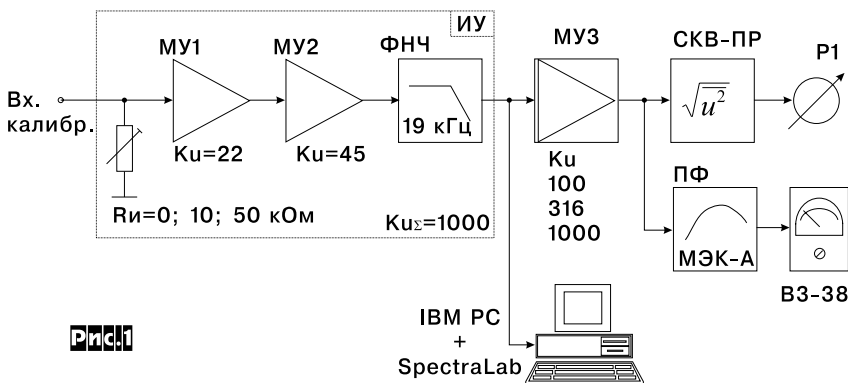


Шумовые параметры операционных усилителей

П.Борщ, В.Семенов, г.Киев

Более 35 лет прошло с момента выпуска фирмой Fairchild в 1964 г. первого серийного операционного усилителя (ОУ) $\mu A702$. За это время область первоначального применения операционных усилителей в аналоговых вычислительных машинах (АВМ) расширилась до практически всех направлений в радиотехнике. Причем использование ОУ обеспечивает почти идеальную повторяемость характеристик как серийных промышленных, так и радиолюбительских конструкций.

При разработке звукотехники, устройств автоматики, а также прецизионных измерительных и высокочувствительных регистрирующих устройств, кроме основных характеристик, часто необходимо знать шумовые параметры ОУ.



Для корректного расчета шумовых характеристик усилительных узлов нужно учитывать не только значение ЭДС шума, приведенной ко входу в рабочем диапазоне частот, но и шумового тока. В популярной справочной литературе, да и в ТУ, как правило, шумовые характеристики ОУ представлены недостаточно полно. Так в [1], [8] для некоторых типов ИС указано напряжение шума (среднеквадратичное значение), приведенное ко входу, при сопротивлении источника сигнала $R_i=0$ в полосе частот 0,1-10 Гц (или 20–20000 Гц) и/или нормированная спектральная плотность напряжения шума на частоте f_0 сопряжения низкочастотных шумов типа $1/f$ с горизонтальным участком спектра шумов, расположенным выше f_0 (f_0 –20000 Гц). Параметры шумового тока отсутствуют полностью.

В [4], [5] приведены спектральные плотности как шумового напряжения, так и шумового тока, но лишь для ограниченного количества типов ОУ.

Для определения шумовых параметров ОУ в соответствии с теоретическими положениями, изложенными в [2, 3, 5, 6, 7], был изготовлен измерительный стенд по структурной схеме **рис. 1**. Испытываемый ОУ включается по схеме неинвертирующего усилителя (МУ1) с $K_u=22$ (**рис. 2**), при этом малосигнальная полоса пропускания более 20 кГц обеспечивается с запасом для любого типа ОУ, независимо от его частотных характеристик. Эквивалентное сопротивление, приведенное к инвертирующему входу, составляет менее 20 Ом, что позволяет пренебречь шумами резисторов ООС, а также протекающим по ним шумовым током ОУ. При необходимости подключаются цепи частотной коррекции, соответствующие конкретному типу ИС. К входу усилителя с помощью переключателей могут поочередно подключаться резисторы (С2-14, $\pm 0,1\%$) 50 кОм, 10 кОм, образующие R_i , или общий провод ($R_i=0$). Для исключения контактных шумов ОУ подключаются только пайкой. После первого включен второй масштабный усилитель (МУ2) на ИС К157УД4 с $K_u=45,5$. Его вклад в суммарное напряжение шумов обоих усилителей, приведенный ко входу первого, составляет менее 0,08 мкВ (среднеквадратичное значение в полосе 20 кГц), а т.к. шумы суммируются в квадратуре, то в этом случае мож-

но измерять шумовые напряжения, приведенные ко входу, величиной от 0,25 мкВ и с погрешностью менее 5%.

На выходе измерительного усилителя (ИУ) включен ФНЧ 3-го порядка с $f_{ср}=19$ кГц и эквивалентной полосой пропускания равной $\Delta f=1,05/f_{ср}=20$ кГц для шумового сигнала по сравнению с "идеальным прямоугольным" ФНЧ ([5], т.1, с.485). Шумовой вклад ФНЧ ничтожен и его можно не учитывать. Общий коэффициент усиления измерительного усилителя $K_u=1000$ калибруется на частоте 1 кГц при подаче на вход сигнала величиной 1 мВ от прецизионного делителя напряжения с $R_{вх} < 1$ Ом, подключенному к выходу ГЗЧ. Для удобства измерений сигнал на среднеквадратичный измеритель (СКВ) и измеритель среднего уровня по кривой "А" МЭК подается через дополнительный масштабный усилитель (МУ3) с переключаемыми фиксированными $K_u=100, 316, 1000$. Схемы СКВ-преобразователя, МУ3 и взвешивающего фильтра "А" заимствованы из [2], в качестве измерителя среднего уровня использовался милливольтметр В3-38 на пределе 1 В. Нижняя граничная частота СКВ-измерителя по уровню -3 дБ равна 5 Гц, ИУ – 0,1 Гц.

