



В. П. Дедов
Г. М. Тригубович

СНИИГТИМС, НОВОСИБИРСК
СНИИГТИМС, НОВОСИБИРСК

МЕХАНИКА ЖИДКОСТНОГО МИКРОСЕЙСМОМЕТРА: ИНЖЕНЕРНАЯ ТРАКТОВКА

АННОТАЦИЯ. Представлено подробное математическое описание первичного механического коэффициента преобразования для жидкостного микросейсмометра. Материал предназначен для использования в инженерных расчётах.

ВВЕДЕНИЕ. В разведочной технологии АНЧАР, как известно, применяют высокочувствительные жидкостные микросейсмометры. Принципиальная механическая схема такого прибора представлена на рис. 1. В защитном корпусе жестко зафиксированы сосуды V_1 и V_2 , имеющие каждый по одной упруго-податливой стенке мембранного типа. Полости V_1 и V_2 сообщаются тонким соединительным каналом. Последний может быть прямолинейным, как в [12] и на рис. 1, или криволинейным, как в [4]. (Без существенной потери общности мы будем рассматривать прямолинейный вариант, а в конце статьи укажем очень простой переход к случаю с криволинейным каналом.)

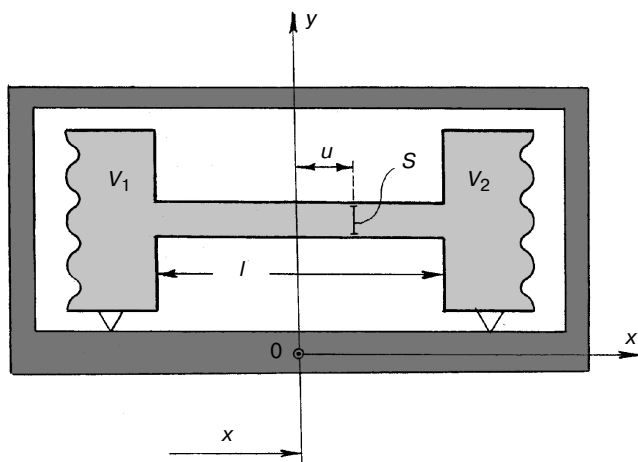


Рис. 1. Схема жидкостного микросейсмометра: сосуды V_1 и V_2 снабжены упругими мембранными стенками и соединены тонким каналом $\{l, S\}$. Внутренний объём системы заполнен рабочей жидкостью класса электролитов. Микросейсмывы приводят к перетеканию жидкости в канале. Последнее преобразуется в электрический выходной сигнал посредством специальных электродов (на рисунке не показаны)

Внутри канала встраивают систему измерительных электродов. Обычно это платиновые штыри и сетки. Прочие детали изготавливают из химически стойких резин и пластмасс. Объемы V_1 и V_2 и соединительный канал сплошь заполняют жидкотекучим электролитом. Под воздействием микросейсмических возмущений электролит приходит в знакопеременное движение. При этом на электродах появляется электрический сигнал, по которому и судят о входных микросейсмах. Фундаментальная электрохимическая теория формирования указанного сигнала изложена в [1, 3, 5, 6].

Механическую же часть модели разработчики дали в [1] общим планом, показав, что перемещение жидкости в соединительном канале и ускорение корпуса связаны в первом приближении линейным дифференциальным уравнением второго порядка. Из этого уравнения авторы получили выражение для метрологически важной амплитудно-частотной характеристики, которая обозначена в [1] термином “механический коэффициент преобразования”.

В настоящей статье мы представляем более подробное механико-математическое описание жидкостного микросейсмометра, адаптированное к инженерным приложениям.

