

За счет введения компенсирующей емкости  $C_k$  удалось добиться расширения рабочего диапазона частот и обеспечить фазовую ошибку не более 3,5 градусов на частотах до 13 ГГц.

При моделировании реакции схемы на гармоническое воздействие установлено, что максимальная амплитуда входного сигнала составляет 400 мВ на частоте 6,2 ГГц, что удовлетворяет базовым требованиям существующих промышленных стандартов.

Предложенное схемотехническое решение управляемого фазового корректора за счет комплекса схемотехнических мероприятий позволяет расширить диапазон рабочих частот, обеспечить реализацию квадратурных составляющих опорных сигналов, снизить потребляемый ток и уменьшить геометрические размеры различных СФ блоков за счет отказа от использования индуктивностей.

Настоящее устройство является составной частью СФ блоков смешанных СнК – систем ФАПЧ, квадратурных модуляторов и демодуляторов, управляемых линий задержки и т.п.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка схемотехники квадратурных модуляторов и демодуляторов как СФ блоков для SiGe технологии» / руководитель С.Г. Крутччинский. – Таганрог, 2009. – С. 514.

**Грипинский Сергей Александрович**

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kagami-sorano@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634325659.

**Gripinskiy Sergey Aleksandrovich**

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kagami-sorano@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634325659.

УДК 621.375

**Н.Н. Прокопенко, П.С. Будяков, С.В. Крюков**

#### **АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ ШИРОКОПОЛОСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ КАСКАДОВ С ОБЩЕЙ БАЗОВОЙ И ОБЩЕЙ КОЛЛЕКТОРНОЙ ЦЕПЯМИ**

*Предлагается архитектура новых подклассов дифференциальных каскадов (ДК) на основе включения транзисторов с общей базовой и общей коллекторной цепями, которые, в сравнении с классическим ДК, имеют преимущества по частотному диапазону и эффективности использования напряжения источников питания.*

*Дифференциальные усилители; фазорасщепители; аналого-цифровые интерфейсы.*

N.N. Prokopenko, P.S. Budyakov, S.V. Kryukov

### ALTERNATIVE ARCHITECTURE BROADBAND AMPLIFIERS DIFFERENTIAL CASCADE WITH COMMON BASE AND COMMON COLLECTOR CHAINS

*The proposed architecture of the new sub-classes of differential stages (DC) through the inclusion of transistors with common base and common collector circuits, which, in comparison to classical DC, have an advantage in the frequency range and efficiency of the supply voltage.*

*Differential amplifiers; fazorasschepiteli; analog-digital interfaces.*

Классическая схема дифференциального усилителя (ДУ) с общей эмиттерной цепью (рис. 1,а) широко используется во многих интерфейсах систем автоматики и вычислительной техники.

