

5. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЕЙ НА БАЗЕ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ

5.1. Этапы синтеза широкополосных усилителей. Интегральные широкополосные усилительные секции

До недавнего времени проектирование функциональных блоков приемно-усилительных трактов: многокаскадных широкополосных и избирательных усилителей, устройств частотной селекции, устройств нелинейной обработки сигналов и т. п. – происходило в следующей последовательности: элемент – каскад (звено) – функциональный блок (ФБ). В качестве элементов выступали радиолампы, транзисторы, резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и др. Основное внимание уделялось разработке отдельных каскадов. Каскады объединялись в функциональный блок (ФБ), причем разработке способов такого объединения, другими словами, структурным схемам построения ФБ, уделялось существенно меньшее внимание. Использовалась главным образом последовательная (каскадная) структура.

Бурное развитие микроэлектроники привело к изменению элементной базы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), выдвинув в качестве основного компонента схемы функциональный модуль (ФМ) в виде интегральной микросхемы, состоящей из одного или нескольких каскадов. При этом последовательность проектирования сократилась за счет исключения этапа создания каскадов и стала иметь вид: функциональный модуль – функциональный блок. Использование элементного базиса в виде ИМС, электрические параметры которых не всегда возможно изменить и набор которых ограничен, оставляет единственную возможность выполнения заданных требований – формирование (синтез) рациональной структурной схемы соединения ФМ. Алгоритм такого синтеза содержит следующие основные этапы:

- 1) выбор и математическое описание базовых ФМ;
- 2) определение функциональной связи между математическими моделями ФБ и ФМ (этап аппроксимации в функциональной области);

3) построение структурной схемы ФБ в виде направленного графа (этап реализации).

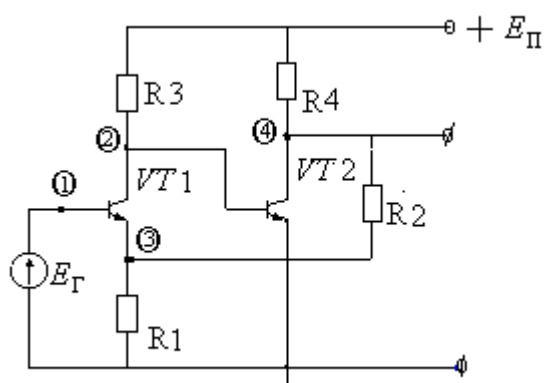
Базовые функциональные модули (интегральные широкополосные усилительные секции).

При разработке интегральных широкополосных усилительных секций закладывались три основных принципа схемотехнического построения:

- 1) использование непосредственных гальванических связей, так как в интегральном исполнении невозможно реализовать конденсаторы большой емкости;
- 2) широкое применение общих и местных ООС по постоянному и переменному току для существенного улучшения электрических показателей усилительных устройств, в частности, по стабильности и широкополосности;
- 3) использование принципа взаимного согласования цепей, который осуществляется благодаря близкому технологическому размещению в кристалле полупроводниковых элементов схемы; при этом достигается строгая идентичность или пропорциональность параметров во всем интервале эксплуатационных воздействий (при изменении температуры окружающей среды, питающих напряжений и т.д.).

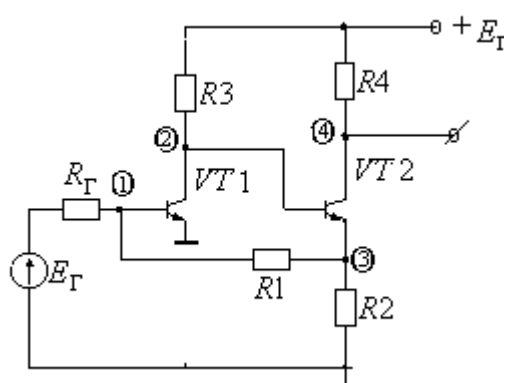
Проанализируем свойства интегральных широкополосных усилительных секций, реализованных в виде «двоек» и «троек» и обладающих различными видами ООС. Упрощенные схемы таких секций с подключенным источником входного сигнала, справедливые для области средних и верхних частот, приведены в табл. 5.1÷ 5.4. Там же дается краткая характеристика секций.

Табл. 5.1.