В качестве искоемых выходных величин взяты не только перемещение жидкости в соединительном канале, но и её скорость и ускорение. А за входные возмущения приняты по отдельности перемещение, скорость и ускорение корпуса.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

t - время; $0x$ - ось чувствительности прибора (определяется прямой, проходящей через центры устьев соедини-

тельного канала); ρ и μ - плотность и динамическая вязкость рабочей жидкости; l и S - длина и площадь поперечного сечения соединительного канала (форма сечения, вообще говоря, может быть произвольной); c - объёмная жесткость, создаваемая мембранами (важнейшая метрологическая константа прибора, которую следует определять путём целевого лабораторного эксперимента); $p = \alpha + i\omega$ - комплексная частота, выступающая у нас в качестве параметра преобразования Лапласа; $\{x(t), \dot{x}(t) = dx/dt, \ddot{x}(t) = d^2x/dt^2\}$ и $\{X(p), \dot{X}(p), \ddot{X}(p)\}$ - оригиналы и изображения по Лапласу перемещения, скорости и ускорения прибора, относящиеся к его оси чувствительности; $\{u(t), \dot{u}(t) = du/dt, \ddot{u}(t) = d^2u/dt^2\}$ и $\{U(p), \dot{U}(p), \ddot{U}(p)\}$ - оригиналы и изображения усреднённых по площади S значений перемещения, скорости и ускорения жидкости в соединительном канале.

Прочие обозначения будут введены по ходу изложения.

ДОПУЩЕНИЯ

1. Примем, что доминирующую роль в нашей задаче играет движение жидкости в канале $\{l, S\}$ и что динамическими эффектами в объёмах V_1 и V_2 можно пренебречь. С энергетической точки зрения это допущение оправдано, если сечение S невелико по сравнению с площадью мембран. В такой постановке расчётная сейсмическая масса жидкости составляет величину

$$m = \rho l S. \quad (1)$$

2. Будем считать, что поток жидкости в соединительном канале неизменно сохраняет ламинарность. В таком случае из обобщенного закона Пуазейля [11, § 97] следует, что сила вязкого трения, действующего на массу m жидкости в канале, однозначно определяется скоростью u течения и составляет величину

$$F = -\frac{8\pi}{k} \mu l \dot{u}, \quad (2)$$

где k - безразмерный коэффициент, зависящий от формы сечения S , а в нашем случае - ещё и от гидравлического сопротивления электродных штырей и сеток. Величину k лучше всего определять путём целевых испытаний макета соединительного канала со встроенными электродами. В отсутствие электродов, согласно [11], для круглого сечения получается $k = 1$, а для сечения эллиптической формы с полуосями a и b имеем $k = 2ab/(a^2 + b^2)$.

3. Будем полагать, что собственная масса мембран пренебрежимо мала. Это допущение значительно упрощает выкладки, но остаётся, строго говоря, сомнительным в смысле метрологической чистоты.

Кардинальное решение проблемы состоит, как нам кажется, в следующем. Мембраны в сосудах V_1 и V_2 заменяем жёсткими крышками, а в качестве упругих элементов используем газовые пузырьки, впрыснутые внутрь сосудов. Этот вариант имеет ряд потенциальных преимуществ. Но вместе с тем он содержит одну досадную тех-

ническую трудность. Она заключается в предотвращении перетекания газа из сосуда в сосуд вследствие наклонов и опрокидываний прибора, неизбежных при его эксплуатации.

УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КАНАЛЕ

На массу m жидкости действуют упомянутая сила трения F и упругая сила мембран, которую находят по формуле

$$T = -cS^2u. \quad (3)$$

Других сил, влияющих на динамику движения жидкости в канале, нет. Следовательно, искомое уравнение движения имеет вид

$$m(\ddot{x} + \ddot{u}) = F + T, \quad \text{или} \\ \ddot{u} + 2n\dot{u} + \omega_0^2u = -\ddot{x}, \quad (4)$$

где $2n = \frac{8\pi\mu}{\rho k S}; \quad (5)$

$$\omega_0^2 = \frac{cS}{\rho l}. \quad (6)$$

Уравнение (4), эквивалентное полученному в [1], является стандартным. Оно описывает работу различных механических, электрических и радиотехнических устройств. В приложении к обычным твердотельным сейсмометрам и акселерометрам это уравнение можно считать довольно точным. Но для жидкостных приборов его следует понимать как первое приближение к действительности в рамках введённых допущений.

Решения уравнения (4) во всем их многообразии прекрасно освещены в общедоступной литературе [9, 13]. Мы же здесь сочли целесообразным, исходя из (4), дать описание сейсмометра в терминах теории автоматики, благодаря чему изложение становится более экономным и стройным.

