

УДК 621.372

Л.Н. Павлов, канд. техн. наук, Ю.М. Калниболотский, д-р техн. наук

Оптимизация операционного усилителя

Выдвинута стратегия оптимизации ИМС популярного операционного усилителя. В качестве критерия оптимальности принят минимум площади кристалла. В качестве ограничений принят минимальный уровень запаса по фазе, минимальный уровень коэффициента усиления и допустимый уровень шумов.

Strategy of optimization of IC of popular operational amplifier is pulled out. A minimum of area of crystal is accepted as a criterion of optimality. The minimum level on a phase margin, minimum level of amplification factor and possible level of noises are accepted as restrictions.

Ключевые слова: операционный усилитель, коэффициент усиления, уровень шума, ИМС.

Введение

К интегральным микросхемам общего назначения предъявляются жесткие требования с точки зрения экономической эффективности. При этом подразумевается безусловное выполнение электрических характеристик в диапазоне заданном диапазоне температур. При проектировании и оптимизации подразумевается, что желательно, чтобы этот температурный диапазон отвечал как минимум требованиям промышленного стандарта. Тогда в процессе производства ИМС, которые при разбраковке не прошли по требованиям промышленного стандарта, как правило, переводят в категорию бытовых ИМС.

Постановка задачи

Одним из популярных в настоящее время является ИМС массового производства операционного усилителя класса 4558, которая производится ведущими производителями ИМС: Texas Instruments, Fairchild, Philips, Motorola и др. [1-5], причем стоимость ИМС не превосходит 20 центов. При такой незначительной стоимости *требуется минимизация* площади кристалла. Схема операционного усилителя опубликована разными фирмами [1-5].

Общий анализ схемы электрической

Каждая фирма, которая производит образцы ИМС класса 4558 [1-5], вносит при этом в топологию и схему электрическую те или иные изменения, которые можно считать несущественными.

Главные особенности ИМС состоят в том, что:

1. ИМС должна выдерживать по цепи питания до 36 В.

2. Таблица норм на параметры ИМС в целом одинакова для каждой фирмы.

3. Минимальный коэффициент усиления по постоянному току составляет более 110 дБ.

4. Запас по фазе составляет 45° [3].

5. Частота единичного усиления в среднем составляет 2,8 МГц.

6. Коэффициент нелинейных искажений на частоте 1 кГц не более 0,008 (аудиотехника).

7. Конденсатор в первом каскаде составляет существенную емкость – 87 пФ. Номинальное значение этого конденсатора вносит свой вклад в устойчивость схемы.

8. Полоса пропускания определяется вторым конденсатором, емкостью 10 пФ. Этот конденсатор также вносит существенный вклад в устойчивость схемы.

9. Напряжение шумов, приведенное к входу – $25 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Некоторые схемные решения отличаются наличием электронной защиты от перегрузок, но на этом мы останавливаться не будем.

Рассмотрим, какие ресурсы могут быть использованы для минимизации площади кристалла.

Уменьшение площадей транзисторов в данном случае невозможно, так как приводит к уменьшению пробивных напряжений и при этом нарушается требование п.1.

Переход на высокоомные слои для резисторов малоэффективен, так как в ИМС нет высокоомных резисторов.

Разумным подходом может быть путь, позволяющий уменьшить площади конденсаторов при сохранении запаса по фазе.

Стратегия оптимизации при этом предложена следующая: провести ревизию схемы электрической и осуществить оптимизацию с целью минимизации площади конденсаторов. При необходимости ввести изменения в схему электрическую и осуществить новый цикл оптимизации.

Стратегия оптимизации

Приведем исходную схему ОМС ОУ в виде рис.1.

Частотную и фазовую характеристику в значительной степени определяет постоянная времени $\tau_1 = R_1 C_1$. Поэтому для уменьшения

площади конденсатора C_1 необходимо увеличить сопротивление R_1 . Чтобы при этом не снизить диапазон синфазных сигналов, необходимо уменьшить ток, протекающий через первый каскад. Но уменьшение тока приведет к увеличению дифференциального сопротивления эмиттеров входных транзисторов. Вследствие этого неизбежно возрастет уровень шумов, что недопустимо по требованиям п.9.

Возникшее противоречие указывает на то, что схемотехническими решениями, касающимися коррекции только входного каскада операционного усилителя, задача оптимизации не решается. Поэтому, выясним возможности повышения запаса по фазе при анализе второго каскада ОУ. В частности выясняется, что с увеличением тока второго каскада, который задается генератором тока на PNP-транзисторе VT7, запас по фазе $\Delta\varphi$ увеличивается. Эта зависимость приведена на рис. 2.

Характер этой зависимости можно пояснить, в частности, уменьшением коллекторного сопротивления при увеличении тока эмиттеров транзисторов VT9 и VT10. Благодаря этому уменьшается постоянная времени $\tau_2 = R_k C_m$, где –

сопротивление коллектора, C_m – емкость Миллера. Соответственно корректируется и фазочастотная характеристика. Подобный эффект можно объяснить, в частности, уменьшением сопротивления коллекторов транзисторов VT9 и VT10.

