

Микросхемы логарифмических усилителей традиционной схемотехники

Логарифмические и антилогарифмические усилители используются для сжатия (компрессии) сигнала, поиска значений логарифмов и показательных функций, а также для выполнения аналогового умножения и деления. В статье рассматриваются базовые положения схемотехники логарифмических усилителей традиционной идеологии. Дается краткий обзор микросхем логарифмических усилителей, выпускаемых фирмой Burr-Brown как в части их основных параметров, так и практического применения.

Павел МИХАЛЕВ

Традиционный логарифмический усилитель

Для получения логарифмической характеристики усилителя необходимо иметь элемент или устройство, которое обладает собственной логарифмической характеристикой, и включить его в цепь отрицательной обратной связи (ООС) ОУ. Такой характеристикой обладает полупроводниковый *pn*-переход, например диод.

Из теории полупроводников известно, что при прямом включении ток, протекающий через диод, и падающее на нем напряжение связаны между собой следующим соотношением:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{U_D}{m\phi_T}} - 1 \right); \quad I_0 e^{\frac{U_D}{m\phi_T}} \quad (1)$$

где I_D — прямой ток диода; U_D — прямое напряжение на диоде; I_0 — тепловой ток (обратный ток насыщения). Этот ток зависит от температуры, и его значение удваивается при увеличении температуры на каждые 10°C . Величина этого тока составляет $10^{-12} \dots 10^{-6}$ мА для кремниевых и $10^{-8} \dots 10^{-3}$ мА для германиевых диодов.

Температурный потенциал определяется по формуле:

$$\phi T = kT/q,$$

где $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/°К — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $q = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл — заряд электрона. При комнатной температуре ($t^\circ = 300^\circ\text{C}$) температурный потенциал составляет $25,875$ мВ.

Логарифмируя выражение (1) по основанию e , получим:

$$U_D = m\phi_T (\ln(I_D) - \ln(I_0)), \quad (2)$$

где m — коэффициент, учитывающий отклонения характеристик диода и зависящий от величины прямого тока. В зависимости от типа диода его величина составляет $m = 1-2$.

Если тепловой ток пренебрежимо мал по величине, то выражение (2) упрощается до следующего вида:

$$U_D = m\phi_T \ln(I_D). \quad (3)$$

Переход от натурального логарифма к десятичному осуществляется согласно элементарному соотношению:

$$\lg(x) = 0,43429 \times \ln(x). \quad (4)$$

Это преобразование логарифмов легко реализуется на основе простейшего блока масштабного преобразования.

Схема логарифмического усилителя на основе диода приведена на рис. 1.

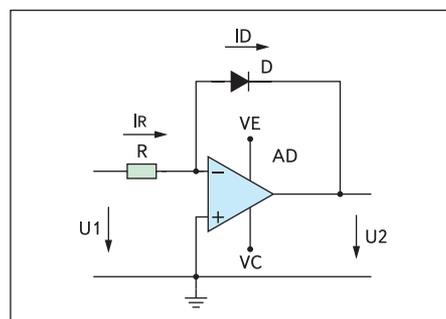


Рис. 1. Логарифмический усилитель с диодом в цепи ООС

Для ОУ с бесконечно большим входным сопротивлением его входной ток равен нулю. Поэтому выходное напряжение $U_2 = U_D$ и определяется напряжением на диоде (2). Поскольку при этом

$$I_D = I_R = U_1/R, \quad (5)$$

выражение для выходного напряжения, определяемое (2), преобразуется с учетом (3) к виду:

$$U_2 = -m\phi_T \times 0,43429 (\lg(U_1/R) - \lg(I_0)). \quad (6)$$

Логарифм теплового тока представляет собой малую величину, и при постоянной температуре эта ошибка логарифмирования легко учитывается, если она вообще поддается оценке. Поэтому выражение (6) можно представить в виде:

$$U_2 \approx -m\phi_T \times 0,43429 \times \lg(U_1/R I_0). \quad (7)$$

С учетом (4) данное выражение может быть представлено в следующем виде:

$$U_2 \approx -m\phi_T \times 0,43429 \times \lg(I_R/I_0). \quad (8)$$

Здесь величина тока I_R может трактоваться как ток источника входного воздействия логарифмического усилителя.

Для исключения влияния вариаций коэффициента m диод заменяют транзистором в диодном включении. При этом увеличивается диапазон рабочих напряжений. Это определяется тем, что для биполярного транзистора (БТ) напряжение «база–эмиттер» в точности равно натуральному логарифму коллекторного тока в диапазоне от пА до единиц мА.

Для БТ, включенного по схеме с ОБ, коллекторный ток описывается следующим выражением:

$$I_K = I_{E0} \left(e^{\frac{U_{BE}}{\phi_T}} - 1 \right). \quad (9)$$

Логарифмируя это выражение по основанию e , получим:

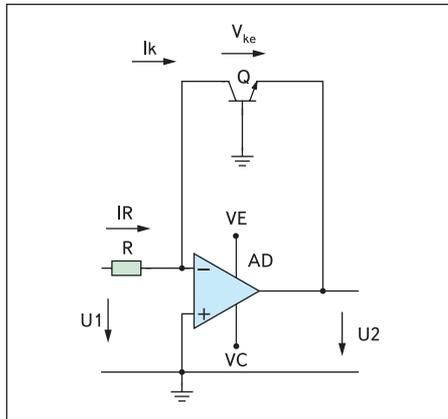


Рис. 2. Логарифмический усилитель с транзистором в цепи ООС

$$U_{BE} = \varphi_T \ln(I_K/I_{E0}), \quad (10)$$

где U_{BE} — напряжение на переходе «база-эмиттер»; I_{E0} — ток перехода «база-эмиттер» при небольшом обратном смещении и закороченных выводах коллектора и базы.