Прежде всего напомним, что по теории Лапласа [7] при нулевых начальных данных имеют место соотношения:

$$\dot{X}(p) = pX(p); \quad \ddot{X}(p) = p^2X(p); \\ \dot{U}(p) = pU(p); \quad \ddot{U}(p) = p^2U(p). \quad (7)$$

Следовательно, изображение уравнения (4) имеет вид

$$U(p)(p^2 + 2np + \omega_0^2) = -p^2X(p). \quad (8)$$

НЕОБХОДИМЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ АВТОМАТИКИ [2, 9]

Предстоящие операции над уравнением (8) требуют воспроизвести как минимум следующие понятия и термины, фигурирующие в теории автоматики:

1. Отношение изображения выходного сигнала к изображению входного сигнала называется передаточной функцией данного прибора. Обобщённо всякую передаточную функцию принято обозначать символом $W(p)$.

2. Положив $p = i\omega$ (чисто мнимый случай), получают частотную функцию $W(i\omega)$ того же прибора.* При некоторой “масштабной” частоте $\omega = \omega_M$ частотная функция обращается в действительное (именованное или отвлеченное) число M , т. е. получается ситуация

$$W(i\omega_M) = M. \quad (9)$$

Величина M , своя для каждого прибора, является его функциональным масштабом. Если прибор не имеет вещественного масштаба, то такой прибор не может быть средством измерения данного входного сигнала.

3. Выражение

$$\bar{W}(i\omega) = \frac{1}{M} W(i\omega) \quad (10)$$

представляет собой нормированную частотную функцию. Её обычно расчлняют на действительную и мнимую части:

$$\bar{W}(i\omega) = \text{Re}(\omega) + i\text{Im}(\omega). \quad (11)$$

4. Фазово-частотную характеристику (ФЧХ), которая, как известно, относится к важнейшим динамическим характеристикам любого измерительного прибора, находят по формуле

$$\varphi(\omega) = -\text{arctg} \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)}. \quad (12)$$

5. Столь же просто получают и другую характеристику первостепенной важности, а именно - нормированную (т. е. безразмерную) амплитудно-частотную характеристику (БАЧХ):

$$A(\omega) = |\bar{W}(i\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)}. \quad (13)$$

Эту характеристику можно обратить в натуральную АЧХ умножением на масштаб M .

6. Очевидно, всегда должны выполняться условия:

$$A(\omega = \omega_M) = 1; \quad (14)$$

$$\left[\frac{d}{d\omega} A(\omega) \right]_{\omega=\omega_M} = 0. \quad (15)$$

Иначе говоря, характеристика $A(\omega)$ должна обнаруживать максимум при $\omega = \omega_M$, а в более или менее широкой окрестности частоты ω_M должно быть

* В справочнике [10, с. 237] эта функция проходит как “комплексная частотная характеристика (КЧХ)”.

$$A(\omega) \approx 1. \quad (16)$$

Нулевая производная (15) на “масштабной” частоте, как и вещественный масштаб (9), является необходимым критерием принципиальной пригодности прибора для измерения данного входного сигнала.

7. Формула (14) означает, что на “масштабной” частоте прибор свободен от динамических искажений амплитуды. На иных частотах, т. е. при $\omega \neq \omega_M$, неизбежны так называемые динамические амплитудные погрешности. Они имеют следующее общее выражение:

$$\delta(\omega) = |\bar{W}(i\omega)| - 1 = A(\omega) - 1. \quad (17)$$

Существует и другой тип динамических погрешностей. Это амплитудно-фазовые погрешности. Они порождаются не только динамическими “забросами” или “завалами” амплитуды, как у $\delta(\omega)$, но и фазовым сдвигом. Общее выражение для погрешностей этого сорта имеет вид

$$\varepsilon(\omega) = |\bar{W}(i\omega) - 1|. \quad (18)$$

У одного и того же прибора обычно получается $\varepsilon(\omega) > \delta(\omega)$ или даже $\varepsilon(\omega) \gg \delta(\omega)$. Погрешности $\varepsilon(\omega)$ необходимо учитывать в случае нескольких параллельно работающих (преимущественно разнородных) приборов, выходные сигналы которых подвергаются в текущем времени взаимному сравнению, суммированию и иным операциям.

