

# Российский операционный усилитель КМОП с архитектурой rail-to-rail

**Одной из основных тенденций рынка ИС операционных усилителей в настоящий момент является появление и широкое распространение так называемых rail-to-rail ОУ. Данным термином в зарубежной литературе принято классифицировать ОУ, диапазоны изменений выходного и синфазного входного напряжений которых занимают весь спектр значений, лежащих между уровнями питающих напряжений. Де-факто название rail-to-rail стало общепринятым и в отечественной литературе (см., например, [1]). Использование этого термина в предлагаемой статье применительно к ИС отечественного производства обусловлено стремлением авторов к привлечению внимания разработчиков, использующих импортные комплектующие и привыкших к терминологии зарубежных поставщиков.**

**Василий Лысь,  
Юрий Попов,  
Татьяна Сергеева,  
Дмитрий Шлёмин**

market@okbnzpp.ru,  
d.chlemine@ieee.org

С переходом на все более прогрессивные технологические процессы изготовления цифровых СБИС, с уменьшением минимального топологического размера происходит неизбежное снижение напряжения питания, а поскольку построить законченную систему только на цифровых элементах практически невозможно, то соответственно возрастают требования и к элементной базе аналого-цифрового интерфейса, основным компонентом которого был и остается ОУ. Стандартным ОУ общего назначения, как известно, присущи ограничения на диапазоны входных и выходных напряжений, из-за которых 2–3 В из номинала напряжения питания фактически оказываются потерянными при определении динамического диапазона системы. При двухполярном питании  $\pm 15$  В это обстоятельство не создает заметных проблем, однако при построении современных аналого-цифровых систем используется однополярное питание 2,5, 3,3 и 5 В, что диктует применение только ОУ архитектуры rail-to-rail. В дальнейшем эта тенденция приведет к переходу на рабочие напряжения питания на уровне 1 В. Фирма Xilinx, например, уже объявила о выпуске нового семейства ПЛИС Spartan-3, изготавливаемого на пластинах диаметром 300 мм по технологии с топологическими нормами 90 нм и напряжением питания 1,2 В. Цена таких изделий составляет около \$20 за кристалл с 1 миллионом вентиляей (<http://www.xilinx.com/spartan3>), что фактически знаменует собой начало перехода на качественно новый уровень в области элементной базы сложных систем. Для работы в таких системах обычных ОУ rail-to-rail уже недостаточно, и становятся актуальными так называемые ОУ beyond-the-rails, работоспособные при входных синфазных сигналах, выходящих за рамки уровней шин питания [2].

Помимо фактора, обусловленного тенденцией к снижению напряжения питания цифровых СБИС, необходимо отметить, что неуклонно расширяется область экономичных низковольтных применений ОУ, таких, как портативная аппаратура с батарейным питанием, слуховые аппараты, тонометры, кардиостимуляторы и другие приборы медицинского назначения, портативные аудиоустройства, а также аппаратура специального применения.

Учитывая перечисленные факторы и тенденции, ФГУП «НЗПП с ОКБ» разработало на основе архитектуры rail-to-rail серию счетверенных КМОП ОУ, состоящую из четырех ИС: К1476УД1Т, К1476УД2Т, К1476УД3АТ, К1476УД3БТ. Каждая ИС содержит четыре программируемых КМОП ОУ с раздельными входами и выходами, имеющих общую цепь программирования рабочего режима и общий вход для перевода ИС в ждущий режим с малым потреблением (функция Standby). Программирование осуществляется выбором сопротивления одного внешнего резистора, включаемого между входом R ИС и положительным выводом источника питания.

