

УДК 550.34.03

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ С ПОМОЩЬЮ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ФИЛЬТРА

© 2024 г. Н. В. Кабыченко¹, А. Н. Беседина¹, *, З. З. Шарафиев¹¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*Email: besedina.an@idg.ras.ru

Общемировая тенденция сейсмологических наблюдений последних лет заключается в увеличении количества измерительных пунктов и оснащении их широкополосной и высокочувствительной аппаратурой. Однако такой подход приводит к существенному удорожанию измерений. Одним из возможных решений данной проблемы является применение в качестве дополнительных датчиков значительно более дешевых геофонов или короткопериодных сейсмометров с расширенным частотным диапазоном. В работе рассмотрен процесс синтеза схемы корректирующего фильтра на базе биквадратной передаточной функции, приведены схемы расширения частотных характеристик датчиков, в том числе схемы коррекции характеристики сейсмометра СМ-3КВ и геофона GS-20DX в приборном исполнении. Разработанный алгоритм позволяет расширить АЧХ сейсмометра СМ-3КВ в область низких частот до 0.02 Гц (при штатной частоте 0.5 Гц) и геофона GS-20DX до 1 Гц (при собственной частоте 10 Гц).

Ключевые слова: обратный фильтр, приборная коррекция, корректирующий фильтр, биквадратная передаточная функция, амплитудно-частотная характеристика датчика.

Для цитирования: Кабыченко Н.В., Беседина А.Н., Шарафиев З.З. Расширение возможности сейсмических датчиков с помощью универсальной передаточной функции фильтра // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16. № 1. С. 32–42. http://doi.org/10.26006/29490995_2024_16_1_32

Введение

При получении и обработке сейсмических данных современные тенденции заключаются в повышении чувствительности систем регистрации данных, что влечет за собой увеличение количества задействованной аппаратуры. В рамках решения этой проблемы – для снижения стоимости и, соответственно, возможности организации более плотных систем наблюдения – ведется разработка различных схем коррекции характеристик сейсмометров [Boulaenko, 2002; Havskov, Alguacil, 2002; Ulmann, 2005; Romeo, Spinelli, 2013; Кабыченко и др., 2017; Беседина и др., 2019; Кабыченко и др., 2020; Mihaylov, El Nagggar, 2021]. С учетом высокой стоимости сейсмических датчиков при организации научных сейсмологических исследований, нуждающихся, например, в широкополосной аппаратуре, минимизация материальных затрат на аппаратурное обеспечение работ путем использования датчиков с откорректированными характеристиками может достигать нескольких раз.

Применение датчиков с расширенными характеристиками (как в области высоких, так и низких частот) может позволить регистрировать цуги длиннопериодных поверхностных волн от удаленных землетрясений короткопериодными сейсмометрами (со схемой коррекции), а также корректно рассчитывать очаговые параметры слабых сейсмических событий (например, сейсмический момент и излученная сейсмическая энергия) по записям геофонов (с расширенной верхней граничной частотой). Внедрение геофонов с расширенными характеристиками в область верхних и нижних частот может быть актуально также при мониторинге сейсмичности при проведении гидроразрыва пласта.

Расширение рабочего частотного диапазона датчика можно реализовать как с помощью цифрового, так и аналогового фильтра. В первом случае процедура представляет коррекцию первичной записи датчика с помощью обратного фильтра (деконволюции первичной сейсмограммы). Основы процедуры

достаточно подробно описаны в [Scherbaum, 1996; Havskov, Alguacil, 2002]. На основе такого подхода создаются программные продукты, которые позволяют выполнять расширение частотного диапазона датчика в режиме реального времени с минимальной задержкой [Mihaylov, El Nagggar, 2021] или при постобработке сейсмических записей [Besedina et al., 2012; Besedina, Kabychenko, 2017; Dergach, Yushin, 2017; Dergach et al., 2019], которые имеют свои ограничения. Уровень шума измерительного канала является одним из ключевых факторов, влияющих на диапазон расширения граничной частоты датчика [Besedina et al., 2012; Беседина, 2014; Besedina, Kabychenko, 2017]. Стоит отметить, что построение цифрового обратного фильтра не всегда возможно, например, когда уровень шумов измерительного канала за пределами рабочего диапазона датчика превышает уровень сигнала. При численной коррекции (деконволюции) во временной области могут также возникать проблемы, связанные с влиянием частоты оцифровки на амплитуду восстановленного сигнала – при близких значениях частоты оцифровки и собственной частоты датчика возникает аномальное увеличение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) сигнала виртуального датчика (сигнал после деконволюции) в рабочем диапазоне частот. Для того, чтобы избежать ошибки в значениях амплитуды восстановленного сигнала рекомендуется существенно увеличивать частоту Найквиста при проведении наблюдений, например, до 1 кГц [Dergach et al., 2019] или же проводить деконволюцию в частотной области, где процедура не вносит дополнительных ошибок. В [Беседина, 2014; Беседина, Кабыченко, 2014] при реализации цифрового фильтра для записей реальных сейсмограмм землетрясений и карьерных взрывов, зарегистрированных короткопериодными датчиками и геофонами, компенсации возникающей фазовой задержки использовались всепропускающие фазовые фильтры, которые имеют постоянную АЧХ, равную единице, во всем диапазоне частот.