Наш дальнейший анализ мы и ограничим отысканием перечисленных выше функций и характеристик, вытекающих из уравнения (8). Полученный материал адресован к сейсмоприёмникам со сверхкритическим демпфированием, каковыми, скорее всего, и являются жидкостные приборы.

СЕМЕЙСТВО ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ

Из (8) следует:

$$\frac{U(p)}{X(p)} = W_1(p), \quad (19)$$

где

$$W_1(p) = -\frac{p^2}{p^2 + 2np + \omega_0^2}. \quad (20)$$

Последнее выражение представляет собой передаточную функцию от перемещения $x(t)$ корпуса прибора к перемещению $u(t)$ жидкости в соединительном канале.

Через (20) можно очень просто выразить восемь остальных передаточных функций для парных комбинаций из трёх входных сигналов $\{x, \dot{x}, \ddot{x}\}$ и трёх выходных сигналов $\{u, \dot{u}, \ddot{u}\}$. Для этого преобразуем (19) к виду

$$\frac{p^a U(p)}{p^b X(p)} = p^{a-b} W_1(p). \quad (21)$$

**Матрица передаточных функций
для уравнения (8).**

(Опорная функция W_1 имеет выражение (20))

Вход \ Выход	x ($b = 0$)	\dot{x} ($b = 1$)	\ddot{x} ($b = 2$)
u ($a = 0$)	W_1	$W_2 = \frac{1}{\rho} W_1$	$W_3 = \frac{1}{\rho^2} W_1$
\dot{u} ($a = 1$)	$W_4 = \rho W_1$	W_1	$W_2 = \frac{1}{\rho} W_1$
\ddot{u} ($a = 2$)	$W_5 = \rho^2 W_1$	$W_4 = \rho W_1$	W_1

Числа a и b будем независимо выбирать каждое из триады $\{0, 1, 2\}$. Помня (7), получим девять сочетаний, охватывающих все пары входных и выходных сигналов. Соответствующие передаточные функции представлены в таблице.

Оказалось, что девять возможных сочетаний входных и выходных сигналов обслуживаются всего лишь пятью передаточными функциями. Из них только три (W_1, W_2, W_3) удовлетворяют критериям (9) и (14 - 16) и, следовательно, имеют перспективу практического приложения к жидкостным приборам. Далее мы и займемся этими тремя функциями.

Случай 1. Передаточная функция имеет вид (20).

Как видно из таблицы, эта функция связывает между собой перемещения x и u , скорости \dot{x} и \dot{u} , а также ускорения \ddot{x} и \ddot{u} . Вариант с перемещениями соответствует режиму классического сейсмометра.

Перейдем от передаточной функции (20) к частотной функции:

$$W_1(i\omega) = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2n\omega}. \quad (22)$$

В данном случае масштабная частота и масштаб прибора составляют величины $\omega_M \rightarrow \infty$ и $M = -1$. Нормированная частотная функция отличается от (22) только знаком:

$$\bar{W}_1(i\omega) = -\frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2n\omega} = \text{Re}_1(\omega) + i\text{Im}_1(\omega),$$

где
$$\text{Re}_1 = -\frac{\omega^2(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2};$$

$$\text{Im}_1 = \frac{2n\omega^3}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}.$$

Теперь по формулам (12, 13, 17) находим ФЧХ, БАЧХ и погрешность $\delta_1(\omega)$:

$$\varphi_1(\omega) = \arctg \frac{2n\omega}{\omega_0^2 - \omega^2};$$

$$A_1(\omega) = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}};$$

$$\delta_1(\omega) = \left| \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}} - 1 \right|.$$

Графики функций $A_1\left(\frac{\omega}{\omega_0}; \frac{n}{\omega_0}\right)$ и $\delta_1\left(\frac{\omega}{\omega_0}; \frac{n}{\omega_0}\right)$ пред-

ставлены на рис. 2 и 3. Несомненный практический интерес имеет область частот, где погрешность δ_1 не превышает заданного предельного значения $\hat{\delta}$. При $n \geq \omega_0$ и $\hat{\delta} \ll 1$ эту область можно определять по приближённой формуле

$$\omega \geq \sqrt{\frac{2n^2 - \omega_0^2}{\hat{\delta}}} = \omega_0 \sqrt{\frac{2n^2/\omega_0^2 - 1}{\hat{\delta}}}.$$