Схема логарифмического усилителя с транзистором в цепи ООС приведена на рис. 2.

Выражение для тока коллектора транзистора имеет вид (9). Поскольку $U_{KE} = U_2$ и $I_K = I_R$, тогда для выходного напряжения получим следующее выражение:

$$U_2 = -U_{BE} \varphi_T \times 0,43429(\lg(U_1/R) - \lg(I_{E0})) \quad (11)$$

или

$$U_2 = -U_{BE} \varphi_T \times 0,43429 \times \lg(U_1/R I_{E0}). \quad (12)$$

С учетом (4) данное выражение преобразуется к следующему виду:

$$U_2 = -U_{BE} \varphi_T \times 0,43429 \times \lg(I_K/I_{E0}). \quad (13)$$

Данное выражение совпадает с выражением (8).

Температурная компенсация логарифмического усилителя

Передачная функция диода существенно зависит от температуры. Поэтому для повышения точности работы логарифмического усилителя используют температурную компенсацию.

Простейшая схема логарифмического усилителя с температурной компенсацией приведена на рис. 3.

Значение обратного тока насыщения диода D1 (I_0) уменьшается за счет введения диода D2 и источника тока I_R . От этого источника через диод D2 протекает постоянный ток, что приводит к появлению напряжения U_2' . Если характеристики двух диодов полностью согласованы, то напряжение U_3 определяется следующим соотношением:

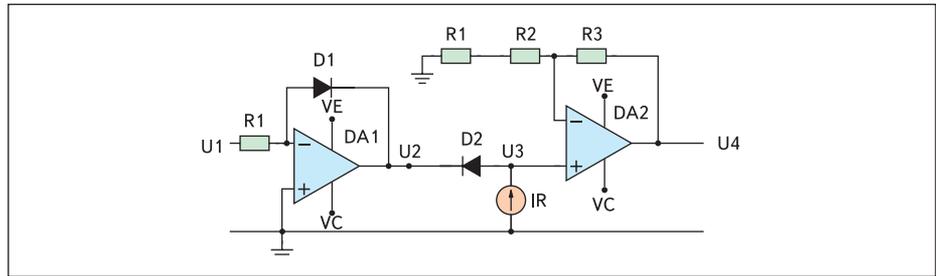


Рис. 3. Логарифмический усилитель с температурной компенсацией на диодах

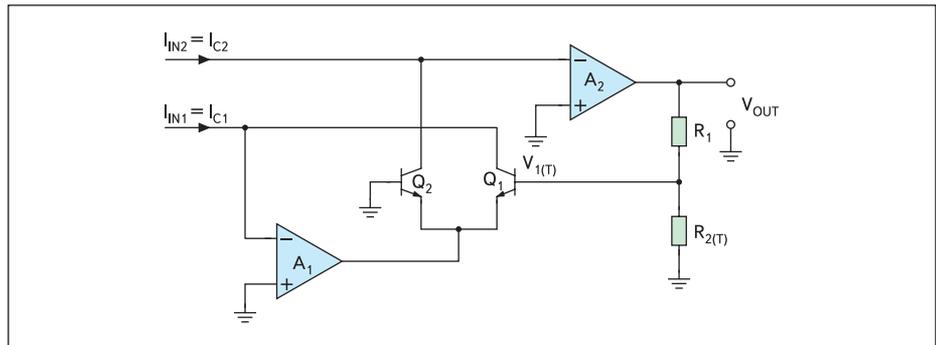


Рис. 4. Логарифмический усилитель с температурной компенсацией

$$U_3 = U_2 + U_2' = -\varphi_T (\ln(U_1/R_1) - \ln(I_0) - \ln(I_R) + \ln(I_0)). \quad (14)$$

Отсюда следует:

$$U_3 = -\varphi_T \ln(U_1/R_1 I_R). \quad (15)$$

В этом случае присутствует только одна температурно-зависимая величина φ_T . Формируя температурно-зависимый коэффициент передачи выходного усилителя схемы рис. 2, можно исключить также влияние параметра теплового потенциала. Для этого в схему выходного усилителя вводят терморезистор R_T . Тогда выходное напряжение логарифмического усилителя с температурной компенсацией приобретает вид:

$$U_4 = U_3 \times (1 + R_3/(R_2 + R_T)) = (R_3 + R_2 + R_T)/(R_2 + R_T) \times \varphi_T \times \ln(U_1/(R_1 \times I_R)). \quad (16)$$

Для исключения температурной зависимости необходимо потребовать выполнения следующего равенства:

$$(R_3 + R_2 + R_T)/(R_2 + R_T) \times \varphi_T = k_1, \quad (17)$$

где k_1 — постоянное число.

Решая уравнение (17) относительно R_T , можно определить требуемые параметры терморезистора для обеспечения выполнения следующего соотношения:

$$U_4 = k_1 \times \ln(U_1/R_1 I_R). \quad (18)$$

На рис. 4. приведена схема логарифмического усилителя с температурной компенса-

цией на основе использования согласованных транзисторов [1].

