i)}{(m + m_{\text{мрт}(40)})s^2 + b_{(40)}(i)s + c(i)}. \quad (23)$$

Из амплитудно-частотных характеристик МР-гидроопоры (см. рис. 5) видно, что входной вибросигнал в виде белого шума ослабляется на 8 дБ без магнитного поля ($H = 0$ кА/м) в диапазоне частот от 25 до 42 Гц и на 10 дБ при внешнем магнитном поле ($H = 252$ кА/м).

Причём при 40°C и напряжённости в $H = 252$ кА/м наблюдается уход резонансной частоты $f_{\text{нас}}^{H=0} = 26,173$ Гц на частоту $f_{\text{нас}}^{H=252} = 18,3$ Гц. Кроме того, при внешнем магнитном поле на АЧХ МР-гидроопоры наблюдается горизонтальный участок на уровне -4 дБ в диапазоне частот от 25 Гц до 100 Гц.

Данный горизонтальный участок в диапазоне частот от 25 Гц до 100 Гц также объясняется через представление передаточных функций (4) и (23) в виде произведения передаточных функций форсирующего и колебательного звеньев второго порядка [7]. При сложении ЛАЧХ форсирующего и колебательного звеньев возникает прямолинейный участок на искомой АЧХ МР-гидроопоры в области высоких частот, где информация об искомой АЧХ МР-гидроопоры теряется (рис. 5). Поэтому наиболее эффективная работа МРТ также наблюдается в полосе частот до 25 Гц, так как здесь также наблюдается ещё большой магнитореологический эффект МРЖ по выходному сигналу.

3. Амплитудно-частотные характеристики МР-гидроопоры при входном среднеквадратичном отклонении в 50 м/с² при температуре рабочей МРЖ в 60°C приведены на рисунке 6.

Передаточная функция гидроопоры имеет вид [1-3, 7]:

$$H(s) = \frac{m_{\text{МРТ}(60)}s^2 + b_{(60)}(i)s + c(i)}{(m + m_{\text{МРТ}(60)})s^2 + b_{(60)}(i)s + c(i)}. \quad (24)$$

Из амплитудно-частотных характеристик МР-гидроопоры (см. рис. 6) видно, что входной вибросигнал в виде белого шума ослабляется на 9,5 дБ без магнитного поля ($H = 0$ кА/м) в диапазоне частот от 25 до 42 Гц и на 4 ÷ 5 дБ при внешнем магнитном поле (252 кА/м). Здесь при температуре рабочей МРЖ в 60°C и внешнем магнитном поле ($H = 252$ кА/м) наблюдается падение демпфирования МР-гидроопорой входного вибросигнала.

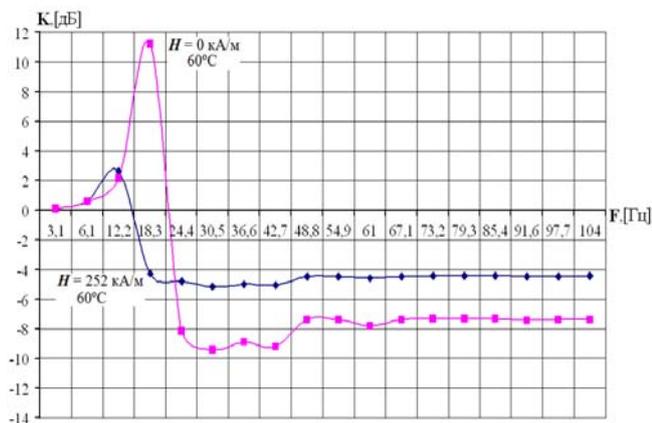


Рис.6. Амплитудно-частотные характеристики МР-гидроопоры при температуре рабочей МРЖ 60°C и $H = 252$ кА/м

Причём при 60°C и напряжённости в $H = 252$ кА/м наблюдается уход резонансной частоты $f_{\text{нас.}}^{H=0} = 26,173$ Гц на частоту $f_{\text{нас.}}^{H=252} = 18,3$ Гц. Кроме того, при внешнем магнитном поле на АЧХ МР-гидроопоры ОМГ-50 наблюдается горизонтальный участок на уровне -4,5 дБ в диапазоне частот от 20 Гц до 100 Гц.

