

## Электронные системы

УДК 621.316.54:621.314.632

Л.Н. Павлов, канд. техн. наук, М.А. Терешин, канд. техн. наук

### Исследование выходного каскада операционного усилителя класса Rail-to-Rail по выходу

Рассмотрена одна из проблем, возникающих при проектировании операционного усилителя. Исследован выходной каскад операционного усилителя класса Rail-to-Rail. Оценено влияние паразитных элементов на выходной сигнал. Изменена технология изготовления ОУ и получены работающие образцы.

An opamp design problem is investigated. The output of Rail-to-Rail opamp is analysed. The parasitic elements influence to output signal is measured. Opamp manufacturing was changed and acting samples are obtained.

**Ключевые слова:** операционный усилитель, выходной каскад, паразитные элементы.

#### Введение

Требование Rail-to-Rail по выходу означает минимальный уровень остаточного напряжения, измеренного между выходом операционного усилителя (ОУ) и соответствующим выводом напряжения питания. В случае максимального уровня выходного напряжения – это напряже-

ние между выходом и выводом источника питания положительной полярности. Исследование взаимосвязи между остаточным напряжением и током потребления в режиме холостого хода операционного усилителя ведущей фирмы [1] по схеме (рис. 1), выявило необычную зависимость тока потребления от выходного напряжения (рис. 2). Суть эффекта состоит в том, что при уменьшении остаточного напряжения наблюдается резкое увеличение тока потребления. Для ОУ, которые не обладают свойством Rail-to-Rail по выходу, зависимость тока потребления от выходного напряжения носит стабильный характер и эффект возрастания тока при приближении выходного напряжения к минимуму или к максимуму, не наблюдается.

Исследование других представителей этого класса ОУ [2, 3] подтвердило, что выявленная зависимость присуща каждому из них. Задача данной работы состоит в том, чтобы определить причины этого явления и пути построения ОУ класса Rail-to-Rail по выходу, позволяющие минимизировать указанный эффект.

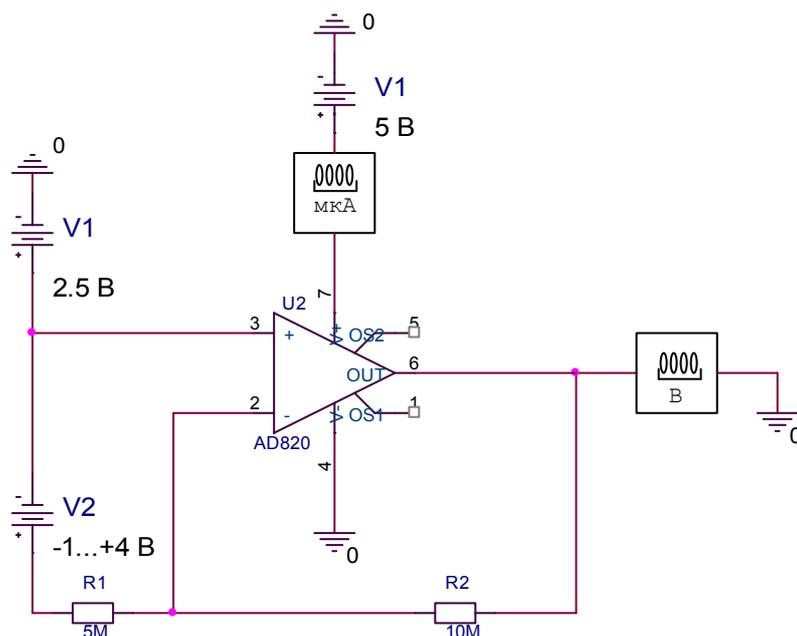


Рис. 1. Включение ОУ для определения зависимости тока потребления от выходного напряжения

