

Статические параметры быстродействующих операционных усилителей на комплементарных СВЧ биполярных транзисторах

Корнеев С. В.

Описываются конструктивно-технологические способы симметрирования статических параметров быстродействующих операционных усилителей (ОУ), построенных на основе комплементарной биполярной технологии. Рассматриваются проблемы обеспечения высоких статических параметров быстродействующих ОУ с обратной связью по напряжению и быстродействующих ОУ с токовой обратной связью.

Введение

В настоящее время одним из основных аналоговых элементов, широко применяющихся при построении широкополосных систем обработки информации, являются интегральные микросхемы (ИС) операционных усилителей (ОУ). Ведущие мировые производители полупроводниковых приборов и ИС (Analog Devices, Maxim, Texas Instruments, National Semiconductor) выпускают сотни типов ОУ для различных применений [1]. Выпускаемые промышленностью микросхемы ОУ постоянно совершенствуются, оптимизируются их параметры. Постоянный рост частоты в трактах преобразователей частоты (ПЧ) приёмо-передающих модулей, ужесточение требований к точности обработки СВЧ сигналов предъявляют очень жесткие требования к статическим и динамическим параметрам современных аналоговых устройств, в том числе и к операционным усилителям [2]. Для расширения области применения операционных усилителей актуальным является создание универсальных ОУ, имеющих совокупность статических и динамических параметров, удовлетворяющих большинству схем включения.

Статические параметры быстродействующих ОУ

Разработанная в ФГУП «НПП «Пульсар» комплементарная биполярная технология аналоговых монолитных ИС на основе вертикальных СВЧ n-p-n и p-n-p транзисторов с пробивными напряжениями коллектор-эмиттер до 35 В и с граничными частотами более 2 ГГц впервые в отечественной практике позволила создать класс быстродействующих операционных усилителей с такими динамическими и статическими параметрами как полоса единичного усиления $f_t = 700$ МГц, скорость нарастания выходного напряжения $V_{\text{цвых}} = 2000$ В/мкс, напряжение смещения $U_{\text{см}} = 10$ мВ, входной ток $I_{\text{вх}} = 20$ мкА, обеспечить статические параметры высокочастотных усилителей на уровне, сопоставимом с менее быстродействующими серийно выпускаемыми ОУ, невозможно в силу конструктивно-технологических особенностей СВЧ элементной базы и схемотехнических особенностей построения быстродействующих широкополосных ОУ [3].

Одним из самых важных факторов, влияющих на статические параметры быстродействующих ОУ, разрабатываемых в ФГУП «НПП «Пульсар», является принципиальная невозможность полного симметрирования параметров комплементарных p-n-p и n-p-n транзисторов в силу различия их электрофизических свойств. Разница напряжений эмиттер-база ($U_{\text{эб}}$), напряжений Эрли ($U_{\text{э}}$) и коэффициентов усиления базового тока (β) комплементарных СВЧ транзисторов приводит к возникновению разностных

токов в цепях усилительного каскада ОУ и появлению напряжений смещения и входных токов [4].

Характер и степень влияния элементной базы на статические параметры не в последнюю очередь зависит от структуры построения ОУ. По структуре построения операционные усилители можно условно разделить на два класса: операционные усилители с токовой обратной связью (ОУ с ТОС) и операционные усилители с обратной связью по напряжению (ОУ с ОСН).

Наиболее критичной к симметрии комплементарных транзисторов является ОУ с ТОС. Комплементарный буферный усилитель на входе ОУ с ТОС, обеспечивая высокие динамические параметры, имеет гораздо большее напряжение смещения из-за разницы напряжений эмиттер-база ($U_{эб}$) комплементарных n-p-n и p-n-p транзисторов, чем ОУ с ОСН на основе классического дифференциального каскада на однополярных транзисторах. Это объясняется тем, что одинаковые по конструкции и имеющие равные периметры эмиттеров комплементарные транзисторы при одинаковых коэффициентах усиления всегда различаются зарядами в базах, что приводит к расхождению входных вольт-амперных характеристик [5].