С развитием элементной базы радиоэлектроники стала возможна коррекция АЧХ сейсмометров с помощью аналоговых фильтров. Достаточно распространенной техникой расширения рабочей полосы сейсмометра является метод умножения передаточных функций (аналог цифрового обратного фильтра), который может быть реализован различными приборными способами. Например, рассматривается использование интегратора с дифференцирующей цепочкой в петле обратной связи [Al-Alaoui, 2001] или введение последовательно двух каскадов интеграторов [Кабыченко и др., 2017]. В [Беседина и др., 2019] метод умножения передаточных функций датчика реализуется в виде представления передаточной функции корректирующего аналогового фильтра в виде суммы трех фильтров: всепропускающего, полосового фильтра 2-го порядка и фильтра нижних частот 2-го порядка. В [Ma et al., 2023] передаточную функцию корректирующего фильтра представляют в виде разницы всепропускающего фильтра и полосового фильтра 2-го порядка, реализованного с помощью схемы Саллена – Ки. Другим методом расширения частотного диапазона датчика в область низких частот является введение отрицательного сопротивления [Беседина и др., 2019; Boulaenko, 2002; Havskov, Alguacil, 2002; Ulmann, 2005; Romeo, Spinelli, 2013]. Отрицательное сопротивление снижает активное сопротивление в цепи, что создает большое затухание колебательной системы. Нежелательным следствием чрезмерного снижения сопротивления в цепи является пик на АЧХ в области высоких частот. Для подавления резонанса рекомендуется использовать фильтр нижних частот, что ограничивает рабочую полосу частот, или вводить отрицательную индуктивность [Беседина и др., 2019].

В данной работе представлен метод синтеза универсальной передаточной функции датчика для расширения рабочей частотной полосы датчика как в область низких, так и высоких частот. На примере короткопериодного сейсмометра СМ-3КВ и геофона GS-20DX рассчитаны приборные реализации корректирующего фильтра.

Основы метода

При проведении экспериментов сигналы за пределами рабочей полосы частот датчика ослабляются по амплитуде и искажаются по фазе. Зачастую эти искажения устраняют, пользуясь математическими методами с помощью компьютерных программ при обработке цифровых экспериментальных записей.

Однако, если к выходу датчика подключить соответствующий корректирующий фильтр, то рабочая полоса канала, включающего датчик и корректирующий фильтр, будет расширена в обе стороны, предоставляя экспериментатору возможность получить дополнительную информацию.

Рассмотрим передаточную функцию универсального корректирующего фильтра, пригодного для коррекции частотных характеристик измерительного канала, а также синтез по ней схемы корректирующего фильтра. Вывод передаточной функции корректирующего фильтра для сейсмометра изложен, например, в [Кабыченко и др., 2011; 2017]:

$$H(s) = \frac{s^2 + 2h_0\omega_0s + \omega_0^2}{s^2 + 2h_1\omega_1s + \omega_1^2}. \quad (1)$$

В (1) ω_0 – собственная частота геофона; h_0 – затухание геофона; ω_1 и h_1 – нижняя граничная частота и затухание геофона после коррекции амплитудно-частотной характеристики соответственно; s – комплексная переменная Лапласа, $\omega_0 = 2\pi f_0$. Передаточная функция (1) относится к классу биквадратных передаточных функций и является универсальной в своем классе. С ее помощью можно расширять полосу частот как в сторону нижних частот, так и верхних, а также нейтрализовать колебания, связанные с резонансом в колебательной системе датчика. Следует заметить, что числитель в (1) является знаменателем передаточной функции корректируемого датчика, а знаменатель в (1) является знаменателем передаточной функции откорректированного датчика. По виду передаточной функции можно сделать несколько общих замечаний: второй порядок функции предполагает использование при инструментальном синтезе двух RC -интеграторов. Структура функции позволяет воспользоваться техникой направленных графов для синтеза соответствующей электрической схемы.

Синтез схемы корректирующего фильтра проще всего выполнять, пользуясь направленным графом передаточной функции (1). Для удобства построения направленного графа разделим числитель и знаменатель (1) на s^2 :

$$H(s) = \frac{-1 - \frac{2h_0\omega_0}{s} - \frac{\omega_0^2}{s^2}}{1 - \left(-\frac{2h_1\omega_1}{s} - \frac{\omega_1^2}{s^2} \right)}. \quad (2)$$

Числитель в (2) умножен на -1 поскольку на практике наиболее просто реализуются инвертирующие интеграторы на операционных усилителях (ОУ). Согласно формуле Мэсона для направленных графов [Абрахамс, Каверли, 1967] в числителе представлена сумма передач прямых путей от датчика до выхода фильтра, а в знаменателе (в скобках) – сумма передач контуров отрицательных обратных связей, причем в один контур включены два интегратора, а в другой – один. Соответствующий граф представлен на рис. 1. По функции (2) построена электрическая схема корректирующего фильтра на ОУ. Схема приведена на рис. 2.