Структурная схема одного ОУ ИС, отражающая общие признаки архитектуры rail-to-rail применительно к КМОП-технологии, приведена на рис. 1. Основной чертой, характерной для всех КМОП rail-to-rail ОУ, является построение входного дифференциального каскада на основе параллельного включения комплементарных дифференциальных пар МОП-транзисторов, за счет чего обеспечивается работоспособность ОУ в диапазоне синфазных входных напряжений, который может даже превышать пределы, установленные напряжениями шин питания (то есть обеспечивается режим beyond-the-rails), но на величину, не превышающую прямое падение напряжения на диодах входной защиты. По анало-

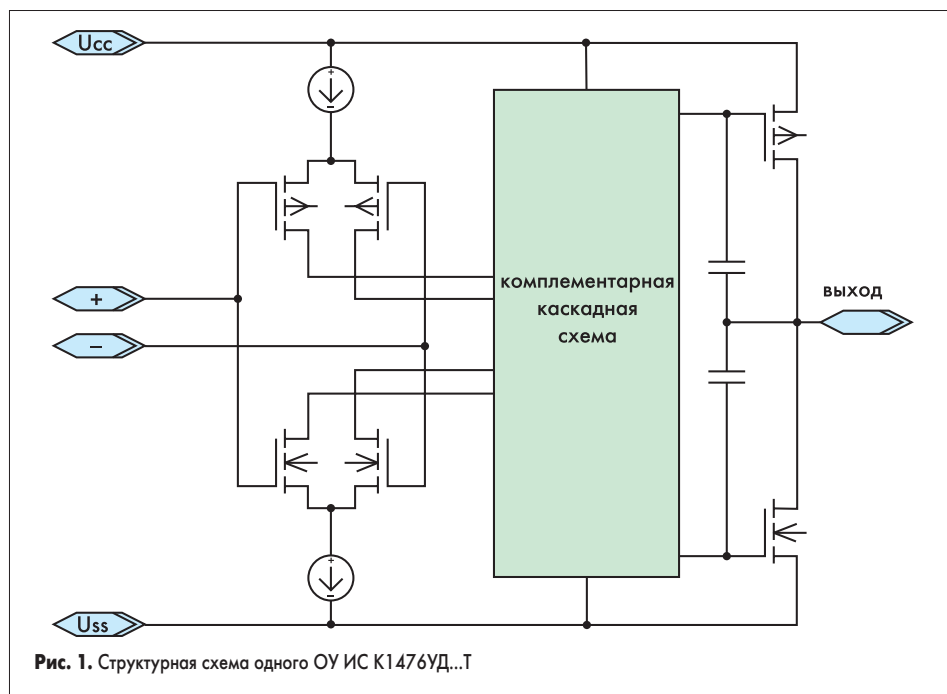


Рис. 1. Структурная схема одного ОУ ИС К1476УД...Т

Таблица 1. Электрические характеристики ИС серии К1476УД...Т при U<sub>cc</sub>=5 В и T=25 °С (предварительные) и предельно допустимые режимы работы