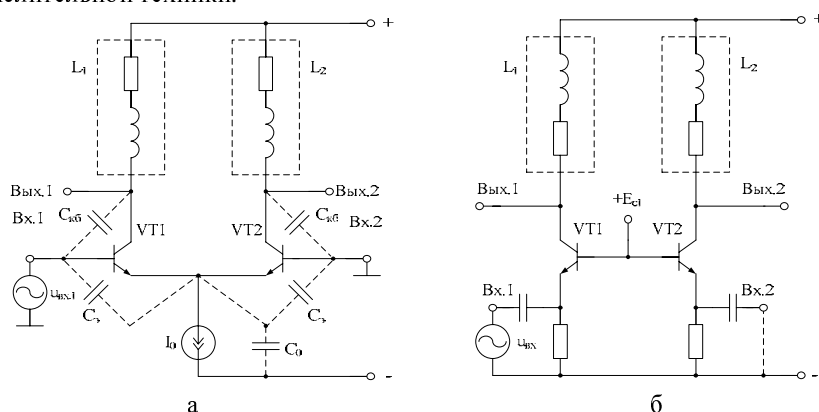


Рис. 1. Классические схемы усилителей с парафазным выходом

Однако с повышением диапазона рабочих частот до единиц-десятков гигагерц в этой схеме начинают проявляться погрешности преобразования сигналов, обусловленные особенностями ее архитектуры. В диапазоне СВЧ классический ДУ рис. 1,а не обеспечивает, в частности, качественное преобразование входного напряжения  $u_{вх}$  в два противофазных выходных напряжения. Действительно, в схеме (рис. 1,а) коэффициенты передачи по напряжению ( $K_y$ ) со входа Vx.1 (или входа Vx.2) на первый (Вых.1) и второй (Вых.2) выходы в диапазоне высоких частот (1÷10 ГГц) оказываются неодинаковы из-за повышенного влияния на  $K_y$  емкостей эмиттерного ( $C_э$ ) и коллекторного ( $C_{кб}$ ) p-n – переходов, а также выходной емкости  $C_0$  источника опорного тока  $I_0$ . Это не позволяет выполнить на базе ДУ (рис. 1,а) достаточно важные функциональные узлы аналоговых интерфейсов (согласующие каскады перемножителей и смесителей сигналов, управляемые усилители, элементы ФАПЧ и т.д.).

Известны также каскадные дифференциальные усилители (рис. 1,б), у которых входной сигнал  $u_{вх}$  подается в эмиттерную цепь входных транзисторов VT1 и VT2, включенных по схеме с общей базой. Это более высокочастотные устройства с малыми входными сопротивлениями. Однако ДУ (рис. 1,б) является по существу, псевдодифференциальным усилителем, так как у него выходное напряжение, например на правом выходе, не зависит от напряжения на левом входе. То есть схема (рис. 1,б) не может применяться в качестве преобразователя одного входного напряжения  $u_{вх}$  в два противофазных выходных напряжения, т.е. данная функция в ДУ рис. 1,б не реализуется.

В этой связи большой практической интерес представляет поиск и исследование новых архитектур дифференциальных каскадов [1-3] (рис. 2,а,б), использующих фундаментальные свойства транзисторов в других классических схемах включения – с общей базой (ОБ) и общим коллектором (ОК).

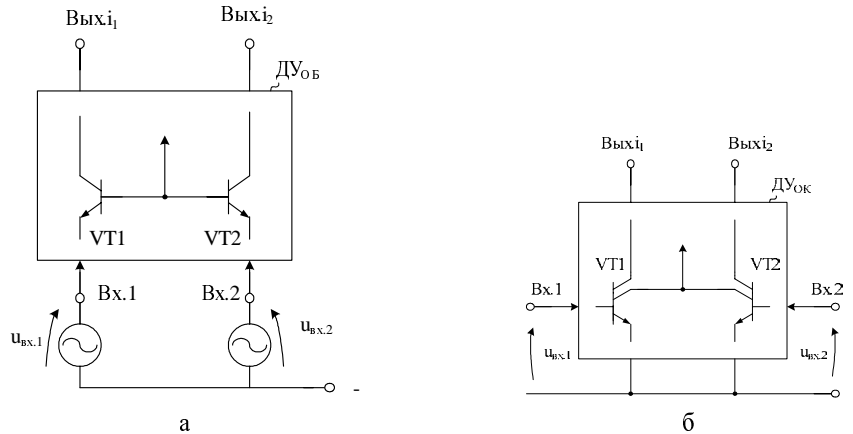


Рис. 2. Архитектуры ДУ с общей базовой (а) и общей коллекторной (б) цепями [1-3]

При этом следует ожидать, что иное включение транзистора в дифференциальных структурах приведет к изменению их ряда важных параметров.

**Дифференциальные усилители с общей базовой цепью.** Использование принципов функциональной интеграции позволяет синтезировать дифференциальный усилитель с общей базовой цепью, входные напряжения  $u_{вх.1}$ ,  $u_{вх.2}$ , в котором подаются в эмиттер входных транзисторов VT1 и VT2 (рис. 3) [1,2].