Данный горизонтальный участок в диапазоне частот от 25 Гц до 100 Гц также объясняется через представление передаточных функций (4) и (24) в виде произведения передаточных функций форсирующего и колебательного звеньев второго порядка [7]. При сложении ЛАЧХ форсирующего и колебательного звеньев возникает прямолинейный участок на искомой АЧХ МР-гидроопоры в области высоких частот, информация об искомой АЧХ МР-гидроопоры теряется [7] (рис. 6). Поэтому и в полосе частот до 25 Гц работа МРТ менее эффективна, чем при температурах МРЖ в 20°C и 40°C, так как наблюдается потеря магнитореологического эффекта МРЖ по выходному сигналу.

4. Амплитудно-частотные характеристики МР-гидроопоры при входном среднеквадратичном отклонении в 50 м/с² при температурах 20°C, 40°C, 60°C приведены на рисунке 7.

Отличие резонансных частот АЧХ МР-гидроопоры, построенных при помощи среды программирования Simulink программного пакета Matlab, от расчётных значений, приведённых в таблице 5, можно объяснить аппроксимацией редактора Microsoft Office Excel.

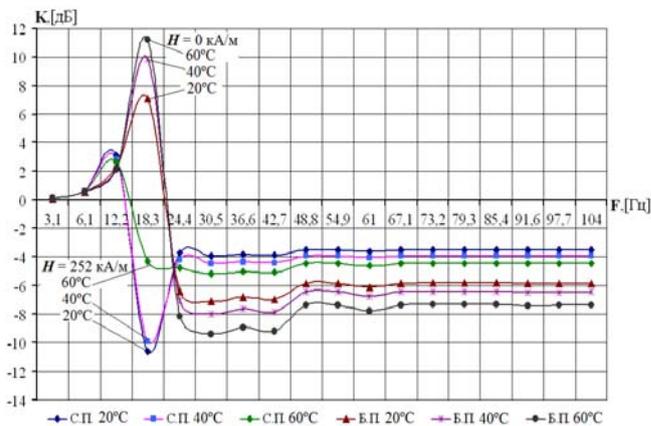


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики МР-гидроопоры при температурах рабочей МРЖ 20°C, 40°C, 60°C и $H = 252$ кА/м

1.6. Расчёт собственных частот настройки МР-гидроопоры в зависимости от напряжённости магнитного поля при температуре 20°C

При имитационном моделировании динамических характеристик МР-гидроопор с МРЖ необходимо также учитывать изменение частот настройки МР-гидроопоры в зависимости от напряжённости магнитного поля при различных температурах рабочей МРЖ в дроссельных каналах. В данном разделе приведём только расчёт собственных частот настройки МР-гидроопоры в зависимости от напряжённости магнитного поля при температуре 20°C.

В работе [3] получено выражение для приведённой массы в дроссельном канале ИТ (присоединённой инерционной массы к нагрузке МР-гидроопоры):

$$m_{\text{пр}} = \frac{\pi d^2}{4} \rho l \frac{D^4}{d^4} = \frac{\pi}{4} \rho l \frac{D^4}{d^2} = 0,7854 \rho l \frac{D^4}{d^2}. \quad (25)$$

Для примера приведём расчёт приведённых масс в дроссельных каналах МРТ гидроопоры по выражению (28) при диаметрах поршня $D = 0,076$ м и эквивалентного дроссельного канала $d = 0,007922$ м МР-демпфера ОМГ-50, рабочей объём которого заполнен МРЖ с $\rho_{\text{МЖ}} = 2950$ кг/м³ при $t^\circ C = 20^\circ C$.