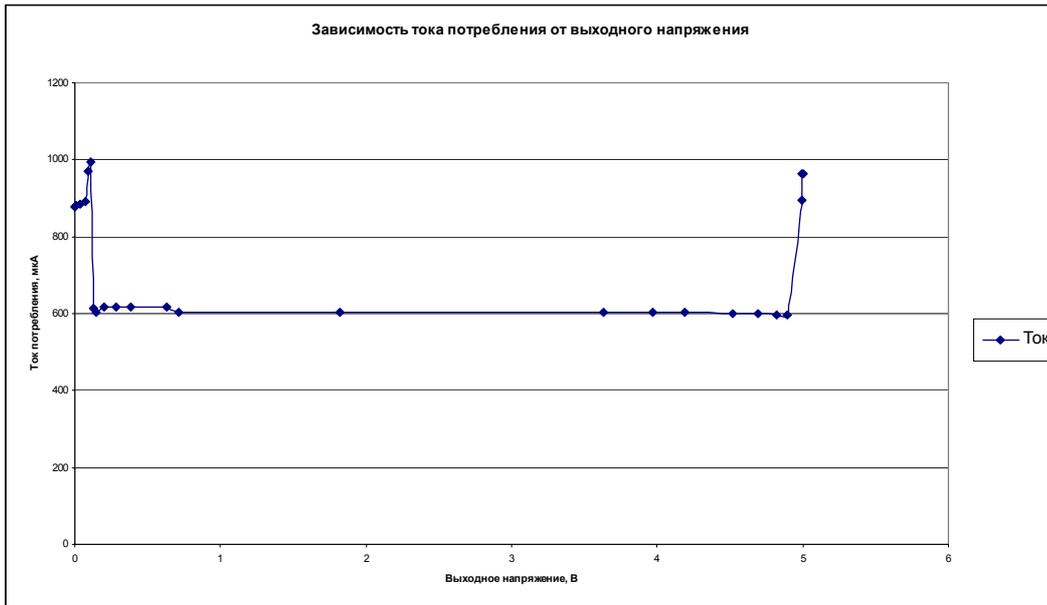


Рис. 2. Зависимость тока потребления от выходного напряжения

**Основная часть**

Анализ топологии кристаллов ОУ [1-3] и полученных на его основе приближенных эквивалентных схем, показал, что основные и самые лучшие схемотехнические решения отображает упрощенная эквивалентная схема [3], приведенная на рис. 3.

Особенность схемы состоит в том, что к выходной контактной площадке выходные транзисторы подключены не эмиттерами, как это было принято в течение десятилетий развития области ОУ, а коллекторами. В данном случае это оправдано. Иначе, если бы к выходному контакту были подключены эмиттеры, то остаточное

напряжение в нормальных климатических условиях для указанных выходных токов ОУ 20 мкА [1-3] составляло бы 0,6...0,7В.

В приведенной схеме, при надлежащих токах базы, выходные транзисторы могут входить в режим, когда остаточное напряжение будет существенно ниже – до 5...10 мВ. Для задания таких токов базы сконструирован специальный предоконечный каскад на транзисторах VT43, VT55, VT58, VT49, VT62, VT60, VT56, VT52, который в практике проектирования ОУ такого класса принято называть ядром [4]. Основная функция ядра – преобразование сигнала управления выходным каскадом из напряжения входных каскадов в ток базы

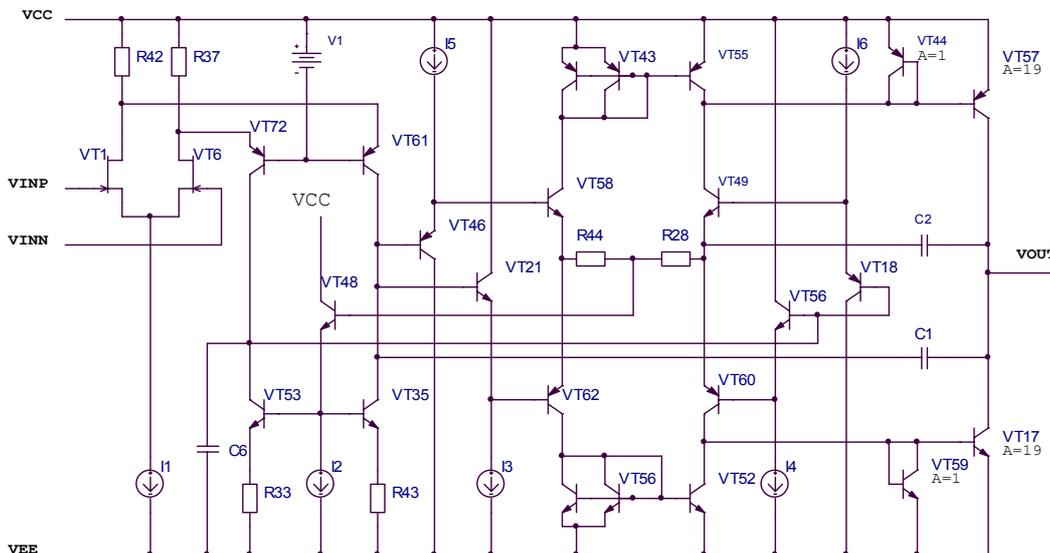
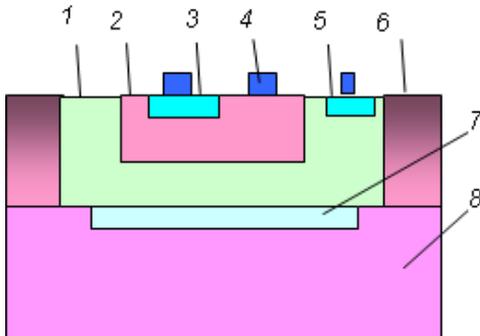


