

Современные операционные усилители и компараторы National Semiconductor

Геннадий Штрапенин

Основанная в 1959 году фирма National Semiconductor прошла огромный путь от производства первых дискретных транзисторов до сложнейших современных микроэлектронных устройств. Одним из приоритетных направлений деятельности фирмы является разработка интегральных операционных усилителей (ОУ) и компараторов, объем производства которых в настоящее время составляет около 1 миллиарда изделий в год.

В статье [1] рассмотрен ряд операционных усилителей (ОУ) и компараторов National Semiconductor, выпускаемых с середины 2005 года. За прошедшее время номенклатура изделий National Semiconductor, в частности прецизионных операционных усилителей, существенно обновилась. Произошло это в связи с началом выпуска интегральных микросхем (ИМС) с использованием патентованного технологического процесса VIP50, позволяющего существенно улучшить параметры ОУ и компараторов. Следует отметить, что ценовая политика фирмы осталась прежней — изделия National

Semiconductor с параметрами, существенно превосходящими аналогичные ИМС других фирм, стоят значительно дешевле.

В отличие от цифровых ИМС, основной проблемой разработчиков которых является повышение степени интеграции и быстродействия при снижении напряжения питания и потребляемой мощности, аналоговые микросхемы и, в частности, операционные усилители более разнообразны, поскольку ориентированы для решения широкого круга различных задач. Например, ИМС для промышленной аппаратуры традиционно имеют напряжение питания 10 В и

менее, в то время как микросхемы для стремительно развивающейся автомобильной электроники должны устойчиво работать при бортовом питании 12 В и сохранять работоспособность при бросках напряжения до 27 В в широком диапазоне температуры окружающей среды, достигающей +150°C. Для медицинской техники требуются малощумящие прецизионные многоканальные ОУ с минимальным энергопотреблением в миниатюрных корпусах. Все большие требования по точности, шумам, искажениям и другим параметрам предъявляются также и к аналоговым ИМС для бытовой электроники.

Таблица 1. Основные параметры современных ОУ National Semiconductor

Исполнение			Корпус	Диапазон температур	Напряжение питания, В		Потребляемый ток на один канал, мкА, макс	Выходной ток (вытекающий/втекающий), мА, макс	Входной ток, пА, тип	Напряжение смещения, мВ, тип	Температурный дрейф напряжения смещения, мкВ/С, тип
Одиночн.	Сдвоенн.	Счетвер.			мин	макс					
LPV511	-	-	SC70	I	2,7	12	0,88	1,35	110	0,20	5,0
LPV531 Full	-	-	TSOT23	I	2,7	5,5	425	24	0,05	1,0	2,0
LPV531 Mid	-	-					42	4,0			
LPV531 Low	-	-					5,0	0,30			
LMV651	LMV652	LMV654	SC70, SOT-23, TSSOP	E	2,7	5,5	116	18/50	80000	0,10	6,6
-	LMV716	-	MSOP	I	2,7	5,0	1600	31/41	0,60	1,6	-
LMV796	LMV797	-	SOT23, MSOP	I/E	1,8	5,5	1150	60/21	0,10	0,10	2,0
LMV791	LMV792	-	TSOT23, MSOP	I/E	1,8	5,5	1150	60/21	0,10	0,10	2,0
LMP7701	LMP7702	LMP7704	SOT-23, MSOP, TSSOP	E	2,7	12	715	66/76	0,20	0,04	1,0
LMP7715	LMP7716	-	TSOT23, MSOP	E	1,8	5,5	1150	66/23	0,10	0,01	1,0
LMP7711	LMP7712	-	TSOT23, MSOP	E	1,8	5,5	1150	66/23	0,10	0,01	1,0
LPV7215	-	-	SC70, SOT-23	I	1,8	5,0	0,58	19	0,40	0,30	1,0
LM6211	-	-	SOT-23	E	5,0	24	1000	25	0,50	0,10	2,0
LMV2011	LMV2012	LMV2014	SOT23, SOIC, MSOP	C	2,7	5,2	930	17	-3,0	0,00012	0,015
LMP2011	LMP2012	LMP2014	SOT23, SOIC, MSOP	E	2,7	5,2	930	17	-3,0	0,00012	0,015

* При напряжении питания 3,3 В

Итогом двухлетней работы инженеров National Semiconductor в данном направлении стала разработка технологического процесса производства аналоговых ИМС VIP50, получившего номинацию “2005 EDN Innovation of the Year” — лучшая инновация 2005 года по версии журнала EDN Magazines. Отметим, что VIP50 — не первая революционная технология National Semiconductor, несколько лет назад фирма запатентовала технологический процесс изготовления высокочастотных интегральных комплементарных транзисторов VIP10, позволивший создать серию высокоскоростных ОУ LMН6xxx с токовой обратной связью, обладающих рекордным сочетанием скорости нарастания выходного напряжения и частоты единичного усиления [2].