Для уменьшения помех и наводок измерительный усилитель заключен в электрический экран из фольгированного стеклотекстолита со съемной крышкой, питание ИУ осуществлялось от аккумуляторной батареи напряжением $2 \times 12,6$ В $\pm 5\%$. Для определения спектра шумов использовался ПК PC AT с процессором Pentium 233MMX, 16 Mb оперативной памяти со звуковой картой CREATIVE SoundBlaster 16 и программой SpectraLAB, установленной с CD "Радиохобби-99".

Измерения напряжения шумов проводились при $R_i=0, 10$ кОм, полученные значения пересчитывались ко входу испытываемого ОУ с учетом коэффициента усиления ИУ и МУ3. **Результаты измерений** приведены в **табл. 1**, а **спектрограммы** – на **рисунках** без нумерации, расположенных с целью экономии места непосредственно в тексте краткого описания того или иного ОУ (см. **стр. 60-62**). Условия измерений ($R_i=0, 10$ кОм, 50 кОм) и тип ОУ указаны непосредственно на спектрограммах, причем масштаб по оси амплитуд и частот на всех рисунках один и тот же.

Поскольку частоты сопряжения фликер-шумов f_0 большинства ОУ расположены ниже 1 кГц, спектральную плотность ЭДС шумов с приемлемой погрешностью можно рассчитать, используя значения ЭДС **Уш.о.**, измеренное по кривой "А" при **$R_i=0$** :

$$E_{ш}[B/\sqrt{Гц}] = \frac{U_{ш.о}("A")}{\sqrt{\Delta f_{экв}}}, \quad [1]$$

где $\Delta f_{экв}$ – эквивалентная полоса пропускания фильтра "А" для "белого" шума ($\Delta f_{экв} \approx 10$ кГц). Или, для определения **Еш** в [нВ/√Гц] нужно значение **Уш.о** ("А") в [мкВ] в 3-м столбце **табл. 1** умножить на 10. Измерение параметров шумового тока затруднительно даже при использовании $R_i=50$ кОм из-за погрешности, вызванной остаточным напряжением паразитных электромагнитных полей, поэтому расчет спектральной плотности шумового тока не производился, а было вычислено его среднеквадратичное значение в полосе частот 5-20000 Гц. Поскольку

