

УДК 621.316.54:621.314.632

Л.Н. Павлов, канд. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Повышение нагрузочной способности операционного усилителя

Исследована причина локальной неустойчивости операционного усилителя массового применения. Установлено, что причина локальной неустойчивости состоит в нелинейной зависимости емкостей транзисторов от напряжения в текущей рабочей точке, поэтому анализа запаса по фазе в начальной рабочей точке недостаточно. Отмечается, что традиционный анализ устойчивости не охватывает полностью проблемы. Для решения поставленной задачи исследованы численные подходы к анализу неустойчивости. Предложено решение задачи за счет увеличения объема анализа амплитудных и фазовых характеристик с проверкой анализом во временной области. Библ. 3., рис. 12.

Ключевые слова: операционный усилитель; запас по фазе; модель транзистора; амплитудно-частотная характеристика; фазо-частотная характеристика; нагрузочная способность.

Введение

Для расширения сфер применения массового операционного усилителя класса 4558 [1], рис.1, потребовалось увеличить стойкость к емкостной нагрузке в 2 раза. Фактически это означало, что при расчетах номинальное значение нагрузочного конденсатора увеличить с 100пФ до 200пФ. При этом в результате доработки размеры кристалла должны были остаться в первоначальных габаритах, чтобы стоимость кристалла интегральной микросхемы не увеличилась. Такие жесткие условия диктуются острой конкуренцией за рынки сбыта, где разница в 1-2 цента за микросхему может оказаться решающим условием в борьбе за покупателя. Цель работы, поэтому, состоит в том, чтобы повысить устойчивость минимальными вмешательствами в структуру кристалла без увеличения его габаритов.

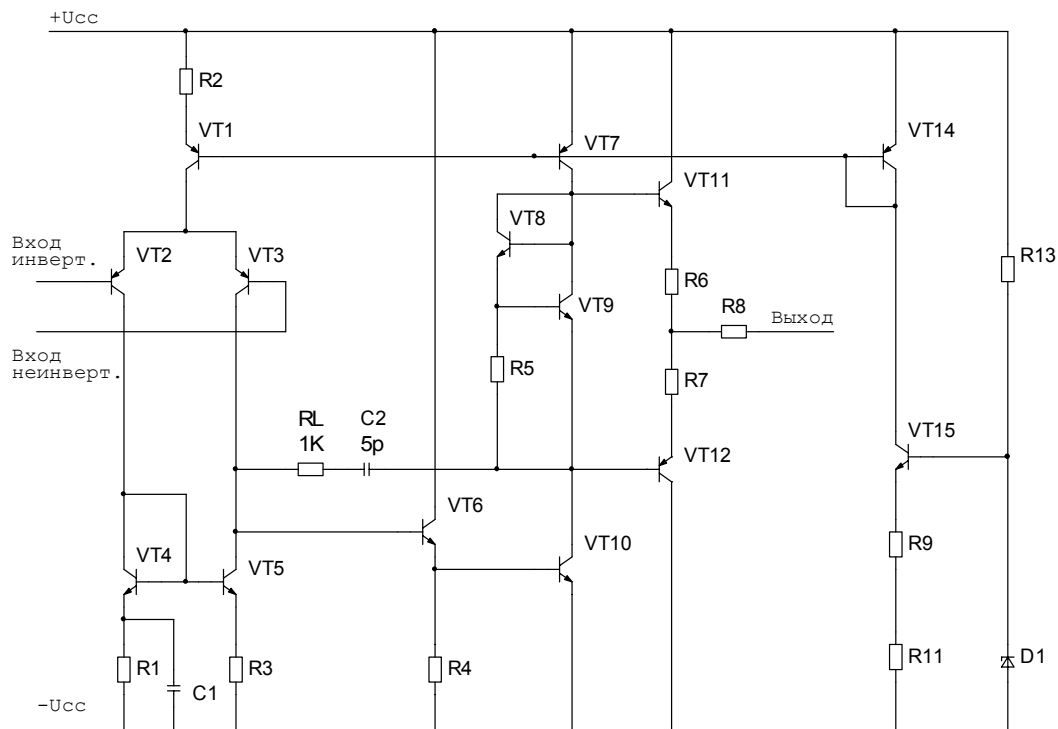


Рис. 1. Изображение исходной схемы электрического операционного усилителя

Основная часть

Для исследования устойчивости включим операционный усилитель (ОУ) в режиме повторителя, рис. 2, где V1 – источник импульсного сигнала.