Обратившись к (18), находим амплитудно-фазовую погрешность:

$$\varepsilon_1(\omega) = |\bar{W}_1(i\omega) - 1| = \sqrt{\frac{\omega_0^4 + 4n^2\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}}.$$

Область частот, где погрешность ε_1 не превышает заданного допустимого значения $\hat{\varepsilon}$, приближенно выражается как

$$\omega \geq \frac{2n}{\hat{\varepsilon}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{\omega_0^4}{4n^4}}}.$$

Случай 2

$$W_2(p) = \frac{1}{p} W_1(p) = -\frac{p}{p^2 + 2np + \omega_0^2}. \quad (23)$$

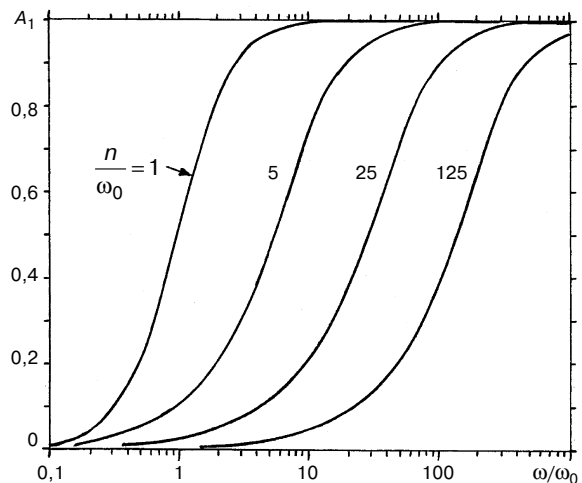


Рис. 2. Графики нормированных амплитудно-частотных характеристик $A_1(\omega) = |W_1(i\omega)|$ при критическом ($n = \omega_0$) и сверхкритическом ($n > \omega_0$) демпфировании

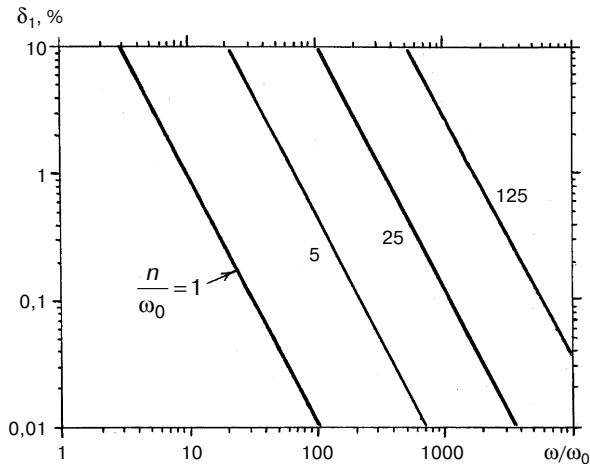


Рис. 3. Графики амплитудной динамической погрешности $\delta_1(\omega, n)$

Эта передаточная функция фигурирует во многих прикладных задачах. В частности, она используется для описания интегрирующих акселерометров, входящих в системы инерциальной навигации. В нашем случае функция (23) связывает измеряемую скорость \dot{x} корпуса прибора с перемещением u жидкости в соединительном канале, а также ускорение \ddot{x} со скоростью \dot{u} .

По приведённым выше общим формулам находим:

$$W_2(i\omega) = -\frac{i\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2n\omega};$$

$$\omega_M = \omega_0; \quad M = -\frac{1}{2n};$$

$$\bar{W}_2(i\omega) = \frac{4n^2\omega^2 + i2n\omega(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2};$$

$$\varphi_2(\omega) = -\text{arctg} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2n\omega};$$

$$A_2(\omega) = \frac{2n\omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}}.$$

Иллюстративные графики последней характеристики представлены на рис. 4. Амплитудная погрешность $\delta_2(\omega) = 1 - A_2(\omega)$ не превышает заданного значения $\hat{\delta}$ в полосе частот

$$\omega_H \leq \omega \leq \omega_B,$$

где
$$\omega_{H,B} = \omega_0 \sqrt{\theta \mp \sqrt{\theta^2 - 1}};$$

$$\theta = 1 + 2 \frac{n^2}{\omega_0^2} \left[\frac{1}{(1 - \hat{\delta})^2} - 1 \right].$$