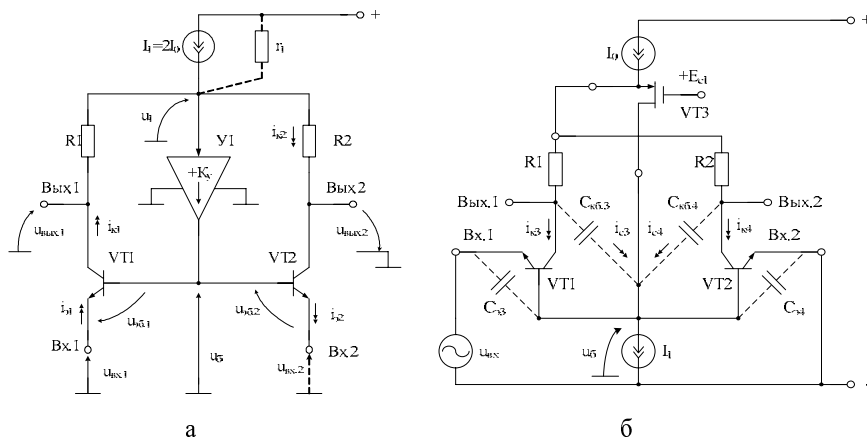


Рис. 3. Архитектуры ДУ с общей базовой цепью (а) и пример его построения (б) [1,2]

Неинвертирующий каскад У1 может быть реализован как на активных, так и на пассивных элементах, обеспечивающих согласование статических потенциалов. Статический режим ДУ устанавливается двухполюсником  $I_1$ .

Увеличение напряжения на первом входе Вх.1 вызывает уменьшение эмиттерного и коллекторного токов транзистора VT1 ( $i_{э1}$ ,  $i_{к1}$ ). Это создает на двухполюснике  $I_1$  положительное приращение напряжения  $u_1$ , которое через каскад У1 передается в общую базовую цепь ДУ. В результате коллекторный ток транзистора VT2 ( $i_{к2}$ ) увеличивается, что в конечном итоге обеспечивает противофазную передачу сигнала  $u_{вх.1}$  на второй выход ДУ и выполнение следующих равенств:

$$u_{эб.1} \approx u_{эб.2} = u_{вх.1} / 2, \tag{1}$$

$$i_{к1} = \frac{u_{вх.1}}{2r_{э1}}, \quad i_{к2} = \frac{u_{вх.1}}{2r_{э2}}, \tag{2}$$

где  $r_{эi}$  – сопротивления эмиттерных переходов транзисторов VT1, VT2.

Если двухполюсник  $I_1$  – источник опорного тока, то синфазные изменения напряжений на входах ДУ (рис. 3) не приведут к изменениям статических токов транзисторов, т.е. ДУ (рис. 3) имеет высокое ослабление синфазных сигналов.

Статический режим транзисторов VT1 и VT2 ДУ (рис. 3,б) определяется двухполюсниками  $I_0$  и  $I_1$  и не зависит от синфазного напряжения на входах Вх.1 и Вх.2:

$$I_{эVT1} = I_{эVT2} = I_{вх.1} = I_{вх.2} = \frac{I_0 - I_1}{2}. \tag{3}$$

На высоких частотах емкости  $C_{кб.VT1}$ ,  $C_{кб.VT2}$  оказывают одинаковое влияние (в отличие от классического ДУ) на амплитудно-частотную характеристику коэффициента усиления как по первому Вых.1, так и по второму Вых.2 выходам. Как следствие, в предлагаемой схеме в связи с симметричным включением (относительно выходов Вых.1 и Вых.2) ёмкостей  $C_{кб.1}$  и  $C_{кб.2}$  расширяется частотный диапазон, в пределах которого сохраняется идентичность коэффициентов передачи входного напряжения  $u_{вх.1}$  к узлам Вых.1 и Вых.2.

На рис. 4 для схемы ДУ (рис. 3) и техпроцесса SGB25VD при  $R1=R2=500$  Ом,  $I_0 = 6$  мА,  $I_1 = 2$  мА приведены зависимости его коэффициентов передачи по первому и второму выходам от частоты сигнала (рис. 4,а), а также зависимость фазы выходных напряжений от частоты (рис. 4,б).