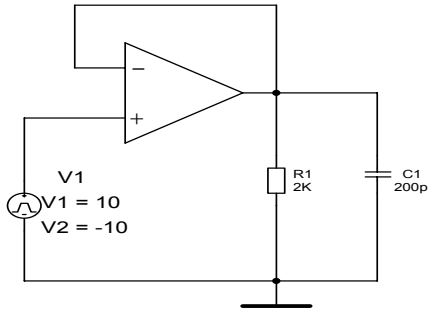


Рис. 2. Схема электрическая включения ОУ повторителем напряжения

В этом включении выход ОУ соединен со входом, а тестовый прямоугольный импульсный сигнал подается на не инвертирующий вход.

Это типовой режим тестирования ОУ, который в большинстве случаев позволяет выявить слабые стороны усилителя, в первую очередь проблемы с устойчивостью. Кроме того, при таком режиме по входам наблюдается наибольший размах воздействия синфазного сигнала, в данном случае от минус 10В до +10В при питающих напряжениях ± 15 В. Емкость нагрузочного конденсатора увеличена от 100 пФ до 400 пФ в соответствии с поставленной задачей. Таким образом, тестирование выполняется в наиболее жестких условиях

График временной диаграммы напряжения на элементах нагрузки R1, C1 приведен на рис. 3

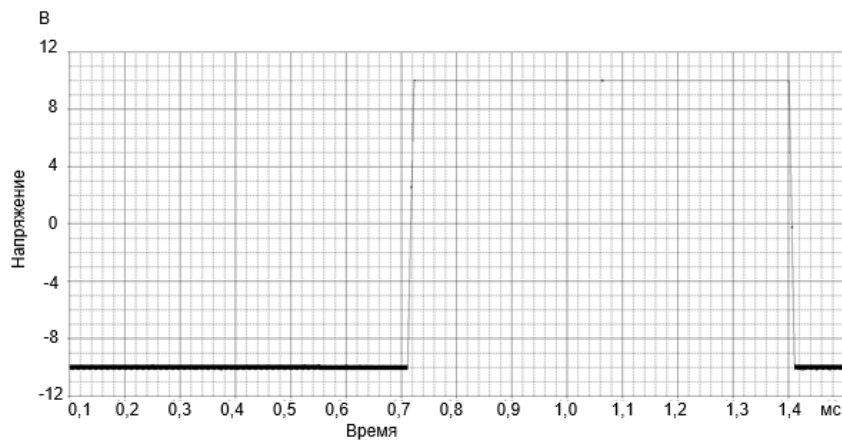


Рис. 3. График временной диаграммы напряжения на нагрузке R1, C1

Жирная линия внизу диаграммы на уровне минус 10В и неравномерность времени счета по интервалу диаграммы указывает на то, что в схеме возможно возникли колебания. Участок этой диаграммы в увеличенном масштабе, приведенный ниже на рис.4, подтверждает обоснованность таких опасений. Возникла локальная нестабильность, которая проявилась в области

отрицательных значений выходного напряжения ОУ. Анализ колебаний, рис. 4, показывает:

Колебания по форме близки к синусоиде.

Период колебаний составляет 625мкс, что по частоте соответствует 1,6 кГц. Это существенно ниже единичной частоты усиления.

Минимумы этих колебаний уплощены по сравнению с максимумами.