$$U_{ш} = \sqrt{U_{ш.о}^2 + (I_{ш} \cdot R_u)^2 + 4kTR_u\Delta f} \quad [2]$$

$$I_{ш} = \frac{\sqrt{U_{ш}^2 - (U_{ш.о}^2 + 4kTR_u\Delta f)}}{R_u}, \quad [3]$$

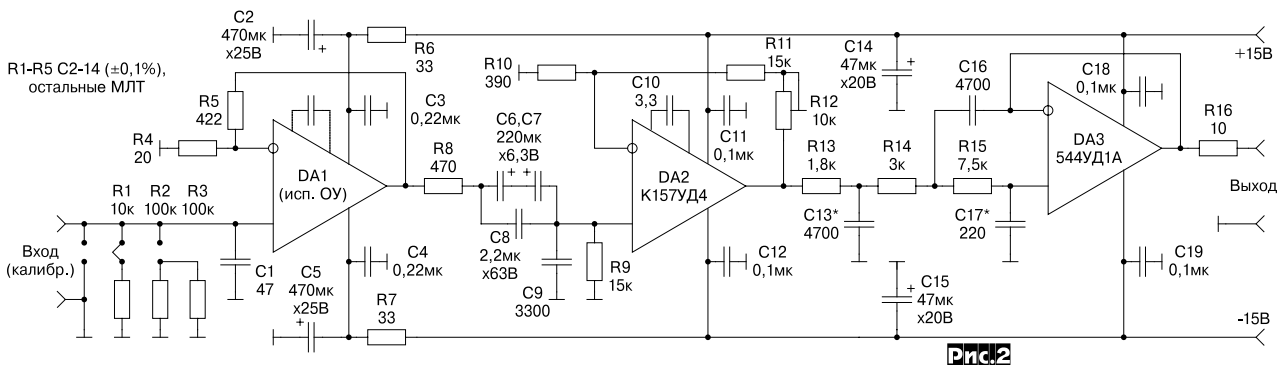


Таблица 1

Тип ОУ	Уш.о, мкВ		Уш, мкв				Иш, нА
	Rи = 0		Rи = 10 кОм		Rи = 50 кОм		Расчетное значение
	СКЗ	"А"	СКЗ	"А"	СКЗ	"А"	
К140УД1Б	0,57	0,285	2,6	1,6	8,8	6,0	0,15 - 0,26
	0,77	0,36	2,4	1,3	6,6	3,8	
	0,63	0,30	4,0	2,0	13,5	8,0	
	0,56	0,275	3,3	2,1	11	7,4	
	0,75	0,35	2,0	1,05	4,9	2,6	
140УД6	2,8	1,65	3,0	1,7	4,4	2,7	0,01-0,02
	2,65	1,6	3,0	1,7	4,5	2,7	
	2,9	1,7	3,0	1,75	4,6	2,75	
КР140УД608	2,45	1,5	2,9	1,7	4,4	2,7	0,01 -0,02
	2,7	1,65	2,9	1,75	4,4	2,7	
	3,0	1,8	3,3	1,95	5,0	2,9	
	2,5	1,5	2,8	1,7	4,4	2,6	
	2,6	1,5	2,9	1,7	4,4	2,7	
КР140УД708	1,9	1,15	2,25	1,55	4,4	2,5	0,02 - 0,025
	2,0	1,25	2,3	1,5	4,4	2,5	
	2,1	1,28	2,35	1,6	4,5	2,55	
	2,0	1,25	2,3	1,5	4,4	2,6	
	2,0	1,25	2,3	1,5	4,4	2,5	
140УД11	2,5	1,2	3,3	1,6	5,0	2,9	<0,05
	3,6	3,2	3,7	2,5	5,4	4,0	
	2,6	1,3	3,3	1,65	5,0	2,9	
	2,4	1,15	3,1	1,5	4,8	2,75	
К140УД12 (Iупр=200 мкА)	3,0	1,55	-	-	4,9	2,8	0,01-0,02
	2,7	1,45	-	-	4,8	2,85	
К140УД12 (Iупр=60 мкА)	2,6	1,55	-	-	4,7	2,7	
	2,5	1,5	-	-	4,6	2,7	
К140УД12 (Iупр=15 мкА)	2,5	1,7	-	-	4,3	2,75	
	2,4	1,7	-	-	4,2	2,75	
К140УД1208 (Iупр=60 мкА)	2,6	1,5	-	-	4,4	2,8	
	2,4	1,45	-	-	4,2	2,8	
К140УД1208 (Iупр=200 мкА)	2,45	1,8	-	-	4,3	2,9	
	2,4	1,7	-	-	4,2	2,8	
К140УД14А	3,6	2,3	3,7	2,4	5,2	3,2	<0,01
	3,2	2,15	3,3	2,2	4,8	3,15	
	2,6	1,5	3,0	1,8	4,8	2,7	
	2,7	1,55	2,9	1,8	4,8	2,7	
	2,7	1,6	3,0	1,9	6,0	3,0	
КР140УД1408А	4,0	2,5	4,2	2,5	6,6	3,5	<0,01
	2,6	1,65	3,4	2,0	4,8	2,9	
	3,0	1,8	3,2	2,0	5,4	2,9	
	2,7	1,65	2,9	2,0	6,0	3,0	
	2,6	1,6	2,8	1,7	5,5	2,9	
К140УД17А	0,95	0,75	2,0	1,5	4,2	2,2	0,02
	1,5	0,78	2,0	1,15	4,1	2,2	
	0,92	0,68	2,1	1,1	4,2	2,15	
	0,88	0,7	2,0	1,0	4,1	2,2	
	0,92	0,67	2,0	1,1	4,2	2,4	

Тип ОУ	Уш.о, мкВ		Уш, мкв				Иш, нА
	Rи = 0		Rи = 10 кОм		Rи = 50 кОм		Расчетное значение
	СКЗ	"А"	СКЗ	"А"	СКЗ	"А"	
140УД25А	0,39	0,22	2,2	1,25	6,4	4,1	0,08 - 0,12
	0,37	0,21	2,2	1,25	7,0	4,4	
	0,43	0,215	2,05	1,15	5,6	3,6	
	0,4	0,215	2,05	1,1	6,0	3,8	
	0,4	0,21	2,1	1,1	6,8	4,4	
140УД26Б	0,52	0,22	2,15	1,25	7,4	4,8	0,08 -0,15
	0,53	0,23	2,3	1,2	6,0	3,6	
	0,48	0,21	2,2	1,1	7,8	4,7	
	0,58	0,25	2,4	1,1	5,5	3,3	
	0,5	0,26	2,1	1,1	5,4	3,2	
153УД2	2,8	1,45	3,0	1,7	4,6	2,7	0,05
	2,7	1,4	2,9	1,7	4,6	2,7	
	2,4	1,3	3,0	1,7	4,8	2,9	
153УД6	2,5	1,4	3,0	1,65	4,5	2,7	0,03
	2,8	1,45	3,1	1,7	4,5	2,7	
154УД1Б	4,5	3,6	4,8	3,7	5,4	4,4	0,01
К157УД2	1,55	0,8	2,4	1,3	6,3	2,7	0,07-0,1
	1,45	0,84	2,4	1,25	6,0	2,8	
	1,5	0,8	2,5	1,25	6,4	2,6	
	1,6	0,86	2,6	1,3	5,2	2,6	
	1,5	0,82	2,6	1,35	6,0	2,4	
К157УД4	1,6	0,88	2,4	1,35	4,3	2,4	0,03
	1,65	0,88	2,4	1,35	4,4	2,5	
	1,55	0,88	2,7	1,3	4,4	2,5	
	1,5	0,84	2,4	1,55	4,4	2,6	
	1,6	0,87	2,4	1,35	4,4	2,7	
КР140УД18	1,9	1,05	2,5	1,4	4,1	2,4	-
	2,2	1,1	2,6	1,55	4,2	2,4	
	2,4	1,4	2,9	1,65	4,4	2,5	
	2,2	1,15	2,6	1,5	4,6	2,4	
	2,0	1,1	2,6	1,5	4,3	2,4	
К140УД22	2,05	1,2	2,6	1,5	4,2	2,4	-
	1,7	0,95	2,5	1,4	4,1	2,3	
	2,25	1,2	2,5	1,35	4,4	2,4	
	1,6	0,9	2,3	1,25	4,1	2,3	
К140УД23	1,8	0,95	2,4	1,3	4,1	2,35	-
	2,35	1,2	2,9	1,6	4,2	2,4	
	2,0	1,05	2,6	1,4	4,1	2,4	
	2,2	1,15	2,6	1,4	4,3	2,4	
	2,0	1,05	2,6	1,4	4,1	2,4	
КР140УД8А	5,2	3,4	5,6	3,7	6,4	4,2	-
	7,0	4,2	7,2	4,4	8,0	5,0	
	4,4	2,8	4,7	2,9	5,8	3,4	
	10,0	6,2	10,4	6,4	10,5	6,6	
	2,2	1,4	2,6	1,7	4,2	2,6	
	4,8	3,0	5,0	3,2	6,2	4,0	
	4,6	3,0	4,9	3,2	5,8	3,6	
	2,5	1,6	2,8	1,8	4,2	2,8	
4,4	2,8	4,6	3,0	5,6	3,6		