Известно, что улучшение параметров интегральных транзисторов лимитировано паразитными емкостями и утечками между элементами схемы и подложкой. Процесс VIP50 использует технологию “Кремний на изоляторе” — Silicon on Insulator (SOI) с полной изоляцией элементов углубленным оксидом, ранее не применявшуюся для производства прецизионных аналоговых ИМС. Достоинством процесса VIP50 явля-

ется также возможность создания на одном кристалле полностью комплементарных биполярных и 0,5 мкм МОП-транзисторов и, как следствие, использование достоинств БиКМОП технологии в схемотехнике — создание операционных усилителей с минимальным токопотреблением — менее 700 нА, гигантским входным сопротивлением, Rail to Rail входом и выходом (RRIO) и очень малыми шумами, работающими в широком диапазоне напряжений питания от 1,8 до 12 В и более. Другой особенностью процесса VIP50 является применение в ИМС тонкопленочных резисторов с низким температурным коэффициентом и лазерной подгонкой сопротивления с точностью лучше, чем 0,01%, что позволяет создавать интегральные ОУ и другие ИМС с минимальными значениями напряжения смещения и его температурного дрейфа, а также высокостабильным фиксированным или программируемым коэффициентом усиления. На сегодняшний день National Semiconductor предлагает более десяти моделей ОУ и компараторов, выпущенных по технологическому процессу VIP50, их основные параметры при напряжении питания 5 В приведены в табл. 1. Там же приведены параметры других

последних моделей ОУ — малошумящего быстродействующего с низким энергопотреблением LM6211 и ультрапрецизионных с автоматической коррекцией нуля LMV2011 и LMP2011, которые будут рассмотрены в конце статьи.

Супермикромощный ОУ LPV511 работоспособен в диапазоне питающих напряжений от 2,7 до 12 В и предназначен для работы в устройствах с питанием от солнечных батарей, охранных системах с автономным питанием и другой аппаратуре со сверхнизким энергопотреблением. Номинальное значение потребляемого тока I_s даже при температуре 125°C не превышает 1,5 мкА, соответствующая зависимость I_s от напряжения питания и температуры приведена на рис. 1.

ОУ LPV511 выдерживает синфазное входное напряжение, равное напряжению питания, и обеспечивает размах выходного напряжения всего на 100 мВ меньше значений напряжения питания (Rail to Rail вход и выход). Он скорректирован для любого значения коэффициента вплоть до единичного, обладает сравнительно высоким быстродействием — скорость нарастания выходного напряжения составляет 7,7 В/мкс. По величине напряжения смещения и

Коэффициент усиления, дБ, тип	Коэффициент ослабления синфазного сигнала, дБ, тип	Коэффициент влияния нестабильности напряжения питания, дБ, тип	Синфазное входное напряжение, В		Выходное напряжение, В		Частота единичного усиления, МГц, тип	Скорость нарастания выходного напряжения, В/мкс, тип	Напряжение шумов, нВ/Гц, тип	Примечание
			мин	макс	мин	макс				
105	105	115	-0,1	5,1	0,11	4,89	0,027	7,5	320	Супермикромощный, RRIO
115	95	90	-0,3	3,8	0,10	4,95	4,6	2,5	20	Программируемый, КМОП вход, RRO
96	92	88					0,625	0,25	60	
90	90	85					0,073	0,028	200	
94	100	95	-	-	0,11	4,88	12	3,2	17	То же, малошумящий
122	80	82	-	-	0,03	3,29*	5,0	5,8	12	То же, КМОП вход
100	100	100	-0,3	5,3	0,02	4,98	17	10	5,8	RRIO
100	100	100	-0,3	5,3	0,02	4,98	17	10	5,8	То же, Shutdown
130	130	100	-0,1	5,1	0,06	4,97	2,5	1,0	9,0	RRIO, прецизионный
100	100	100	-0,3	5,3	0,02	4,98	17	10	5,8	RRO, малошумящий
100	100	100	-0,3	5,3	0,02	4,98	17	10	5,8	То же, Shutdown
120	94	82	-0,3	5,3	0,04	4,94	-	-	-	Микромощный компаратор
110	98	98,0	-0,3	5,3	0,02	4,98	20	5,6	5,5	24 В. Малошумящий
130	130	120	-0,1	5,3	0,04	4,98	3,0	4,0	35	Ультрапрецизионный
130	130	120	-0,1	5,3	0,04	4,98	3,0	4,0	35	То же