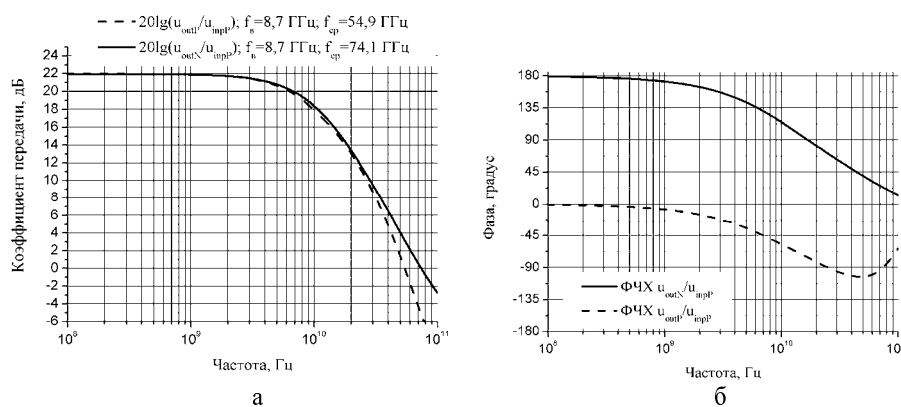


Рис. 4. Зависимость коэффициентов передачи по первому и второму выходам (а) и фазы выходных напряжений ДУ (б) от частоты

**Дифференциальные каскады с общей базовой цепью на основе транзисторных делителей тока.** Применяя предложенный в [1,2] транзисторный каскад в дифференциальной структуре, можно синтезировать ряд перспективных для SiGe-технологий схем дифференциальных каскадов (рис. 5) с общей базовой цепью.

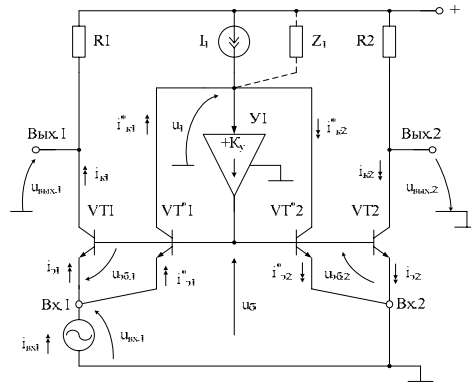


Рис. 5. Архитектура ДК с общей базовой цепью на основе транзисторных делителей тока (VT1, VT\*1, VT2, VT\*2)

В схеме (рис. 5) за счет идентичности транзисторов VT1, VT\*1, VT2, VT\*2 организуется параллельный канал стабилизации статического режима. Это обеспечивает более эффективное использование напряжения питания ДК.

**Архитектура ДК с общей коллекторной цепью и их основные свойства.** Основным признаком ДК с общей коллекторной цепью является непосредственное соединение коллекторов входных транзисторов ДК [3] (рис. 6). При этом для экстракции выходных дифференциальных сигналов параллельно эмиттерно-базовым переходам входных транзисторов могут включаться эмиттерно-базовые переходы выходных транзисторов, в коллекторные цепи которых вводится дифференциальная нагрузка [3].

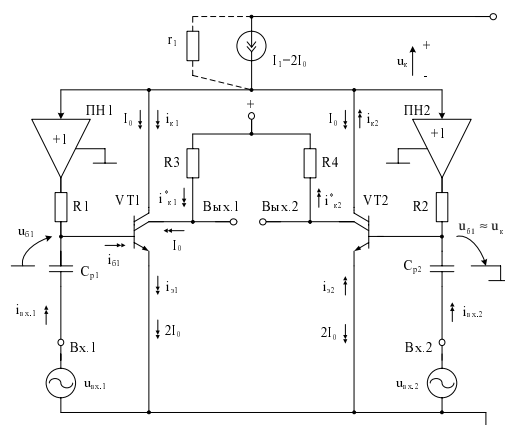


Рис. 6. Архитектура ДК с общей коллекторной цепью [3]

ДК содержит входные транзисторы VT1, VT2, коллекторный ток которых устанавливается двухполюсником  $I_1 = 2I_0$ :  $I_{к1} = I_0 = I_{к2}$ . В частных случаях повто-

рители напряжений ПН1 и ПН2 могут отсутствовать. Резисторы R1 и R2 исключают полное шунтирование источников сигнала  $u_{вх.1}$  и  $u_{вх.2}$ .