Систему уравнений по числу усилителей для потенциалов V_a, V_b, V_c, V_0 можно записать в виде:

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{-1}{sCR1} + V_0 \frac{-1}{sCR2}, \\ V_b &= V_a \frac{-1}{sCR} + V_c \frac{-1}{sCR3}, \\ V_c &= \frac{-R}{R4} - V_0, \\ V_0 &= -V_b - 1. \end{aligned} \quad (3)$$

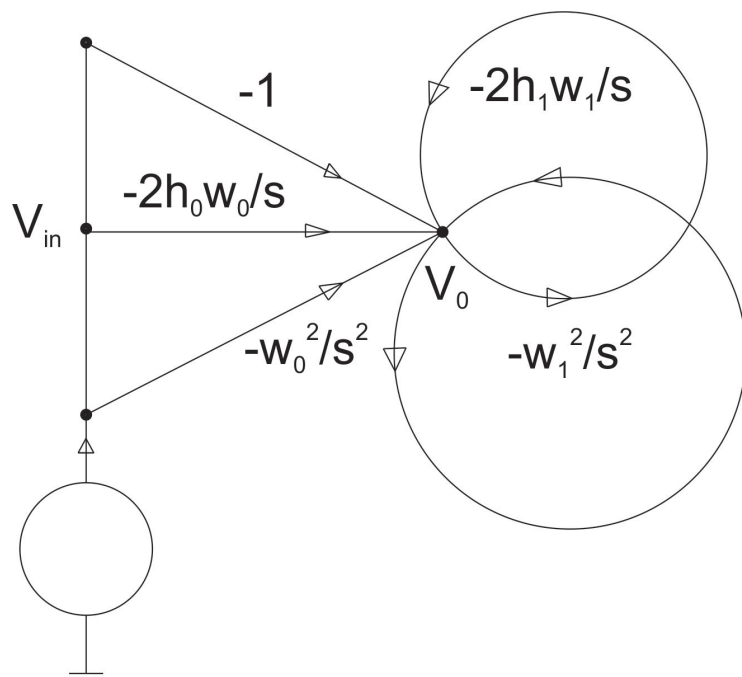


Рис. 1. Направленный граф биквадратной передаточной функции (2)

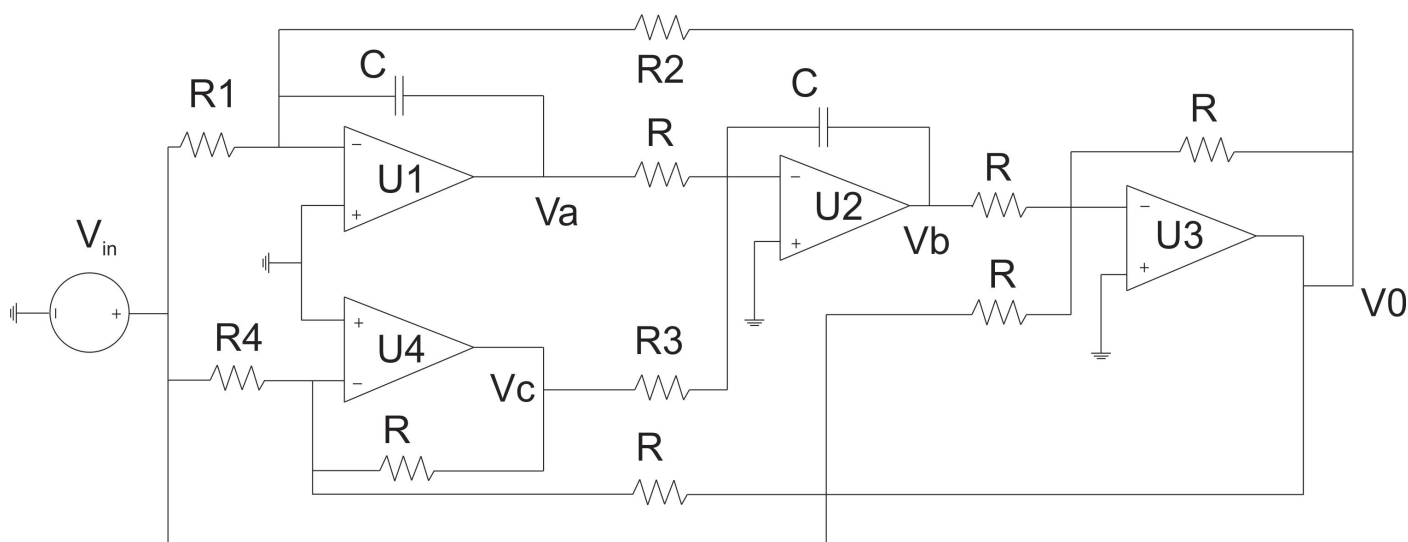


Рис. 2. Корректирующий фильтр на ОУ: 2 интегратора, 2 инвертора, 2 конденсатора и 10 резисторов. По 4-м напряжениям на выходах ОУ можно определить номиналы только 4-х резисторов $R1, R2, R3, R4$, а номиналы остальных резисторов и конденсаторов необходимо предварительно задать

Входное напряжение принято равным 1, поэтому передаточная функция корректирующего фильтра равна выходному напряжению V_0 :

$$H(s) = - \frac{s^2 + \frac{1}{C^2 R R 1} + \frac{R s}{C R 3 R 4}}{s^2 + \frac{1}{C^2 R R 2} + \frac{s}{C R 3}} \quad (4)$$