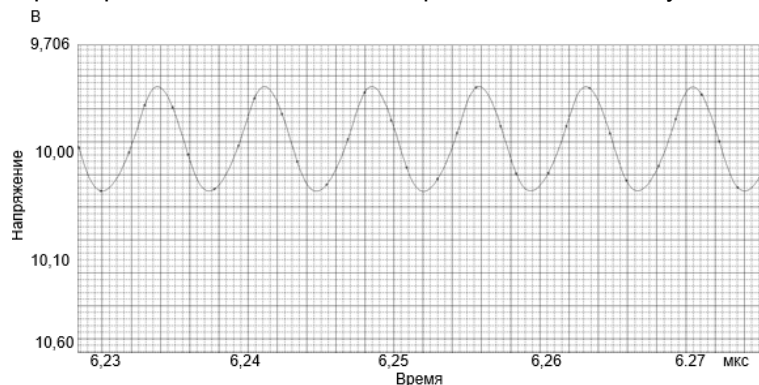


Рис.4. График временной диаграммы напряжения на нагрузке R1, C1 на уровне 10В

Это обстоятельство указывает на снижение коэффициента усиления по мере приближения уровня выходного напряжения к нижней допустимой границе. В то же время, с точки зрения баланса амплитуд, уменьшение значения коэффициента усиления должно бы способствовать увеличению стабильности. Таким образом, выявляется противоречие.

Проведенный анализ во временной области указывает на неоднородность частотных свойств усилителя в верхнем и нижнем диапазоне выходных напряжений. Задача работы, таким образом, состоит в том, чтобы определить причину потери устойчивости в области отрицательных значений выходного напряжения при увеличении емкости нагрузки до 400 пФ и предложить приемлемый вариант схемы с устранением этой проблемы.

Для этого проверим схему на возможность генерации с точки зрения баланса фаз. Исследуем запас по фазе для исходного значения конденсатора $C1 = 100$ пФ и заданного $C2 = 200$ пФ. Так как запас по фазе для любой нагрузки определяется на частоте единичного усиления. Для этого от схемы включения в режиме повторителя перейдем к схеме включения в режиме усилителя с начальным коэффициентом усиления на нулевой частоте $K_u = 10$, а затем с $K_u = 3$, рис. 5. Таким же образом проводится исследование технических аналогов [2]. Для первой схемы получим амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), рис.6, верхняя диаграмма, и фазо-частотную характеристику (ФЧХ), рис.6, нижняя диаграмма.

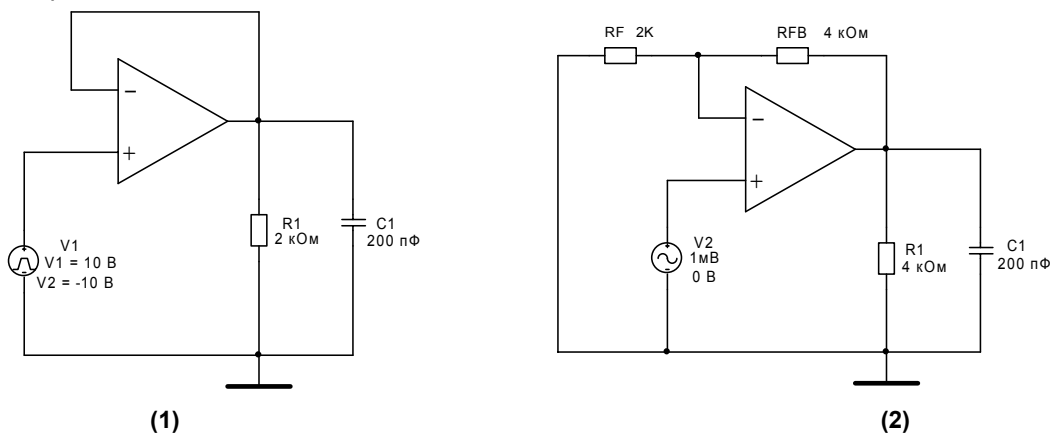


Рис. 5. Схема электрическая при расчете частотных характеристик: (1) с коэффициентом усиления 10; (2) с коэффициентом усиления 3