Таблица 1 (окончание)

Тип ОУ	Уш.о, мкВ		Уш, мкВ				Iш, нА
	Rи = 0		Rи = 10 кОм		Rи = 50 кОм		
	СКЗ	"А"	СКЗ	"А"	СКЗ	"А"	
140УД8А	7,8	4,1	7,8	4,1	8,6	4,6	-
544УД1А ОСМ	2,1	1,2	2,8	1,7	4,4	2,4	-
	1,8	0,9	2,7	1,45	4,2	2,3	
	2,5	1,1	2,9	1,8	4,5	2,4	
	2,1	1,15	2,8	1,8	4,4	2,4	
	2,0	1,0	2,8	1,8	4,4	2,3	
КР544УД1А	2,0	1,1	2,6	1,65	4,4	2,4	-
	1,7	0,9	2,3	1,4	4,1	2,3	
	2,1	0,9	2,25	1,35	4,5	2,4	
	2,95	1,7	3,0	1,8	4,6	2,4	
	2,3	1,3	2,6	1,6	4,4	2,3	
544УД2А	3,8	2,0	4,2	2,2	5,3	2,8	-
	4,4	2,3	4,2	2,4	5,8	3,3	
	4,5	2,3	4,8	2,4	5,7	3,3	
	3,8	2,1	4,0	2,2	5,2	3,1	
	4,0	2,2	4,2	2,3	5,6	3,2	
КР544УД2А	5,0	2,7	5,4	2,8	6,5	3,5	-
	3,8	2,0	5,0	2,4	5,4	3,2	
КР574УД1Б	2,7	1,4	3,2	1,65	5,2	2,7	-
	3,1	1,65	3,8	1,9	5,4	2,8	
К574УД2Б	6,0	3,3	6,4	3,6	7,4	4,0	-
	4,6	2,4	5,1	2,8	6,2	3,3	
LF355N	2,15	1,25	2,7	1,5	4,5	2,4	-
	2,5	1,5	2,75	1,55	4,7	2,5	
	2,2	1,28	2,8	1,65	4,6	2,4	
	2,6	1,6	3,0	1,8	4,8	2,6	

где
 $I_{ш}$ – эффективное среднеквадратичное значение шумового тока;
 $U_{ш}$ – суммарное напряжение шумов, приведенное ко входу при $R_i = 50$ кОм (5-й столбец табл.1);
 $U_{ш.о}$ – ЭДС шумов, приведенная ко входу при $R_i = 0$ (2-й столбец табл.1);
 $R_i = 50$ кОм;
 $\Delta f = 5-20000$ Гц;
 k – постоянная Больцмана;
 T – абсолютная температура.

Ввиду ничтожного значения $I_{ш}$ в ОУ с полевым входом, расчет проводился только для ОУ с биполярным входным каскадом.

Авторы не претендуют на полноту охвата разновидностей ОУ и высокую точность полученных результатов из-за ограниченного числа исследованных типов ИС и количества ОУ в пределах одного типа, а также погрешностей калибровки и присутствия остаточного напряжения помех, однако полученные шумовые параметры могут обеспечить сравнительный анализ и обоснованный выбор типа ИС для конкретного применения.

