

В. С. ПЕЛЛИНЕЦ, А. Е. СЕРПУХОВА
(Ленинград)

О РАСЧЕТЕ УСИЛИТЕЛЕЙ ПЬЕЗОТОКОВ

В статье рассмотрены вопросы методики расчета усилителей пьезотокков, учитывающей допустимую величину динамической погрешности измерительного тракта и обеспечивающей наименьшие искажения сигнала при воздействии импульсных помех. Дан пример расчета усилителя пьезотокков и описан усилитель, выполненный в соответствии с подобным расчетом.

Широкий диапазон измерения как по частоте, так и по интенсивности, а также конструктивные преимущества, свойственные пьезоэлектрическим преобразователям [1], привели к значительному их распространению в области измерения механических величин. При этом возникла необходимость разработки и изготовления специализированных измерительных усилителей пьезотокков.

Основным свойством усилителей пьезотокков часто считают высокое входное сопротивление. Однако большое значение имеют и другие характеристики усилителя, определяющие его помехоустойчивость и величину динамических искажений, создаваемых измерительным трактом.

При выборе и расчете схемы усилителя пьезотокков необходимо учитывать следующие особенности измерительного тракта с пьезодатчиком:

1) значительный подъем амплитудно-частотной характеристики пьезодатчика вблизи его собственных частот, что приводит к большим искажениям входного сигнала;

2) наличие большой электромеханической связи у большинства применяемых пьезоэлектриков, а также большое выходное сопротивление пьезодатчика, что не позволяет устанавливать фильтр непосредственно после преобразователя;

3) смещение среднего уровня выходного сигнала в течение времени, определяемого постоянной времени входной цепи, после кратковременной утечки заряда во входной цепи усилителя пьезотокков (утечка может возникать за счет сеточных токов или токов базы входного каскада как при прохождении резонансных сигналов преобразователя, так и при воздействии импульсных помех самого различного происхождения);

4) искажения передаваемого сигнала за счет конечного значения постоянной времени входной цепи, полностью аналогичные искажениям, создаваемым переходными цепями усилителей на сопротивлениях [2].

Для расчета должны быть заданы: низшая собственная частота f_{01} и степень успокоения ϵ закрепленного преобразователя; ожидаемый спектр исследуемого процесса, или максимальные значения сигнала

преобразователя на его собственных частотах; максимально возможная амплитуда напряжения U_n импульсных помех на входе усилителя; допустимая величина амплитудной динамической погрешности δ измерительного тракта; характеристики преобразователя: чувствительность ξ и емкость C_n ; диапазон измерения $a_1 - A_n$; напряжение U_2 на выходе усилителя; полное сопротивление нагрузки усилителя, интервал наблюдения t_n .

Методика расчета получается наиболее последовательной при следующем его порядке: 1) согласование усилителя с нагрузкой; 2) выбор корректирующего фильтра нижних частот; 3) выбор входного напряжения усилителя; 4) распределение поддиапазонов и расчет масштабных емкостей; 5) определение коэффициента усиления; 6) определение входных сопротивлений.

Согласование с нагрузкой производится обычным путем, например, в соответствии с [3]; в результате определяется необходимость введения в усилитель выходного каскада, характеристики последнего и производится выбор его схемы.

Для компенсации динамических искажений, вносимых преобразователем, в схему усилителя необходимо вводить корректирующий фильтр.

Его амплитудно-частотная характеристика $\beta_\Phi(f)$ должна возможно более точно соответствовать закону, обратному функции, определяющей первый подъем амплитудно-частотной характеристики $\beta_n(f)$ преобразователя вплоть до его нижней собственной частоты; на более высоких частотах ее уровень должен быть минимальным:

$$\begin{aligned} \beta_\Phi(f) &\approx \frac{1}{\beta_n(f)}; & f \leq f_{01}; \\ \beta_\Phi(f) &\approx 0; & f > f_{01}, \end{aligned} \quad (1)$$

где f_{01} — низшая из собственных частот преобразователя.