Приравняв коэффициенты при s и свободные члены в (1) и (4), получаем формулы для вычисления номиналов резисторов $R1, R2, R3, R4$:

$$\begin{aligned} R1 &= \frac{1}{C^2 R \omega_0^2}, R2 = \frac{1}{C^2 R \omega_1^2}, \\ R3 &= \frac{1}{2Ch_1\omega_1}, R4 = \frac{Rh_1\omega_1}{h_0\omega_0}. \end{aligned} \quad (5)$$

Реализация метода

Далее приведены примеры использования рассчитанных значений номиналов сопротивлений по формулам (5) и функции (4) для расширения полосы в сторону нижних и верхних частот на примере короткопериодного сейсмометра СМ-3КВ с собственной частотой 0.5 Гц (рисунки 3, 4) и геофона GS-20DX с нижней граничной частотой 10 Гц (рис. 5).

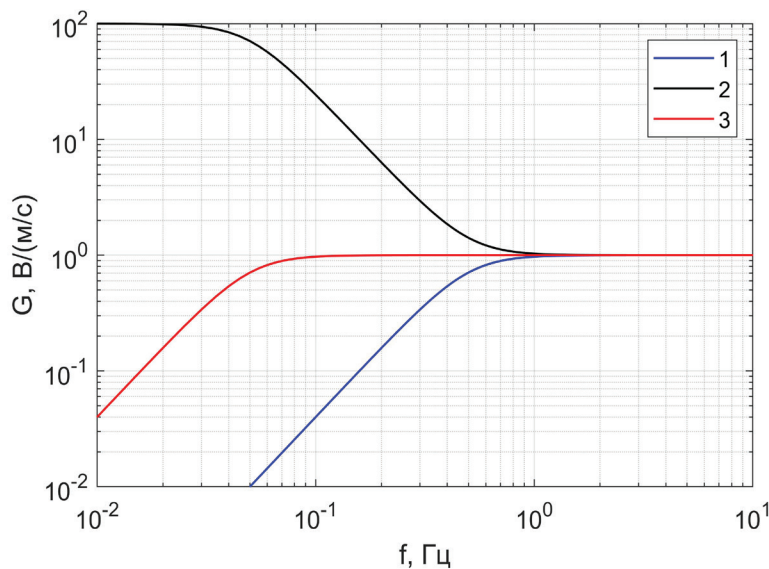


Рис. 3. Результат коррекции АЧХ сейсмометра СМ-3КВ (3) путем умножения передаточной функции сейсмометра (1) и передаточной функции корректирующего фильтра (2). Расширение рабочей полосы от 0.5 до 0.05 Гц

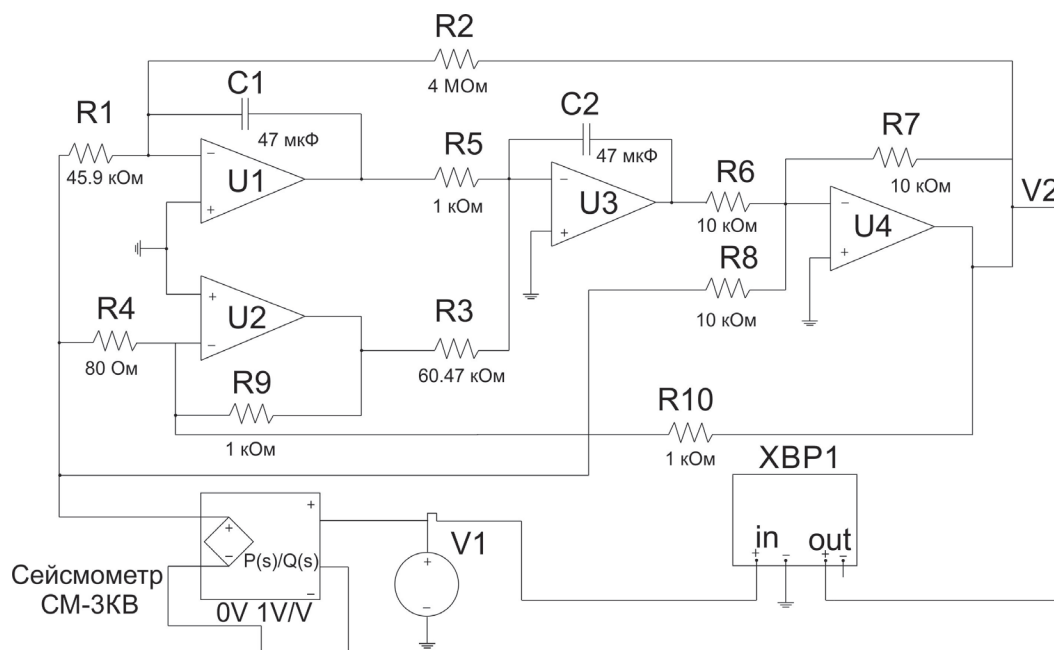


Рис. 4. Схема расширения рабочего диапазона СМ-3КВ с корректирующим фильтром (4) для коррекции нижней граничной частоты от 0.5 до 0.05 Гц. На схеме сейсмометр СМ-3КВ представлен своей передаточной функцией