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Тип ИС	Значение параметра при I <sub>o</sub>		
				5 мкА	50 мкА	250 мкА
Коэффициент усиления, не менее	K <sub>uo</sub>		К1476УД1Т	50 000	40 000	20 000
			К1476УД2Т	200 000	100 000	40 000
			К1476УД3АТ, К1476УД3БТ	50 000	20 000	10 000
Напряжение смещения, не более	U <sub>OS</sub>	мВ	К1476УД1Т	10	10	10
			К1476УД2Т	10	10	10
			К1476УД3АТ	1	1	1
			К1476УД3БТ	3	3	3
Коэффициент ослабления синфазных входных напряжений	CMRR	дБ	К1476УД1Т	70	65	60
			К1476УД2Т	66	60	52
			К1476УД3АТ, К1476УД3БТ	70	65	60
Скорость нарастания выходного напряжения	SR *	В/мкс	К1476УД1Т	0,8	8	20
			К1476УД2Т	0,5	6	15
			К1476УД3АТ, К1476УД3БТ	0,6	7	18
Частота единичного усиления	GBW *	МГц	К1476УД1Т	2,5	8	15
			К1476УД2Т	0,8	3	6
			К1476УД3АТ, К1476УД3БТ	1	4	7
Коэффициент ослабления помех по питанию, не менее	PSRR	дБ	К1476УД...Т	120	120	120
Ток потребления в рабочем режиме	I <sub>cc</sub>	мА	К1476УД1Т	0,3	2,6	11
			К1476УД2Т	0,12	1,3	6
			К1476УД3АТ, К1476УД3БТ	0,2	2,2	10
Ток потребления в режиме Standby	I <sub>sb</sub>	мкА	К1476УД...Т	20		
Максимальный выходной ток	I <sub>out</sub>	мА	К1476УД...Т	35		
Максимальный размах выходного напряжения при сопротивлении нагрузки: RL=60 Ом; RL=1 кОм; RL=10 кОм.	ΔU <sub>out</sub> **	В	К1476УД...Т	1,3		
				0,2		
				0,02		
Диапазон допустимых напряжений питания	U <sub>cc</sub>	В	К1476УД...Т	2,7-9		
Допустимый диапазон синфазных входных напряжений	U <sub>cm</sub>	В	К1476УД...Т	0-U <sub>cc</sub>		
Допустимый диапазон дифференциальных входных напряжений	U <sub>dif</sub>	В	К1476УД...Т	0-U <sub>cc</sub>		
Диапазон допустимых напряжений питания	U <sub>cc</sub>	В	К1476УД...Т	2,7-9		
Допустимый диапазон синфазных входных напряжений	U <sub>cm</sub>	В	К1476УД...Т	0-U <sub>cc</sub>		
Допустимый диапазон дифференциальных входных напряжений	U <sub>dif</sub>	В	К1476УД...Т	0-U <sub>cc</sub>		
Температурный рабочий диапазон	T	°С	К1476УД...Т	-25- +85		

Примечания:

\* При емкости нагрузки C<sub>L</sub>=50 пФ

\*\* ΔU<sub>out</sub> — разность между уровнем напряжения любой из шин питания и соответствующей границей диапазона линейности выходного напряжения.

гичной структурной схеме реализованы отечественные КМОП ОУ серии 1446 [3], в состав которой входит счетверенный ОУ 1446УД3, являющийся ближайшим отечественным аналогом ОУ серии К1476УД...Т. Основным преимуществом ИС серии К1476УД...Т по отношению к ИС 1446-й серии являются улучшенные функциональные возможности (за счет программирования рабочего режима ОУ и наличия функции Standby). Первый фактор обеспечивает:

- универсальный характер ИС, ОУ которой, в зависимости от номинала одного внешнего резистора, может быть как микро-мощным, так и быстродействующим, причем переход от одного режима к другому может происходить в процессе работы ИС под воздействием внешнего управляющего сигнала;
- расширение области применения ОУ за счет новых нестандартных схемотехнических решений.

Второй из перечисленных выше факторов позволяет оптимизировать мощность потребления в системах с активным и пассивным режимами работы, например, в приемниках систем персонального радиовызова. Вопросам применения ИС серии К1476УД...Т, в том числе и нестандартным, имеющим определенные преимущества перед типовыми, посвящена отдельная статья, которая будет предложена вниманию читателей в ближайшее время.

Ближайшими зарубежными аналогами ИС серии К1476УД...Т являются ИС TLV2465 фирмы Texas Instruments ([ht tp:// ww .w.ti.c om](http://www.w.ti.com)) и AD8594 от Analog Devices ([ht tp:// ww .w .analog.c om](http://www.w.analog.com)). Оба аналога совместимы с ИС серии К1476УД...Т по выводам, имеют функцию Standby, но, поскольку возможность программирования в данных аналогах не предусмотрена, вывод № 8 16-выводного корпуса в них не используется (обозначен как NC — по connect). К1476УД...Т проигрывает названному зарубежному аналогу по единственному параметру — максимальному выходному току, но превосходит их по диапазону допустимых питающих напряжений, коэффициенту усиления по постоянному току и коэффициенту подавления синфазного сигнала. Это обусловлено тем, что для производства зарубежных аналогов используется КМОП-технология с меньшими топологическими нормами, на основе которой проще обеспечить большой выходной ток, но труднее сохранить точностные показатели и которая к тому же является более низковольтной. Недостатком серии К1476УД...Т является также планарный металлокерамический корпус типа 402.16, однако предприятие-изготовитель планирует переход на более современное конструктивное исполнение.