Фазо-частотная характеристика фильтра в диапазоне частот $0 - f_{01}$ должна приближаться к линейной. В этом случае, начиная с момента окончания переходного режима, сдвиг записи во времени будет постоянным, т. е. форма кривой измеряемой величины будет регистрироваться без искажений.

Фильтр подбирается экспериментально; схемы фильтров с амплитудно-частотными характеристиками подобного типа приводятся, в частности, в [4, 5].

Выбор схемы входного каскада и ее параметров должен обеспечивать получение достаточно высокого входного сопротивления усилителя и широкого амплитудного диапазона каскада. Номинальное напряжение на входе определяется как меньшее из двух значений:

$$U_1 \leq \frac{U_d}{x}; \quad (2)$$

$$U_1 \leq \frac{U_{ym}}{x}, \quad (3)$$

где U_1 — входное напряжение при максимальном уровне измеряемого сигнала;

U_d — предел линейности амплитудной характеристики входного каскада;

κ — превышение резонансным сигналом уровня номинального сигнала (в ряде практических случаев значения κ составляют 10—30);

U_{ym} — предельное значение напряжения, при котором сохраняется входное сопротивление каскада (в качестве U_{ym} принимается меньшее из двух возможных значений для отрицательной и положительной полярностей).

Схема входного каскада должна удовлетворять также условию

$$U_{ym} \geq U_n, \quad (4)$$

где U_n — максимально возможное напряжение импульсной помехи на входе;

причем в [6] рекомендуется производить измерение величины U_{ym} не только на постоянном, но и на переменном токе повышенной частоты. Для лампового каскада это вряд ли оправдано.

Достаточно высокие значения U_n и U_{ym} могут быть получены только в режиме, обеспечивающем глубокую отрицательную обратную связь (катодные и эмиттерные повторители и т. п.). При этом наиболее высокими значениями U_{ym} обладают сверхэкономичные лампы прямого накала (2П1П, 2П2П, 1Ж29Б и др.). Характеристики транзисторов, кроме полевых, в этом отношении много хуже, что практически исключает возможность создания в настоящее время полупроводниковых усилителей пьезотокков с высокой помехоустойчивостью.

Изменение чувствительности усилителя (разбивка на поддиапазоны) становится необходимым в случаях, когда $M = \frac{A_n}{a_1} > 14 - 20 \text{ дБ}$, где A_n — максимальное, а a_1 — минимальное значения измеряемой величины.

Установка аттенюатора на входе усилителя, как указывалось выше, недопустима, а введение делителя между каскадами приводит либо к нарушению условия (3) на верхних поддиапазонах, либо к снижению U_1 на нижних. Последнее ухудшает отношение сигнал/помеха и требует соответствующего увеличения коэффициента усиления. Поэтому наиболее рациональным способом изменения чувствительности усилителя пьезотокков является переключение входной (масштабной) емкости C_m .

Для расчета поддиапазонов необходимо задаться коэффициентом перекрытия внутри диапазона m и коэффициентом перекрытия диапазонов b :

$$m = \frac{A_k}{a_k}; \quad b = \frac{A_k}{a_{k+1}}; \quad b < m, \quad (5)$$

где A_k , a_k — максимальное и минимальное значения измеряемой величины в поддиапазоне;

k — номер поддиапазона.

Значения m выбираются от 20 дБ при низком уровне помех в измерительном тракте до 6 дБ при высоком их уровне. Значения b обычно принимают на 3—8 дБ менее m , учитывая, что реально используемое перекрытие в поддиапазоне колеблется от b до m , а количество поддиапазонов n определяется выражением

$$n = \frac{M - m}{m - b} + 1. \quad (6)$$

По значениям m и b , согласно (5), рассчитываются, а затем округляются пределы измерения на каждом из поддиапазонов.

