

В. А. Гарнага

ВЫСОКОЛИНЕЙНЫЕ УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С СИММЕТРИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Определяющий компонент аналоговой схемотехники – усилители, отдельную нишу среди которых составляют усилители постоянного тока (УПТ), что в свою очередь является основой операционных усилителей для аналоговых и гибридных вычислительных машин и измерительных информационных систем [1]. Исторически сложилось так, что первые УПТ строили на электронных лампах [2]. Вместе с тем перенесение подходов и принципов построения структурных схем ламповых усилителей на транзисторные привело к тому, что интегральные транзисторные схемы УПТ, появившиеся в 60-х и 70-х годах, в значительной степени напоминали ламповые схемы. Это значительно ограничивало достижение потенциальных возможностей в рамках динамических и статических характеристик, поскольку не позволяло использовать частотные свойства транзисторов вплоть до предельной частоты f_T , а также ограничивало линейность передаточной характеристики и ряд других параметров.

Ключевые слова: симметрическая структура, усилитель постоянного тока.

Значительное количество современных усилителей постоянного тока используют преимущественно одноканальную асимметрическую структуру с дифференциальным усилительным каскадом на входе и двухтактным симметричным каскадом на выходе, который предусматривает принцип усиления и преобразование напряжений [3]. Преимуществами такого подхода является функциональная универсальность этих схем, которая позволяет использовать их в разных устройствах (операционные усилители, буферные устройства, устройства выборки-хранения аналоговых сигналов, компараторы и т. д.). Тем не менее усилители на базе дифференциального каскада с одноканальной структурой имеют определенные недостатки: низкую скорость нарастания исходного сигнала, значительный коэффициент нелинейных искажений, особенно при увеличении частоты входного сигнала, асимметричность выходного сигнала при работе по прямоугольным двополярным входным импульсам.

Вместе с тем, следует отметить, что, еще в 70-х годах начали строить двухтактные симметричные усилители тока. Но они были несовершенными, поскольку имели ограниченное количество (1 или 2) усилительных каскадов, низкую линейность и малый коэффициент передачи. Одной из причин этого было то, что в указанных схемах с многокаскадной структурой (2 или 3) сложно задавать режим по постоянному току. По этой причине не было возможности воспользоваться преимуществами, которые предоставляют двухтактные усилители постоянного тока с симметричной структурой. Поэтому проблема построения двухтактных симметричных усилителей постоянного тока с повышенной линейностью передаточной характеристики является актуальной.

Автор предлагает построение усилительных устройств осуществлять на базе двухтактных симметричных структур УПТ, в которых проблема задания рабочей точки схемы преодолевается с помощью использования двунаправленных отражателей тока. Преимуществами такого подхода является высокая линейность статической передаточной характеристики, повышенное быстродействие, а также симметричная реакция на входной прямоугольный двополярный импульс [4]. Несмотря на ряд практических реализаций разновидностей этих усилителей, к тому же защищенных патентами СССР и Украины, анализ передаточной характеристики таких УПТ проведен недостаточно глубоко из-за отсутствия соответствующих аналитических зависимостей.

Цель – рассмотреть схемные решения УПТ с симметричной структурой, проанализировать их преимущества перед асимметрическими традиционными структурами.

Решение задач

Рассмотрим основные особенности построения усилительных устройств с симметричной структурой. В зависимости от построения входного каскада симметричные УПТ можно разделить на две основные группы:

- 1) с самодополнительной схемой с общей базой;
- 2) с гибридной схемой с общим коллектором.

Рассмотрим упрощенную схему усилителя постоянного тока с симметричной структурой, которая приведена на рис. 1. Она принадлежит к первой группе схем симметричных УПТ.

Двухтактный симметричный УПТ состоит из входного каскада, построенного на транзисторах Т1 и Т2, включенных по самодополнительной схеме с общей базой, и промежуточных каскадов усиления на транзисторах Т9 и Т10, включенных по схеме с общим эмитером. Для задания и балансирования режима по постоянному току промежуточных каскадов в схему введен двунаправленный отражатель тока на транзисторах Т3 и Т5, Т6 и Т7, Т4 и Т8, а также двух транзисторов Т10, Т11 в диодном включении.