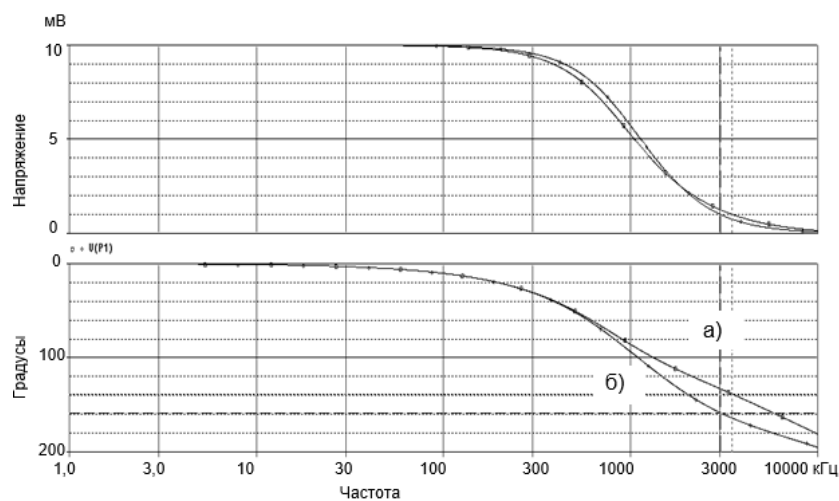


Рис. 6. Изображение частотной (вверху) и фазовой (внизу) характеристики ОУ на нагрузке $R1, C1$ при $K_u=10$: (а) $C1=100$ пФ; (б) $C1=200$ пФ

При входном сигнале 1 мВ получаем при нагрузке $C1=100\text{пФ}$ частоту единичного усиления 3,48 МГц и запас по фазе $41,2^\circ$. При нагрузке $C1=200\text{ пФ}$ получаем частоту единичного усиления 3,0 МГц и запас по фазе 22° . Такое уменьшение запаса по фазе почти в два раза – это существенная причина для возникновения генерации. Но это пока не объясняет того факта, что генерация возникает локально – в области отрицательных значений выходного напряжения.

При уменьшении коэффициента усиления до трех по схеме рис. 5 – 2, получаем АЧХ и ФЧХ, рис. 7. Из рисунка видно, что при уменьшении коэффициента усиления до трех уже проявляются резонансные свойства схемы, увеличивается значение частоты единичного усиления до 3,4 МГц и 3,9 МГц и уменьшается запас по фазе до 40° и 17° соответственно.

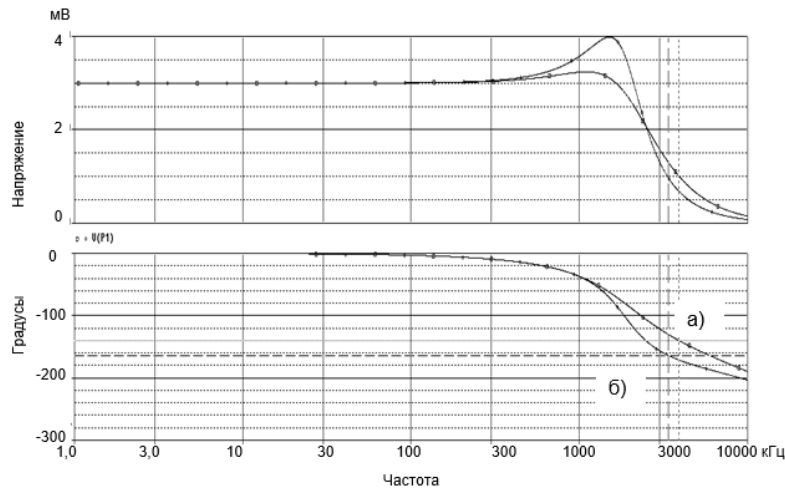


Рис. 7. Изображение сдвига фазы на нагрузке $R1, C1$ при $K_u=3$: (а) $C1=100\text{пФ}$; (б) $C1=200\text{пФ}$