Максимальное значение масштабной емкости в усилителях, используемых с преобразователями, содержащими поликристаллические пьезоэлектрики, не должно превышать 0,01 мкф. При больших значениях C_m , как это следует из экспериментальных данных, могут иметь место заметные отклонения от расчетного коэффициента деления. Объяснение эффекта следует искать в сложной электромеханической схеме этих пьезоэлектриков и наличии в ней нелинейных параметров.

Масштабная емкость C_{m1} первого поддиапазона рассчитывается по формуле

$$C_{m1} = \frac{A_1 \xi}{U_1} - C_n, \quad (7)$$

где ξ — чувствительность преобразователя на единицу измеряемой величины в пк;

$$C_n = C_n + C_0;$$

C_n — емкость преобразователя в пф;

C_0 — емкость входа усилителя в пф.

Если в результате расчета будет получено отрицательное значение C_{m1} следует принять $C_{m1} = 0$ и, согласно (7), найти новое значение U_1 или же применить более чувствительный преобразователь.

Масштабные емкости остальных поддиапазонов определяются по формуле

$$C_{mk} = \frac{A_k}{A_1} (C_n - C_{m1}) - C_n. \quad (8)$$

Общий коэффициент усиления складывается из коэффициентов усиления отдельных каскадов и коэффициента передачи фильтра. Каскады усиления рассчитываются обычным способом [2]. Фильтр включается непосредственно после первого каскада, поэтому амплитудные характеристики последующих каскадов должны обладать линейностью лишь в пределах номинальных значений сигнала.

Расчет входного сопротивления усилителя выполняется из условия обеспечения заданной динамической погрешности δ .

Представляя входную цепь как одно из звеньев $C-R$, составляющих эквивалентную схему измерительного тракта без преобразователя, получим:

$$\frac{1}{\tau_{\text{эkv}}} \approx \frac{1}{\tau_{\text{вх}}} + \frac{1}{\tau_{\text{ус}}} + \frac{1}{\tau_{\text{р}}} \approx \frac{1}{\tau_{\text{вх}}} + \frac{1}{\tau_{\text{ур}}}; \quad \frac{1}{\tau_{\text{ур}}} = \frac{1}{\tau_{\text{ус}}} + \frac{1}{\tau_{\text{р}}}, \quad (9)$$

где $\tau_{\text{эkv}}$ — суммарная эквивалентная постоянная времени;

$\tau_{\text{вх}} = R_{\text{вх}, k} C_{\text{вх}, k}$ — постоянная времени входной цепи ($C_{\text{вх}, k} = C_n + C_{mk} + C_0$);

$\tau_{\text{ус}}, \tau_{\text{р}}$ — постоянные времени усилителя и регистрирующего устройства.

Величина $\tau_{\text{эkv}}$ зависит от заданной погрешности δ , интервала измерения t_n или наибольшего периода T измеряемой величины и закона ее изменения со временем.

Так, например, для установившегося гармонического процесса связь между $\tau_{\text{эkv}}, \delta$ и T можно представить табл. 1.

Приближенные соотношения для нестационарных

Таблица 1

$\delta, \%$	$\tau_{\text{эkv}}/T$
1	1,1
2	0,8
3	0,67
4	0,57
5	0,5

Таблица 2

Вид измеряемого процесса	Выражение для δ , %
$U=0; t \leq 0$ $U=U_0; t > 0$	$\delta \approx \frac{100}{\tau_{\text{ЭКВ}}/t_{\text{Н}}}$
$U=0; t \leq 0$ $U=at; t > 0$	$\delta \approx \frac{50}{\tau_{\text{ЭКВ}}/t_{\text{Н}}}$
$U=0; t \leq 0$ $U=at^2; t > 0$	$\delta \approx \frac{33}{\tau_{\text{ЭКВ}}/t_{\text{Н}}}$

процессов, начинающихся в момент времени $t=0$, приведены в табл. 2.