Два транзистора образуют дифференциальный каскад, выходное напряжение которого U_1 определяется разностью напряжений «база-эмиттер» обоих транзисторов:

$$U_1 = U_{BE1} - U_{BE2} = \varphi_T \ln(I_{C1}/I_{E01}) - \varphi_T \ln(I_{C2}/I_{E02}). \quad (19)$$

Поскольку транзисторы согласованы по своим параметрам, полагаем $I_{E01} = I_{E02} = I_{E0}$. В этом случае выражение (19) упрощается к виду:

$$U_{1(T)} = \varphi_T \ln(I_{C1}/I_{C2}). \quad (20)$$

Температурная зависимость при этом определяется только тепловым потенциалом. Наличие в схеме резистивного делителя R_1 и R_2 вносит свой вклад в температурную зависимость выходного напряжения усилителя:

$$U_{OUT(T)} = (1 + R_1/R_2) \varphi_T \ln(I_{C1}/I_{C2}). \quad (21)$$

Для компенсации температурного влияния теплового потенциала резистор R_2 заменяют терморезистором с положительным температурным коэффициентом. Величина этого коэффициента варьируется в пределах от 3500 до 3700 ppm/°K.

Передачная функция логарифмического усилителя

Обобщенное представление передачной функции логарифмического усилителя в соответствии с идентичными по виду выраже-

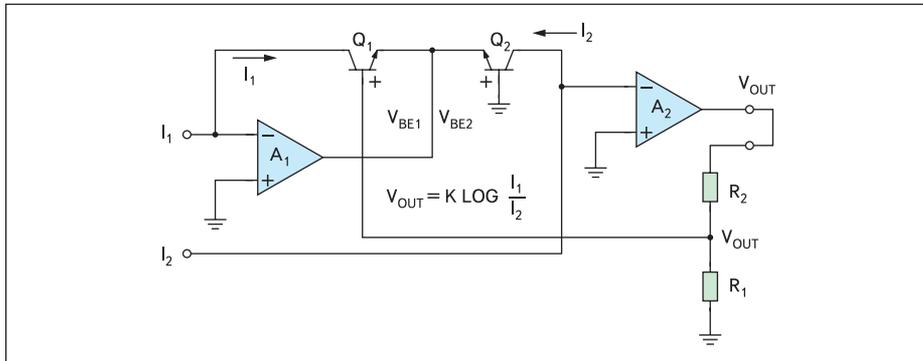


Рис. 5. Упрощенная структура микросхем LOG100/101/102/104/112

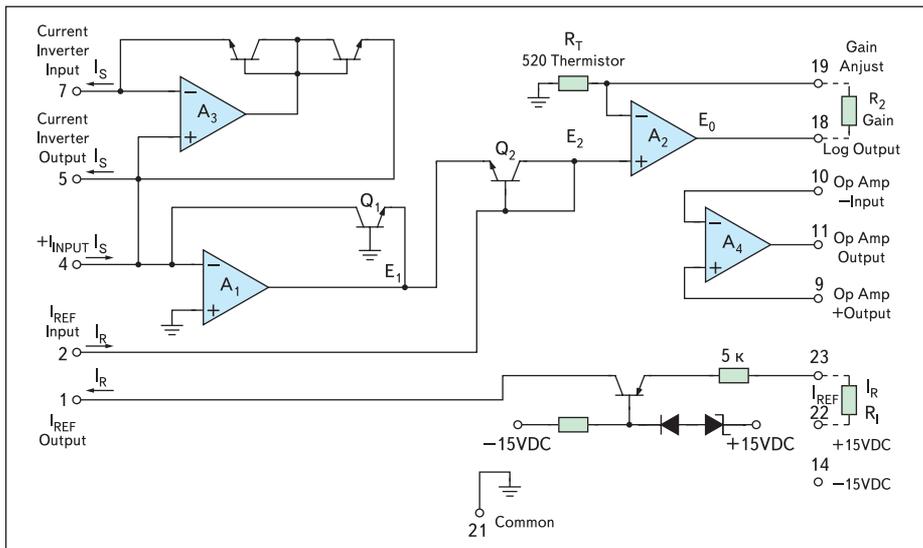


Рис. 6. Функциональная схема логарифмического усилителя 4127

када»; V_X — напряжение логарифмического перехвата (точка перехвата). Когда $V_{IN} = V_X$, аргумент логарифма равен единице, а сам логарифм равен нулю.

Данное выражение предполагает, что V_{IN} есть напряжение постоянного тока, и если $V_X > 0$, то V_{IN} также должно быть положительным, поскольку логарифма отрицательного числа не существует.

Логарифмические усилители производства Burr-Brown

Фирма Burr-Brown, которая несколько лет назад вошла в состав компании Texas Instruments, в течение многих лет занималась разработкой и производством микросхем логарифмических усилителей, ориентированных на различные практические приложения. В таблице приведены параметры наиболее известных микросхем данной фирмы.

Выбор в пользу микросхем Burr-Brown был сделан на том основании, что их схемотехническая реализация основана на традиционной идеологии, представленной на рис. 2. За исключением микросхем 4127 и LOG114, все остальные микросхемы реализованы по единой упрощенной схеме, которая приведена на рис. 5.

Все микросхемы, за исключением 4127, изготовлены с помощью методов твердотельной технологии с использованием лазерной подгонки резисторов для обеспечения высокой точности реализуемых характеристик.

Для проведения процедуры вычисления логарифма отношения (например, токов) микросхемы имеют два входа.