Если на вход Вх.1 ДК (рис. 6) подается положительное напряжение  $u_{вх.1}$ , а  $u_{вх.2}$  отсутствует, причем вход Вх.2 не связан с общей шиной, то это приводит к увеличению коллекторного тока транзистора VT1:

$$i_{к1} = i_{к1}^* = \frac{u_{вх.1}}{r_{э1}}, \quad (4)$$

где  $r_{э1}$  – сопротивление эмиттерного перехода транзистора VT1.

Как следствие, уменьшается напряжение на источнике опорного тока  $I_1$

$$u_к = i_{к1} r_1, \quad (5)$$

где  $r_1$  – эквивалентное сопротивление в общей коллекторной цепи ДК.

Изменение  $u_к$  через повторитель ПН2 и резистор R2 передается в цепь базы транзистора VT2, что вызывает уменьшение напряжения

$$u_{б1} \approx u_к \frac{r_{вх.2}}{r_{вх.2} + R_2} \approx u_к, \quad (6)$$

где  $r_{вх.2} \gg R_2$  – входное сопротивление каскада с общим эмиттером на транзисторе VT2.

Запирающее VT2 приращение  $u_{б1}$  создает ток  $i_{к2}$ , противофазный току  $i_{к1}$  в транзисторе VT1

$$i_{к2} \approx \frac{u_к}{r_{э2}} \frac{r_{вх.2}}{r_{вх.2} + R_2} \approx \frac{u_к}{r_{э2}}. \quad (7)$$

Поэтому эффективное напряжение в общей коллекторной цепи ДК зависит от разности токов

$$u_к = (i_{к1} - i_{к2}) r_1 = \left[ \frac{u_{вх.1}}{r_{э1}} - \frac{u_к}{r_{э2}} \right] r_1. \quad (8)$$

После преобразований последней формулы находим, что

$$u_к \approx \frac{r_{э2}}{r_{э1}} u_{вх.1} \approx u_{б2}. \quad (9)$$

Так как  $r_{э2} = r_{э1}$ , то из (9) следует, что напряжение на базе транзистора VT2 равно по величине, но противоположно по фазе входному напряжению ДК. То есть правое плечо ДК создает выходное напряжение

$$u_{вых.2} = \frac{u_{вх.1}}{r_{э2}}. \quad (10)$$

Таким образом, схема рис. 6 работает как устройство, преобразующее входной сигнал в два противофазных выходных сигнала. Данные свойства присущи классическому дифференциальному каскаду.

Основные специфические погрешности ДК с общей коллекторной цепью связаны с наличием разделительных конденсаторов  $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$ , не полной передачей напряжения  $u_k$  в цепь базы транзистора VT2, инерционностью двухполюсника  $I_1$  и повторителей напряжения ПН1 и ПН2.

В практической схеме ДК с общей коллекторной цепью (рис. 7,а) используются повторители напряжения, что повышает идентичность каналов.

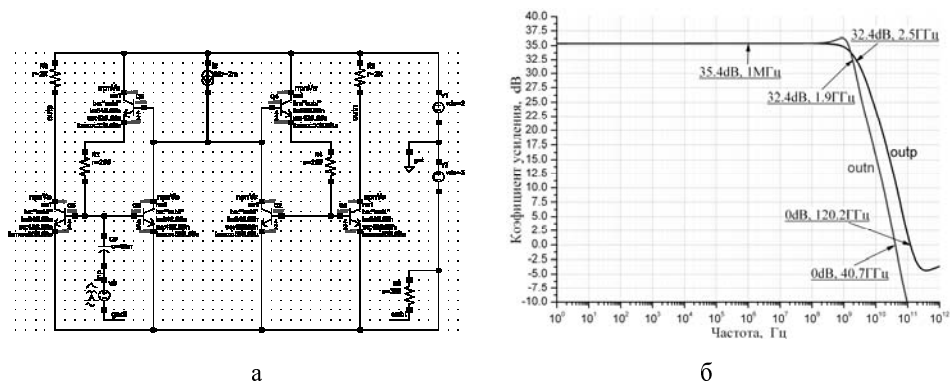


Рис. 7. Схема ДК в среде Cadence (а) и его амплитудно-частотные характеристики (б)

К числу очевидных достоинств ДК с общей коллекторной цепью относятся: высокий коэффициент усиления по напряжению и мощности; эффективное использование напряжения питания, которое может быть достаточно малым ( $E_n = 1,5 \div 2$  В); возможность построения аналоговых схем только на п-р-п-транзисторах; наличие свойств фазорасшипителя (так называемого «балуна»).