Необходимо также уточнить назначение конденсатора C_2 . С одной стороны его роль – параллельный высокочастотный канал. С другой стороны он составляет емкостную нагрузку входного каскада. В связи с этим, можно определить стратегию оптимизации, охватывающую и первый, и второй каскад ОУ. При этом необходимо прояснить физическую суть эффекта увеличения запаса по фазе с помощью конденсатора C_2 . Опережение по фазе, которое образуется с помощью этого конденсатора на фазо-частотной характеристике проявляется как «полка» в области частот от 200кГц до 2МГц, рис. 3.

Повышенная скорость спада этой характеристики в области частот свыше 2МГц определяется не в последнюю очередь емкостной составляющей нагрузки входного каскада за счет конденсатора C_2 .

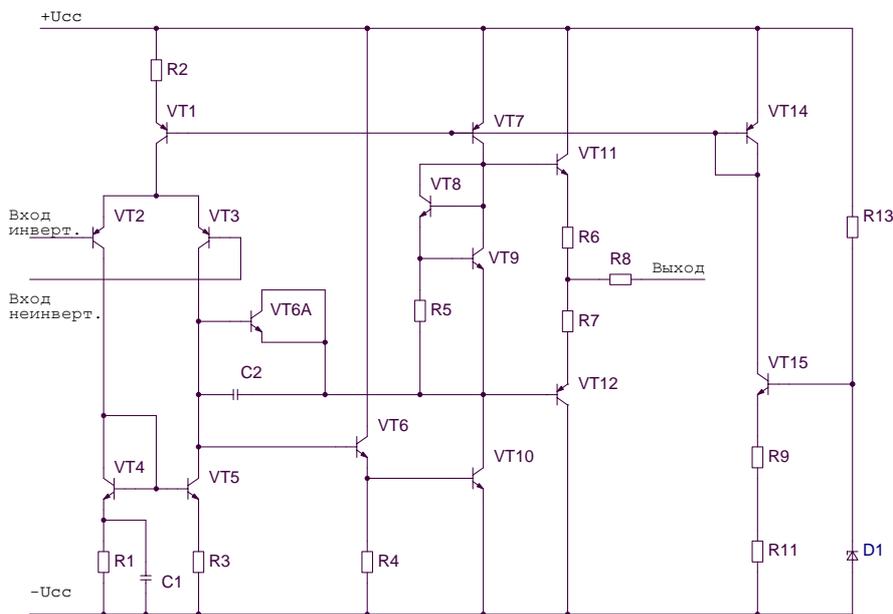


Рис. 1. Схема электрическая операционного усилителя

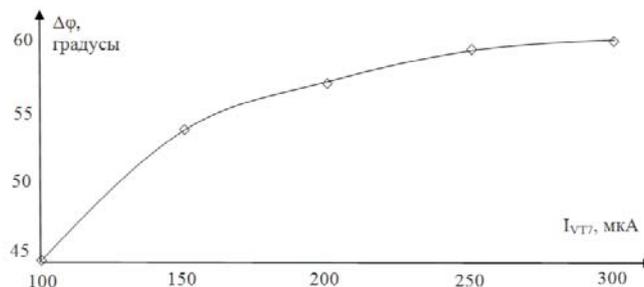


Рис. 2. Зависимость запаса по фазе от тока второго каскада

Подобное пояснение дает возможность опробовать другое решение цепи коррекции: последовательно с конденсатором ввести резистор, чтобы внести потери в цепь конденсатора в области высоких частот, ограничении связи первого и второго каскада.

В целом, были выполнены следующие шаги:

- Уменьшение тока входного каскада
- Увеличение тока второго каскада
- Введение резистора R_L в цепь коррекции
- Отработка топологии входных транзисторов

Это позволило уменьшить емкость конденсатора C_1 с 87 до 12 пФ, а емкость конденсатора C_2 – с 10 до 5 пФ. Благодаря этому удалось уменьшить площадь кристалла операционного усилителя почти на 30%.

Откорректированная схема представлена на рис. 4, где сопротивление потерь обозначено как R_L .

В настоящее время ведется изготовление ИМС по откорректированной топологии.

