

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 550.839

Л. Д. Гик

*(Новосибирск)***КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМОПРИЕМНИКОВ  
БЕЗ НАРУШЕНИЯ ИХ МЕХАНИЧЕСКОЙ СВЯЗИ  
С ИССЛЕДУЕМЫМ ОБЪЕКТОМ**

Проанализированы методы высокоточного контроля параметров сейсмоприемников, реализация которых допустима без снятия их с исследуемого объекта, что крайне желательно при проведении сейсмического мониторинга. Сделан вывод о том, что оптимальным является метод косвенных испытаний, при котором в качестве испытательного (возмущающего) воздействия и контролируемого отклика используются электрические сигналы. Доказывается, что таким путем могут быть определены чувствительность, собственные частоты и добротности как сейсмической системы, так и установочного резонанса электродинамического сейсмоприемника. Показано, что погрешность измерения в значительной степени определяется точностью компенсации чисто электрического импеданса сейсмоприемника. Предлагается удобный для практики вариант такой схемы. Анализ показал, что погрешности измерения данного метода легко могут быть сведены к величине менее 1 %.

В настоящее время при решении ряда задач сейсмологии, например мониторинга малых вариаций состояния среды, необходимо осуществлять измерение сейсмических сигналов с повышенной точностью. Между тем нестабильности характеристик самих сейсмоприемников (в дальнейшем СП), неизбежно возникающие под влиянием изменения температуры и других факторов, приводят к появлению погрешностей, ограничивающих точность измерения. Преодоление этого отрицательного явления возможно методом периодического контроля их параметров и введения соответствующих поправок. Особый интерес при решении задач мониторинга (а также некоторых других) представляют такие методы контроля, реализация которых возможна без нарушения жесткого контакта между сейсмоприемником и исследуемым объектом (почвой, постаментом, скважиной). Действительно, снятие прибора с объекта для установки на вибростенде или испытание иным механизмом часто бывает затруднительно, а в ряде случаев просто невозможно. Кроме того, приходится учитывать, что любое перемещение неизбежно изменяет условия работы прибора, а это ведет к изменению его характеристик тем больше, чем ниже собственная частота прибора. В результате неизбежно возникают погрешности. Участие в практическом решении ряда задач сейсмического мониторинга и наличие многолетнего опыта выполнения высоко-

точных измерений механических колебаний [1, 2] послужили причиной выполнения данной работы.

Не вполне очевидным (требующим уточнения) является вопрос о том, какие именно параметры СП определяют точность измерения в конкретных задачах сейсмического мониторинга. Измеряемой (входной) величиной может быть либо колебательное смещение  $u$ , либо его производные по времени – скорость  $u'$  или ускорение  $u''$ . Выходная величина – электрическое напряжение  $U_s = Su_m$ . Здесь  $U_s$  – функция электрического,  $u_m$  – механического (кинематического) сигналов;  $S$  – чувствительность, или в иной терминологии электромеханический коэффициент. В данной работе ограничимся рассмотрением электродинамических преобразователей (в дальнейшем ЭД), электрический сигнал которых пропорционален не смещению, а скорости чувствительного элемента, что выражается как  $S_{u'} = U_s/u'$ . Измеряемый механический сигнал  $u_m$  является изменяющейся во времени функцией, а значит, и обладает совершенно определенным частотным спектром. Поэтому в случае ограниченной частотной полосы измерительного прибора (что имеет место всегда) необходимо измерять чувствительность  $S$  не как константу, а как частотную функцию  $S(\omega)$ . Попытаемся обосновать типичный вид частотной характеристики СП.

Эквивалентную механическую систему СП можно представить так, как показано на рис. 1 [1]. Масса сейсмической системы  $m_{CC}$  с помощью пружины  $w_{CC}$  соединена с корпусом, обладающим массой  $m_k$ . Корпус обычно жестко устанавливается на постаменте (П), совершающем движение с измеряемым колебательным смещением  $u_1$ . В действительности невозможно выполнить механическую связь прибора с постаментом абсолютно жесткой: место соединения всегда будет обладать некоторой упругостью, что показано на рис. 1 в виде пружины  $w_{KP}$ , связывающей корпус СП с постаментом. Учет вязкого сопротивления, всегда имеющего место в любых реальных механизмах, изображен на рисунке в виде двух поршней:  $h_{CC}$  – демпфирующего движение массы относительно корпуса,  $h_{KP}$  – демпфирующего движение корпуса относительно постаumenta. Таким образом, эквивалентная схема СП представляет собой две последовательно соединенные механические колебательные системы (резо-

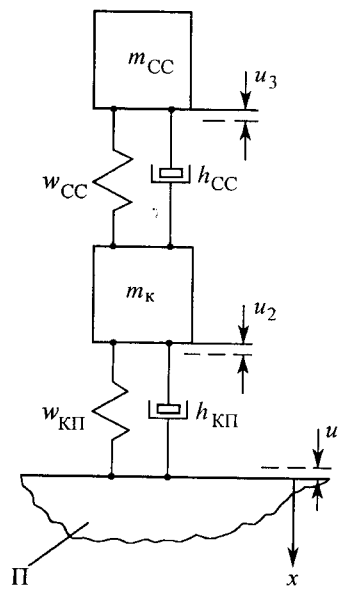


Рис. 1. Эквивалентная механическая система сейсмоприемника, установленного на исследуемом объекте:  $m_{CC}$ ,  $w_{CC}$  и  $h_{CC}$  – масса, пружина и демпфер сейсмической системы;  $m_k$  – масса корпуса, включая (в общем случае) «присоединенную» массу объекта;  $w_{KP}$  – эквивалентная упругость контактного соединения корпуса с объектом;  $h_{KP}$  – эквивалентный демпфер контактного соединения корпуса с объектом; П – постамент, на котором установлен сейсмоприемник (в случае полевых измерений это может быть верхний слой почвы);  $u_1$  и  $u_2$  – колебательные смещения постаumenta и корпуса в абсолютной (инерциальной) системе координат;  $u_3$  – колебательное смещение сейсмической массы относительно корпуса