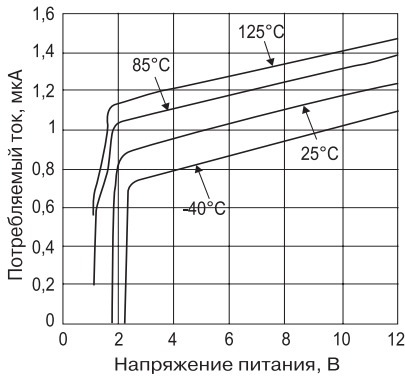


Рис. 1. Зависимость потребляемого тока ОУ LPV511 от напряжения питания и температуры

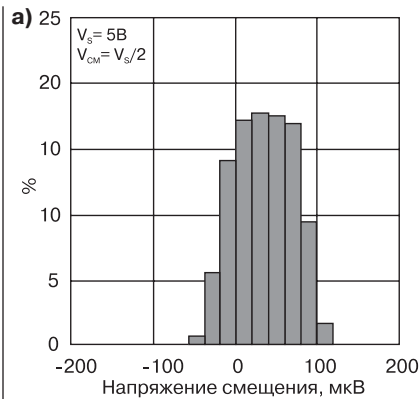
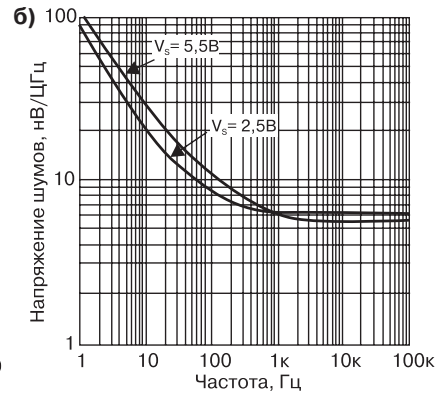


Рис. 2. Распределение (%) по типовому значению напряжения смещения (а) и типовая зависимость уровня шумов от частоты (б) для ОУ LMP7711



его температурного дрейфа, а также величинам коэффициента усиления и подавления синфазных сигналов и помех по питанию ОУ соответствует прецизионным. Выпускается в пятивыводном миниатюрном корпусе SC70. Успешно заменяет ОУ MCP6141 и LT1494.

Программируемый ОУ **LPV531** с входным каскадом на МОП-транзисторах и Rail to Rail выходом (RRO) предназначен для работы в электронной аппаратуре с автономным питанием, имеющей несколько режимов работы с различным энергопотреблением. Управление режимами ОУ от микромощного (Low) до сравнительно быстродействующего (Full) с максимальным выходным током 24 мА производится одним внешним резистором, включаемым между выводом ИМС I_{SEL} и общим проводом, при этом отношение величины потребляемого тока к частоте единичного усиления остается постоянным и равно 90 мкА/МГц. ОУ LPV531 выпускается в шестивыводном корпусе TSOT-23.

Серия экономичных ($I_s = 110$ мкА) быстродействующих малощумящих одно-, двух- и четырехканальных ОУ **LMV651/2/4** также ориентирована для применения в портативной аппаратуре с батарейным питанием. При частоте единичного усиления 12 МГц LMV651/2/4 потребляют значительно меньшую мощность, чем аналогичные ОУ других производителей. Они отличаются низким значением напряжения смещения и его температурного дрейфа, а также малым коэффициентом нелинейных искажений 0,003% в звуковом диапазоне и низким уровнем шумов, что делает перспективным применение ОУ LMV651/2/4 в аппаратуре высококачественного звуковоспроизведе-

ния. Приборы серии работоспособны в расширенном температурном диапазоне от -40°C до $+125^\circ\text{C}$ при напряжении питания от 2,7 до 5 В. Выпускаются в корпусах SC70, SOT-23 и TSSOP.