ниями (7) и (12) можно записать следующим образом:

$$V_{OUT} = V_Y \lg(V_{IN}/V_X), \quad (22)$$

где V_Y — фиксированное напряжение, которое определяет крутизну передаточной функции логарифмического усилителя (данный параметр измеряется в величинах «вольт/де-

Микросхема 4127

Это одна из первых микросхем логарифмического усилителя, выполненная по гибридной технологии и способная работать как от источника входного тока, так и от источ-

Таблица. Параметры наиболее известных микросхем Burr-brown

Модель	Назначение	Динамический диапазон	Частотный диапазон	Шумовые параметры по входу	Диапазон вх. токов	Напряж. питания (В)	Ток потр. (мА)	Темпер. диапазон (°С)	Корпус
4127	Логарифмирование Антилогарифмирование Вычисление логарифма отношения	6 декад для тока 4 декады для напр./=	90 кГц при вх. токе 100 мкА	Токовый шум: 10 пА rms Шумовое напряжение 10 мкА в полосе 10 Гц–10 кГц	Pib 4: (+1 нА)–(+1 мА) Pin 7: (–1 нА)–(–1 мА)	±15	±20	От –10 до +70	CDIP-24
LOG100	Логарифмирование Антилогарифмирование Вычисление логарифма отношения Вычисление логарифма коэф. пропускания опт. систем Компрессия данных	6 декад	45 кГц при вх. токе 1 мА	Токовый шум: 0,5 пА rms Шумовое напряжение 3 мкА в полосе 10 Гц–10 кГц	1 нА–1 мА	±15	±7	От –40 до +85	CDIP-14
LOG101	Логарифмирование Вычисление логарифма отношения Компрессия сигнала фотодатчика Компрессия аналогового сигнала на входе АЦП	7,5 декад	45 кГц при вх. токе 1 мА	Спектр. плотн. токового шума 4 фА/√Гц Спектр. плотн. шумового напр. 30 нВ/√Гц	100 пА–3,5 мА	От ±4,5 до ±18	±1	От –40 до +85	SO-8
LOG102	Логарифмирование Вычисление логарифма отношения Компрессия сигнала фотодатчика Компрессия аналогового сигнала на входе АЦП	6 декад	45 кГц при вх. токе 1 мА	Спектр. плотн. токового шума 4 фА/√Гц Спектр. плотн. шумового напр. 30 нВ/√Гц	1 нА–1 мА	От ±4,5 до ±18	2	От –40 до +85	SO-14
LOG104	Логарифмирование Вычисление логарифма отношения Компрессия сигнала фотодатчика Компрессия аналогового сигнала на входе АЦП	7,5 декад	45 кГц при вх. токе 1 мА	Спектр. плотн. токового шума 4 фА/√Гц Спектр. плотн. шумового напр. 30 нВ/√Гц	100 пА–3,5 мА	От ±4,5 до ±18	1	От –40 до +85	SO-8
LOG112	Логарифмирование Вычисление логарифма отношения Компрессия сигнала фотодатчика Компрессия аналогового сигнала на входе АЦП	7,5 декад	45 кГц при вх. токе 1 мА	Спектр. плотн. токового шума 4 фА/√Гц Спектр. плотн. шумового напр. 30 нВ/√Гц	100 пА–3,5 мА	От ±4,5 до ±18	1,75	От –40 до +85	SO-14
LOG2112	Логарифмирование Вычисление логарифма отношения Компрессия сигнала фотодатчика Компрессия аналогового сигнала на входе АЦП	7,5 декад	45 кГц при вх. токе 1 мА	Спектр. плотн. токового шума 4 фА/√Гц Спектр. плотн. шумового напр. 30 нВ/√Гц	100 пА–3,5 мА	От ±4,5 до ±18	1,75	От –40 до +85	SO-16
LOG114	Логарифмирование Вычисление логарифма отношения Компрессия сигнала фотодатчика Компрессия аналогового сигнала на входе АЦП	8 декад	–	–	100 пА–10 мА	+5 или ±5	10	От –5 до +75	QFN-16

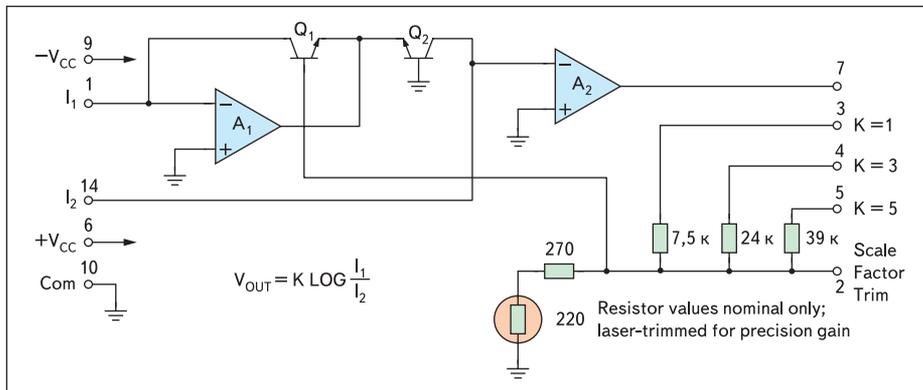


Рис. 7. Структурная схема LOG100

ника входного напряжения. Особенностью данной схемы является то, что ее входные сигналы могут иметь любую полярность.