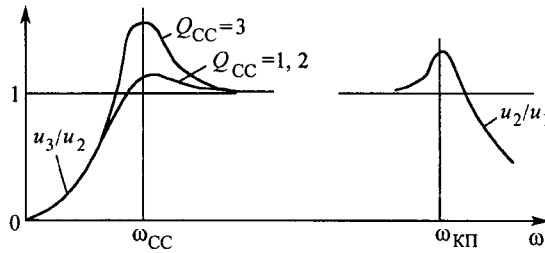


Рис. 2. Частотная характеристика системы рис. 1:  $\omega_{СС} = \sqrt{(w_{СС}/m_{СС})}$  – частота резонанса сейсмической системы;  $\omega_{КП} = \sqrt{(w_{КП}/m_{к})}$  – частота «установочного» резонанса (корпуса относительно постамент);  $Q_{СС}$  – добротность сейсмической системы (величина, обратная коэффициенту демпфирования)

наторы). Эквивалентная схема рис. 1 не учитывает распределенные массы сейсмической пружины, которые могут быть причиной резонансных искажений на повышенных частотах. Согласно нашему опыту [1], при малой величине массы пружин (по сравнению с массой сейсмической системы) эти искажения проявляются слабо, причем в узкой полосе частот. По этой причине они несущественно искажают импульсный сейсмический сигнал.

Фактором, существенно упрощающим дальнейший анализ, является то обстоятельство, что корпус обычно обладает значительно большей массой, чем сейсмическая система ( $m_{к} \gg m_{СС}$ ). Это дает возможность с достаточной точностью независимо рассматривать прохождение измеряемого сигнала  $u$  от постамента к корпусу СП и далее к сейсмической массе. Воспользуемся свойствами механических резонаторов как частотных фильтров [2]. Итак, при возникновении колебательного движения постамента амплитудой  $u_1$  и круговой частотой  $\omega = 2\pi f$  (где  $f$  – обычная циклическая частота) масса корпуса  $m_{к}$  должна прийти в движение с той же частотой  $\omega$  и амплитудой  $u_2$ , равной

$$u_2 = u_1 / (1 - (\omega/\omega_{КП})^2 - 2i(1/Q_{КП})\omega/\omega_{КП}). \quad (1)$$

Здесь  $\omega_{КП} = \sqrt{(w_{КП}/m_{к})}$  – собственная частота резонатора корпус–постамент;  $Q_{КП} = 2\sqrt{m_{к}w_{КП}}/h$  – его добротность (величина, обратная степени успокоения);  $i = \sqrt{(-1)}$  – мнимая единица. Выражение (1) показывает, что корпус СП, упруго связанный с постаментом, представляет собой фильтр низких частот второго порядка. Перечислим свойства такого фильтра: 1) слабое влияние на спектральные компоненты тех сигналов, частоты которых лежат ниже его собственной частоты  $\omega_{КП}$  (чем сильнее неравенство  $\omega \ll \omega_{КП}$ , тем ближе выходная величина резонатора  $u_2$  к входной  $u_1$ ); 2) квадратичное ослабление спектральных компонент, частоты которых превышают собственную. Выражение (1) представлено графически на рис. 2 в виде кривой  $u_2/u_1$ .

Масса  $m_{СС}$ , упруго связанная пружиной  $w_{СС}$  с корпусом СП, образует второй резонатор, обычно именуемый «сейсмической системой», частотная характеристика которой на основании [2] может быть выражена следующим образом:

$$u_3 = u_2 / (1 - (\omega_{СС}/\omega)^2 - 2i(1/Q_{СС})\omega_{СС}/\omega). \quad (2)$$

Здесь по аналогии с первым резонатором параметры  $\omega_{CC} = \sqrt{(w_{CC}/m_{CC})}$  и  $Q_{CC} = 2\sqrt{w_{CC}m_{CC}}/h_{CC}$  являются собственной частотой и добротностью сейсмической системы. Выражение (2) показывает, что частотная характеристика сейсмической системы представляет собой фильтр верхних частот второго порядка. Свойства такого фильтра: 1) прозрачность для спектральных компонент, частоты которых превышают собственную частоту  $\omega_{CC}$ ; 2) квадратичное ослабление спектральных компонент, частоты которых лежат ниже собственной частоты  $\omega_{CC}$ . На рис. 2 выражение (2) представлено графически кривой  $u_3/u_2$ .