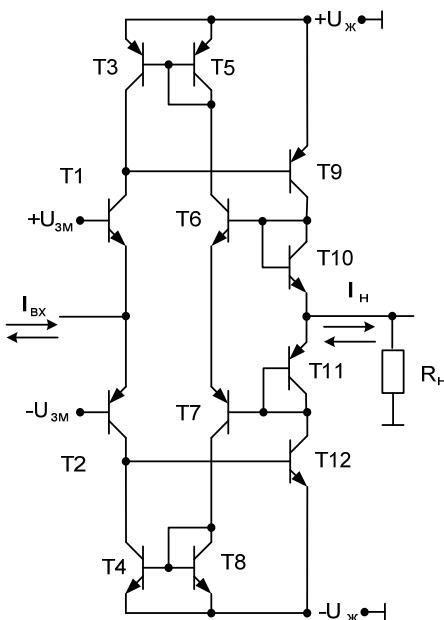


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема двухтактного симметричного УПТ

Общий коэффициент передачи по току описывается формулой:

$$K_i(I_{ex}) \cong \frac{\beta_0^{(12)}\alpha_2 + \beta_0^{(9)}\alpha_1}{2} + \frac{\beta_1^{(12)}\alpha_2 + \beta_1^{(9)}\alpha_1}{2} \Delta I_{ex} + \frac{\beta_2^{(12)}\alpha_2 + \beta_2^{(9)}\alpha_1}{2} \Delta I_{ex}^2.$$

На рис. 2 представлена упрощенная схема усилителя постоянного тока с симметричной структурой, которая принадлежит ко второй группе.

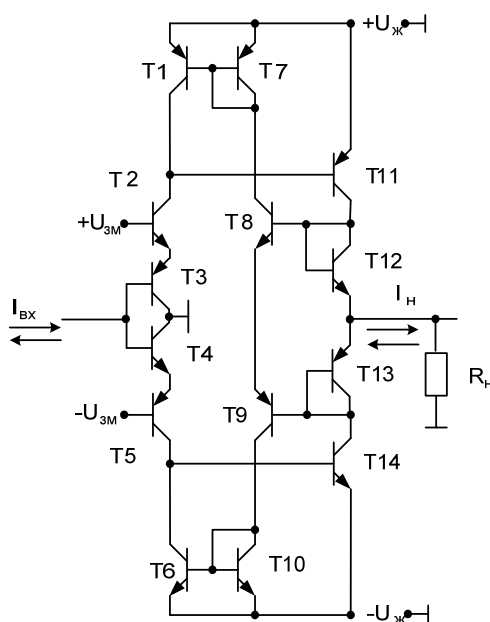


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема двухтактного симметричного УПТ по гибридной схеме с общим коллектором

Особенностью схемы, которая рассматривается, является ее входной усилительный каскад на транзисторах T3 и T4, построенный на основе гибридной схемы с общим коллектором. Аналогично, как и в предыдущей схеме, используется двунаправленный отражатель тока для задания режима по постоянному току на транзисторах T1 и T7, T6 и T10, T8 и T9, а также T12 и T13 в диодном включении.

Преимуществами усилителей постоянного тока с симметричной структурой является симметричная реакция на прямоугольный двуполярный импульс, высокая скорость нарастания выходного сигнала.