Что касается амплитудно-фазовой погрешности, то она в данном случае имеет выражение

$$\varepsilon_2(\omega) = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}}.$$

Верхняя ω_B и нижняя ω_H границы полосы рабочих частот при заданной допустимой погрешности $\hat{\varepsilon}$ определяются по формуле:

$$\omega_{B,H} = \omega_0 \sqrt{b \pm \sqrt{b^2 - 1}},$$

где
$$b = 1 + 2 \frac{n^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{\hat{\varepsilon}^2}{1 - \hat{\varepsilon}^2}.$$

Случай 3

$$W_3(p) = \frac{1}{p^2} W_1(p) = -\frac{1}{p^2 + 2np + \omega_0^2}. \quad (24)$$

Это передаточная функция классического акселерометра. Из неё следует:

$$W_3(i\omega) = -\frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2n\omega};$$

$$\omega_M = 0; \quad M = -\frac{1}{\omega_0^2};$$

$$\bar{W}_3(i\omega) = \omega_0^2 \frac{\omega_0^2 - \omega^2 - i2n\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2};$$

$$\varphi_3(\omega) = \text{arctg} \frac{2n\omega}{\omega_0^2 - \omega^2};$$

$$A_3(\omega) = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}}.$$

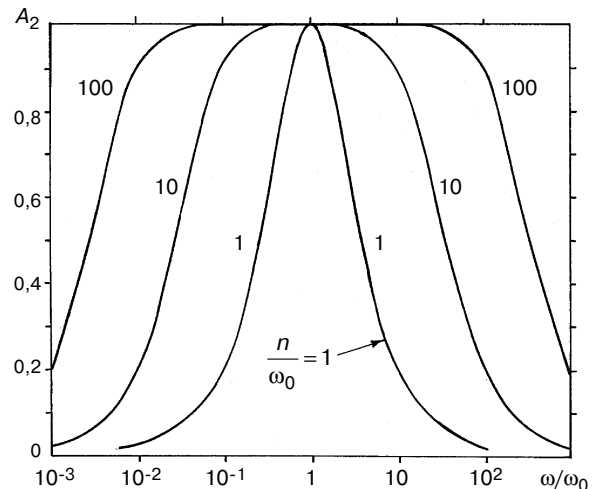


Рис. 4. Безразмерные амплитудно-частотные характеристики для передаточной функции $W_2(p)$

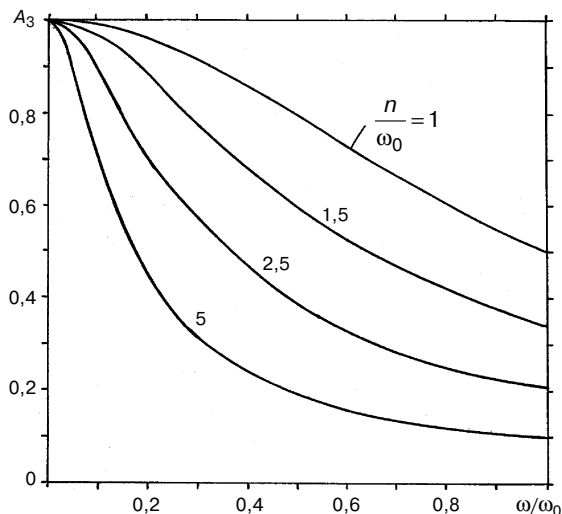


Рис. 5. Графики безразмерных АЧХ в случае передаточной функции $W_3(p)$ круто падают с увеличением демпфирования. Соответственно возрастают динамические погрешности прибора, работающего в режиме акселерометра

Графики последней функции представлены на рис. 5. Полосы рабочих частот при допустимых амплитудной $\hat{\delta}$ и амплитудно-фазовой $\hat{\epsilon}$ погрешностях выражаются следующими формулами:

$$0 \leq \omega \leq \omega_0 \sqrt{\sqrt{B^2 + \xi} - B},$$

где $B = 2 \frac{n^2}{\omega_0^2} - 1; \quad \xi = \frac{1}{(1 - \hat{\delta})^2} - 1,$

и $0 \leq \omega \leq \omega_0 \sqrt{\sqrt{h^2 + q} - h},$

где $h = 2 \frac{n^2}{\omega_0^2} + q; \quad q = \frac{\hat{\epsilon}^2}{1 - \hat{\epsilon}^2}.$

Рассмотренные передаточные функции и их производные характеристики, отражающие перекрестные связи входных и выходных параметров, могут быть использованы при разработке новых и анализе уже существующих жидкостных микросейсмометров.