Сделаем оговорку относительно низкочастотных сейсмографов, имеющих собственную частоту ниже приблизительно 5 Гц. По конструктивным соображениям сейсмическую систему таких приборов приходится выполнять в виде неуравновешенного маятника (см., например, [2]). Физические свойства при этом не изменяются. Однако значение выходной величины сейсмической системы приобретает угловое смещение маятника  $\theta = u_3/r_m$  (где  $r_m$  – приведенная длина маятника), массы – момент инерции, а пружины – упругий противодействующий момент. Главной причиной такого технического решения является возможность простой реализации так называемой «пружины отрицательной жесткости», которая, не ухудшая механической прочности прибора, позволяет резко снизить суммарный противодействующий момент и таким образом собственную частоту сейсмической системы, а с нею и нижнюю границу частотного диапазона. Практика, однако, показывает, что обеспечить высокую идентичность пружин «положительной» и «отрицательной» жесткости обычно не удается. В результате собственная частота сейсмической системы таких устройств оказывается во много раз нестабильнее, чем в случае использования только «положительных» пружин, причем тем больше, чем более точная компенсация была реализована. Поэтому нижняя граница частотной полосы низкочастотных СП, основанных на идее пружины отрицательной жесткости, является весьма нестабильным параметром.

Необходимо отметить, что свойства СП не ограничиваются пятью вышеуказанными параметрами [1]. Так, в некоторых случаях приходится учитывать боковую и ротационную чувствительности (способность реагировать на специфические помехи): поступательные смещения, направленные ортогонально оси чувствительности, и угловые колебания. Приходится также учитывать, что существуют свойства, являющиеся общими для любых измерительных механизмов: влияние климатических факторов, магнитных и электрических полей и т. д. Мы же ограничимся названными выше параметрами как главными.

Выскажем мнение о возможности применения к задачам сейсмического мониторинга ранжирования по важности вышеуказанных параметров, характеризующих свойства СП. На первый взгляд кажется, что наиболее вероятной причиной возникновения погрешности следует ожидать изменение во времени чувствительности  $S_u$ . Такое мнение, однако, не имеет достаточных оснований. Действительно, для электродинамических преобразователей чувствительность определяется как произведение магнитной индукции в зазоре  $B_{эд}$  на полную длину провода рабочей катушки  $l_{эд}$ . Однако характеристики современных постоянных магнитов отличаются высокой стабильностью, по этой причине нет оснований ожидать изменений магнитной индукции. Длину провода вообще можно считать идеально стабильным

параметром. Согласно нашему опыту, в процессе применения средне- и низкочастотных ЭД СП наиболее частой причиной возникновения ошибок измерения оказываются механические неисправности, происходящие вследствие изменения упругих направляющих движения, роль которых обычно выполняют пружины сейсмической системы. Это проявляется как изменение собственной частоты  $\omega_{СС}$ , оказывающееся иногда достаточно значительным. Чем ниже собственная частота СП, тем более мягкие пружины необходимы, а значит, тем сильнее указанный фактор. Поэтому контроль собственной частоты низкочастотных ЭД СП можно рассматривать как эффективный способ выявления их неисправностей.

При измерении сейсмических сигналов на поверхности почвы решающее значение может иметь нестабильность частоты установочного резонанса  $\omega_{КП}$ , определяющей верхнюю границу частотной полосы прозрачности СП. Это обусловлено тем, что упругость почвы, в которой устанавливается СП, сильно зависит от погодных и сезонных факторов. Исходя из этого факта, приходится сделать вывод о том, что контроль частоты установочного резонанса в данном случае также может иметь не меньшее значение, чем контроль чувствительности. Итак, если границы частотной полосы прозрачности не удается достаточно широко раздвинуть, то характеристики этих границ необходимо контролировать и в случае их изменения вводить соответствующие коррекции в регистрируемый сигнал, например, путем использования нормальной электрической коррекции [2], реально позволяющей в очень широком диапазоне частот расширять пределы измерения механических колебаний. Следует обратить внимание на то, что для сейсмической системы желателен контроль как собственной частоты, так и добротности, поскольку во многих практически важных случаях приходится использовать околорезонансную полосу частот. Для установочного резонанса, по-видимому, чаще всего достаточно осуществить контроль только собственной частоты, так как в области верхней границы частотного диапазона околорезонансная область частот используется реже, в то же время измерение характеристик установочного резонанса сложнее, чем резонанса сейсмической системы. Поэтому для задач сейсмического мониторинга наиболее актуальным, по нашему мнению, следует считать контроль четырех параметров:  $S_u$ ,  $\omega_{СС}$ ,  $\omega_{КП}$  и  $Q_{СС}$ .

Итак, необходимо выбрать метод высокоточных контрольных испытаний СП, который в наибольшей степени удовлетворял бы задачам мониторинга. Прежде всего, логично сравнить возможности прямых и косвенных методов [2]. Первые используют воздействие на корпус СП калиброванного механического возмущения – чаще гармонического, реже импульсного. Основой калибровки здесь служит функция, являющаяся откликом выходного электрического сигнала на входной механический (колебательное движение корпуса). Косвенные методы используют для целей испытания только электрическую цепь СП, являющуюся в обычных условиях его выходом. Физическую основу измерительного эксперимента здесь составляет сопоставление электрического отклика с электрическим же возмущающим воздействием. Очевидно, что при таком испытании не требуется помещать СП в специальные условия, например на платформу вибростенда, что особенно важно при решении задач мониторинга. В то же время корректность данных методов испытания, как и любых косвенных методов испытания вообще, требует более строгого обоснования, что мы и попытаемся выполнить.