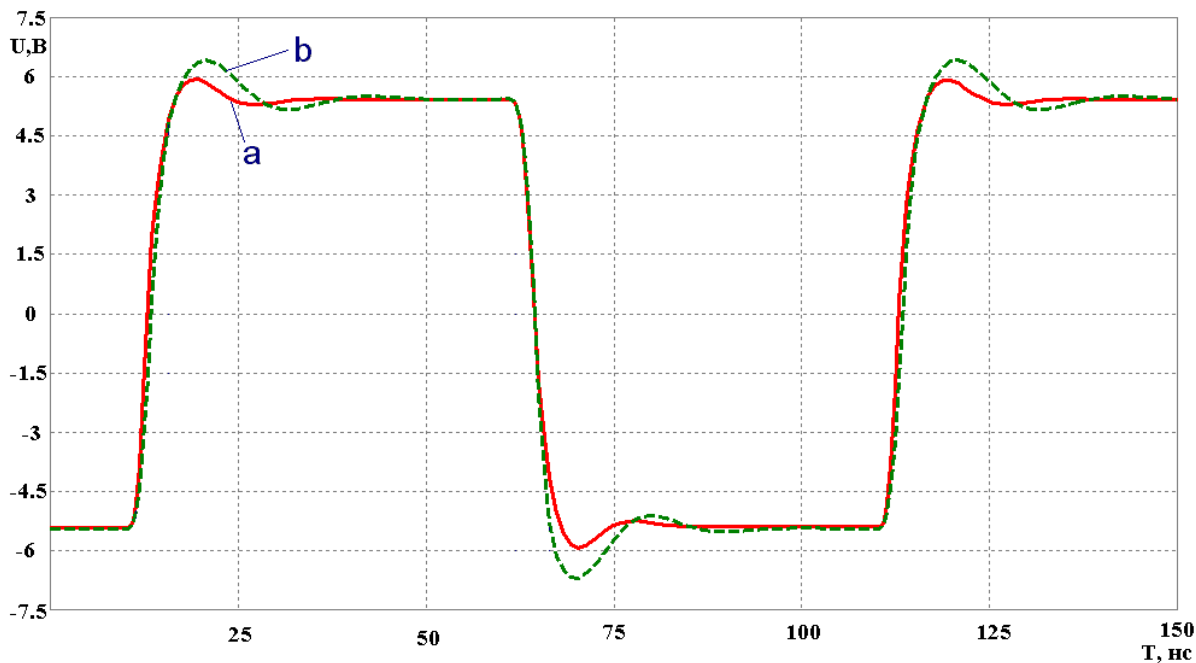


Рис. 3. Передаточная характеристика УПТ с симметричной структурой:
а) схема 1; б) схема 2

Высокая линейность передаточной характеристики достигается за счет использования симметричной структуры усилителей постоянного тока. На рис. 4 представлена типичная погрешность передаточной характеристики УПТ.

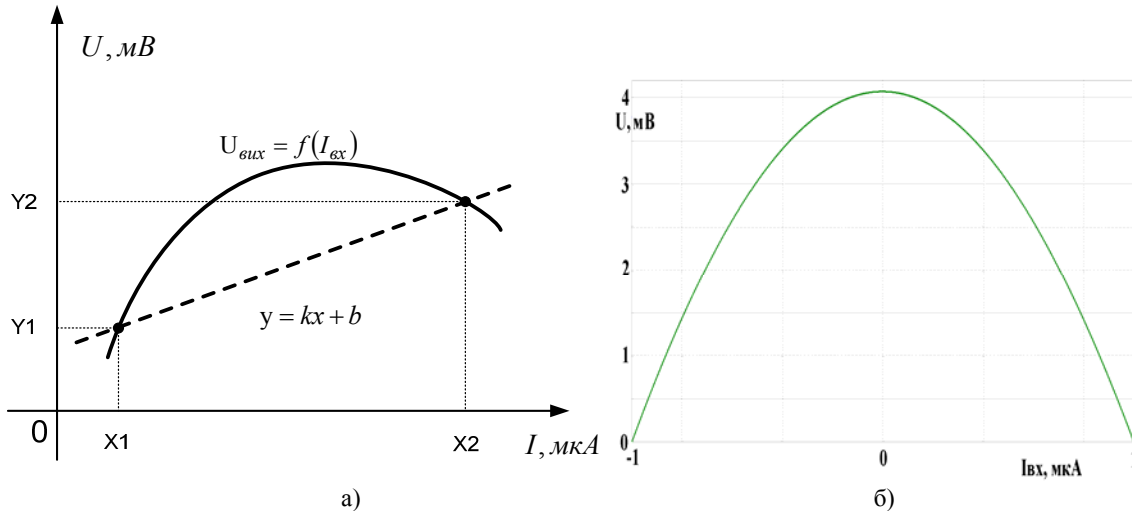


Рис. 4. Графики статической передаточной характеристики: а) схематической; б) двухтактного симметричного УПТ в диапазоне ± 1 мкА