Несколько слов о невостребованных передаточных функциях $W_4(p)$ и $W_5(p)$. Первая из них (W_4) имеет “масштабную” частоту $\omega_M = \omega_0$ и масштаб $M = \frac{\omega_0^2}{2n}$, но не удовлетворяет требованию (15) нулевой производной. А вторая (W_5) вообще лишена вещественного масштаба. Так что обе эти функции не представляют метроло-

гического интереса. Но они, тем не менее, выражают существующую математическую зависимость соответствующих сигналов и могут быть полезны в проблеме помехозащиты приборов.

И наконец, как обещано, о приборах, имеющих криволинейный соединительный канал. Передаточные функции таких приборов получаем простым умножением представленных выше передаточных функций $W_1(p), \dots, W_5(p)$ на безразмерное число $\lambda = l_0/l$, где l и l_0 - соответственно длина канала и кратчайшее расстояние между его устьями. Очевидно, тот же множитель λ должно ввести в частотные функции и функциональные масштабы. Что же касается нормированных частотных функций, а также БАЧХ, ФЧХ и погрешностей δ и ϵ , то их выражения остаются прежними.

Авторы искренне благодарны Б. М. Графову и А. Е. Сунцову, любезно указавших на ряд первоисточников и приславших несколько из них.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов О. К., Графов Б. М., Ермолин В. И., Исхаков И. Х., Нигматуллин Р. Ш., Новицкий М. А., Сиротинский Ю. В., Федоров С. А.*, 1978, Электрохимические приемники механических колебаний и возможность их использования в сейсмометрии: Сейсмические приборы, **11**, 203 - 208.
2. *Васильев Д. В., Чуич В. Г.*, 1967, Системы автоматического управления: М., Высшая школа.
3. *Введение в молекулярную электронику.* Под ред. Н. С. Лидоренко: М., Энергоатомиздат, 1984.
4. *Графов Б. М., Новицкий М. А., Сиротинский Ю. В., Арутюнов С. Л., Лошкарев Г. Л., Шалыпин Ю. К.* Кондуктометрический датчик колебаний: Патент RU 2055322, 1993/1996.
5. *Графов Б. М.*, 1967, К расчету диффузионного потока на вибрирующий электрод: Электрохимия, **3**, **8**, 935 - 940.
6. *Графов Б. М.*, 1968, О влиянии периодически изменяющегося во времени гидродинамического потока на предельный диффузионный поток: Электрохимия, **4**, **5**, 542 - 545.
7. *Дёч Г.*, 1965, Руководство по практическому применению преобразования Лапласа: М., Наука.
8. *Лойцянский Л. Г., Лурье А. И.*, 1955, Курс теоретической механики, т. 2. Динамика: М., ГИТТЛ.
9. *Розов Н. Х.*, 1984, Передаточная функция: Математическая энциклопедия, т. 4: М., Советская энциклопедия, 240 - 241.
10. *Сейсморазведка.* Справочник геофизика, книга 1: М., Недра, 1990.
11. *Сивухин Д. В.*, 1979, Общий курс физики, т. 1, Механика: М., Наука.
12. *Сиротинский Ю. В., Графов Б. М., Новицкий М. А., Казаринов В. Е., Арутюнов С. Л., Гафаров Н. А., Карнаухов С. М., Кальвин И. А.* Трехкомпонентный приемник акустических колебаний: Патент RU 2128850, 1996/1999.
13. *Тимошенко С. П.*, 1959, Колебания в инженерном деле: М., Физматгиз.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Владимир Петрович ДЕДОВ - ведущий научный сотрудник ФГУП “СНИИГТиМС”, кандидат техн. наук.

Георгий Михайлович ТРИГУБОВИЧ - заместитель генерального директора ФГУП “СНИИГТиМС” по науке, доктор техн. наук.