Косвенные методы контроля СП для сейсмологов не являются новыми (см., например, [3, 4]). Они нашли некоторое практическое применение при определении собственной частоты и добротности [5, 6]. Применение это, однако, весьма ограничено, что, по-видимому, обусловлено недостаточным обоснованием метода и в первую очередь отсутствием анализа свойственной ему точности. Явно недостаточно проработаны некоторые основополагающие детали методики, в том числе способы учета и коррекции влияния чисто электрического импеданса. На это указывают сами авторы цитированных выше работ. Играть роль также и то, что известные методики реализации косвенного контроля очень громоздки и не обеспечивают высокой точности, в особенности при определении чувствительности СП [4]. Что же касается применения косвенных методов для контроля частоты установочного резонанса, то этот вопрос вообще практически не изучен. Причиной для нового обращения к электрическим методам испытаний послужило то, что в последние годы достигнут очень большой прогресс в области высокоточных цифровых приборов измерения электрических величин, применение которых может радикально изменить возможности последних.

Воспользуемся теорией электромеханических четырехполюсников, в частности, выражением для полного импеданса электродинамического преобразователя [7]:

$$Z_{\text{п}} = Z_{\text{э}} + (S_{\text{э}})^2 / Z_{\text{м}}. \quad (3)$$

Здесь  $Z_{\text{э}}$  и  $Z_{\text{м}}$  – комплексные величины сопротивлений четырехполюсника с электрической и механической сторонами. Под «электрической стороной», согласно [7], подразумевается физический элемент (обычно рабочая катушка), используемый в обычных условиях для съема сигнала, возникающего под действием движения корпуса. «Механическая сторона» – это тот элемент, который обычно воспринимает измеряемое колебательное движение, а в случае косвенных испытаний, наоборот, осуществляет такое движение под влиянием электрического сигнала. Целесообразно также ввести понятие «электромеханического импеданса»  $Z_{\text{ЭМ}} = (S_{\text{э}})^2 / Z_{\text{м}}$ . Соотношению (3) соответствует представленная на рис. 3, а эквивалентная электрическая схема в виде последовательного соединения двух импедансов, каждый из которых

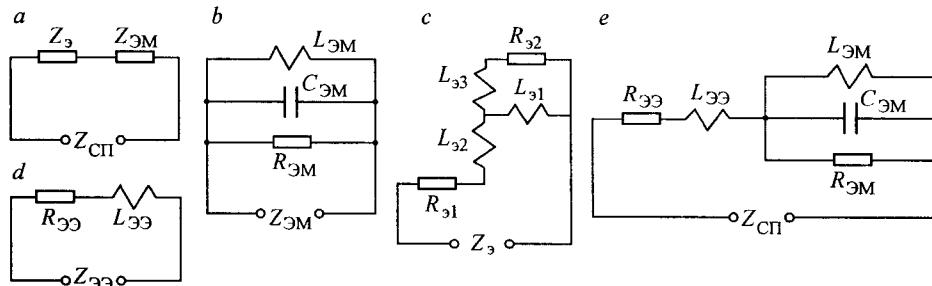


Рис. 3. Эквивалентные электрические схемы: укрупненная (а) и развернутая (е) схемы сейсмоприемника; схема электромеханического импеданса (б); чисто электрические схемы – полная (с) и упрощенная (д).  $R$ ,  $L$ ,  $C$  и  $Z$  – резистивные, индуктивные, емкостные и комплексные импедансы. (Индексы «э», «ЭМ» и «ЭЭ» означают чисто электрическую, электромеханическую и эквивалентную (полученную с некоторым приближением) величины)

имеет в общем случае комплексный характер. Выражение для чисто механического импеданса можно записать в виде [2]

$$Z_m = h + i\omega m_{cc} + w_{cc}/(i\omega) = \omega_{cc} m_{cc} (2/Q + i(\omega/\omega_{cc} - \omega_{cc}/\omega)). \quad (4)$$

На основании выражений (3) и (4) можно сделать вывод о том, что в случае возможности исключения или учета импеданса  $Z_3$  три основных параметра ЭД СП легко определяются по результатам косвенного эксперимента. Примем за основу показанную на рис. 4, а схему эксперимента. Проблемы устранения влияния чисто электрического импеданса СП не возникают, если конструкция ЭД-преобразователя имеет две независимые катушки, чувствительности которых будем считать равными  $S_{1u'}$  и  $S_{2u'}$ . Отношение чувствительностей  $S_{1u'}/S_{2u'}$  обычно бывает известно и практически всегда остается стабильным. При такой конструкции ток  $I$ , возбуждающий силу  $F$  (являющуюся причиной движения сейсмической массы  $m_{cc}$ ), можно пропускать через одну катушку, а наведенное в результате движения напряжение  $U$  – снимать с другой, как показано на рис. 4, б. Очевидно, что в приведенной схеме падение напряжения, вызванное током  $I$ , находится вне цепи напряжения  $U$ , являющегося мерой движения сейсмической массы, и не может вызывать погрешности. Частоту  $\omega$  тока  $I$  будем плавно изменять в некоторой окрестности собственной частоты сейсмической системы  $\omega_{cc}$ . При этом будем измерять силу тока  $I$ , напряжение на второй рабочей катушке  $U$  и фазовый сдвиг между напряжением и током.