После того как будет найдено $\tau_{\text{ЭКВ}}$, необходимо задаться $\frac{\tau_{\text{ВХ}}}{\tau_{\text{УР}}}$ и, пользуясь (9), вычислить искомое значение $\tau_{\text{ВХ}}$, а затем входные сопротивления для каждого поддиапазона.

Большие значения постоянных времени усилителя и регистратора обычно достигаются без заметного ухудшения остальных характеристик, тогда как получение больших значений

$\tau_{\text{ВХ}}$ зачастую связано с большими трудностями. Поэтому отношение $\frac{\tau_{\text{ВХ}}}{\tau_{\text{УР}}}$ целесообразно выбирать в пределах 0,3—0,5.

Входное сопротивление усилителя не должно быть больше величины, полученной из расчета, иначе увеличится время восстановления режима, т. е. снизится помехоустойчивость усилителя. При этом входное сопротивление лампы первого каскада желательно иметь на порядок больше, чем $R_{\text{ВХ1}}$, шунтируя его постоянным сопротивлением нужной величины.

В соответствии с этой методикой был выполнен расчет усилителя пьезотокков для следующих исходных данных при измерении линейно нарастающего ускорения: диапазон измерения от 40 до 2000 g; интервал измерения 2 мсек; динамическая погрешность не более 3%; чувствительность преобразователя 0,2 пк/г; емкость преобразователя 450 пф; низшая собственная частота закрепленного преобразователя 15 кгц; степень успокоения около 0,01; уровень импульсных помех на входе усилителя 25 в. Характеристики осциллографа, использованного в качестве измерительного устройства, таковы: входное сопротивление 150 ком; напряжение полного отклонения луча 0,23 в; эквивалентная

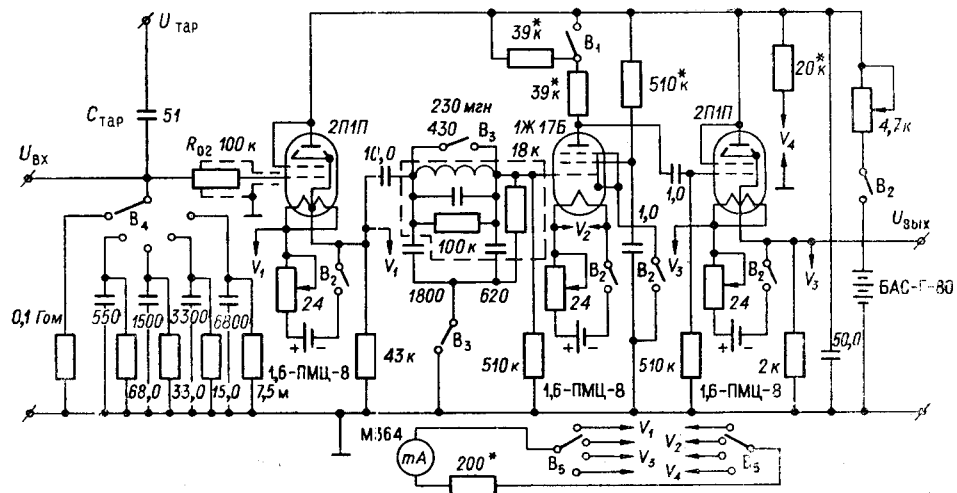


Рис. 1.

постоянная времени 0,2 сек; емкость кабеля, ведущего к осциллографу, 5000 пф.

Электрическая схема усилителя пьезотоков, выполненная в близком соответствии с расчетом, представлена на рис. 1. Постоянная времени входной цепи составляет около 0,06 сек. Поддиапазоны измерения даны в табл. 3.