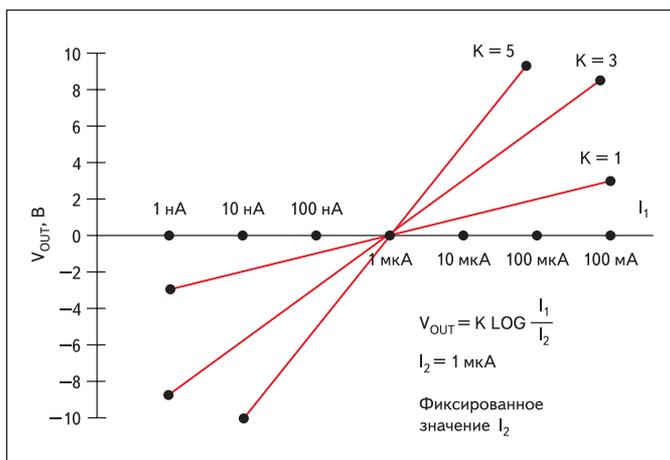
Функциональная схема усилителя приведена на рис. 6.

Входные усилители A_1 и A_2 имеют входные дифференциальные каскады, выполненные на полевых транзисторах. Это позволяет значительно уменьшить шумы, а также достичь предельно низких значений входных токов смещения. В принципе данная схема выполнена по классической схеме логарифмического усилителя с транзистором в цепи ООС в диодном включении и цепями термокомпенсации. Наличие встроенной цепи опорного напряжения и дополнительного ОУ A_4 способствуют расширению реализационных возможностей микросхемы.

Универсальность схемы в отношении возможности работы с разнополярными сигналами, к сожалению, требует для каждого варианта своего способа включения микросхемы, подробности которых можно найти в [2].

Микросхема LOG100

Эта микросхема относится к категории прецизионных. Предельная точность логарифмирования с учетом всех возможных ошибок составляет 0,37% в пределах более 5 декад.

Рис. 8. Передаточная функция усилителя при изменении I_1 и K и фиксированном значении $I_2 = 1$ мкА

Применение входных каскадов на полевых транзисторах и лазерная подгонка резисторов обеспечивают входной ток смещения усилителя всего 1 пА. При этом минимальное значение входного сигнала в виде тока составляет 1 нА.

Структурная схема логарифмического усилителя с указанием номеров выводов приведена на рис. 7.

Наличие двух входов позволяет с высокой точностью вычислять логарифм отношения входных сигналов в виде токов. Передаточная функция данной схемы имеет вид:

$$V_{OUT} = K \lg(I_1/I_2), \quad (23)$$

где K — крутизна передаточной функции. Зависимость V_{OUT} от изменения I_1 при K , изменяющемся как параметр, и фиксированном значении $I_2 = 1$ мкА приведена на рис. 8.

На рис. 9 приведена зависимость V_{OUT} от изменения I_1 при фиксированном значении крутизны ($K = 3$) и наборе значений I_2 .

Приведенные графики показывают реализационные возможности данной микросхемы логарифмического усилителя.

Когда микросхема LOG100 используется как логарифмический усилитель для одного входного сигнала I_1 , ко второму входу вместо I_2 необходимо подключить источник опор-

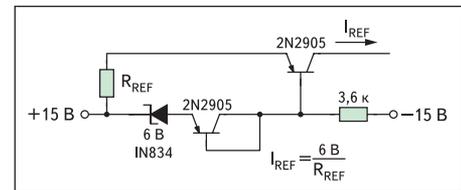


Рис. 10. Схема термокомпенсированного источника опорного тока

ного тока I_{REF} . Для этого используют цепь опорного источника тока с термокомпенсацией, схема которой приведена на рис. 10.

При измерении логарифма коэффициента пропускания оптических объектов используется схема, приведенная на рис. 11.

Схема включения для вычисления антилогарифма приведена на рис. 12.

Подробное описание микросхемы с полным перечнем параметров и различных способов включения можно найти в [3].

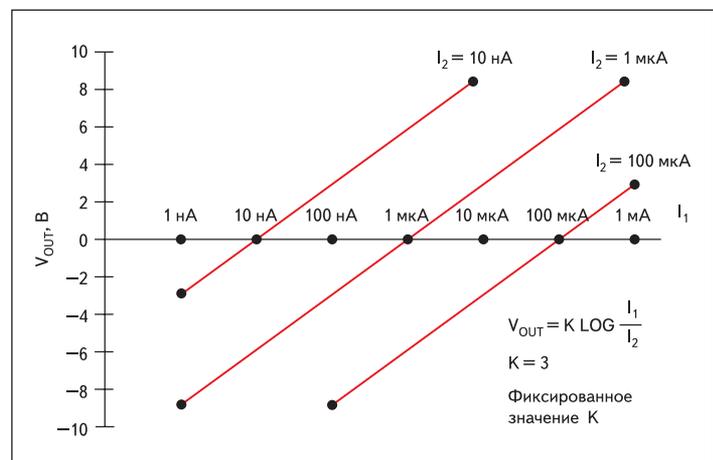
Микросхема LOG101

Данная микросхема является высокопрецизионной. Предельная точность логарифмирования с учетом всех возможных ошибок составляет 0,01% в пределах более 5 декад при полном динамическом диапазоне 7,5 декад.

Структурная схема логарифмического усилителя, выполненная по традиционной идеологии, приведена на рис. 13. В схеме используются согласованные транзисторы и содержится цепь термокомпенсации. В отличие от LOG101, данная микросхема сохраняет работоспособность при широких пределах изменения питающих напряжений: от $\pm 4,5$ до ± 18 В. При этом ток потребления составляет всего 1 мА.

Типовая схема включения микросхемы приведена на рис. 14.