Рис. 3. Упрощенная эквивалентная схема ОУ AD823

выходных транзисторов. Эти токи могут ввести выходные транзисторы в насыщение, благодаря чему и возможно достижение остаточного напряжения 5...10 мВ при токе коллектора 20 мкА [1,2].

Рассмотрим, чем сопровождается введение в насыщение обычного интегрального выходного п-р-п транзистора, структура которого приведена на рис. 4.



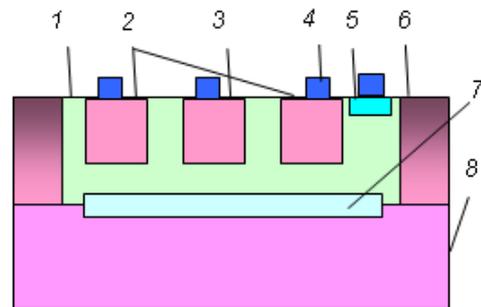
**Рис.4. Структура интегрального п-р-п транзистора:** 1 – п-эпитаксия; 2 – р-база; 3 – п-эмиттер; 4 – контакт; 5 – п-коллектор; 6 – р-разделение; 7 – п+скрытый слой; 8 – р-подложка <111>.

В соответствии с рис. 1 и рис. 3 эмиттер этого транзистора подключен к земле. При прохождении через базу транзистора тока, сопоставимого с током коллектора, потенциал на коллекторе в режиме холостого хода или высокоомной нагрузки, стремится к потенциалу земли. Транзистор входит в режим насыщения. В этом случае база основного транзистора становится эмиттером паразитного вертикального р-п-р транзистора, базой которого является коллектор выходного транзистора, а коллектором служит область разделения. Таким образом, увеличение тока потребления в области низких выходных напряжений (рис. 2) объясняется эффектом активизации паразитного транзистора в кармане выходного п-р-п транзистора. Особенность интегральной структуры, приведенной на рис. 4, в том, что область эмиттера паразитного транзистора несколько превышает область рабочего, хотя коэффициент инжекции сопоставим с рабочим.

Аналогичная картина наблюдается и при больших базовых токах выходного латерального р-п-р транзистора, структура которого приведена на рис. 5.

Эмиттер этого транзистора подключен к источнику питания положительной полярности (рис. 3). При пропускании через базу тока, сравнимого с током коллектора, потенциал коллектора стремится к потенциалу эмиттера. В этом случае активизируется р-п-р паразитный транзистор, эмиттером которого является коллектор выходного транзистора, а базой – база этого же транзистора, при этом в качестве коллектора паразитного транзистора выступает область

разделения карманов. Особенность интегральной структуры (рис.5), состоит в том, что область коллектора 2 в 6-8 раз превышает область эмиттера 3. Кроме того, площадь поверхности области разделения 7, выступающая в качестве коллектора паразитного транзистора, в несколько раз превышает область коллектора основного транзистора 2. Поэтому эффективность паразитного транзистора, в случае его активизации, может почти на порядок превышать эффективность основного. Этим можно объяснить более сильный эффект возрастания тока операционного усилителя при приближении выходного напряжения к уровню источника питания, чем в случае активизации паразитного транзистора в кармане выходного п-р-п транзистора.