С учетом соотношений  $F = S_{1u'} I$ ,  $u' = F/Z_m$ ,  $U = S_{2u'} u'$ , вытекающих из определения ЭД СП, на основании (3) и (4) можно в комплексном виде получить выражение «электромеханической проводимости» преобразователя как

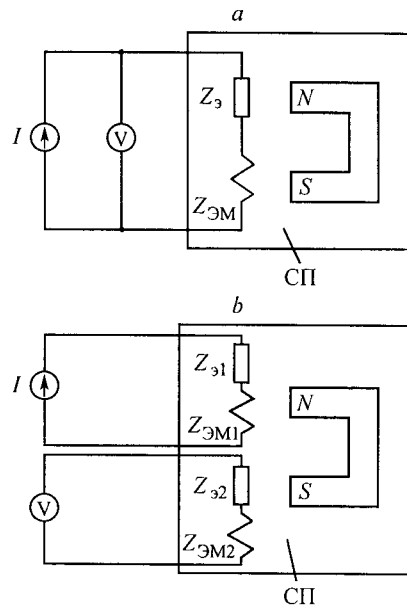


Рис. 4. Эквивалентные электрические схемы косвенных испытаний сейсмоприемника (воздействием только на его «электрическую» сторону): а – однокатушечного, б – двухкатушечного. (Индексы  $N$  и  $S$  – полюса постоянного магнита)

отношение тока, протекающего через его первую катушку, к напряжению на второй:

$$1/Z_{ЭМ} = I/U = m(2\omega_{CC}/Q_{CC} + i(\omega - (\omega_{CC})^2/\omega))/(S_{u'})^2. \quad (5)$$

Здесь  $u'$  – в самом общем случае скорость движения катушки по отношению к магниту, в частном случае двухрезонансной конструктивной схемы рис. 1 это колебательная скорость сейсмической массы, вызванная действием силы  $F$ , т. е.  $u' = d^2 u_3 / dt^2$ ;  $(S_{u'})^2 = S_{1u'} S_{2u'}$  – произведение чувствительностей обеих катушек. Факт существования трех слагаемых электромеханической проводимости, обладающих принципиальным различием зависимости от частоты как  $(i\omega)^0$ ,  $(i\omega)^1$  и  $(i\omega)^{-1}$ , свидетельствует о том, что физически этот параметр эквивалентен трем параллельно соединенным качественно различающимся импедансам (безреактивному, емкостному и индуктивному), равным соответственно

$$R_{ЭМ} = (S_{u'})^2 Q_{ЭМ} / 2\omega_{CC} m, \quad C_{ЭМ} = m / (S_{u'})^2, \quad (6)$$

$$L_{ЭМ} = (S_{u'})^2 / (\omega_{CC})^2 m = (S_{u'})^2 / w,$$

как показано на рис. 3, б.

Выражение (5) указывает простой и вместе с тем достаточно точный способ определения собственной частоты сейсмической системы – по переходу фазовой характеристики электромеханического импеданса через нуль. Действительно, при  $\omega = \omega_{CC}$  мнимая слагающая в (5) исчезает, в результате чего напряжение  $U$  оказывается синфазным току  $I$ , что может быть зафиксировано любым высокочувствительным фазометром, от которого даже не требуется высокой точности. Точность нужна только при определении частоты возбуждающего тока  $I$ , что при современном состоянии электронных средств измерения не влечет никаких технических проблем. Таким образом, собственную частоту можно выразить формулой

$$\omega_{CC} = \omega[\varphi_{UI} = 0]. \quad (7)$$

Здесь  $\varphi_{UI}$  – фазовый сдвиг напряжения  $U$ , наведенного в ЭД-преобразователе, относительно тока  $I$ , возбуждающего силу, которая является причиной движения сейсмической массы.

Из выражения (5) также непосредственно видно, что добротность сейсмической системы  $Q_{CC}$  может быть определена как крутизна наклона фазовой характеристики электромеханического импеданса  $Z_{ЭМ}$ . Действительно, при малой относительной величине отклонения частоты  $\omega$  от частоты резонанса  $\delta_\omega = (\omega - \omega_{CC})/\omega_{CC} \ll 1$  на основании (5) получаем выражение для определения добротности:

$$Q_{CC} = -\text{tg}(\varphi) / \delta_\omega. \quad (8)$$

Наконец, чувствительность ЭД СП на основании (5) может быть выражена как

$$(S_{u'})^4 = m^2 [U(\omega)/I(\omega)]^2 [(2\omega_{CC}/Q_{CC})^2 + \omega^2 (1 - (\omega_{CC}/\omega)^2)^2]. \quad (9)$$



В рабочей частотной полосе СП, когда  $\omega_{CC} \ll \omega \ll \omega_{КП}$ , двучлен внутри вторых квадратных скобок выражения (9) очень близок к параметру  $\omega^2$ , поскольку при указанном соотношении частот имеет место как  $2\omega_{CC}/Q_{CC} \ll 1$ , так тем более и  $(\omega_{CC}/\omega)^2 \ll 1$ . Поэтому выражение для чувствительности принимает простой и наглядный вид:

$$S_{u'} = \sqrt{[\omega m U(\omega)/I(\omega)]}. \quad (10)$$

Как видно, чтобы определить чувствительность  $S_{u'}$ , нужно измерить только один механический параметр – сейсмическую массу  $m$ . В остальном требуется измерение электрических величин: тока  $I$ , напряжения  $U$  и частоты  $\omega$ , что всегда намного удобнее реализовывать. Кроме того, следует иметь в виду, что измерение величины сейсмической массы всегда может быть выполнено заранее для каждого испытуемого типа СП. Раздельные значения чувствительностей  $S_{1u'}$  и  $S_{2u'}$  могут быть определены по данным измерения произведения  $(S_{u'})^2$  с использованием априорной информации о величине отношения чувствительностей первой и второй рабочих катушек.