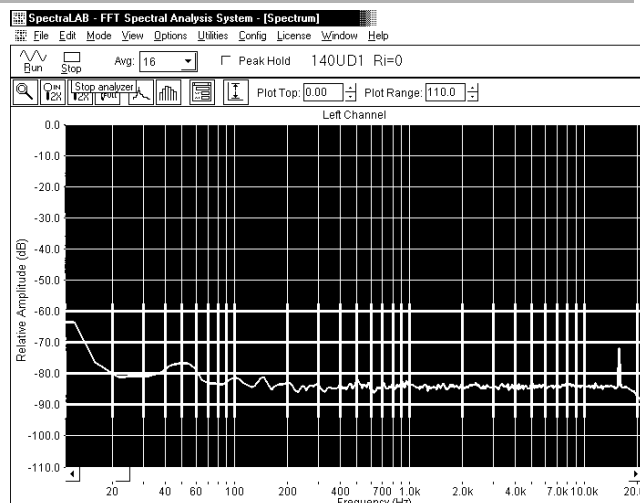
Следует отметить, что в данной работе количественные параметры были определены традиционным способом с помощью специализированных измерителей, а программа SpectraLAB использовалась лишь как индикатор спектра. Но это не значит, что программой нельзя пользоваться при звукотехнических измерениях. SpectraLAB является мощным инструментом исследования параметров как шумовых, так и стационарных звуковых сигналов [9], поэтому при необходимости разработчики могут использовать её в более полном объеме для количественных и качественных характеристик шумов.

Краткий анализ шумовых параметров различных типов ОУ ОУ с биполярным входом

140УД1 (приблизительный аналог $\mu A702$)

$E_{ш} = 3-3,5$ нВ/ $\sqrt{Гц}$; $I_{ш} = 0,15-0,26$ нА ($\Delta f = 20$ кГц)

Первый отечественный монолитный ОУ. При малой величине R_i



имеет небольшой уровень напряжения шумов, приведенных ко входу, уступая по этому параметру лишь 140УД25, 26. Например, микрофонный усилитель с эквивалентными сопротивлениями, приведенными к обоим входам, по 250 Ом, на 140УД1 будет иметь выигрыш по шумам на 6-10 дБ по сравнению с усилителем на 157УД2/4, включенным по той же схеме. Однако большой шумовой ток сводит на нет его преимущества при $R_i > 10$ кОм. 140УД1 – единственный из приведенных в данной статье с выходным буфером, работающим в классе А, что в сочетании с широкополосностью делает его привлекательным для некоторых применений, в частности аудиофильских. В последние годы незаслуженно "забыт" разработчиками из-за его относительной "древности" и нежелания возиться с цепями частотной коррекции.

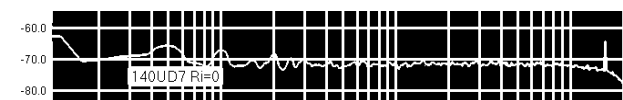
140УД6, КР140УД608 (полный аналог MC1456)



$E_{ш} = 15-18$ нВ/ $\sqrt{Гц}$; $I_{ш} = 0,01-0,02$ нА

По ЭДС шумов имеет хорошие характеристики, небольшая величина $I_{ш}$ позволяет работать с большими $R_i < 100$ кОм, практически не внося собственных шумов.

140УД7, КР140УД708 (полный аналог $\mu A741$)



$E_{ш} = 12-13$ нВ/ $\sqrt{Гц}$; $I_{ш} = 0,02-0,025$ нА

Имеет хороший уровень ЭДС шумов, особенно в области самых низких частот, что обеспечивается специальной технологией изготовления, величина $I_{ш}$ позволяет оптимально применять ОУ с R_i до 50 кОм.

140УД11 (полный аналог LM118)



$E_{ш} = 12-30$ нВ/ $\sqrt{Гц}$; $I_{ш} = 0,05$ нА

Имеет большой разброс величины ЭДС шумов, величина $I_{ш}$ позволяет оптимально работать с $R_i < 10$ кОм. Приемлемые шумовые параметры для скоростного ОУ ($\rho = +50/-20$ В/мкс).

К140УД12, КР140УД1208 (полный аналог $\mu A776$)

$E_{ш} = 15-18$ нВ/ $\sqrt{Гц}$; $I_{ш} = 0,01-0,02$ нА

По ЭДС шума – хорошие характеристики, при увеличении тока управления значение спектральной плотности $E_{ш}$ уменьшается в средне-высокочастотной области звукового диапазона, в области НЧ – увеличивается. Величина $I_{ш}$ позволяет оптимально работать с $R_i < 100$ кОм во всем диапазоне изменения тока управления. Однако из-за зависимости тока покоя выходного буфера, работающего в классе АВ, от тока управления, для достижения приемлемого коэффициента гармоник рекомендуется использование ОУ при токе управления не менее 15 мкА.

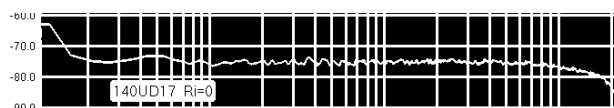
К140УД14, К140УД1408 (полный аналог LM108, LM308)



Еш = 15-25 нВ/√Гц; Iш = 0,01 нА

Уровень ЭДС шумов – несколько хуже среднего, однако очень малое значение Iш позволяет оптимально использовать ОУ с Ri < 1 МОм, почти наравне с ОУ с полевыми структурами на входе.

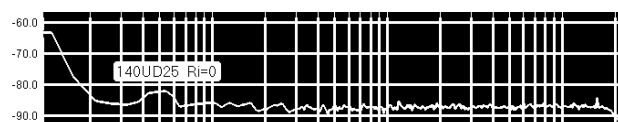
К140УД17 (полный аналог OP-07)



Еш = 7-8 нВ/√Гц; Iш = 0,02 нА

Первый малошумящий прецизионный отечественный ОУ с хорошими шумовыми характеристиками во всей полосе звуковых частот, позволяет оптимально работать с Ri < 50 кОм, но низкое быстродействие ($\rho = 0,3$ В/мкс) и наличие полной внутренней частотной коррекции ограничивают применение в усилительных устройствах.