Следует отметить, что несмотря на отсутствие выходного каскада, который бы увеличивал нагрузочную способность каскада предварительного усиления схемы, погрешности линейности довольно низкие. Вместе с тем дополнительное введение выходного каскада позволит увеличить общий коэффициент передачи.

Для малосигнальной зоны будем иметь такие приросты на резисторе нагрузки для двухтактных симметричных УПТ [5]:

$$\Delta I_n = \frac{\beta_{12}\alpha_2 + \beta_9\alpha_1}{2} I_{ex} + (\beta_{12}\alpha_2 - \beta_9\alpha_1) \left(\sqrt{\frac{I_{ex}^2}{4} + I_0^2} - I_0 \right),$$

где ΔI_n – ток, который протекает через нагрузку, $I_{вх}$ – входной ток, I_0 – смещение нуля, β_9 и β_{12} – дифференциальные коэффициенты усиления по току соответствующих транзисторов в схеме с общим эмитером, β_1 и β_2 – параметры соответствующих транзисторов в схеме с общей базой [4].

Еще одним преимуществом перед асимметричными структурами является низкий коэффициент нелинейных искажений. Выведен коэффициент нелинейных искажений в аналитической форме для двухтактных УПТ с симметричной структурой [5]:

$$\nu = \frac{\left| \left(-\frac{\bar{\beta}_1}{2} + \bar{\beta}_2 I_0 \right) I_{ex} \right|}{\left| \bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_1 I_0 - \frac{\bar{\beta}_2}{2} I_{ex}^2 \right|}.$$

Применение симметричной структуры построения и двунаправленных отражателей тока в усилительных каскадах позволяет строить УПТ с высокими коэффициентами усиления: Наукові праці ВНТУ, 2008, № 4

100 Дб и более.

Выводы

1. Представлены аналитические выражения для коэффициентов усиления для входного каскада, каскадов предыдущего усиления и исходного каскада двухтактного УПТ, которые позволяют оценить значение этих коэффициентов, используя дифференциальные коэффициенты передачи β по току р-п-р и п-р-п транзисторов.
2. Показано влияние неидентичности коэффициентов усиления по току транзисторов типа п-р-п и р-п-р на коэффициент нелинейных искажений в диапазоне частот входного сигнала.
3. Приведены практические схемы реальных УПТ и проведен анализ значений их коэффициентов усиления. При этом надо отметить, что двухтактные симметричные структуры имеют низкий КНИ при достаточно высоком коэффициенте усиления по току (10^2 - 10^3) и в ряде случаев могут использоваться без обратной связи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kesler W. ANALOG-DIGITAL CONVERSION. – ADI Central Application Department, – 2004. – 1127 p.
2. Alan B. Grebene Bipolar and MOS analog integrated circuit design. – Wiley Classic Library New Jersey, 2003. – 915 p.
3. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.
4. Аналіз передатної характеристики двотактного симетричного підсилювача постійного струму / Азаров О. Д., Гарнага В. А., Решетнік О. О., Богомолів С. В. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Електронне наукове фахове видання. – 2007. – №1(1). Режим доступу до журн.: www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/vyp1.html
5. О. Д. Азаров, В. А. Гарнага. Нелінійні спотворення у двотактних симетричних підсилювачах постійного струму // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології: Міжнар. наук.-техн. журнал. – Вінниця, 2007. – № 2 (14). – С. 26 – 33.

Гарнага Владимир Анатоліевич – аспірант кафедри вычислительной техники, e-mail: w0lfman@rambler.ru, моб.: +380979888981; +380939031717.

Вінницький національний технічний університет.