Длина дроссельных каналов в зоне полюсов ВЭ МРТ $l = 15$ мм.

Приведённая масса МРТ с МРЖ и $\rho_{\text{МЖ}} = 2950$ кг/м³ при напряжённости магнитного поля $H = 0$ кА/м при 20°C равна:

$$m_{\text{пр.МЖ}} = 0,7854 \rho_{\text{МЖ}} l \frac{D^4}{d^2} = 0,7854 \cdot 2950 \cdot 0,015 \frac{(0,076)^4}{(7,922 \cdot 10^{-3})^2} = 18,475 \text{ кг} \quad (26)$$

При расчёте приведенной массы МРТ $m_{\text{МРТ}}$ в дроссельных каналах принимают усреднённый круглый радиус дроссельного канала. Усреднённый радиус дроссельного канала МР-гидроопоры определён как:

$$R_{\text{к.к1}} = \left(\sqrt{S_{\text{пк1}}/\pi} + (3,0 + 3,0) \cdot 10^{-3} \right) / 3 = (2,4 + 3,0 + 3,0) / 3 = 2,801 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (27)$$

Площадь эквивалентного дроссельного канала МР-гидропоры определяется суммой площадей двух усредненных дроссельных каналов как:

$$S_{\text{кк}} = 2S_{\text{кк1}} = 2\pi \cdot R_{\text{к.к1}}^2 = 2\pi \cdot 2,801^2 \cdot 10^{-6} = 49,306 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (28)$$

Масса рабочей МРЖ MRF-132DG в эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 50$ мм в зоне полюсов ВЭ МР-гидропоры ОМГ-50 при напряженности магнитного поля $H = 0$ кА/м и при температуре 20°C и $\rho_{\text{мж}} = 2950 \text{ кг/м}^3$ равна:

$$m_{\text{мж}}^{(H=0,20^\circ)} = \rho_{\text{мж}}^{(H=0,20^\circ)} \cdot l \cdot \pi \cdot R_{\text{к.к}}^2 = 2950 \cdot 0,05 \cdot \pi \cdot (2,801 \cdot 10^{-3})^2 = 3,636 \cdot 10^{-3} \text{ кг}. \quad (29)$$

Приведенная масса МРЖ MRF-132DG в эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 50$ мм в зоне полюсов ВЭ МРТ при напряженности магнитного поля $H = 252$ кА/м, температуре 20°C и $\rho_{\text{мж}} = 2950 \text{ кг/м}^3$ равна:

$$m_{\text{мрт.9.1}} = \frac{\eta_{9.1}^{(20^\circ)}}{\eta_{1.1}^{(20^\circ)}} \cdot 0,785 \rho_{\text{мж}} l \frac{D^4}{d^2} = 1,943 \cdot 0,785 \cdot 2950 \cdot 0,015 \frac{(0,076)^4}{(7,922 \cdot 10^{-3})^2} = 27,74 \text{ кг} \quad (30)$$

Значения приведенных масс $m_{\text{мрт}}$ в эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм в зоне полюсов ВЭ МР-гидропоры ОМГ-50 при напряженностях магнитного поля и температуре МРЖ MRF-132DG 20°C приведены в таблице 6.

Таблица 6.

Приведенные массы МР-гидропоры ОМГ-50 в эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм с МРЖ MRF-132DG в зоне полюсов ВЭ при различных напряженностях магнитного поля и температуре 20°C

H , кА/м	9	39	67	89	128	152	179	219	252
η , мПа·с, (20°)	530	710	830	880	920	950	990	1015	1030
$m_{\text{мрт}}$, кг, (20°)	14,274	19,121	22,353	23,699	24,776	25,584	26,662	27,335	27,739

В таблице 6 сведены значения приведенных масс МРТ, создающие дополнительную инерционность по относительному перемещению в эквивалентном дроссельном канале с МРЖ MRF-132DG, добавляемые к общей внешней нагрузке одной МР-гидропоры ОМГ-50.