140УД25 (полный аналог OP-27)



Еш = 2,2 нВ/√Гц; Iш = 0,08-0,12 нА

Отличное значение ЭДС шума получено ценой увеличения Iш, при этом оптимальное использование ОУ достигается при Ri < 10 кОм, хорошие скоростные свойства ($\rho = 2,5$ В/мкс) позволяют широко применять этот ОУ в звукотехнической аппаратуре.

140УД26 (полный аналог OP-37)

Еш = 2,2-2,5 нВ/√Гц; Iш = 0,08-0,15 нА

Шумовые характеристики аналогичны 140УД25, $\rho = 20$ В/мкс, частотно скорректирован для $K_u > 5$ – наилучший прецизионный ОУ бывшего СССР.

153УД2 (полный аналог LM-101)



Еш = 13 –15 нВ/√Гц; Iш = 0,05 нА

Ближайший родственник 140УД7, но с внешней коррекцией АЧХ, имеет максимальную гибкость применения в различных узлах, величина Iш позволяет оптимально работать с Ri < 30 кОм.

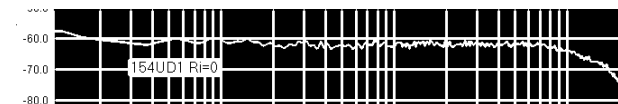
153УД6 (полный аналог LM-101A)



Еш = 14-15 нВ/√Гц; Iш = 0,03 нА

Характеристики аналогичны 153УД2, может оптимально работать с Ri < 50 кОм.

154УД1 (полный аналог HA2700)



Еш = 36 нВ/√Гц; Iш = 0,01 нА

Шумовые характеристики хуже среднего уровня ОУ – 140УД7, 153УД2 и аналогичных, но это простительно для микромощного скоростного ОУ (Iпотр = 120 мкА; $\rho = 10$ В/мкс).

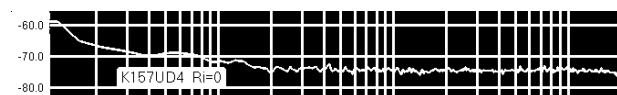
К157УД2 (зарубежного аналога не имеет)

Еш = 8-9 нВ/√Гц; Iш = 0,07-0,1 нА

Первый отечественный ОУ, специально разработанный для применения в высококачественных усилительных устройствах с нормированным напряжением шумов, приведенных ко входу $U_{ш} = 1,6$ мкВ при Ri = 600 Ом в полосе частот 20-20000 Гц. Имеет внешнюю частотную коррекцию и высокую гибкость применения. В одном корпусе ИС содержится 2 ОУ. По величине ЭДС шумов приближается к прецизионному 140УД17, позволяет оптимально работать с Ri < 10 кОм. В отсутствие внешней коррекции (Ск=0) имеет высокое быстродействие ($\rho = +20/-15$ В/мкс) и типовое значение $K_u = 46$ дБ (!) на частоте 1 МГц. В качестве выходного буфера использован т.н. "параллельный усилитель", позволяющий получить минимальный коэффициент гармоник (такое же

схемное решение применено фирмой Analog Devices Inc. в одной из последних разработок – высококачественном малошумящем ОУ AD797).

К157УД4 (аналог К157УД2)



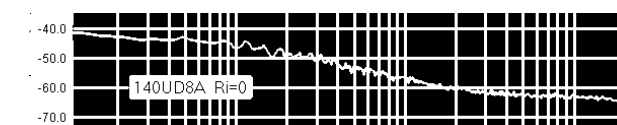
Еш = 8-9 нВ/√Гц; Iш = 0,03 нА

Одноканальный вариант К157УД2 с уменьшенным значением шумового тока, что позволяет оптимально использовать ОУ с Ri < 50 кОм, имеет максимальную гибкость применения. По совокупности различных параметров все одиночные и сдвоенные ОУ в ИС К157УД2-К157УД8 являются одними из лучших биполярных ОУ для применения в узлах усиления звукового сигнала.

ОУ с полевым входом

По ЭДС шумов, приведенных ко входу, ОУ с полевым входом в общем случае несколько уступают биполярным, но ничтожная величина Iш позволяет получить лучшие результаты при работе с источниками сигналов сопротивлением более 50-100 кОм, по сравнению с биполярными ОУ.

140УД8 (полный аналог μA740)



Еш = 15-42 нВ/√Гц

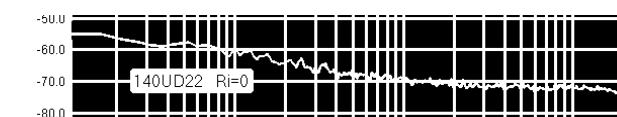
Первый отечественный ОУ с полевым дифкаскадом и лучшими статическими параметрами, чем у зарубежного аналога, имеет большой разброс значения ЭДС шумов, но хорошее быстродействие ($\rho = 5$ В/мкс) позволяет широко применять его в различных усилительных узлах.