Перейдем к анализу возможности контроля верхней границы частотного диапазона сейсмоприемника, определяемой частотой установочного резонанса  $\omega_{КП}$ . В известных нам работах (см., например, [8]) при проведении подобных экспериментов применялся вспомогательный силовой возбудитель. Мы же покажем достаточность использования внутреннего ЭД-преобразователя контролируемого СП. В данном случае нам необходимо рассмотреть движение не только сейсмической массы  $m_{CC}$ , но и корпуса СП  $m_{к}$ . Сначала оценим движение каждой из этих масс по отношению к абсолютной системе координат. В частотном диапазоне, значительно превышающем собственную частоту сейсмической системы  $\omega_{CC}$ , движение сейсмической массы определяется уравнением

$$F - m_{CC} d^2 u_3 / dt^2 = 0, \quad (11)$$

где по-прежнему  $F$  – сила, возбуждаемая электрическим током в электродинамическом преобразователе;  $u_3 = u_{3,0} \exp(-j\omega t)$  – колебательное (в данном случае гармоническое) смещение сейсмической массы в абсолютной (инерциальной) системе координат. Здесь и далее добавление в индексе нуля означает амплитудное значение гармонической величины. Решение уравнения, получаемого подстановкой значений  $u_3$  и  $F_0$  в (11) и сокращением на  $\exp(-j\omega t)$  для случая гармонического сигнала  $F = F_0 \exp(-j\omega t)$ , приобретает вид:

$$u_{3,0} = -F_0 / m_{CC} \omega^2. \quad (12)$$

Уравнение движения корпуса в той же абсолютной системе координат может быть записано как  $F = w_{КП} u_{к} + h_{КП} du_{к} / dt + m_{к} d^2 u_{к} / dt^2$ . Для случая гармонического сигнала его решение в комплексном виде оказывается равным:

$$u_{2,0} = F_0 / (w_{КП} + ih_{КП} \omega - m_{к} \omega^2). \quad (13)$$

В результате колебательное смещение сейсмической массы относительно корпуса, являющееся выходной величиной СП, на основании (12) и (13) может быть выражено в виде

$$u_{2,0} - u_{3,0} = (F_0/m_{CC}\omega^2) [1 - (m_{CC}/m_k) / (1 - (\omega_{КП}/\omega)^2 - (2i/Q_{КП})(\omega_{КП}/\omega))]. \quad (14)$$

Выражение в квадратных скобках представляет собой частотную характеристику ускорения сейсмической массы относительно корпуса сейсмоприемника; его качественное изображение показано на рис. 5. В эксперименте данная зависимость может быть получена путем однократного дифференцирования электрического сигнала ЭД СП (второе дифференцирование автоматически выполняется электродинамическим преобразователем). Легко видеть, что анализ изменения этой функции вблизи частот установочного резонанса  $\omega_{КП}$  позволяет определить эту частоту, а значит, и верхнюю границу частотной полосы прозрачности ЭД СП. Действительно, в полосе частот, лежащих существенно ниже  $\omega_{КП}$ , частотная характеристика  $d^2(u_2 - u_3)/dt^2$  (выражение в квадратных скобках) изменяется очень слабо. Однако ниже и вблизи частоты  $\omega_{КП}$  имеет место антирезонанс (спад), а выше частоты  $\omega_{КП}$  — подъем на относительную величину  $m_{CC}/m_k$ , который в непосредственной близости к частоте  $\omega_{КП}$  имеет резонансный характер. Все это и может послужить критерием для определения частоты установочного резонанса  $\omega_{КП}$ .

Теперь перейдем к рассмотрению вопроса о возможности контроля параметров ЭД СП, содержащих только одну рабочую катушку, которую в этом случае приходится одновременно использовать и как генераторную, и как измерительную. Естественно, что на напряжение  $U_{ЭМ}$  будет накладываться электрический потенциал  $U_3 = Z_3 I$ , образующийся при протекании тока  $I$  по чисто электрическому импедансу  $Z_3$  рабочей катушки. Данный потенциал становится помехой при определении напряжения  $U_{ЭМ}$ , входящего в расчетные соотношения контролируемого ЭД СП. В результате возникает проблема отделения потенциала  $U_3$  от  $U_{ЭМ}$ , что реально можно осуществить одним из двух способов: ввести либо коррекцию на величину  $U_3$  на стадии измерения, либо расчетную поправку на ту же величину на стадии обработки.