Сдвоенный малощумящий ОУ **LMV716** с малым входным током 0,6 пА, Rail to Rail выходом и большим коэффициентом усиления 130 дБ предназначен для использования в активных фильтрах, каскадах предварительного усиления и в качестве инструментального сравнительно быстродействующего усилителя в соответствующем диапазоне частот. Размах выходного сигнала при напряжении питания 3,3 В достигает 3,29 В. Он выпускается в миниатюрном восьмивыводном корпусе MSOP.

Улучшенный вариант LMV716 — серии одно- и двухканальных малощумящих ОУ с малым входным током 0,1 пА **LMV791/2** и **LMV796/7**, работоспособных при однополярном питании напряжением от 1,8 В. Отличительной особенностью данных ОУ является очень низкий уровень шумов 5,8 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при гигантском входном сопротивлении, что делает предпочтительным их использование в усилителях сигналов фотодиодов, активных фильтрах высоких порядков, медицинской аппаратуре и других аналоговых устройствах. Для экономии энергии батарей ИМС LMV791/2 имеют входы EN, нулевое напряжение на которых переводит ОУ в «спящий режим» Shutdown, в котором значение потребляемого тока составляет 140 нА на канал. Выпускаются в миниатюрных 5-6-выводных корпусах SOT23 и 8-10-выводных MSOP.

Перейдем далее к описанию последних моделей прецизионных операционных усилителей National

Semiconductor серии LMP77xx, также выполненных по технологическому процессу VIP50. Их отличает великолепное сочетание различных параметров — минимальное значение напряжения смещения и его температурного дрейфа, низкий входной ток и уровень шумов, широкая полоса усиливаемых частот и температурный диапазон. Серия одно-, двух-, четырехканальных ОУ **LMP7701/2/4** с Rail to Rail входом и выходом работоспособна при напряжении питания от 2,7 до 12 В. Гарантируется максимальное значение напряжения смещения ± 200 мкВ (типичное значение ± 40 мкВ) и входного тока 100 пА (типичное значение $\pm 0,2$ пА), что дает возможность эффективно использовать данные ОУ в качестве усилителей сигналов высокоомных датчиков, инструментальных усилителей и аналоговой аппаратуре.

Последние модели прецизионных ОУ, изготовленные по технологическому процессу VIP50 **LMP7711/2** и **LMP7715/6**, имеют еще лучшие параметры, в частности, максимальное значение напряжения смещения у LMP7711 реально не превышает ± 100 мкВ (типичное значение 10 мкВ) при температурном дрейфе -1 мкВ/ $^\circ\text{C}$, а уровень шумов составляет не более 5,8 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Статистическое распределение величины типового напряжения смещения для ОУ LMP7711 при напряжении питания $V_s = 5$ В и зависимость уровня шумов от частоты сигнала при напряжении питания $V_s = 5,5$ В и $V_s = 2,5$ В приведены на рис. 2 (а, б).

Благодаря использованию во входном каскаде ОУ высокотехнологичных МОП-транзисторов, излом зависимости шума 1/f удалось сдвинуть до частоты менее 1 кГц и тем самым значительно расширить частотный диапазон ОУ по миниму-

му шумов. Отметим, что подобные зависимости характерны для большинства моделей операционных усилителей, изготовленных по технологическому процессу VIP50.

ОУ LMP7711/2 и LMP7715/6 рассчитаны на одно- и двухполярное напряжение питания от 1,8 до 5,5 В и при потребляемом токе 1,15 мА на канал имеют частоту единичного усиления 17 МГц. Особенностью данных ОУ является также очень низкое значение коэффициента нелинейных искажений сигнала 0,001% в звуковом диапазоне. ИМС LMP7711/2 имеют входы EN, нулевое напряжение на которых переводит ОУ в "спящий режим" Shutdown. Выпускаются в миниатюрных корпусах и успешно заменяют MAX4475 и AD8615.