КР140УД18 (полный аналог LF355)

Еш = 11-14 нВ/√Гц

Малошумящий ОУ, хорошее быстродействие ($\rho = 2$ В/мкс), универсальное применение.

140УД22 (полный аналог LF 156)



Еш = 9-12 нВ/√Гц

По шумовым параметрам несколько опережает КР140УД18

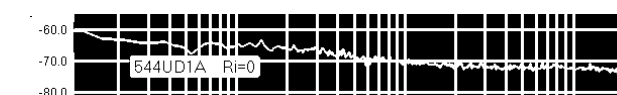
140УД23 (полный аналог LF 157)



Еш = 10-12 нВ/√Гц

Малошумящий скоростной ОУ ($\rho = 30$ В/мкс), частично скорректирован для $K_u > 5$, подключение внешней коррекции не предусмотрено, по совокупности параметров – один из лучших для усиления звукового сигнала.

544УД1 (приблизительный аналог μA740)

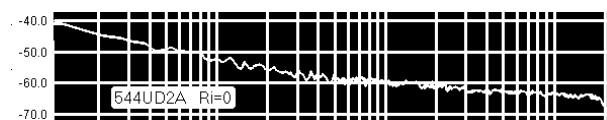


Еш = 9-13 нВ/√Гц

Первый отечественный малошумящий ОУ с полевым входом и нормированным напряжением шумов в диапазоне инфранизких частот 0,1-10 Гц (3 мкВ с индексом А и 5 мкВ – для Б), в области звуковых частот также имеет хорошие шумовые характеристики, по совокупности параметров лучше, чем более поздняя разработка – 140УД18, имеет широкое применение.

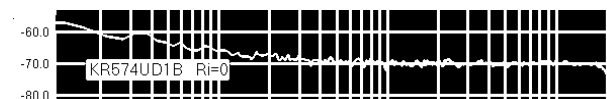
544УД2 (приблизительный аналог CA3130)

Еш = 20-27 нВ/√Гц



Удовлетворительные шумовые параметры при высоком быстродействии ($\rho = 20$ В/мкс), позволяет использовать внутреннюю и внешнюю частотную коррекцию, высокая гибкость применения, широко используется в различных усилительных узлах.

574УД1 (полный аналог AD513)



$E_{ш} = 14-17$ нВ/√Гц

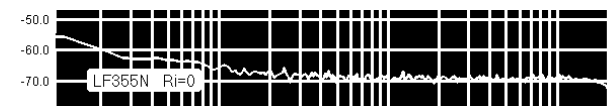
Хорошие шумовые параметры при высоком быстродействии ($\rho = 50-90$ В/мкс), имеет внешнюю частотную коррекцию, большую гибкость применения, лучший скоростной ОУ с полевым входом для усиления звукового сигнала.

574УД2 (полный аналог TL083)

$E_{ш} = 24-33$ нВ/√Гц

Шумовые параметры хуже среднего уровня ОУ, скоростной ($\rho = 5-15$ В/мкс), в одном корпусе содержит 2 ОУ, может использоваться в различных узлах РЗА.

LF355N (прототип для KP140УД18)



$E_{ш} = 12-15$ нВ/√Гц

Характеристики аналогичны KP140УД18, имеет малый разброс шумовых параметров.

При необходимости приближенное среднеквадратичное значение спектральной плотности шумового тока можно вычислить по формуле:

$$i_{ш} = \frac{I_{ш}}{\sqrt{\Delta f_{экв}}}, \quad [4]$$

используя вычисленное значение $I_{ш}$ в полосе частот 5-20000 Гц (для этого величину $I_{ш}$ нужно поделить на $\sqrt{20000} \approx 140$).

В заключение приводим шумовые характеристики двух малошумящих ОУ зарубежного производства.

NE5534

$E_{ш} = 4$ нВ/√Гц на частоте $f = 1$ кГц;

$E_{ш} = 10$ нВ/√Гц на частоте $f = 10$ ГГц;

$I_{ш} = 0,6$ пА/√Гц на частоте $f = 1$ кГц;

$I_{ш} = 8$ пА/√Гц на частоте $f = 10$ ГГц.

Среднеквадратичное значение напряжения шумов, приведенное ко входу, в полосе частот 10-20000 Гц:

$U_{ш.о} = 0,6$ мкВ, при $R_i = 0$;

$U_{ш} = 2,0$ мкВ, при $R_i = 10$ кОм;

$U_{ш} = 7,0$ мкВ, при $R_i = 50$ кОм;

Среднеквадратичное значение шумового тока в полосе частот 10-20000 Гц: $I_{ш} = 0,1$ нА

"Ветеран" зарубежной Hi-Fi техники, используется в усилительных устройствах более 20 лет. Имеет высокое быстродействие ($\rho = 13$ В/мкс), частично скорректирован и имеет возможность подключения внешней цепи частотной коррекции. В одном корпусе содержит один ОУ, сдвоенный вариант – NE5532. Рекомендуется применять при $R_i < 10$ кОм.