Прежде всего, обоснуем выбор эквивалентной электрической схемы импеданса  $R_3$  рабочей катушки. Необходимо учесть, что на практике получили распространение два существенно различающихся конструктивных варианта ЭД СП: с электропроводящим и неэлектропроводящим каркасом рабочей катушки. Эквивалентную схему первого варианта на основании общеизвестных положений электротехники можно представить так, как показано на рис. 3, с, где  $R_{31}$  и  $R_{32}$  — резистивные сопротивления самой катушки и каркаса;

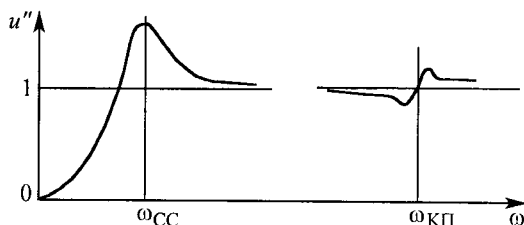


Рис. 5. Качественное изображение частотной характеристики, соответствующей косвенному методу испытаний СП

$L_{\varepsilon 1}$ ,  $L_{\varepsilon 2}$  и  $L_{\varepsilon 3}$  – индуктивности соответственно самоиндукции, рассеяния рабочей катушки и рассеяния электропроводящего каркаса. При качественном анализе можно пользоваться показанной на рис. 3, *d* упрощенной эквивалентной схемой, которая фактически является точной в случае неэлектропроводящего каркаса. Объединяя схемы рис. 3, *b* и *d* в соответствии с рис. 3, *a*, получаем, что эквивалентная схема полного электрического импеданса однокатушечного ЭД СП должна быть представлена так, как показано на рис. 3, *e*.

Выполним количественные оценки. Применительно к типичному сейсморазведочному ЭД СП марки СВ-20 нами были получены следующие результаты:  $f_{CC} = \omega_{CC}/2\pi = 20$  Гц;  $S_u = 18$  В·с/м;  $2/Q = 0,8$ ;  $R_{\varepsilon 3} = 270$  Ом;  $L_{\varepsilon 3} \approx 5$  МГн;  $m_{CC} = 20$  г. Подставляя данные  $S_u$ ,  $f_{CC}$ ,  $m_{CC}$  и  $Q$  в (6), находим  $C_{\varepsilon M} = 54$  мкФ;  $L_{\varepsilon M} = 1,16$  Гн;  $R_{\varepsilon M} = 185$  Ом. Приходится отметить, что измерение резистивного сопротивления рабочей катушки  $R_{\varepsilon 3}$  легко осуществляется на постоянном токе. Что же касается измерения эквивалентной величины электрической индуктивности  $L_{\varepsilon 3}$ , то здесь возникают принципиальные затруднения, поскольку данный параметр трудно выделить на фоне электромеханических параметров  $C_{\varepsilon M}$  и  $L_{\varepsilon M}$ , имеющих значительно большие импедансы. Чтобы все же реализовать измерение, мы затормаживали сейсмическую массу, прижимая ее к упорам СП [1].

Анализ эквивалентной схемы рис. 3, *e* показывает, что индуктивность рабочей катушки  $L_{\varepsilon 3}$  начинает сказываться только на высоких частотах, близких к частоте резонанса последовательного индуктивно-емкостного контура  $L_{\varepsilon 3} - C_{\varepsilon M}$ , которая оказывается достаточно высокой:  $f_{\varepsilon - \varepsilon M} = (1/2\pi) \times \sqrt{L_{\varepsilon 3} C_{\varepsilon M}} \sim 300$  Гц. Поэтому в данном случае параметр  $L_{\varepsilon 3}$  можно не учитывать. Что же касается резистивного сопротивления преобразователя  $R_{\varepsilon 3}$ , то оно в сейсморазведочном диапазоне оказывается даже выше его импедансов параллельного колебательного контура  $L_{\varepsilon M} - C_{\varepsilon M}$ , по величине которых рассчитываются параметры ЭД СП. Поэтому его влияние необходимо скорректировать с погрешностью, по крайней мере, на порядок меньшей, чем погрешность измерения параметров контролируемого сейсмоприемника.

На рис. 6 приведен один из опробованных нами вариантов электрических схем, позволяющих реализовать компенсацию мешающего действия падения напряжения  $U_3$  на чисто электрическом импедансе  $Z_{\varepsilon 3}$ . В измерительную электрическую цепь, по которой пропускается возбуждающий

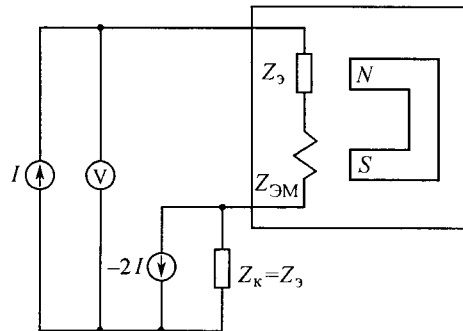


Рис. 6. Схема компенсации падения напряжения на чисто электрическом импедансе СП

электрический ток  $I$ , последовательно с испытуемым ЭД СП включается резистивно-индуктивный импеданс  $R_k - L_k$ , который должен быть равным чисто электрическому импедансу сейсмоприемника. Очевидно, что падение напряжения на данном импедансе будет равно мешающему электрическому потенциалу  $U_s$ . В схему вводится специальный электрический контур, через который пропускается электрический ток  $-2I$ , вдвое превышающий возбуждающий ток  $I$ , но имеющий противоположный знак. При таких условиях на импедансе  $R_k - L_k$  возникает падение потенциала  $-U_s$ , равное, но противоположное по знаку падению потенциала на чисто электрическом импедансе сейсмоприемника. В результате на вход измерительного прибора И окажется приложенным только напряжение электромеханического преобразователя  $U_{ЭМ}$ , что и требуется для осуществления косвенных измерений параметров контролируемого сейсмоприемника.