Структурная схема ИС К1476УД...Т приведена на рис. 2. Рабочий режим каждого ОУ ИС задается четырьмя напряжениями, которые вырабатывает общий для всех каналов блок BIAS. Назначение выводов описано в таблице 2.

Основные технические характеристики ОУ серии К1476УД...Т приведены в таблице 1, а на рис. 3-5 приведены амплитудно-частотные характеристики ОУ с разомкнутой це-

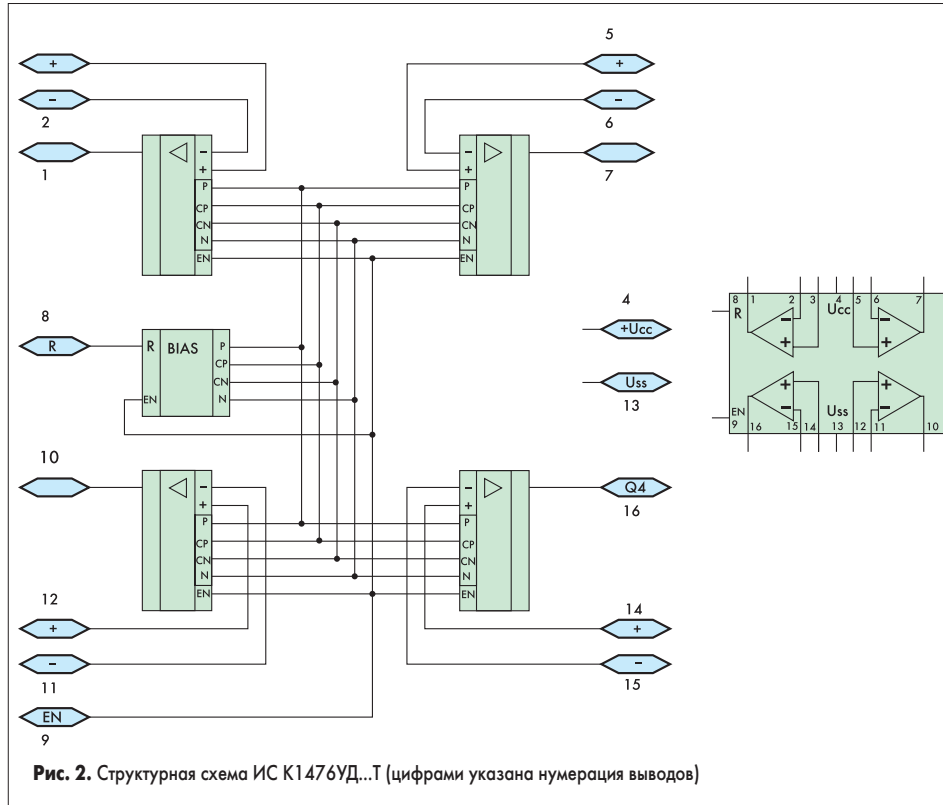


Рис. 2. Структурная схема ИС К1476УД...Т (цифрами указана нумерация выводов)

Таблица 2. Назначение выводов ИС серии К1476УД...Т

№ вывода	Назначение вывода
1	выход 1-го ОУ
2	инвертирующий вход 1-го ОУ
3	неинвертирующий вход 1-го ОУ
4	положительное напряжение питания +Ucc
5	неинвертирующий вход 2-го ОУ
6	инвертирующий вход 2-го ОУ
7	выход 2-го ОУ
8	вход R для подключения внешнего токазадающего резистора к +Ucc или генератора втекающего тока
9	вход EN активизации режима Standby (активный уровень — высокий)
10	выход 3-го ОУ
11	инвертирующий вход 3-го ОУ
12	неинвертирующий вход 3-го ОУ
13	отрицательное напряжение питания («земля») Uss
14	неинвертирующий вход 4-го ОУ
15	инвертирующий вход 4-го ОУ
16	выход 4-го ОУ