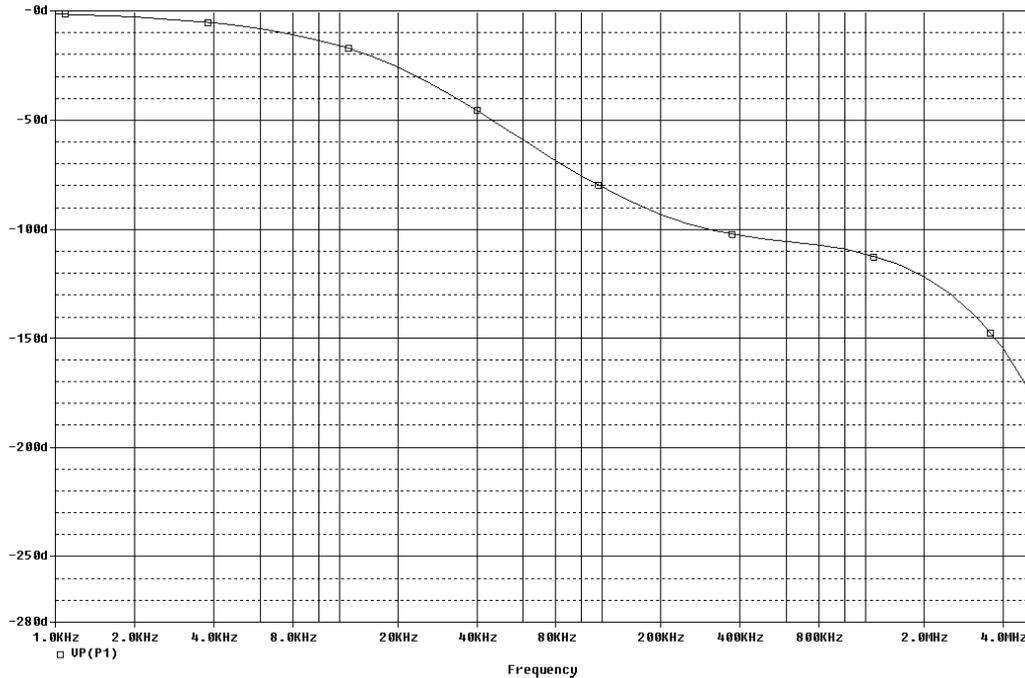


Рис. 3. Фазо-частотная характеристика операционного усилителя

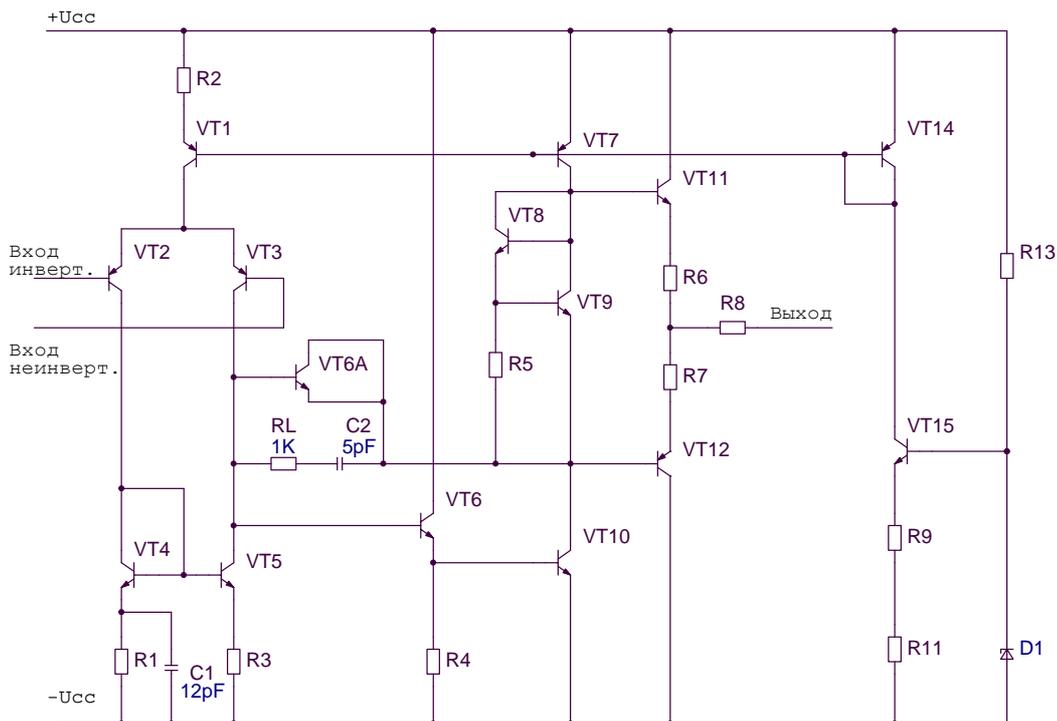


Рис. 4. Окончательная схема электрическая операционного усилителя

Выводы

- При оптимизации операционного усилителя с целью минимизации площади кристалла наиболее перспективным является уменьшение площадей корректирующих конденсаторов.
- Критерием минимального значения емкости конденсатора является запас по фазе.
- Контрольной величиной при оптимизации площади является уровень шумов, приведенный к входу.
- Эффективной мерой, позволяющей существенно уменьшить емкости конденсаторов, оказывается введение в цепь конденсатора сопротивления потерь.

Литература

1. MIKRON. Inv № 456. DUAL GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS October 2006 - revised May 2010.
2. Texas Instruments. RC4558, RM4558. DUAL GENERAL-PURPOSE OPERATIONAL AMPLIFIERS. SLOS073A – MARCH 1976 – REVISED JUNE 1999.
3. 2001 ST Microelectronics MC4558. WIDE BANDWIDTH DUAL BIPOLAR OPERATIONAL AMPLIFIER.
4. LESHAN RADIO COMPANY, LTD. LR4558. DATASHEET 22.04.2006. Two high performance operational amplifiers.
5. Philips Semiconductors Linear Products. Dual general-purpose operational amplifier NE/SA/SE4558.