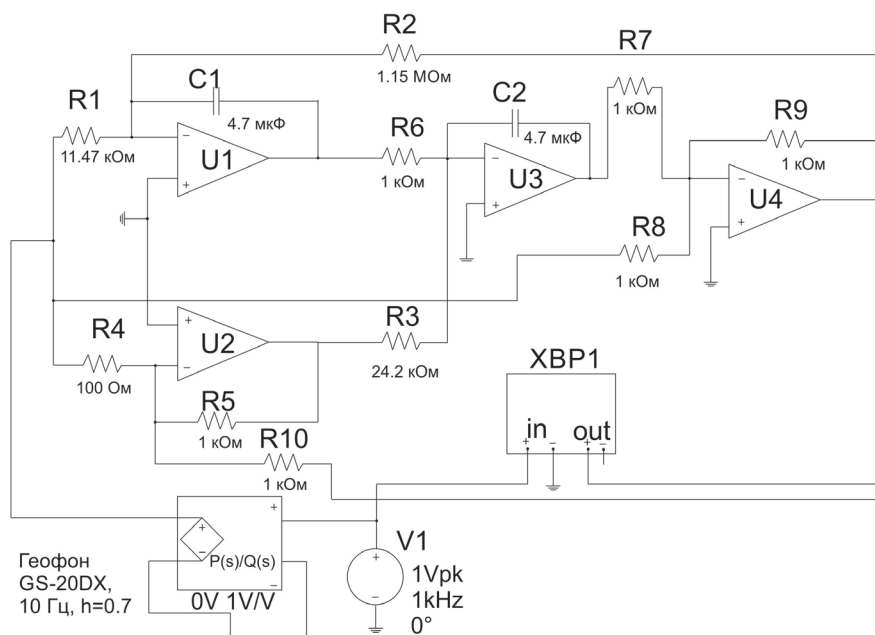


Рис. 5. Схема расширения рабочего диапазона геофона GS-20DX с корректирующим фильтром (4) для коррекции нижней граничной частоты от 10 до 1 Гц. На схеме геофон GS-20DX представлен своей передаточной функцией

Стоит отметить, что при введении затухания датчика $h = 1$ схема передаточной функции существенно упрощается. Для коррекции передаточных функций 1-го порядка применима функция:

$$H_2(s) = \frac{s + \omega_0}{s + \omega_1}, \quad (6)$$

где $\omega_0 > \omega_1$ – условие для расширения рабочей полосы датчика в область низких частот, а $\omega_0 < \omega_1$ – условие для расширения рабочей полосы датчика в область верхних частот.

Для коррекции передаточных функций 2-го порядка справедливо:

$$H_3(s) = \left(\frac{s + \omega_0}{s + \omega_1} \right)^2. \quad (7)$$

Рассмотрим схемы этих передаточных функций для коррекции АЧХ сейсмометров и геофонов подробнее.

В арсенале схем для коррекции разных участков частотных характеристик в системах автоматического управления (САУ) интерес представляют две (рис. 6).

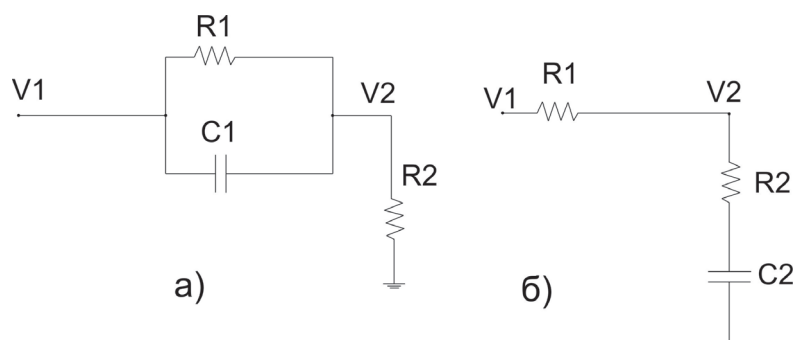


Рис. 6. Схемы: для коррекции верхних частот (а) и коррекции нижних частот (б)

Передаточную функцию схемы (рис. 6а) для коррекции верхних частот можно записать в виде:

$$F_1(s) = \frac{s + \frac{1}{R1C1}}{s + \frac{1}{\frac{R1R2}{R1+R2}C1}}, \quad (8)$$

где $R1C1 > \frac{R1R2}{R1+R2}C1$. Для передаточной функции схемы на рис. 6б при расширении частотной характеристики в область низких частот в виде:

$$F_2(s) = \frac{s + \frac{1}{R2C2}}{s + \frac{1}{(R1+R2)C2}}, \quad (9)$$

где $R2C2 < (R1+R2)C2$.