При использовании микросхемы LOG101 как логарифмического усилителя для одного входного сигнала I_1 ко второму входу вместо I_2 подключают источник опорного тока

Рис. 9. Передаточная функция усилителя при изменении I_1 и I_2 и фиксированном значении $K = 3$

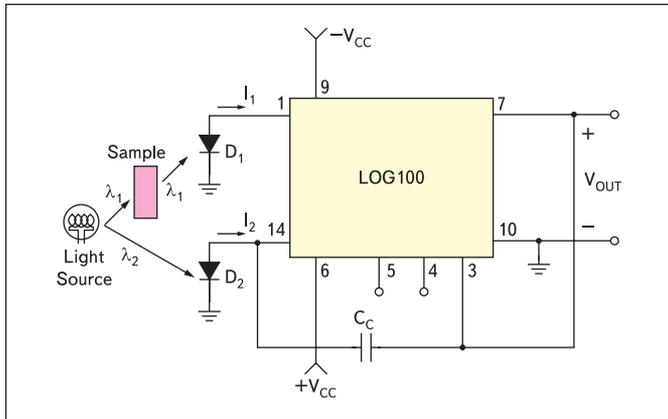


Рис. 11. Схема измерения логарифма коэффициента пропускания оптических объектов

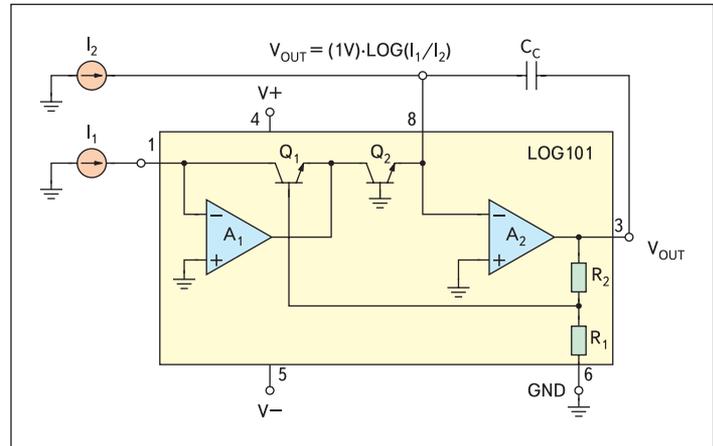


Рис. 13. Структурная схема LOG101

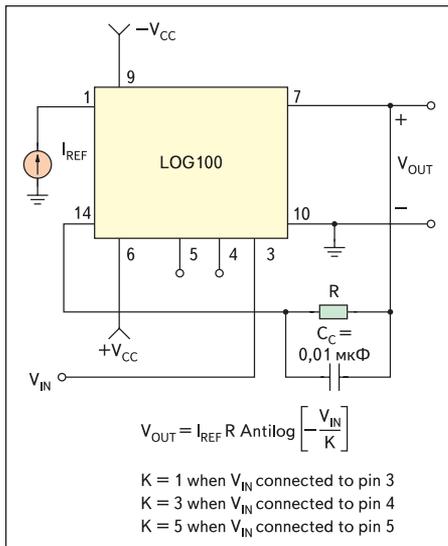


Рис. 12. Схема включения LOG100 для вычисления антилогарифма

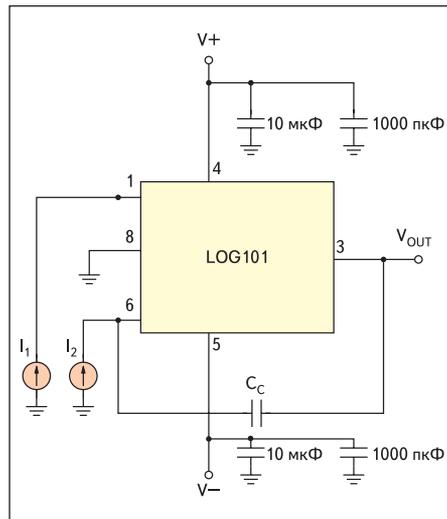


Рис. 14. Типовая схема включения LOG101

и назначению аналогична LOG101, за исключением динамического диапазона, который в данном случае меньше на 1,5 декады.

Предельная точность логарифмирования с учетом всех возможных ошибок составляет 0,15% в полном динамическом диапазоне, равном 6 декадам.

Микросхема сохраняет работоспособность при широких пределах изменения питающих напряжений: от ±4,5 до ±18 В. При этом ток потребления составляет 2 мА.

Структурная схема данного логарифмического усилителя приведена на рис. 17.

Схема содержит дополнительный выходной усилитель A_3 для увеличения коэффициента усиления. Дополнительное усиление обеспечивается подключением внешних резисторов R_1 и R_2 и определяется соотношением:

$$G = 1 + R_2/R_1. \quad (24)$$

Подробное описание микросхемы с полным перечнем параметров и различных вариантов практических приложений можно найти в [4].

Микросхема LOG102

Эта микросхема также относится к категории прецизионных и по своим параметрам

Кроме того, схема содержит усилитель A_4 , который при необходимости может быть использован также в качестве дополнительного усилительного каскада или компаратора. Если этот усилитель не используется, то его неинвертирующий вход следует подключить к общей шине, а неинвертирующий выход

I_{REF} с термокомпенсацией, схема которого приведена на рис. 10.

Микросхема LOG101 работает только при положительных входных токах. В случае, когда необходимо работать с отрицательными входными токами, используют схему токового инвертора, приведенную на рис. 15.

Передаточная функция данной микросхемы приведена на рис. 16. На этом рисунке представлена зависимость выходного напряжения от величины входного тока I_1 при изменяющемся как параметр тока I_2 .