Очевидно, что по мере приближения схемы к единичному коэффициенту усиления эти эффекты будут нарастать, рис. 8. Вместе с тем, необходимо также отметить, что по мере приближения начального коэффициента усиления (на нулевой частоте) к единице точность расчета падает. Исследование причин этого эффекта не входит в рамки данной работы и это замечание лишь поясняет необходимость последовательного приближения расчетов к начальному значению $K_u=1$. Проявление резонансного эф-

фекта уже поясняет возможность возникновения генерации, но не указывает на причины возникновения колебаний именно в отрицательной области значений выходного напряжения ОУ. Для анализа будем учитывать, что модель каждого интегрального транзистора содержит нелинейные емкости, важнейшими из которых являются:

1. Емкость коллектор-подложка.
2. Емкость коллектор-база.
3. Емкость база-эмиттер.

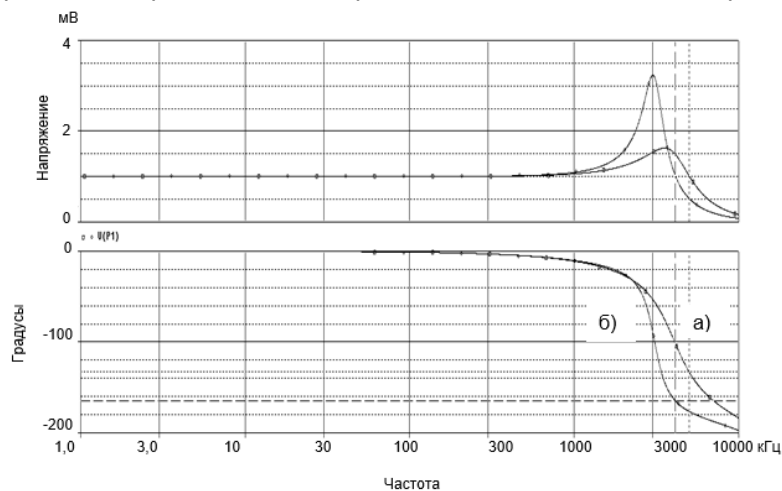


Рис. 8. Изображение сдвига фазы на нагрузке $R1, C1$ при $K_u=1$: (а) $C1=100\text{пФ}$; (б) $C1=200\text{пФ}$

При частотном анализе операционного усилителя в линейном режиме наиболее проблемной является емкостная модель области базы, которая содержит как барьерную, так и диффузионную емкость. Можно предположить, что причина локальной нестабильности – модуляция барьерных емкостей транзисторов в ОУ. Для проверки этого предположения получим семейство фазовых характеристик при условии изменения выходного напряжения ОУ по постоянному уровню от 10В до -10В с шагом 1В, рис.9, и в области частоты единичного усиления -

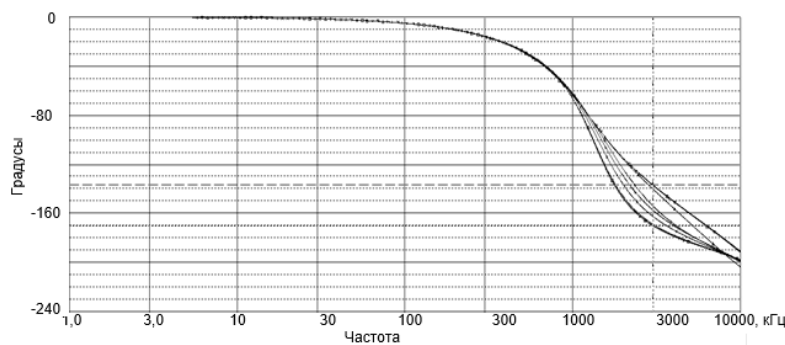


Рис. 9. Графическое изображение семейства фазовых характеристик на нагрузке $R1=2\text{кОм}$, $C1=200\text{пФ}$, $K_u=10$, на выходе ОУ от 10 до -10 с шагом 1В