Можно предложить такие же передаточные функции корректирующих фильтров на одном операционном усилителе (рис. 7). В этом случае передаточные функции для коррекции верхних $F_1(s)$ и нижних частот $F_2(s)$ можно записать в виде:

$$F_1(s) = \frac{V_2}{V_1} = 1 + \frac{R1}{R2 + \frac{1}{sC1}} = \frac{s + \frac{1}{C1(R1+R2)}}{s + \frac{1}{C1R2}}, \quad \frac{1}{C1(R1+R2)} < \frac{1}{C1R2}, \quad (10)$$

$$F_2(s) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{R2 + CR1R2s}{R1 + R2 + CR1R2s} = \frac{s + \frac{1}{CR1}}{s + \frac{1}{\frac{CR1R2}{R1+R2}}}, \quad \frac{1}{CR1} < \frac{1}{\frac{CR1R2}{R1+R2}}. \quad (11)$$

Пример схемы коррекции в приборном исполнении с помощью звена $F_2(s)$ показан на рис. 8. Пример расширения АЧХ в область верхних частот показан на примере датчика с верхней граничной частотой 1 Гц (рис. 9), которую требуется расширить до 10 Гц, и схемы коррекции на основе двух каскадов (рис. 7а).

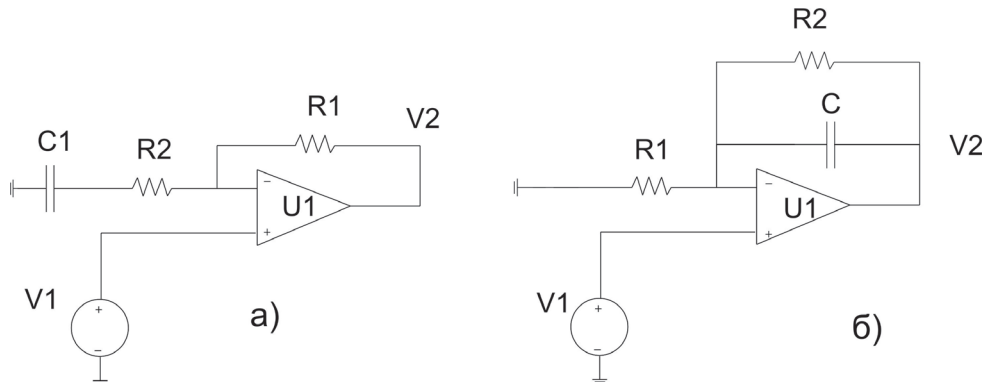


Рис. 7. Схема для коррекции верхних (а) и нижних (б) частот на одном ОУ

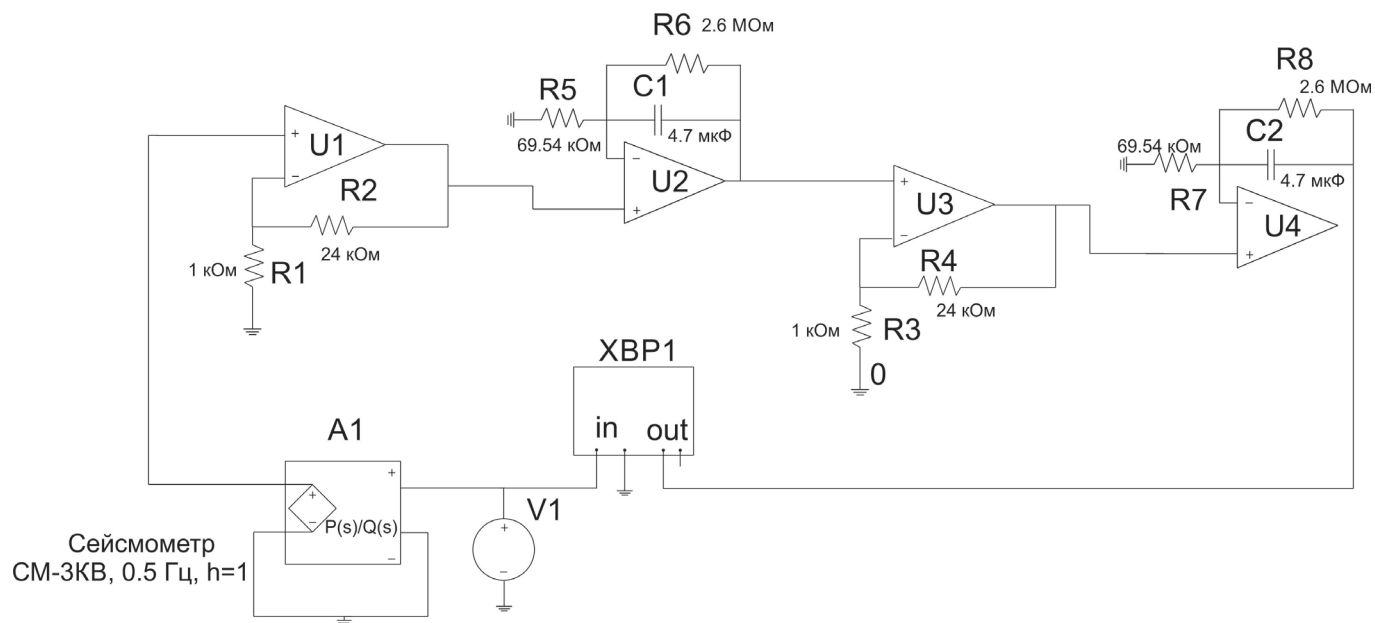


Рис. 8. Расширение АЧХ сейсмометра CM-3KB в область низких частот от 0.5 до 0.02 Гц с помощью звена $F_2(s)$