**Рис.5. Структура интегрального р-п-р транзистора:** 1 – п-эпитаксия; 2 – р-коллектор; 3 – р-эмиттер; 4 – контакт; 5 – п-база; 6 – р-разделение; 7 – п+скрытый слой; 8 – р-подложка <111>.

Измерение тестовых структур минимального размера, принятого в качестве единичного, позволило численно сравнить коэффициенты усиления рабочего и паразитного транзистора. Это дало возможность дополнить модели рабочих транзисторов паразитными структурами. Соответствующая эквивалентная схема приведена на рис. 6. Численные значения соотношения параметров рабочего и паразитного транзистора выражены в значениях параметра модели «AREA» на эквивалентных подсхемах интегральных структур (рис. 6).

Существует несколько путей подавления влияния паразитного транзистора. Наиболее радикальный из них направлен на уменьшение коэффициента усиления паразитной структуры. Его суть состоит в том, чтобы глубоким легированием области кармана по периметру от поверхности до скрытого слоя образовать область высокой проводимости кармана. Эта область способствует рекомбинации неосновных носителей и существенно снижает плотность тока, проникающего на область разделения. Этот путь пригоден как для п-р-п транзисторов, (рис. 7) так и для р-п-р транзисторов (рис. 8).

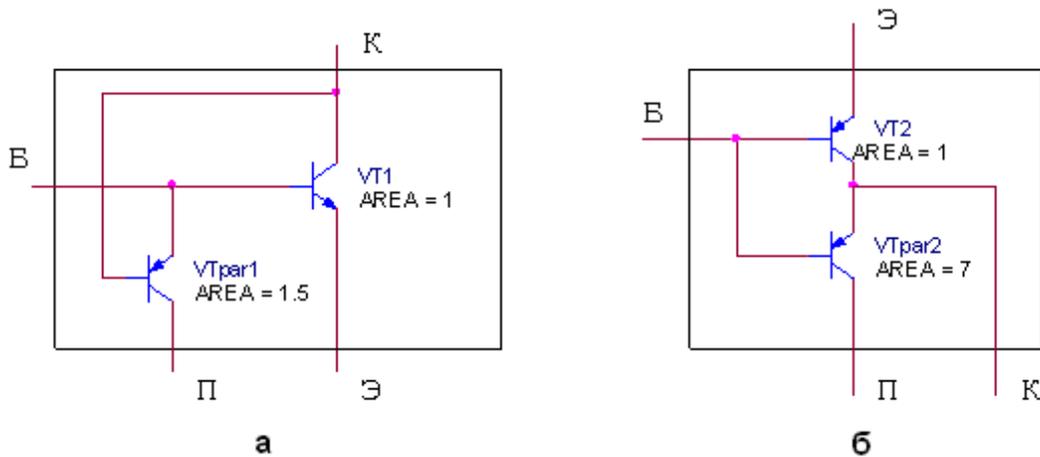


Рис.6. Эквивалентные подсхемы интегральных транзисторов (а) n-p-n переход и (б) p-n-p переход

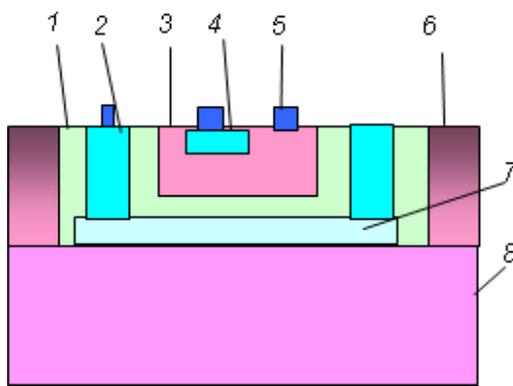


Рис.7. Структура улучшенного интегрального выходного n-p-n транзистора: 1– n-эпитаксия; 2 – n-глубокий коллектор; 3 – p-база; 4 – n-эмиттер; 5 – контакт; 6 – p-разделение; 7 – n+ скрытый слой; 8 – p-подложка <111>.