По технологическому процессу VIP50 выпускается также микромощный интегральный RRIO компаратор LPV7215 с двухтактным выходом. При токе потребления 0,58 мкА время переключения составляет 4,5 мкс. На рис. 3 (а, б) соответственно приведены зависимости потребляемого тока I_s от напряжения питания и температуры, и времени переключения компаратора t_{pd} от разности входных напряжений. LPV7215 выпускается в миниатюрных пятивыводных корпусах SC-70 и SOT23 и идеально подходит для применения в схемах детекторов нуля, различных генераторов и таймеров в мобильных устройствах, охранных системах и другой аппаратуре с малым энергопотреблением.

Малозащумящий экономичный широкополосный ОУ LM6211 с напряжением питания от 5 до 24 В с частотой единичного усиления 20 МГц отличается великолепным сочетанием параметров, приближающих его к прецизионным. Особенностью LM6211 является небольшая входная емкость 5,5 пФ, что дает возможность использовать данный ОУ в широкополосных усилителях с большим усилением. Позиционируется для применения в активных фильтрах, схемах ФАПЧ, входных каскадах высококачественных усилителей звуковых частот и других аналоговых устройствах. Выпускается в пятивыводном миниатюрном корпусе SOT-23.

Заслуживает внимания одно из последних достижений National Semiconductor — это серия ультрапрецизионных одно-, двух- и четырехканальных операционных усилителей с автоматической коррекцией нуля LMV2011/2/4 и их последующие

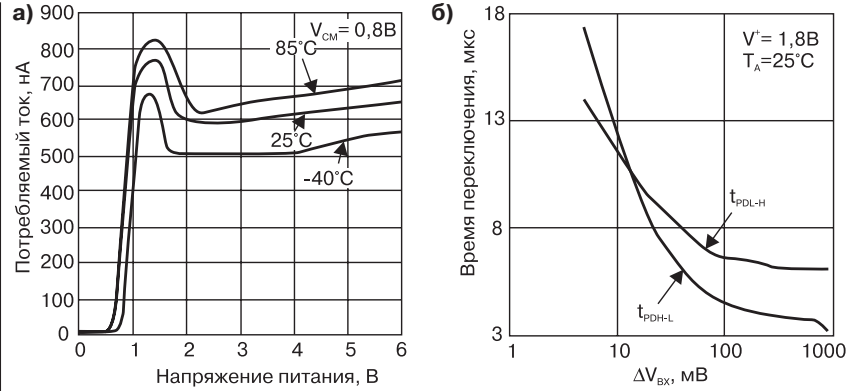


Рис. 3. Зависимость потребляемого тока от напряжения питания и температуры (а) и времени переключения от разности входных напряжений (б) для компаратора LPV7215

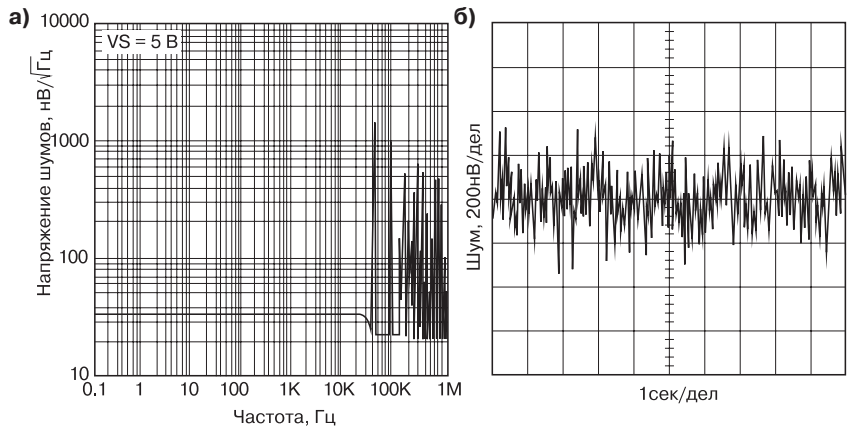


Рис. 4. Спектральная плотность напряжения шумов (а) и временная зависимость напряжения шумов в полосе частот от 0,1 до 10 Гц (б) для ОУ LMP2011/2/4

модификации LMP2011/2/4, работоспособные в расширенном температурном диапазоне от -40°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Типичное значение напряжения смещения LMP2011/2/4 составляет 0,12 мкВ, его температурный дрейф 0,015 мкВ/ $^{\circ}\text{C}$, а общий дрейф напряжения смещения за все время жизни ИМС не превышает 2,5 мкВ.