AD797

$E_{ш} = 0,9-1,2$ нВ/√Гц на частоте $f = 1$ кГц

$E_{ш} = 1,7-2,5$ нВ/√Гц на частоте $f = 10$ ГГц;

$I_{ш} = 2,0$ пА/√Гц на частоте $f = 1$ кГц

Среднеквадратичное значение напряжения шумов, приведенное ко входу, в полосе частот 10-20000 Гц:

$U_{ш.о} = 0,14$ мкВ, при $R_i = 0$;

$U_{ш} = 1,2$ мкВ, при $R_i = 1$ кОм;

$U_{ш} = 7,0$ мкВ, при $R_i = 10$ кОм;

Среднеквадратичное значение шумового тока, в полосе частот 10-20000 Гц: $I_{ш} = 0,3$ нА

Одна из последних разработок ANALOG DEVICES, отличное значение ЭДС шумов при довольно высоком значении шумового тока, максимальный выигрыш по шумам от применения данного ОУ достигается при $R_i < 1$ кОм.

Имеет большое быстродействие ($\rho = 20$ В/мкс) и мизерный коэффициент гармонических искажений: $K_g = 0,0003\%$ (-110 дБ), при $K_u = +10$; $U_{вых} = 1$ В; $R_n = 600$ Ом; $f = 10$ кГц.

Литература

1. Аналоговые интегральные микросхемы: Справочник / Б. Кудряшов и др. -М.: Радио и связь, 1981. - 160 с.
2. Н. Сухов, Среднеквадратичный милливольтметр. Радио №11, 1981, с. 53-55.
3. Н. Сухов, Как улучшить параметры магнитофона (шумы). Радио №4, 1982, с.42-45
4. Горшков Б.И. Радиоэлектронные устройства : Справочник. - М.: Радио и связь, 1984.-400 с.
5. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х т. Т.1., Т.2. Пер. с англ.-Изд.2-е, стереотип.-М.: Мир, 1984.
6. Техника высококачественного звуковоспроизведения / Н.Е.Сухов, С.Д. Бать и др. - К.: Техника, 1985. - 160 с.
7. П.Шкрипек. Справочное руководство по звуковой схемотехнике: Пер. с немецкого. -М.: Мир , 1991. - 432 с.
8. Интегральные микросхемы : Операционные усилители. Обзор -М.:ДОДЭКА, 1994, 48 с.
9. Е.Музыченко, Программные анализаторы спектра , РАДИОхобби №6, 1998, с.32-34, №1, 1999, с. 38, 39.

HIGH PERFORMANCE AUDIO OP-AMP QUICK REFERENCE

PART NUMBER	TYPE	$R_o = E_n / I_n$	$E_n @ 1kHz$	$I_n @ 1kHz$	GBW	SR	V_{offset}	I_{bias}	MFG.	APPLICATIONS
JT-990C	BIPOLAR MODULE	1100	0.8nV	1pA	50MHz	18V/us	25uV	2.2uA	JENSEN	
AD797BN	BIP/S	450	0.9nV	2pA	110MHz	18V/us	10uV	500nA	AD	LOW Z SOURCES MIC PREAMPS
RC5532AN	BIP/D	7.1k	5.0nV	0.7pA	10MHz	8V/us	500uV	200nA	RAY	G.P. AUDIO
RC5534AN	BIP/S	8.75k	3.5nV	0.4pA	10MHz	13V/us	500uV	400nA	RAY	G.P. AUDIO
MC33078P	BIP/D	9.0k	4.5nV	0.5pA	9MHz	7V/us	150uV	300nA	MOT	G.P. AUDIO
MC33079P	BIP/Q	9.0k	4.5nV	0.5pA	9MHz	7V/us	150uV	300nA	MOT	G.P. AUDIO
AD845BN	FET/S	250k	25nV	100fA	16MHz	100V/us	100uV	500pA	AD	
AD743KN	FET/S	450k	3.2nV	6.9fA	4.5MHz	2.8V/us	100uV	150pA	AD	INDUCTIVE SOURCES GUITAR PREAMPS
AD745KN	FET/S	450k	3.2nV	6.9fA	20MHz	12.5V/us	100uV	150pA	AD	DECOMPENSATED AD743 GAINS >+5 or -4
OPA627BP	FET/S	3.25M	5.2nV	1.6fA	16MHz	55V/us	100uV	1pA	BB	INDUCTIVE SOURCES GUITAR PREAMPS
Тип ОУ	Биполярный BIP или полевой FET	R_o - см. текст.	Спектр. плотность ЭДС шума	Спектр. плотность шумового тока	Частота единичного усиления	Скорость нарастания выходного напряж.	Смещение нуля	Входной ток	Изготовитель	Рекомендуемое применение, примечание
LM6325N	BIP/BUF				30MHz	550V/us	50mV	5uA	NAT'L	+/- 300mA DRIVER

NOTE: E_n is expressed in voltage/root Hertz
 I_n is expressed in current/root Hertz

jensen

AS050

От редакции.

Мы дополняем уникальный материал П.Борща и В.Семенова по отечественным ОУ данными по высококачественным ОУ зарубежного производства для звуковых применений, подготовленный фирмой Jensen.

Размерность спектральной плотности шумовой ЭДС E_n - нВ/√Гц, шумового тока - пА/√Гц для биполярных и фА/√Гц - для полевых ОУ. Синтетический параметр R_o соответствует сопротивлению источника, выше которого вклад токовых шумов начинает превышать вклад шумовой ЭДС.