Скомпенсировать разницу зарядов в базах n-p-n и p-n-p транзисторов входного буфера можно, введя поправку на соотношение площадей эмиттерных переходов. Изготовить быстродействующие ОУ с ТОС и обеспечить малые напряжения смещения (порядка 1-2 мВ) можно при соотношении площадей p-n-p и n-p-n транзисторов входного буферного усилителя $S_{npn} / S_{pnp} = 2$ при условии равенства коэффициентов усиления базового тока. Однако такой метод коррекции $U_{см}$ реализуется лишь при высокой воспроизводимости технологического процесса. Решить проблему компенсации разницы зарядов в базах комплементарных транзисторов можно более простым технологическим способом – путём подбора соотношения коэффициентов усиления базового тока разнополярных транзисторов. Этот способ позволяет осуществлять процесс коррекции вплоть до заключительных этапов технологического процесса. Существенным недостатком этого способа коррекции является различие в значениях коэффициентов усиления комплементарных транзисторов, что приводит к образованию разностного базового тока входных транзисторов и к росту входного тока $I_{вх(+)}$ по неинвертирующему входу ОУ с ТОС. Тем не менее при изготовлении быстродействующих ОУ с ТОС, при использовании технологического способа симметрирования входных ВАХ комплементарных транзисторов удаётся получить $U_{см}$ на уровне 5-7 мВ и $I_{вх(+)}$ на уровне 10 мкА при следующем условии:

$$\beta_{npn}/\beta_{pnp} = 1,5, \text{ при этом } \beta_{pnp} \geq 50.$$

Помимо конструктивно-технологических способов уменьшения напряжения смещения возможно применение схмотехнических решений, направленных на снижение $U_{см}$. Уменьшение напряжения смещения ОУ с ТОС возможно при использовании входных транзисторов буферного усилителя в диодном включении. Реализация такого схемного решения позволяет получать $U_{см}$ порядка 0,5-1 мВ, но при этом происходит существенное (в два раза) снижение скорости нарастания ОУ и уменьшение динамического диапазона по входному сигналу [6].

Для ОУ с ОСН с дифференциальным каскадом на входе напряжение смещения определяется разбросом параметров однополярных транзисторов, а входной ток зависит только от коэффициента усиления и режимного тока входных транзисторов. Это позволяет получать значения напряжений смещения ($U_{см} = 0,5-1$ мВ) и разности входных токов ($\Delta I_{вх} = 0,1-0,2$ мкА) без применения методов симметрирования. Однако недостатком

ОУ с дифференциальным каскадом является невысокое быстродействие, обусловленное схемотехническими особенностями построения схем данного типа [7].

Для повышения быстродействия ОУ с ОСН применяется другое схемное решение, заимствованное из ОУ с ТОС структуры (“quad-core” архитектура). На обоих входах используются комплементарные буферные усилители. Обеспечивая примерно в три раза большее быстродействие, чем ОУ с ОСН с дифференциальным входом, данная схема, однако, обладает гораздо большей чувствительностью к несимметричности параметров транзисторов входного каскада. Имея меньшие по значению входные токи, чем у классической схемы ОУ с дифференциальным каскадом, схема с “quad-core” архитектурой имеет на порядок большее напряжение смещения. Основной причиной возникновения $U_{см}$ в ОУ с ОСН с “quad-core” архитектурой является разностный ток в усилительном каскаде ОУ, возникающий вследствие несимметрии выходных ВАХ комплементарных транзисторов. Указанный недостаток компенсируется симметрированием дифференциальных сопротивлений коллекторных переходов комплементарных транзисторов усилительного каскада. Симметрирование можно осуществлять двумя способами: прецизионной подгонкой номинала тонкоплёночного резистора в источнике тока усилительного каскада и симметрированием дифференциальных сопротивлений коллекторных переходов комплементарных транзисторов путём подбора соотношений площадей эмиттерных переходов комплементарных транзисторов. При разработке и изготовлении быстродействующих ОУ с ОСН с “quad-core” архитектурой обеспечить малые напряжения смещения (порядка 1-2 мВ) можно при соотношении площадей p-n-p и n-p-n транзисторов усилительного каскада $S_{npn}/S_{pnp} = 1,5$ при условии равенства коэффициентов усиления базового тока комплементарных транзисторов.