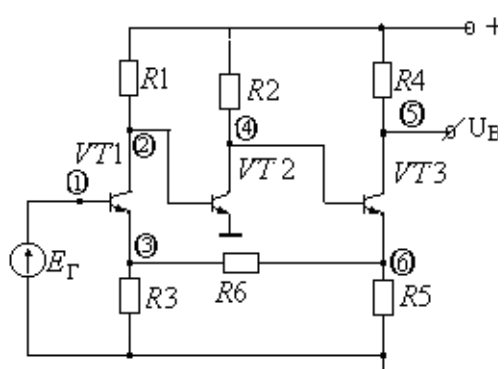
Резистор $R1$ создает в первом каскаде местную ОС по току (Z -типа). С помощью делителя из резисторов $R1$ и $R2$ осуществлена общая обратная связь по напряжению (H -типа). Коэффициент усиления такой усилительной секции практически не зависит от параметров транзисторов.

Табл. 5.2.

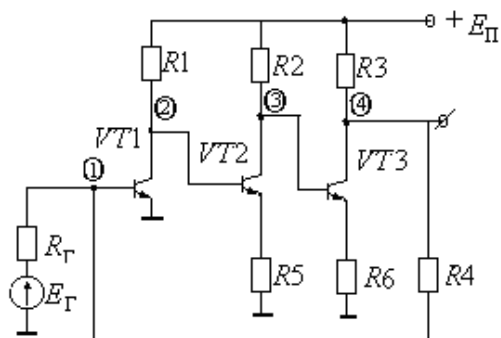


В этой усилительной секции резистор $R2$ создает во втором каскаде местную ОС по току (Z -типа), а с помощью делителя $R_Г, R1$ реализуется общая обратная связь по току (G -типа). При введении общей ООС коэффициент усиления не изменяется, однако резко уменьшается входное сопротивление.

Табл. 5.3.



В трехкаскадном усилителе резисторы $R3-R6$ и $R5-R6$ создают в первом и, соответственно, в третьем каскадах местную ОС по току (Z -типа), а с помощью делителя $R3-R6$ образуется общая обратная связь по току (Z -типа). Коэффициент усиления напряжения рассматриваемой секции практически не зависит от параметров транзисторов.



В трехкаскадном усилителе резисторы $R5$ и $R6$ создают во втором и, соответственно, в третьем каскадах местные ОС по току (Z -типа), а с помощью делителя $R\Gamma$ – $R4$ образуется общая обратная связь по напряжению (Y -типа), которая уменьшает входной импеданс.

На входе и выходе рассмотренных усилительных секций присутствует постоянное напряжение, что препятствует использованию таких схем для усиления постоянного напряжения. В качестве базовой схемы усилителя постоянного тока необходимо использовать дифференциальный каскад.

Рассмотрим промышленную ИМС широкополосного усилителя типа 175УВ1.

Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 5.1.

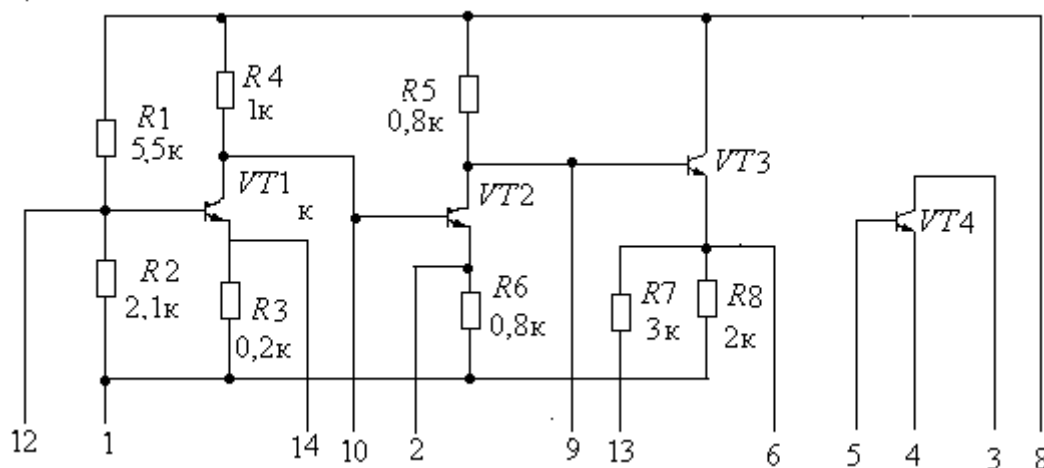


Рис. 5.1. ИМС типа 175УВ1

Кроме основного усилителя на транзисторах $VT1$ — $VT3$ эта ИМС содержит также вспомогательный транзистор $VT4$ и дополнительный резистор $R7$. Подключив внешние компоненты (резисторы и конденсаторы), на основе этой ИМС можно реализовать некоторые из рассмотренных нами усилительных секций. В качестве примера на рис. 5.2 изображена схема широкополосной усилительной секции с ООС H -типа.