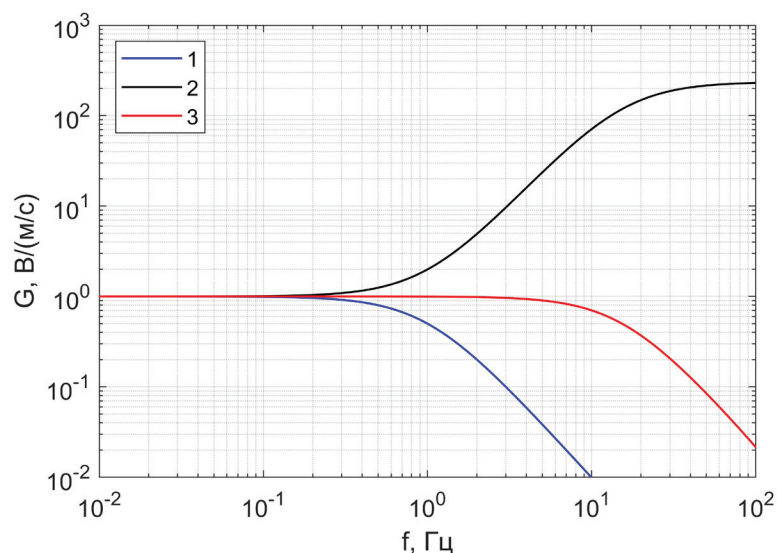


Рис. 9. Результат коррекции АЧХ датчика с верхней граничной частотой 1 Гц (1) в область высоких частот до 10 Гц путем умножения передаточной функции сейсмометра (1) и передаточной функции корректирующего фильтра (2) с учетом поправки 1.533ω к новой граничной частоте датчика

Передаточная функция датчика $G_1(s)$ и корректирующего фильтра $G(s)$ записываются в виде:

$$G_1(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2}, \quad (12)$$

$$G(s) = \left(\frac{s + \frac{1}{C(R1 + R2)}}{s + \frac{1}{CR2}} \right)^2. \quad (13)$$

Результирующая АЧХ датчика после коррекции определяется как $G_c(s) = |G_1(s)G(s)|$. Исходными данными для расчета номиналов корректирующего фильтра являются $\omega_0 = 2\pi$, $c = 4.7 \cdot 10^{-6}$ Ф, $\omega_1 = 2\pi \cdot 10 \cdot 1.533$. После вычисления можно получить значения сопротивлений $R1 = 31.5$ кОм, $R2 = 2.21$ кОм.

Стоит отметить, что при использовании корректирующих звеньев $F_1(s)$ и $F_2(s)$ необходимо учитывать следующую особенность систем 2-го порядка. Последовательное включение 2-х звеньев приводит к отклонению требуемой граничной частоты от расчетной. При использовании $H_2(s)$ для коррекции функции 2-го порядка последовательно подключают 2 звена для расширения полосы в сторону верхних или нижних частот. При этом требуемую граничную величину частоты при использовании формул (6) необходимо увеличивать в 1.533 раза. В случае расширения в сторону верхних частот – $\omega_0 < \omega_1$ – вместо величины ω_1 следует использовать $1.533\omega_1$, а в случае расширения в сторону нижних частот – $\omega_0 > \omega_1$ – вместо ω_1 необходимо использовать частоту в 1.533 раза меньше: $\omega_1/1.533$. Объясняется это тем фактом, что при умножении двух одинаковых передаточных функций 1-го порядка результирующая полоса частот сокращается в 1.533 раза для систем 2-го порядка.

Заключение

В рамках данной работы предложен новый подход к расширению возможностей сейсмической аппаратуры. Рассмотрен процесс синтеза схемы корректирующего фильтра на базе биквадратной передаточной функции. Рассчитаны схемные реализации для широко распространенных на территории России короткопериодных сейсмометров типа СМ-3КВ и высокочастотных геофонов. Разработанный алгоритм позволяет расширить АЧХ сейсмометра СМ-3КВ в область низких частот до 0.02 Гц (при штатной частоте 0.5 Гц) и геофона GS-20DX до 1 Гц (при собственной частоте 10 Гц). Внедрение описанных схем при проведении сейсмического мониторинга может существенно снизить общую стоимость работ по организации систем наблюдения.

Благодарности

Авторы благодарят рецензентов за замечания и комментарии, которые помогли значительно улучшить изложение материала.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900172-5).