Описанные выше схемотехнические и конструктивно-технологические методы коррекции параметров были реализованы в ФГУП «НПП «Пульсар» в процессе разработки быстродействующих ОУ.

В настоящее время ФГУП “НПП “Пульсар” освоены в производстве следующие типы операционных усилителей:

- 1432УД1АР, 1432УД1БР, 1432УД7АР, 1432УД7БР (АЕЯР.431100.280-01 ТУ) – ОУ с ТОС с полосой пропускания 100 МГц и скоростью нарастания 800 В/мкс, напряжением смещения $U_{см} = 15$ мВ, входным током $I_{вх} = 20$ мкА;

- 1432УД2АР, 1432УД2БР, 1432УД2ВР, 1432УД2ГР (АЕЯР.431100.280-03 ТУ) – ОУ с ОСН с полосой пропускания 70 МГц и скоростью нарастания 350 В/мкс, напряжением смещения $U_{см} = 2$ мВ, входным током $I_{вх} = 7$ мкА;

- 1432УД6Р, 1432УД8Р (АЕЯР.431100.280-04 ТУ) – ОУ с ТОС с полосой пропускания 150 МГц и скоростью нарастания 1200 В/мкс, напряжением смещения $U_{см} = 10$ мВ, входным током $I_{вх} = 15$ мкА;

- 1432УД10АР1, 1432УД10БР1 (АЕЯР.431100.280-09 ТУ) – ОУ с ТОС с функцией «отключения по выходу» с полосой пропускания 100 МГц и скоростью нарастания 300 В/мкс, напряжением смещения $U_{см} = 10$ мВ, входным током $I_{вх} = 10$ мкА;

- 1432УД11Р1, 1432УД12Р1, 1432УД15Р1 (АЕЯР.431100.280-09 ТУ) – ОУ с ТОС с полосой пропускания 650 МГц и скоростью нарастания 1700 В/мкс, напряжением смещения $U_{см} = 5$ мВ, входным током $I_{вх} = 10$ мкА;

- 1432УД16Р, 1432УД18Р (АЕЯР.431100.280-07 ТУ) – ОУ с ОСН с полосой пропускания 200 МГц и скоростью нарастания 800 В/мкс, напряжением смещения $U_{см} = 2$ мВ, входным током $I_{вх} = 10$ мкА;

- 1432УД22АР, 1432УД22БР (АЕЯР.431100.280-05 ТУ) – двухканальные ОУ с ОСН

с полосой пропускания 50 МГц и скоростью нарастания 300 В/мкс, напряжением смещения $U_{см} = 3$ мВ, входным током $I_{вх} = 7$ мкА.

Литература

1. Андрей Никитин. Операционные усилители компании MAXIM // Новости электроники, №5 (85), 2010.
2. Брюс Картер. Разработка радиочастотных схем на операционных усилителях // Электронные компоненты, №3, 2008.
3. Виноградов Р. Н., Ксенофонтов Д. Л., Корнеев С. В. Высокочастотные аналоговые микросхемы на базе высокочастотной комплементарной биполярной технологии // Тезисы докладов научно-технической конференции. - Международный форум информатизации «МФИ-97», Москва, Зеленоград.
4. Виноградов Р. Н., Ксенофонтов Д. Л., Корнеев С. В. Быстродействующие аналоговые микросхемы // Электронная промышленность, 1998.
5. Виноградов Р. Н., Ксенофонтов Д. Л., Корнеев С. В., Савченко Е. М. Статические параметры быстродействующих операционных усилителей на комплементарных СВЧ биполярных транзисторах // Материалы научной конференции «ПУЛЬСАР-2003». - Москва, 2003.
6. Виноградов Р. Н., Ксенофонтов Д. Л., Корнеев С. В., Савченко Е. М. Улучшение статических параметров быстродействующих операционных усилителей с токовой обратной связью // Материалы научно-практической конференции «ПУЛЬСАР-2002», Москва, 2002.
7. Виноградов Р. Н., Ксенофонтов Д. Л., Корнеев С. В., Савченко Е. М. Быстродействующие аналоговые микросхемы на базе высокочастотной комплементарной биполярной технологии // Материалы научной конференции «ПУЛЬСАР-2003», Москва, 2003.