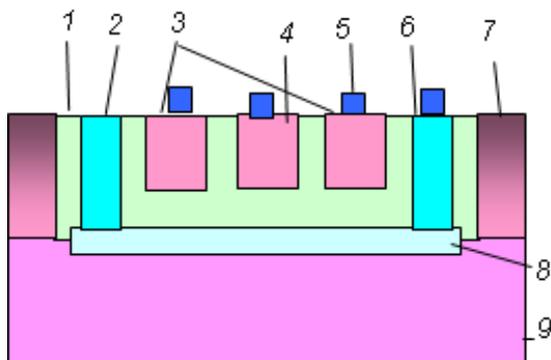


Рис.8. Структура улучшенного интегрального выходного p-n-p транзистора: 1– n-эпитаксия; 2 – n-глубокий коллектор; 3 – p-коллектор; 4 – n-эмиттер; 5 – контакт; 6 – p-база; 7 – p-разделение; 8 – n+ скрытый слой; 9 – p-подложка <111>.

Для проверки эффективности этого решения проведены расчеты структур с вертикальной глубокой диффузией, изготовлены интегральные структуры и проведены измерения на двух пластинах в режимах, указанных в [1, 2] коэффициентов усиления основных и паразитных структур выходных транзисторов. Для относительно малых токов коллектора, до 10 мА, ко-

эффициент усиления паразитных элементов не превосходит 0,33. Результаты измерений для предельных токов [1, 2] приведены в таблице 1 для p-n-p транзистора и в таблице 2 для n-p-n транзистора.

Приведенные измерения показывают, что коэффициент усиления паразитного n-p-n транзистора удалось уменьшить в 100 раз, а коэффициент усиления паразитного p-n-p транзистора уменьшен соответственно в 250 раз.

Эти данные соответствуют расчетным значениям. Измерения параметров выходного каскада в целом подтвердило правильность предположения о причинах нестандартной зависимости тока потребления от режима работы выходного каскада, приведенной на рис. 2.

**Выводы**

1. Для ОУ класса Rail-to-Rail по выходу принципиально невозможно построение выходного каскада на основе традиционных эмиттерных повторителей, иначе остаточное напряжение будет составлять 0,5...0,6В при нормальных климатических условиях как напряжение база-эмиттер прямо смещенного p-n перехода.

2. Построение выходного каскада Rail-to-Rail по выходу на транзисторах, включенных по схеме с общим эмиттером, вызывает активизацию паразитных транзисторов, что в свою очередь приводит к неконтролируемой инжекции носителей в подложку.

3. Минимизация эффекта паразитной инжекции осуществлена изменением конструкции выходных транзисторов, которая дополнена по периметру кармана вертикальным легирующим слоем. Этим коэффициент усиления паразитных транзисторов уменьшен в 100-250 раз. Это подтверждено экспериментально результатами измерений на двух опытных пластинах.

Таблица 1

Выходной латеральный р-п-р транзистор								
Ток коллектора, мВ	15							
Остаточное напряжение, мВ	435	190	152	137	123,4	109	102	96,4
Ток базы, мкА	71,5	100	120	150	200	300	400	500
Статический коэффициент усиления основного транзистора	210	150	125	100	75	50	37,5	30
Ток коллектора паразитного транзистора, мкА	36,8	53	60,9	72,3	90,3	123	154	185
Статический коэффициент усиления паразитного транзистора	0,51	0,53	0,48	0,35	0,45	0,41	0,385	0,37

Таблица 2

Выходной вертикальный п-р-п транзистор				
Ток коллектора основного транзистора, мА	40,0	52,5	60	70
Остаточное напряжение, мВ	0,50	0,70	0,87	1,0
Ток базы, мА	1,78	2,79	3,48	4,64
Статический коэффициент усиления основного транзистора	22,4	18,8	17,2	15,1
Ток эмиттера основного транзистора, мА	41,9	55,3	63,5	74,6
Статический коэффициент усиления паразитного транзистора	1,1	1	1	1

### Литература

1. Data Sheet. Analog Devices. Single Supply, Rail-to-Rail, Low Power, FET Input Op Amp. AD820. Rev. H, 2011. – 24p.
2. Data Sheet. Analog Devices. Single Supply, Rail-to-Rail, Low Power, FET Input Op Amp. AD822. Rev. H, 2011. – 24p.
3. Data Sheet. Analog Devices. Dual, 16 MHz, Rail-to-Rail, FET Input Amplifier. AD823. Rev. D, 2010. – 20p.
4. *Huijsing J.* Operational Amplifiers. Theory and Design. 2nd Edition. – Springer.: “Springer Science”, 2011. – 408p.