Список литературы

- Абрахамс Дж., Каверли Дж. Анализ электрических цепей методом графов. М. : Мир. 1967. – 176 с.
- Беседина А.Н. Научное обоснование методов коррекции волновых форм при проведении сейсмических наблюдений. Дис. ...канд. физ.-мат. наук. Москва: ИДГ РАН. 2014. – 143 с.
- Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Павлов Д.В., Волосов С.Г. Инструментальные методы расширения амплитудно-частотной характеристики геофона // Сейсмические приборы. 2019. Том 55. № 3. С. 5–22. <https://doi.org/10.21455/si2019.3-1>
- Беседина А.Н., Кабыченко Н.В. Применение датчиков с расширенными частотными характеристиками для регистрации землетрясений и взрывов // Динамические процессы в геосферах. Вып. 6. М. : ГЕОС. 2014. С. 86–95. <https://elibrary.ru/tmlhev>
- Кабыченко Н.В., Павлов Д.В., Беседина А.Н. Устройство для коррекции частотной характеристики датчика / Патент № 111689, Российская Федерация: МПК G01V 1/00 (2006.01); патентообладатель ИДГ РАН. – 2011. – № 2011119205/28; заявл. 13.05.2011; опубл. 20.12.2011; Бюл. № 35. https://yandex.ru/patents/doc/RU111689U1_20111220
- Кабыченко Н.В., Беседина А.Н., Волосов С.Г., Королев С.А., Кочарян Г.Г. Короткопериодные сейсмометры в сейсмологии // Сейсмические приборы. 2017. Том 53. № 1. С. 44–65. <https://doi.org/10.21455/si2017.1-4>.
- Кабыченко Н.В., Беседина А.Н., Павлов Д.В., Шарафиев З.З. Устройство коррекции АЧХ датчика / Патент № 200198, Российская Федерация: МПК G01P/00 (2006.01); патентообладатель ИДГ РАН. – 2020. – № 2020100103; заявл. 09.01.2020; опубл. 12.10.2020. https://yandex.ru/patents/doc/RU200198U1_20201012

Al-Alaoui M.A. Low-frequency differentiators and integrators for biomedical and seismic signals // IEEE Transactions on circuits and systems I: fundamental theory and applications. 2001. Vol. 48 (8). P. 1006–1011. <https://doi.org/10.1109/81.940191>

Besedina A.N., Kabychenko N.V. Rationale for applying short-period sensors with extended frequency response for recording strong earthquakes // Seismic Instruments. 2017. Vol. 53 (1). P. 19–27. <https://doi.org/10.3103/S0747923917010029>

Besedina A.N., Kabychenko N.V., Kocharyan G.G., Pavlov D.V. Correction of frequency characteristics of seismic sensors and noise of corresponding measuring channels // Seismic Instruments. 2012. Vol. 48 (1). P. 51–56. <https://doi.org/10.3103/S0747923912010021>

Boulaenko M.E. Novel tools for research and education in seismology. MS Thesis University of Bergen, Bergen, Norway. 2002. – 114 p.

Dergach P.A., Tubanov Ts.A., Yushin V.I., Duchkov A.A. Features of software implementation of low-frequency deconvolution algorithms // Seismic Instruments. 2019. Vol. 55 (3). P. 345–352. <https://doi.org/10.3103/S0747923919030046>

Dergach P.A., Yushin V.I. Electrodynamic geophones beyond the limit of capacity // Seismic Instruments. 2017. Vol. 53 (4). P. 280–285. <https://doi.org/10.3103/S0747923917040028>

Havskov J., Alguacil G. Instrumentation in Earthquake Seismology // Modern Approaches in Geophysics. Springer Academic Publishers. 2002. – 313 p.

Ma K., Wu J., Ma Y., Xu B., Qi S., Jiang X. An effective method for improving low-frequency response of geophone // Sensors. 2023. Vol. 23 (6). P. 3082. <https://doi.org/10.3390/s23063082>

Mihaylov A., El Naggar H. A comparison of instrument response correction methods: Post-processing and real-time methods // Results in Geophysical Sciences. 2021. Vol. 8. P. 100033. <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2021.100033>

Romeo G., Spinelli G. Extending a Lippmann style seismometer's dynamic range by using a non-linear feedback circuit // Advances in Geosciences. 2013. Vol. 36. P. 27–30. <https://doi.org/10.5194/adgeo-36-27-2013>

Scherbaum F. Of Zeros and Poles. Fundamentals of Digital Seismology // Modern Approaches in Geophysics. Kluwer Academic Publishers, 1996. – 256 p.

Ulmann B. Overdamping geophones using negative impedances. 2005. P. 1–7. http://www.vaxman.de/publications/teach_gp.pdf

EXTENDING THE CAPABILITY OF SEISMIC SENSORS USING A UNIVERSAL FILTER TRANSFER FUNCTION

© 2024 N. V. Kabychenko¹, A. N. Besedina^{1,*}, Z. Z. Sharafiev¹

¹*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**Email: besedina.an@idg.ras.ru*

In recent years the global trend in seismological observations consists in increasing the number of measuring points and equipping them with broadband and highly sensitive sensors. However, this approach leads to a significant rise in the cost of measurements. One possible solution to this problem is the use of much cheaper geophones or short-period seismometers with an extended frequency range as additional sensors. This paper discusses the process of synthesizing a correction filter circuit based on a biquadratic transfer function, and provides schemes for expanding the frequency characteristics of sensors, including circuits for correcting the characteristics of the SM-3KV seismometer and the GS-20DX geophone in instrument design. The developed algorithm makes it possible to expand the frequency response of the SM-3KV seismometer to low frequencies region up to 0.02 Hz (natural frequency of 0.5 Hz) and the GS-20DX geophone to 1 Hz (natural frequency of 10 Hz).

Keywords: inverse filter, instrument correction, correction filter, biquadratic transfer function, amplitude-frequency response of the sensor.