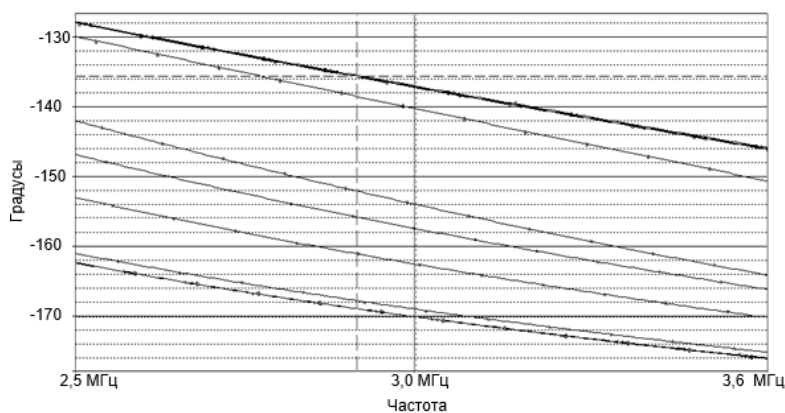


Рис. 10. Графическое изображение семейства фазовых характеристик на нагрузке $R1=2\text{кОм}$, $C1=200\text{пФ}$, $K_u = 10$, на выходе ОУ от 10 до -10 с шагом 1В в области частоты единичного усиления

В действительности, зависимость, рис.10, носит более сложный характер. Как показывает анализ, причина этого эффекта состоит в том, что операционный усилитель содержит инвертирующие каскады, в результате чего при смещении выхода ОУ по постоянному напряжению вниз, входной каскад смещается по шкале постоянных напряжений вверх. Но решающий вклад вносят емкости транзисторов выходного каскада, так как диапазон изменения напряжения во входном каскаде ограничен по схемотехническим соображениям.

ния, как это представлено на рис.10. Как видно, сдвиг фазовой характеристики составляет около тридцати трех градусов. Чем ниже выходное напряжение по постоянному уровню, тем меньше запас по фазе.

Как следует из соотношения для глубины области пространственного заряда [3], для указанных выше емкостей транзисторов можно было ожидать, что зависимость запаса по фазе будет обратно пропорциональна корню квадратному от смещения выходного напряжения

Из этого следует, что для достижения поставленной цели в схеме необходимо нейтрализовать эффект увеличения нелинейных емкостей в моделях транзисторов, который возникает в первую очередь при снижении напряжения между карманом и подложкой. При условии минимального вмешательства в конструкцию кристалла в полной мере такая задача не может быть решена. Но в такой ситуации для повышения устойчивости до приемлемой степени можно опробовать два пути:

- Снизить добротность цепи при включении ОУ в режиме повторителя.
- Повысить уровень фазовой коррекции.

В результате, решение задачи может выглядеть следующим образом, рис.11. В схему добавлена цепочка $RLA=3K$ и $C2A=3pF$. Значение резистора RL увеличено с одного до трех тысяч ом. Конденсатор $C2$ уменьшен до трех пикофард. Подобные изменения не потребовали радикальных изменений, так как резисторы разместили в общем кармане, а общая емкость конденсаторов увеличена всего на одну пикофарду по сравнению с исходной схемой. При таком решении функцию коррекции фазы выполняют два конденсатора. Конденсатор $C2$,

как и в предыдущей схеме, подключен к базе выходного р-п-р-транзистора, а конденсатор $C2A$ – к базе n-р-п-транзистора. Расчет показывает, что в этом случае коррекция оказывается более эффективной, чем при увеличении емкости $C2$ до 6 пикофард в исходной схеме включения, рис.1. Можно показать расчетом при $K_u = 3$, что резисторы RL и RLA по физическому смыслу в данном случае вносят потери в эквивалентный контур цепи, снижая его добротность и уменьшая резонансный выброс на АЧХ. На фазо-частотной характеристике на частоте единичного усиления получаем сдвиг $131,5^\circ$, рис12. Соответственно запас по фазе составляет $48,5^\circ$, что выше, чем в исходной схеме.