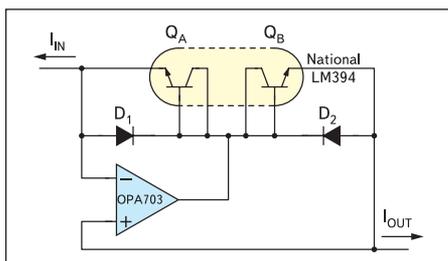


Рис. 15. Схема токового инвертора

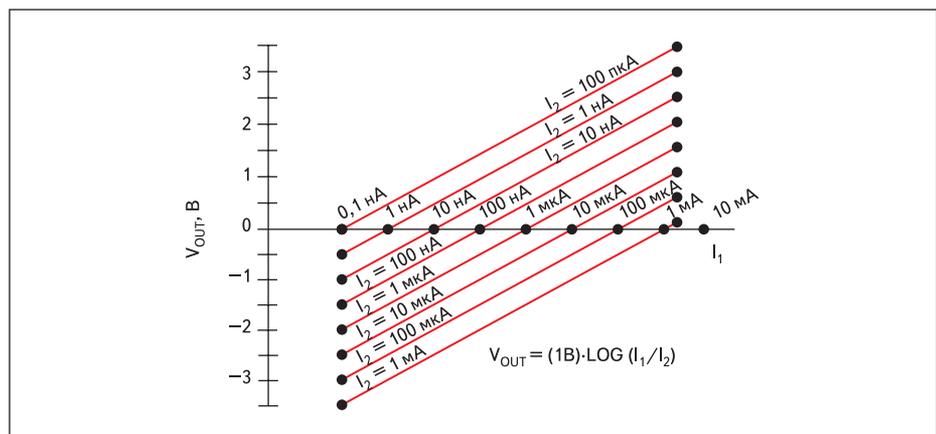


Рис. 16. Передаточная функция LOG101

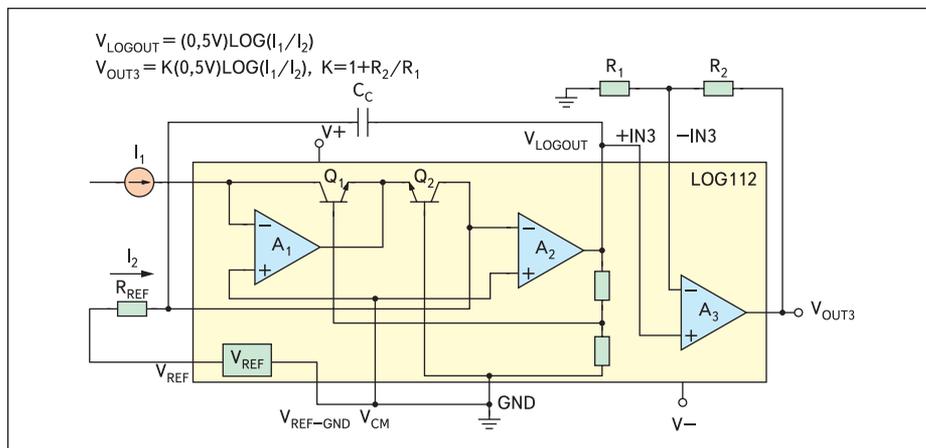


Рис. 22. Структурная схема LOG112

(аналогично схеме LOG102) для получения дополнительного усиления, которое обеспечивается подключением внешних резисторов R_1 и R_2 и определяется соотношением (21). Кроме того, структура данной микросхемы содержит встроенный источник опорного напряжения V_{REF} , с помощью которого можно задавать опорный ток по второму входу без использования внешней дополнительной цепи вида рис. 10.

Типовая схема включения микросхемы LOG112 приведена на рис. 23.

В остальном, включая значения основных параметров, специфику применения и способы включения для разных приложений, данная микросхема идентична LOG101.

Микросхема LOG2112

Это двоянный (двухканальный) логарифмический усилитель LOG112 без каких-либо схемотехнических дополнений.

Типовая схема включения приведена на рис. 24.

Подробное описание микросхемы с полным перечнем параметров и различных вариантов практических приложений можно найти в [7].

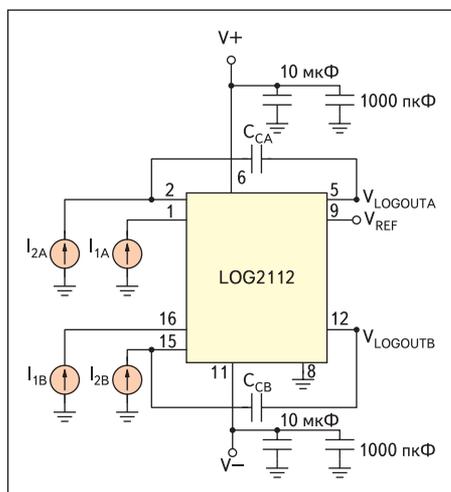


Рис. 24. Типовая схема включения LOG2112

Микросхема LOG114

Эта микросхема существенно отличается по схемотехнике и параметрам от ранее рассмотренных. Она относится к категории быстродействующих прецизионных логарифмических усилителей. Ее динамический диапазон составляет 8 декад и является наибольшим из всех рассмотренных схем. Структурная схема приведена на рис. 25.

Схема имеет два входа для обеспечения вычисления логарифма отношения токов. Содержит встроенный источник опорного напряжения 2,5 В и два дополнительных усилителя на выходе, с помощью которых при подключении внешних резистивных цепей ООС можно получать дополнительное усиление (по аналогии со схемой LOG102).