Фильтр подобран экспериментально; его амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики приведены на рис. 2 (кривые 2 и 3); там же для сравнения дана расчетная кривая 1, соответствующая выражению

$$\beta_{\Phi}(f) = \sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + \left(2\varepsilon \frac{f}{f_0}\right)^2}$$

$(f_0 = 16 \text{ кгц}; \varepsilon = 0,01).$

Т а б л и ц а 3

Поддиапазон измерения, г
40—125
80—250
150—500
300—1000
600—2000

Это выражение представляет собой функцию, обратную функции амплитудно-частотной характеристики некоторой системы с одной степенью свободы. Коэффициент передачи фильтра на низких частотах близок к единице.

Коэффициент усиления промежуточного каскада в зависимости от установленного переключателем B_1 сопротивления анодной нагрузки составляет 2,7 (1-й режим) или 17 (2-й режим).

Кроме описанных выше элементов, схема усилителя содержит градуировочную емкость $C_{\text{тар}} = 51 \text{ пф}$, с помощью которой производится дистанционная градуировка канала усилитель—осциллограф без отключения преобразователя; сопротивление $R_{\text{ог}}$, ограничивающее ток утечки при появлении импульсов помех с амплитудой более 50 в; вольтметр для контроля режимов ламп; переключатель B_3 для отключения фильтра; включающее устройство, выполненное в виде разъема и обеспечивающее надежность работы на открытом воздухе.

Остальные характеристики усилителя таковы:

номинальные значения входного напряжения: в 1-м режиме $\pm 0,25 \text{ в}$; во 2-м режиме $\pm 0,1 \text{ в}$;

входное сопротивление остается постоянным

при значениях напряжения на входе до $\pm 50 \text{ в}$;

нелинейность амплитудной характеристики первого каскада не более 3% при значениях напряжения на входе до $\pm 8 \text{ в}$;

суммарный коэффициент усиления в 1-м режиме 1,2—1,8; во 2-м режиме 7—12;

частотный диапазон (на уровне 0,7) 2—8000 гц;

выходное сопротивление 350—400 ом;

срок службы гальванических элементов 80 час.

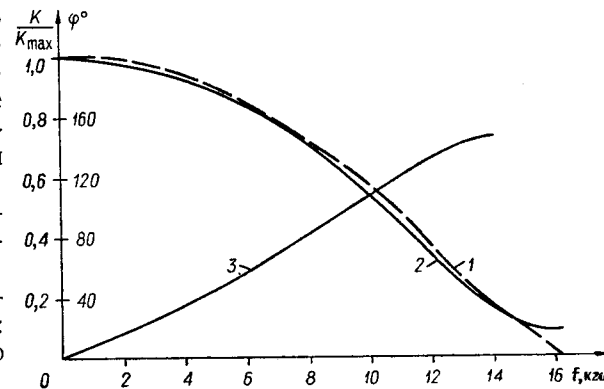


Рис. 2.

Выводы

Изложенные принципы расчета усилителей пьезоэлектрических обеспечивают согласование усилителя с преобразователем и измерительным устройством. Благодаря значительному расширению амплитудного диапазона первого каскада и рациональному выбору входных сопротивлений удастся существенно повысить помехоустойчивость тракта.

В разработке схемы и конструкции усилителя принимали участие Т. Г. Каляева и Е. М. Жуков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Иориш. Виброметрия. М., Машгиз, 1963.
2. П. В. Новицкий. Расчет и проектирование широкополосных пьезоэлектрических акселерометров.— Приборостроение, 1960, № 6.
3. Г. С. Цыкин. Электронные усилители. М., Связьиздат, 1960.
4. Л. Д. Гик, К. Б. Карандеев. Электрическая коррекция виброизмерительной аппаратуры. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
5. Н. П. Раевский, М. И. Субботин. Измерение линейных ускорений. М., Изд-во АН СССР, 1961.
6. T. Z. Greenwood. Transmitting Vibration Signals.— ISA Journal, 1963, v. 10, № 7, p. 51.

*Поступила в редакцию
2 февраля 1965 г.,
окончательный вариант —
24 декабря 1965 г.*