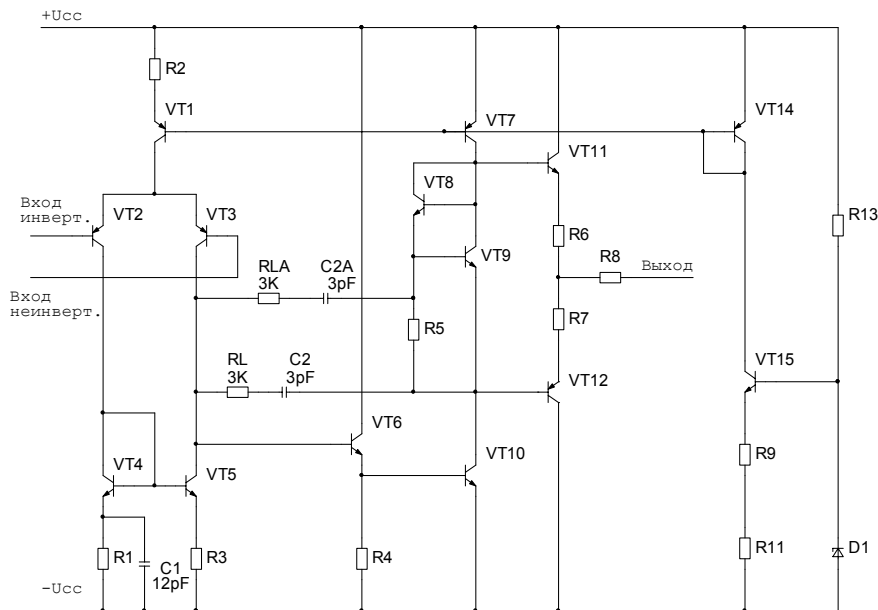


Рис. 11. Окончательная схема электрическая операционного усилителя

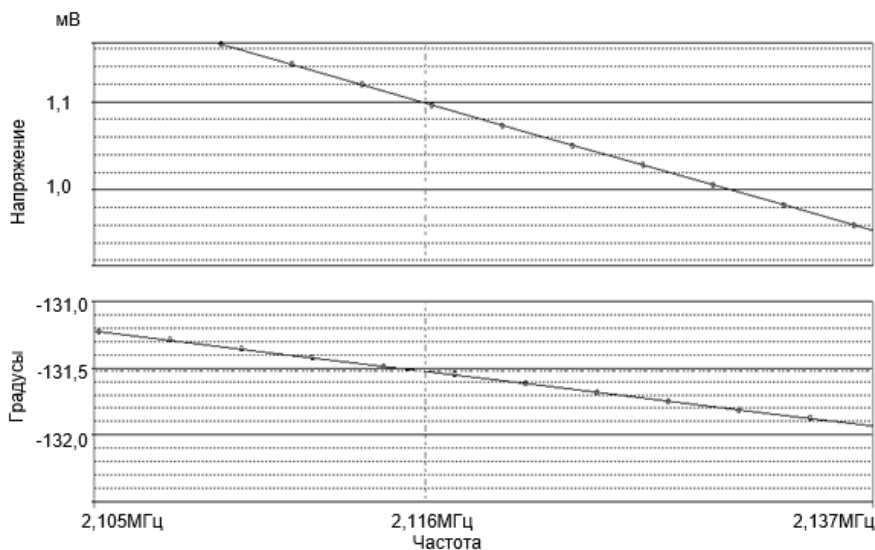


Рис. 12. Графики частотной (вверху) и фазовой (внизу) характеристики на нагрузке $R1=2k\Omega$, $C1=200pF$, откорректированного ОУ, $K_u=10$

Контрольный расчет во временной области показал, что на графике выходного напряжения колебания на уровне – 12 В больше не возникают. Таким образом, генерация, которая была в исходной схеме, устранена.