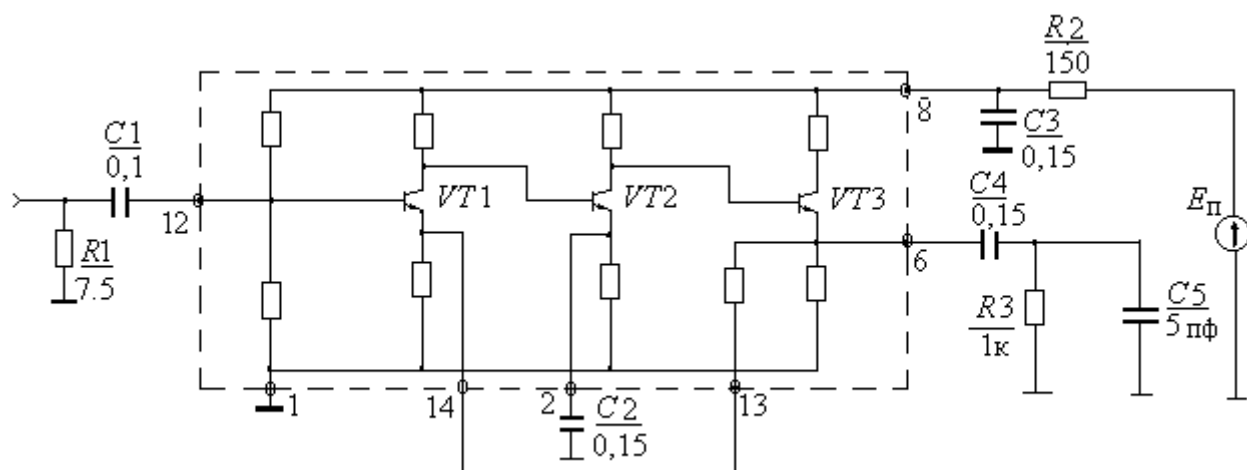


Рис. 5.2. Широкополосная усилительная секция с ООС *H*-типа

Для обеспечения малого выходного сопротивления в схеме применен эмиттерный повторитель на транзисторе *VT3*. При емкостной нагрузке ($R3=1\text{к}$, $C5=5\text{пФ}$) такая усилительная секция обладает значением верхней граничной частоты не менее 60 МГц при коэффициенте усиления напряжения на средних частотах не менее 10.

Приведем пример интегрального широкополосного усилителя, в котором реализован принцип схемотехнической избыточности. Таким примером является ИМС типа К174УР10 (см. рис. 5.3). Эта ИМС содержит два дифференциальных каскада (ДК) с симметричными выходами и токозадающими транзисторами *VT3* и *VT5* с местными обратными связями *Z*-типа. Указанные транзисторы образуют с транзистором *VT4* в диодном включении схемы двух «токовых зеркал». Первый, входной ДК на транзисторах *VT1* и *VT2* имеет несимметричный вход (вывод 5) и местную ООС *Z*-типа (резисторы $R3$ и $R5$). Для обеспечения малого выходного сопротивления к выходам второго ДК, выполненного на транзисторах *VT6* и *VT7*, подключены эмиттерные повторители на транзисторах *VT8* и *VT9*.