В отличие от используемого в операционных усилителях других фирм метода коррекции нуля создающего значительные шумы и искажения сигнала уже на частотах десятки-сотни Герц, в ОУ LMP2011/2/4 частота коррекции составляет 35 кГц, что позволяет перенести основной шумовой спектр в высокочастотную область, достигнув тем самым очень низкого уровня шумов и искажений в диапазоне частот до нескольких десятков килогерц. График спектральной плотности шума и временная зависимость напряжения шумов в полосе частот от 0,1 до 10 Гц для ОУ LMP2011/2/4 приведены на

рис. 4 (а, б) соответственно. Из рисунков видно, что на частотах ± 30 кГц шум не зависит от частоты и не превышает значения $35 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$, а максимальный уровень низкочастотного шума от пика до пика составляет 0,8 мкВ. В целом совокупность таких великолепных характеристик ОУ LMP2011/2/4, как сверхмалое смещение и дрейф, весьма высокие для прецизионных ОУ полоса пропускания и скорость нарастания выходного напряжения в сочетании с низкими шумами и малым потребляемым током, дает возможность применять эти микросхемы в широком классе таких устройств с повышенной точностью и температурной стабильностью, как прецизионные инструментальные усилители, промышленная аппаратура, автомобильная электроника и т.п. Операционные усилители LPM2011/2012/2014 совпадают по выводам и с превышением параметров заменяют ОУ OP184/284/484 фирмы Analog Devices Inc.

Для сокращения затрат времени на выбор и тестирование операционных усилителей и компараторов National Semiconductor предлагает ряд программных средств, существенно облегчающих поиск нужного компонента среди массы различных изделий, каждое из которых обладает множеством разнообразных электрических характеристик. Это, во-первых, простое и удобное в использовании руководство по выбору операционных усилителей и компараторов Amplifier Selection Guide — Selguide, выполненное в виде небольшой, не требующей установки автономно работающей программы под ОС Windows (имеется также версия PalmGuide для PalmOS), которую можно бесплатно скачать с сайта www.national.com/selguide. Программа Selguide включает базу данных элементов, дополнение к которой появляется на сайте каждую неделю, и систему поиска ОУ и компараторов по различным параметрам, включая температурный диапазон и тип корпуса.

Кроме того, большинство операционных усилителей и компараторов National Semiconductor поддержива-

ются онлайн-технологией проектирования электронных устройств Amplifiers Made Simple, которая является частью программной оболочки WEBENCH, размещенной на сайте фирмы, и которая позволяет выбрать оптимальный тип операционного усилителя, соответствующий требованиям пользователя, а также промоделировать его работу в типовых схемах. Как и все прочие инструментальные средства семейства WEBENCH, Amplifiers Made Simple является абсолютно бесплатным. Различные инструменты WEBENCH интегрированы между собой, что создает дополнительные удобства для пользователя.

Благодаря Amplifiers Made Simple, разработчику электронных устройств больше нет необходимости производить трудоемкие расчеты схем и дорогостоящее физическое макетирование. Технология обеспечивает мгновенный доступ к самым последним SPICE-моделям, параметрам и иной информации об операционных усилителях National Semiconductor, а также позволяет пользователю проводить сравнение характеристик нескольких устройств одновременно.

Компания National Semiconductor гарантирует поставку любых, поддерживаемых средствами WEBENCH продуктов, в пределах 24 часов.

Широкая номенклатура и невысокая стоимость интегральных операционных усилителей National Semiconductors, а также возможность программного и онлайн-выбора делает их весьма привлекательными для широкого круга разработчиков РЭА. Более подробную техническую информацию можно найти на сайте фирмы <http://www.national.com>. Рассмотренные операционные усилители, а также другие компоненты производства компании National Semiconductor можно приобрести в ЗАО «ПРОМЭЛЕКТРОНИКА» <http://www.promelec.ru>.

Литература

1. Штрапенин Г.Л. *Современные операционные усилители фирмы National Semiconductor // Компоненты и технологии. 2005. №7. С. 46–51.*
2. Штрапенин Г.Л. *Быстродействующие операционные усилители фирмы National Semiconductor // Chip News. 2003. № 10. С. 24–31.*