В то же время следует заметить, что схемы с общей коллекторной цепью и RC-связью не полностью заменяют по основным качественным показателям схемы с ДК с общей эмиттерной цепью.

Основные направления структурной и схемотехнической оптимизации ДК с общей коллекторной цепью связаны с устранением следующих недостатков базового решения ДК: расширение диапазона рабочих частот за счет использования каскадных структур; создание условий для более точного деления токов между коллекторами входного и выходного транзисторов с учетом эффекта Эрли; исключение из схемы резисторов; минимизация паразитной передачи входного сигнала в общую коллекторную цепь ДК через пассивные элементы схемы; повышение (до единицы) коэффициента передачи напряжения общей коллекторной цепи ДК в цепь базы второго входного транзистора; исключение разделительных конденсаторов; уменьшение паразитной емкости в общей коллекторной цепи ДК; снижение на высоких частотах фазовой погрешности между выходами ДК, что важно при построении фазорасшипителей; повышение идентичности коэффициентов усиления ДК по каждому из выходов; формирование заданных уровней входного сопротивления ДК; снижение уровня шумов и нелинейных искажений; повышение коэффициента усиления по напряжению; снижение токопотребления в статическом режиме.

**Выводы.** Разработанные архитектуры дифференциальных каскадов [1-3] характеризуются (в отличие от традиционных ДК) другой совокупностью свойств и динамических параметров, а также расширяют представления разработчиков элект-

тронных устройств автоматики и вычислительной техники о методах усиления широкополосных сигналов. Для внедрения в практические разработки рассмотренных ДК необходимы дополнительные исследования, а также их всестороннее компьютерное моделирование.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Высокочастотный усилитель на транзисторе по схеме с общей базой [Текст]. Пат. 2365028 Российской Федерации, МПК8 H03F 3/34, 3/04, 3/189 / Прокопенко Н.Н., Конев Д.Н., Будяков А.С., заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса». – № 2007144027/09; заявл. 27.11.2007; опубл. 20.08.2009. Бюл. № 23. – 12с.: ил. (91).
2. Высокочастотный дифференциальный усилитель [Текст]: заявка на патент Российской Федерации; МПК8 H03F 3/34, 3/45 / Прокопенко Н.Н., Будяков А.С., Конев Д.Н. – № 2008109765/09; заявл. 13.03.2008 (121).
3. Усилитель переменного тока с парафазным выходом [Текст]: заявка на патент Российской Федерации; МПК8 H 03 F 3/34, 3/45 / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Гришков В.Н. – № 17-3773/27 от 09.12.09 (273).

**Прокопенко Николай Николаевич**

Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса.  
346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147.  
E-mail: prokopenko@sssu.ru.  
Тел.: 88636222037; 8863222133.

**Будяков Петр Сергеевич**

E-mail: byduakov@mail.ru.

**Крюков Сергей Владимирович**

E-mail: vvks@list.ru.

**Prokopenko Nikolay Nikolaevich**

South-state university of economics and services.  
E-mail: prokopenko@sssu.ru.  
147, Shevchenko, Shahty, 346500, Russia.  
Phone: 88636222037; 8863222133.

**Budyakov Petr Sergeevich**

E-mail: byduakov@mail.ru.

**Kryukov Sergey Vladimirovich**

E-mail: vvks@list.ru.

УДК 621.375

**Н.Н. Прокопенко, П.С. Будяков, С.В. Крюков**

**СПОСОБ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛОВ В СТРУКТУРЕ  
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ КАСКАДОВ С ЦЕПЯМИ ВЗАИМНОЙ  
КОМПЕНСАЦИИ ИМПЕДАНСОВ НИЗКООМНЫХ РЕЗИСТОРОВ**

*Предлагается концепция построения дифференциальных каскадов с повышенным коэффициентом усиления по напряжению, в которых создаются специальные условия для взаимной компенсации импедансов низкоомных резисторов коллекторной нагрузки.*

*Дифференциальный усилитель; собственная и взаимная компенсация импедансов; способы повышения коэффициентов усиления.*