Результирующие инерционные массы складываются из общей внешней нагрузки в 50 кг для МР-гидропоры и приведенных масс МРТ, создающих дополнительную инерционность по относительному перемещению в эквивалентном дроссельном канале с МРЖ. В результате возникает сумма масс $m + m_{\text{мрт}}$ при заданных напряженностях магнитного поля и температуре МРЖ.

В таблице 7 представлены значения общих масс $m + m_{\text{мрт}}$ МРТ МР-гидропоры ОМГ-50 с МРЖ

MRF-132DG в эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм в зоне полюсов ВЭ.

Таблица 7.

Значения общих масс МРТ МР-гидропоры ОМГ-50 в эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм с МРЖ MRF-132DG при напряженностях магнитного поля и температуре 20°C

H , кА/м	9	39	67	89	128	152	179	219	252
η , мПа·с, (20°)	530	710	830	880	920	950	990	1015	1030
$m_{\Sigma 1}$, кг, (20°)	41,274	46,121	49,353	50,699	51,776	52,584	53,662	54,335	54,739

Собственные частоты настройки МР-гидропоры с МРТ при закрытом эквивалентном дроссельном канале следующие:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{\text{об}}}{m_0}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{740 \cdot 10^3}{50}} = 19,362 \text{ [Гц]}, \quad (31)$$

Резонансная частота при открытом дроссельном канале определяется с учетом диаметров поршня и дроссельного отверстия.

Частота настройки МР-гидропоры при открытом дроссельном канале с МРЖ с $\rho_{\text{мж}} = 2950 \text{ кг/м}^3$ и $l = 15$ мм без действия внешнего магнитного поля при температуре 20°C с учетом диаметров поршня и дроссельного канала равна:

$$f_{2.мж}^{(20^\circ)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{\text{об}}}{m_0 + m_{\text{мрт}}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{\text{об}}}{m_0 + 0,7854 \rho_{\text{мж}} l D^4 / d^2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{740 \cdot 10^3}{27 + 0,7854 \rho_{\text{мж}} l (0,076)^4 / (0,007922)^2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{740 \cdot 10^3}{27 + 18,475}} = 18,505 \text{ [Гц]}. \quad (32)$$

Значения частот настройки МР-гидропоры ОМГ-50 с МРЖ MRF-132DG при открытом эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм в зоне полюсов при напряженностях магнитного поля, вычисленные по выражению (32) при температуре 20°C , представлены в таблице 8.

Таблица 8.

Частоты настройки МР-гидропоры ОМГ-50 с МРЖ MRF-132DG при открытом эквивалентном дроссельном канале длиной $l = 15$ мм при напряженностях магнитного поля и температуре 20°C

H , кА/м	9	39	67	89	128	152	179	219	252
$m_{\Sigma 1}$, кг, (20°)	64,274	69,121	72,353	73,699	74,776	75,584	76,662	77,335	77,739
f_2 , Гц (20°)	21,311	20,160	19,489	19,228	19,027	18,880	18,689	18,574	18,505

Приведенная масса МРЖ в дроссельных каналах МР-демпфера является функцией скорости ее движения, а так как скорость движения неньютоновской жидкости зависит от температуры, от наличия в ней растворенных газов и от разности давлений на входе и выходе дроссельного канала, то гидроопора существенно является нелинейным элементом. Поэтому при повышении присоединенной массы понижается собственная частота гидроопоры. Из расчетов приведенных масс МРТ следует, что с ростом напряженности внешнего магнитного поля в его открытом эквивалентном дроссельном канале численное значение собственной частоты МР-гидроопоры меняется на несколько Герц.