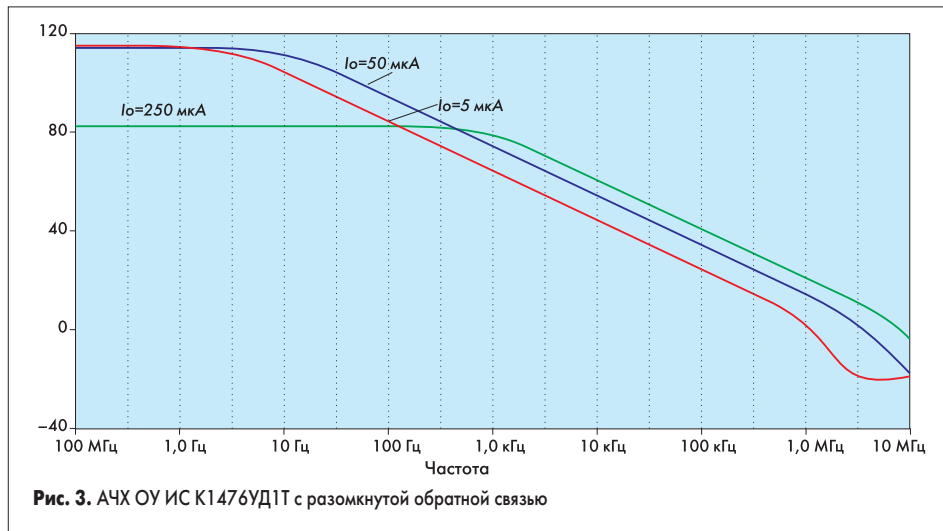


Рис. 3. АЧХ ОУ ИС К1476УД1Т с разомкнутой обратной связью

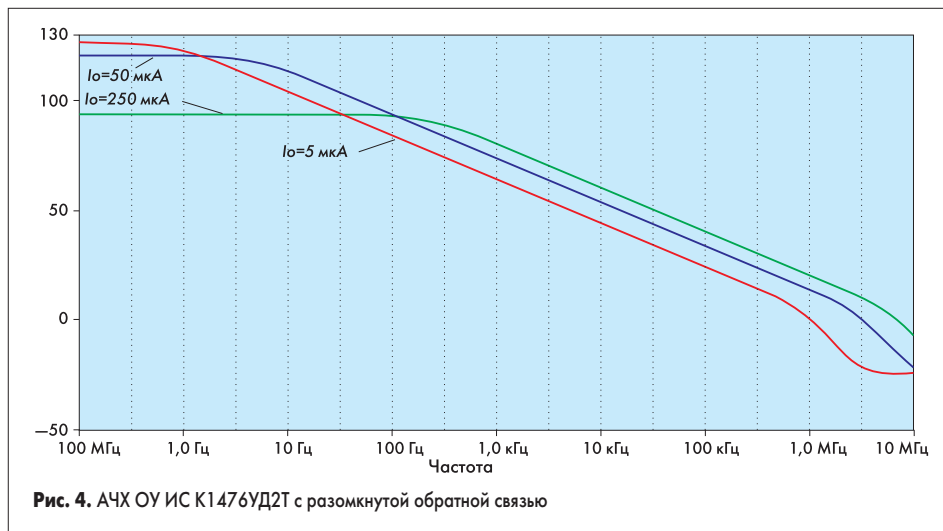


Рис. 4. АЧХ ОУ ИС К1476УД2Т с разомкнутой обратной связью

пью обратной связи для трех значений программирующего тока.