Выводы

1. Нелинейный характер эквивалентных емкостей моделей транзисторов может быть причиной локальной неустойчивости, которая проявляется в виде генерации на выходном импульсе операционного усилителя, включенном в режиме повторителя входного напряжения.
2. Угроза возбуждения может быть выявлена расчетом семейства фазо-частотных характеристик при пошаговом смещении рабочей точки вход и выхода операционного усилителя.
3. Устойчивость схемы может быть повышена за счет компенсации эффекта увеличения емкостей и снижением добротности эквивалентного колебательного контура, образующегося при увеличении глубины обратной связи.

4. Топологическая проработка данного предложения выполнена и ожидается экспериментальное подтверждение приведенных исследований.

Список использованных источников

1. Павлов Л.Н., Калниболотский Ю.М. Оптимизация операционного усилителя. Электроника и связь, №1, 2011, с.59-62.
2. LESHAN RADIO COMPANY, LTD. LR4558. DATASHEET 22.04.2006. Two high performance operational amplifiers.
3. S. M. Sze and Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices, Third Edition. A JOHN WILEY & SONS, JNC., PUBLICATION. ISBN-I 3: 978-0-47 1-1 4323-9, ISBN-10: 0-471-14323-5, 2007, 763p.

Поступила в редакцию 15 мая 2015 г.

УДК 621.316.54:621.314.632

Л.М. Павлов, канд. техн. наук

Національний Технічний Університет України «Київський Політехнічний Інститут
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Україна.

Підвищення навантажної здібності операційного підсилювача

Досліджена причина локальної неустойчивості операційного підсилювача масового застосування. Встановлено, що причина локальної неустойчивості полягає в нелінійній залежності емкостей транзисторів від напруги в поточній робочій точці, тому аналіз запасу за фазою в початковій робочій точці є недостатнім. Означено, що традиційний аналіз стійкості не охоплює повноту проблеми. Для вирішення поставленої задачі дослідженні числові підходи до аналізу нестійкості. Запропоновано вирішення задачі за рахунок збільшення об'єму аналізу в частотній області з контрольною перевіркою в часовій області. Бібл. 3, рис.12.

Ключові слова: операційний підсилювач; запас за фазою; модель транзистора; амплітудно-частотна характеристика; фазо-частотна характеристика; навантажна здібність.

UDK 621.316.54:621.314.632

L. Pavlov, Ph.D.

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

Increasing the load capacity of the operational amplifier

Reason instability in local area of mass application opamp is investigated. It is marked that the tradition analyse of stability does not embrace plenitude of problem. It has been established that the cause of local instability consists in a nonlinear dependence of the capacitance -voltage transistors of the current operating point, so the analysis phase margin at the initial operating point is insufficient.

For a decision the set problem numeral methods analysis of instability are used. Solution of task is offered due to the increase of volume of analysis of frequency and phase descriptions with verification by a time domain analyse. References 3, figures 12.

Keywords: *operational amplifier; phase margin; transistor model; frequency response; phase response; load capacity.*

References

1. *Pavlov, L. N., Kalnibolotski, Y. M. (2011). Opamp optimization. Electronics and Communications, No.1, Pp.59-62. (Rus)*
2. *LESHAN RADIO COMPANY, LTD. LR4558. DATASHEET 22.04.2006. Two high performance operational amplifiers.*
3. *Sze, S. M. and Kwok, K. Ng. (2007). Physics of Semiconductor Devices, Third Edition. A JOHN WILEY & SONS, JNC., PUBLICATION. ISBN-I 3: 978-0-47 1-1 4323-9, ISBN-10: 0-471-14323-5, P. 763.*