Микросхема способна работать как от двуполярного источника питания напряжением ± 5 В, так и от однополярного, напряжением +5 В. Ток потребления при этом составляет 10 мА.

Микросхема выпускается в сверхминиатюрном корпусе QFN-16, размером всего

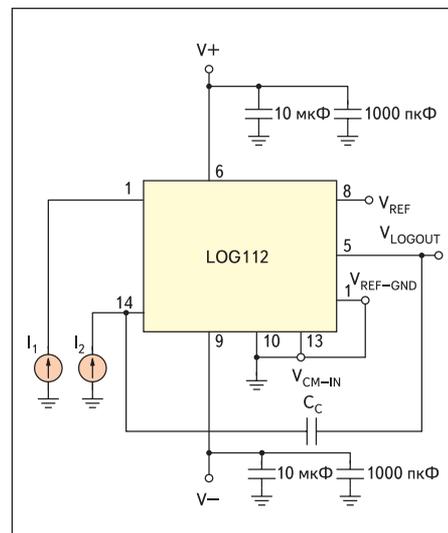


Рис. 23. Типовая схема включения микросхемы LOG112

4×4 мм, рассчитанным для поверхностного монтажа.

Структурная схема данного логарифмического усилителя не содержит в явном виде цепей термокомпенсации. По-видимому, это является причиной того, что температурный диапазон гарантированной работоспособности микросхемы ограничен пределами от -5 до $+75$ °С.

Весьма краткая информация по данной микросхеме содержится в [7].

Заключение

Данная статья посвящена рассмотрению логарифмических усилителей, построенных на основе традиционной схемотехники и ориентированных на стандартные применения. Несмотря на давнюю историю создания таких схем, они остаются востребованными при проектировании радиоэлектрон-

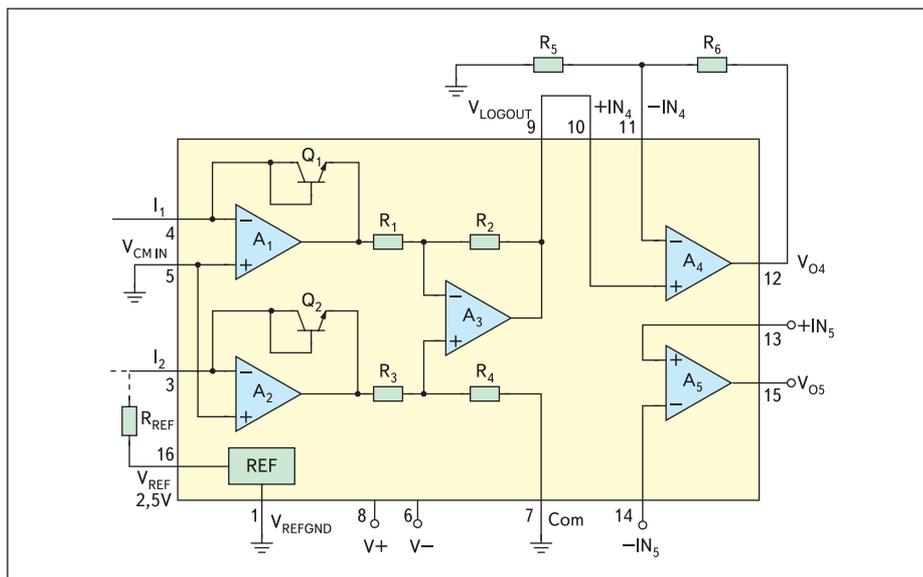


Рис. 25. Структурная схема LOG114

ной аппаратуры различного назначения, в особенности измерительной. В работе рассмотрены основные принципы построения схемотехники таких усилителей, включая методы термокомпенсации. Приведен краткий обзор микросхем логарифмических усилителей, выпускаемых фирмой Burr-Brown. Выбор микросхем именно этой фирмы был продиктован только тем соображением, что они реализованы по традиционной схемотехнике.

Рамки журнальной статьи обзорного характера не позволяют рассмотреть весь спектр

вопросов, связанных как со спецификой построения прецизионной аппаратуры, что должно затрагивать проблему минимизации ошибок, так и с другими методами реализации логарифмических усилителей, ориентированных на более широкий спектр практических приложений. ■

Литература

1. Kugelstradt T. Integrated logarithmic amplifiers for industrial applications // Analog Applications Journal, 1Q, 2004, pp. 28–33.
2. 4127 Logarithmic Amplifier. PDS-346F. [w ww.ti.c om](http://www.ti.com)
3. LOG100 Precision Logarithmic and LOG Ratio Amplifier. PDS-437E. [w ww.ti.c om](http://www.ti.com)
4. LOG101 Precision Logarithmic and LOG Ratio Amplifier. SBOS242B. [w ww.ti.c om](http://www.ti.com)
5. LOG102 Precision Logarithmic and LOG Ratio Amplifier. SBOS211B. [w ww.ti.c om](http://www.ti.com)
6. LOG104 Precision Logarithmic and LOG Ratio Amplifier. SBOS243C. [w ww.ti.c om](http://www.ti.com)
7. LOG112/2112 Precision Logarithmic and LOG Ratio Amplifier. SBOS246D. [w ww.ti.c om](http://www.ti.com)
8. LOG114 Single-Supply, High-Speed, Precision Logarithmic Amplifier. SBOS301. [w ww.ti.c om](http://www.ti.com)