ИС К1476УД1Т является базовым вариантом ОУ архитектуры rail-to-rail серии

К1476УД...Т и изготавливается на основе стандартного технологического процесса КМОП. ИС К1476УД2Т выполнена по идентичной с ИС К1476УД1Т электрической

принципиальной схеме, однако в технологический процесс ее изготовления введена дополнительная операция, что привело к заметному увеличению коэффициента усиления по постоянному току, но также и к ухудшению динамических параметров. ОУ ИС К1476УД3АТ, К1476УД3БТ отличается от базового варианта тем, что во входном дифференциальном каскаде работает только пара транзисторов одного типа, что, строго говоря, должно приводить к тому, что данное устройство не является rail-to-rail ОУ по входу. Однако благодаря тому, что входные дифференциальные пары спроектированы с учетом возможности работы в подпороговом режиме, практически трудно зафиксировать заметное отличие данного ОУ от остальных по диапазону синфазного входного сигнала. С другой стороны, существенным преимуществом этой ИС является заметно меньшее напряжение смещения, — у ИС К1476УД3АТ этот параметр не превосходит величины 1 мВ для всех четырех ОУ, расположенных на кристалле ИС.

Таким образом, анализ электрических характеристик ИС серии К1476УД...Т и их сравнение с параметрами отечественных и зарубежных аналогов свидетельствуют, что ОУ данной серии являются современными КМОП rail-to-rail ОУ, которые могут составить конкуренцию аналогичным изделиям ведущих мировых фирм-производителей на внутреннем рынке, особенно в тех областях, где имеются требования функционирования в жестких условиях эксплуатации.

Возвращаясь к вопросам системного характера, уже затронутым в начале статьи, отметим, что в последнее время наметилась тенденция к проектированию систем на кристалле на основе так называемых IP-модулей, под которыми понимаются законченные функциональные фрагменты системы, выполняющие типовые функции и имеющие тот или иной уровень реализации (алгоритмический, программный, уровень