Приведем в кратком виде результаты анализа точности, которая может быть реализована в изложенном выше методе косвенного контроля параметров ЭД СП. Начнем с оценки погрешности определения собственной частоты сейсмической системы  $\omega_{CC}$ . Примем за основу способ контроля этого параметра по отклонению от нуля фазовой характеристики электромеханического импеданса  $Z_{ЭМ}$ , реализуемого путем пропускания через него тока  $I$  при одновременном наблюдении фазы возбуждаемого током потенциала  $U_{ЭМ}$ . Данный фазовый сдвиг  $\varphi$  в соответствии с общеизвестными соотношениями электротехники может быть выражен как  $\text{tg}(\varphi) = \text{Im}(Z_{ЭМ})/\text{Re}(Z_{ЭМ})$ . Здесь символы  $\text{Im}$  и  $\text{Re}$  означают мнимую и действительную части комплексной величины. Подставляя в последнее выражение функцию электромеханического импеданса, получаем

$$\text{tg}(\varphi) = (1 - (\omega_{CC}/\omega)^2) / ((2/Q)\omega_{CC}/\omega) \approx Q\Delta_\omega. \quad (15)$$

Здесь принято обозначение  $\Delta_\omega = \omega_{CC}/\omega - 1$ , представляющее собой относительную величину отклонения частоты зондирующего тока от собственной частоты сейсмической системы. Приближение соответствует малой величине параметра  $\Delta_\omega \ll 1$ . Погрешностью экспериментального значения частоты  $\omega$  при использовании современных электронных приборов можно пренебречь. Поэтому ошибка измерения собственной частоты сейсмической системы определяется исключительно порогом чувствительности используемого фазометрического устройства и легко может быть сведена к величине, не превышающей  $10^{-3} - 10^{-2}$ .

Выражение (15) можно использовать в качестве основы и для определения добротности сейсмической системы, поскольку  $2Q = (\omega_{CC}/\omega - \omega/\omega_{CC})\text{ctg}(\varphi)$ . Существенное различие, однако, заключается в том, что при определении добротности  $Q$  требуется не просто фиксация отклонения фазового сдвига от нуля, а точное его измерение, погрешность которого определит и погрешность измеряемого параметра.

При определении чувствительности будем считать, что за основу берется выражение (9), которое представим в виде

$$S_u = \sqrt{[\omega m U_{ЭМ}(\omega) / I_{ЭМ}(\omega) (1/K_\omega(\omega))].} \quad (16)$$

Здесь  $K_\omega$  – модуль комплексной частотной характеристики сейсмической системы в режиме измерения колебательных смещений, который в средней

части частотного диапазона близок к единице:  $K_{\omega} [\omega_{CC} \ll \omega \ll \omega_{КП}] \cong 1$ . По-этому погрешность измерения чувствительности ЭДСП фактически определяется погрешностями величин, входящих в (16). Наибольшая погрешность, по-видимому, будет вызываться неточностью определения частотной характеристики, которая по порядку величины не превышает 1 %.

Подводя итоги, можно сделать следующие основные выводы.

Наиболее рациональный путь обеспечения высокой точности измерения непрерывных сейсмических процессов электродинамическими сейсмоприемниками (например, в задачах мониторинга) – использование косвенных методов испытания, в которых как для возбуждения испытательного сигнала, так и для измерения отклика на этот сигнал применяется только «электрическая сторона» электромеханического преобразователя (его выходная катушка).

Осуществление контроля и коррекции чувствительности (электромеханического коэффициента) в общем случае недостаточно: при изучении низкочастотных (ниже  $\sim 10$  Гц) процессов вероятной причиной погрешности может стать нестабильность частоты резонанса сейсмической системы, ограничивающей нижнюю границу частотной полосы прозрачности сейсмоприемной аппаратуры, а при изучении сравнительно высокочастотных процессов (выше  $\sim 100$  Гц) в случае установки сейсмоприемника в рыхлом грунте возможна нестабильность частоты установочного резонанса, которая определяет верхнюю границу частотной полосы прозрачности. Поэтому надежный результат измерения гарантирует контроль и коррекцию четырех параметров: чувствительности, собственной частоты и добротности (степени успокоения сейсмической системы) и частоты установочного резонанса.

С помощью современных цифровых электронных измерительных приборов все четыре вышеназванных параметра могут быть измерены с погрешностью не более 1 %, однако для этого необходимо скомпенсировать влияние чисто электрического импеданса электродинамического преобразователя; приведены успешно опробованные варианты схем реализации такой компенсации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гик Л. Д. Методы определения параметров сейсмоприемников. Новосибирск, 1990. (Препр. /СО АН СССР. Ин-т геологии и геофизики; 16).
2. Гик Л. Д. Измерение вибраций. Новосибирск: Наука, 1972.
3. Гамбурцев Г. А. Основы сейсморазведки. М.: Госстройтехиздат, 1959.
4. Слуцковский А. И. Сейсморазведочная аппаратура. М.: Недра, 1970.
5. Бжассо А. Д., Чернов В. В. Погрешности устройств технологического контроля основных параметров электродинамических сейсмоприемников // Геофизическая аппаратура. 1986. № 85. С. 39.
6. Шведчиков Л. К. Определение параметров электродинамического сейсмоприемника методом обращения // Прикладная геофизика. М., 1981. Вып. 101. С. 62.
7. Харкевич А. А. Теория преобразователей: Избр. тр. М.: Наука, 1973. Т. 1. С. 52.
8. Пасечник И. П. Сравнение результатов теоретического и экспериментального исследований резонансных явлений в системе почва – сейсмограф // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1952. № 5. С. 25.