Заключение

В статье гидроопора с МРТ представлена электромеханическим эквивалентом, а именно, заграждающим фильтром на основе последовательного колебательного электрического контура. Приведены результаты построения АЧХ МР-гидроопоры ОМГ-50 при температурах рабочей МРЖ 20°C, 40°C, 60°C, при напряженностях магнитного поля $H = 0$ кА/м и $H = 252$ кА/м по заданной динамической жесткости МР-гидроопоры.

Представлен расчет приведенных масс в дроссельных каналах МРТ и резонансных частот МР-гидроопоры при напряженностях магнитного поля $H = 0$ кА/м и $H = 252$ кА/м.

Моделирование динамических характеристик гидроопор с МРТ в среде программирования Simulink программного пакета Matlab может рассматриваться как инструмент при разработке магнитоуправляемых гидроопор.

Литература

1. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Синев А.В., Мугин О.О. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 176 с.
2. Охулков С.Н., Плехов А.С., Титов Д.Ю., Шевырëв Ю.В. Методы и устройства ослабления вибрации электромеханических комплексов: монография; Нижний Новгород. Нижегород. гос. техн. у-т им. Р.Е. Алексеева, 2016. — 254 с.
3. Брысин А.Н., Шохин А.Е., Синев А.В. и др. Совершенствование методики испытаний систем виброзащиты. — 2012. - № 4. — С. 80-83. с инерционными преобразователями// Проблемы машиностроения и автоматизации.
4. Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Осмехин А.Н., Степанов К.С. Этапы построения математических моделей магнитоуправляемых гидроопор методом электромеханических аналогий.// Актуальные проблемы электроэнергетики: сб.ст. / НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Н. Новгород, 2018. — С. 119 - 128.

5. Чикуров Н. Г. Синтез математических моделей технических систем методом электроаналогий.// Вестник УГАТУ, Уфа. — 2009. - Т.12, № 2. - С. 156 -165.

6. Гордеев Б.А., Любимов А.К., Охулков С.Н., Титов Д.Ю., Ермолаев А.И. Влияние входного виброускорения широкополосной случайной вибрации на амплитудно-частотные характеристики гидроопор // Вестник машиностроения. — 2019. - № 6. - С. 62-67.

7. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. Учеб. для машиностроительных вузов. - М.: Машиностроение, 1976. - 423 с.

8. Дружинский И. А. Механические цепи. - Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1977. - 240 с.

9. Беляев Е.С., Ермолаев А.И., Титов Е.Ю., Тумаков С.Ф.. Магнитореологические жидкости: технологии создания и применение: монография / Е.С. Беляев [и др.]; под ред. А.С. Плехова. - Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2017. — 94 с. ISBN 978-5-502-00963-8.

10. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. Справочное пособие. Издание 2-е, переработанное. - М.: Машиностроение, 1971. - С. 672.

Сведения об авторах

Гордеев Борис Александрович, доктор техн. наук, профессор, Главный научный сотрудник Института проблем машиностроения Российской академии наук (ИПМ РАН); профессор Нижегородского Государственного архитектурно-строительного университета (ННГАСУ),

603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85

Тел.: (831) 432 - 23 - 56; факс (831) 432 - 23 - 40.

E-mail: gord349@mail.ru.

Охулков Сергей Николаевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории виброзащиты машин ИПМ РАН, доцент кафедры “Теоретическая и общая электротехника” НГТУ,

603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85

E-mail: oxulkovs@mail.ru.

Титов Дмитрий Юрьевич, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудования, электропривода и автоматики» НГТУ им. Р.Е. Алексеева,

603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24.

Ермолаев Артём Игоревич, м.н.с. лаборатории «Виброзащита машин» ИПФ РАН, 603024, г. Н. Новгород, ул. Белинского, д. 85.

E-mail: acidwolfvx@rambler.ru.

Ванягин Алексей Владимирович, ведущий электроник «Институт прикладной физики Российской академии наук»(ИПФ РАН),

603950 г. Н. Новгород, ул. Ульянова д. 46.

Тел.: (831)418-90-84.

E-mail: e678xk@mail.ru