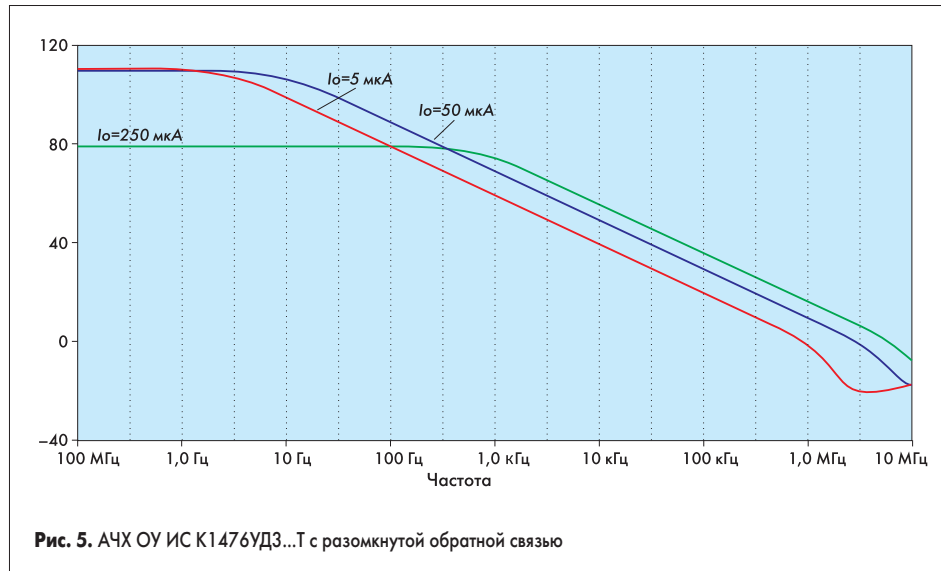


Рис. 5. АЧХ ОУ ИС К1476УД3...Т с разомкнутой обратной связью

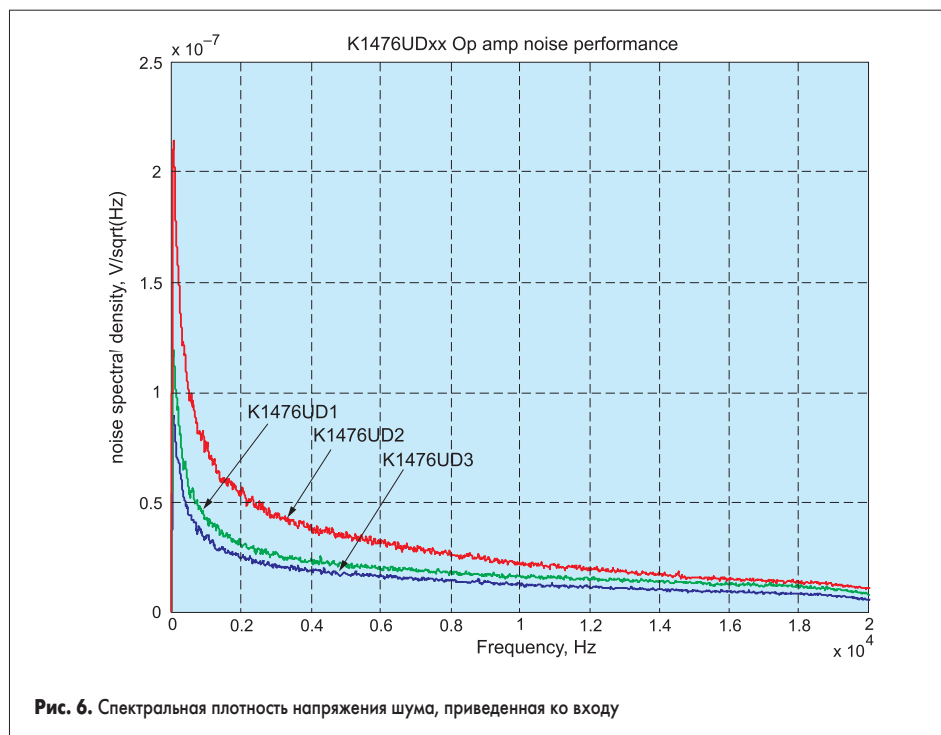


Рис. 6. Спектральная плотность напряжения шума, приведенная ко входу

HDL-описания, схемотехнический, топологический). Такой подход позволяет пользователю библиотеки IP-модулей компоновать разрабатываемую им систему из этих модулей как их «черных ящиков», абстрагируясь от их структуры и используя интеллектуальные ресурсы, воплощенные в IP-модулях, сократить сроки и стоимость проектирования системы, а также снизить его риск. Поскольку уже сейчас более четверти всех проектируемых систем на кристалле являются аналого-цифровыми, а к 2006 году прогнозируется, что их доля достигнет 70% [4], то возрастающая актуальность аналоговых и аналого-цифровых IP-модулей, совместимых с идеологией «система на кристалле» (а значит, и с современными технологиями цифровых КМОП СБИС), становится очевидной. В этом аспекте, учитывая тот факт, что ОУ серии К1476УД...Т изготавливаются по стандартной цифровой технологии КМОП, данные ОУ могут рассматриваться как апробированные на практике IP-модули схемотехнического и топологического уров-

ней, имеющие известный уровень параметров. Как топологический IP-модуль этот ОУ может использоваться при проектировании сложных аналого-цифровых БИС на основе технологии предприятия-изготовителя ИС серии К1476УД...Т, как схемотехнический IP-модуль ОУ может применяться в СБИС типа «система на кристалле», разрабатываемых на основе более прогрессивных технологий.

### Литература

1. Русак А. Операционные усилители Rail to rail от STMicroelectronics // Компоненты и технологии. 2001. № 3.
2. Петров М. Аналоговые и аналого-цифровые микросхемы MAXIM // Компоненты и технологии. 2001. № 3.
3. Бирюков С. Операционные усилители серии КР1446 // Радио. 2001. № 1.
4. Денисенко В. Проблемы схемотехнического моделирования КМОП СБИС // Компоненты и технологии. 2002. № 3.