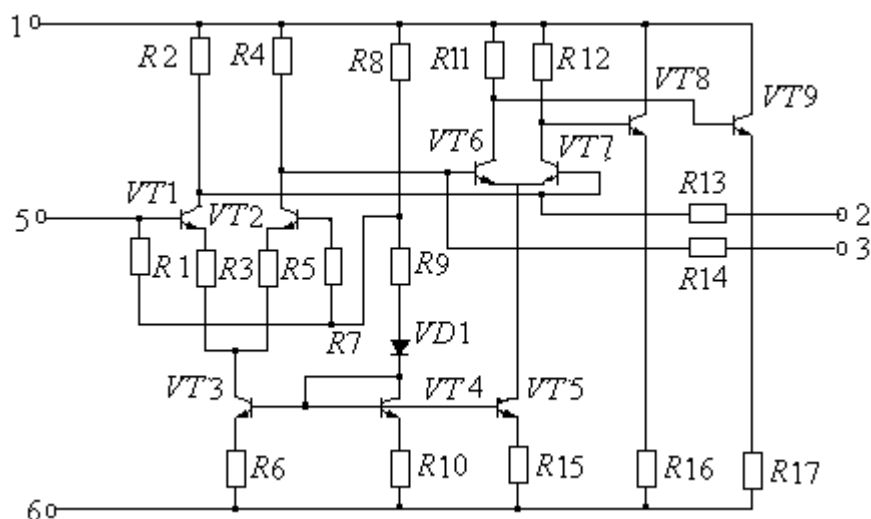


Рис. 5.3. ИМС типа К174УР10

Типовая схема включения ИМС К174УР10 показана на рис. 5.4.

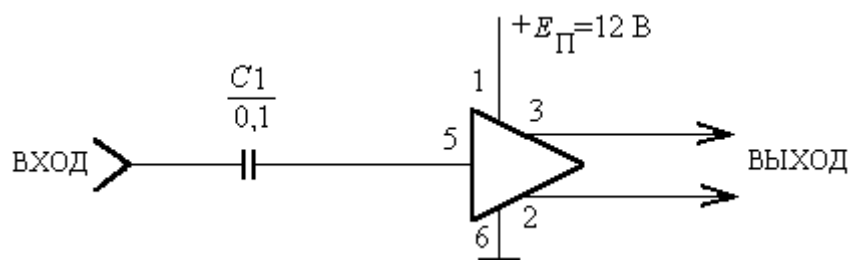


Рис. 5.4. Типовая схема включения ИМС К174УР10

Такой усилитель позволяет получить значение верхней граничной частоты не менее 60÷80 МГц.

Линейные модели ИМС

При разработке микроэлектронных функциональных блоков (ФБ), таких как многокаскадные широкополосные и избирательные усилители, применяют ИМС широкополосных и операционных усилителей (соответственно ШУ и ОУ). Для описания этих ИМС обычно используют математические модели в виде активных четырехполюсников. Синтез микроэлектронных цепей предполагает использование упрощенных моделей активных четырехполюсников в виде управляемых источников: источника напряжения, управляемого напряжением (ИНУН); источника напряжения, управляемого током (ИНУТ); источника тока, управляемого напряжением (ИТУН); источника тока, управляемого током (ИТУТ). Если описать четырехполюсник в виде обобщенной матрицы

с параметрами W_{ij} :

$$\|W_{ij}\| = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{vmatrix},$$

то в управляемых источниках $W_{11} = W_{12} = W_{22} = 0$, а параметр прямой передачи $W_{21} \neq 0$ может иметь комплексное значение. Выпускаемые отечественной промышленностью ИМС ОУ относятся к классу ИНУН. К этому же классу можно отнести, как правило, и ИМС ШУ, так как для обеспечения широкополосности они имеют малую нагрузку, либо содержат на выходе эмиттерные повторители, обладающие малым выходным сопротивлением. Сигнальный граф ИМС ОУ и ШУ класса ИНУН имеет вид, показанный на рис. 5.5.

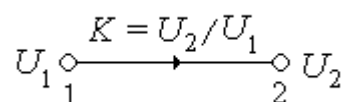


Рис. 5.5. Сигнальный граф ИМС ШУ и ОУ.

Естественно, что при определении параметров линейных моделей реальных ИМС нельзя пренебречь значениями W_{11} и W_{22} . Это обстоятельство при использовании ИМС класса ИНУН приводит к необходимости учета входного и выходного полного сопротивления (или полной проводимости). Поэтому в процессе синтеза реальные ИМС представляют как идеальные управляемые источники класса ИНУН, находят принципиальную схему заданного ФБ, а затем на заключительной стадии проектирования производят учет влияния входных и выходных сопротивлений используемой ИМС.

5.2. Структурные схемы стабильных усилителей на базе идентичных аналоговых микросхем

Этап аппроксимации в функциональной области

После того, как был осуществлен выбор базовых функциональных модулей (ФМ) и выполнено их математическое описание, приступают к следующему этапу разработки структурной схемы усилителя на базе идентичных аналоговых микросхем – этапу аппроксимации. На этом этапе определяют функциональную связь между математическими моделями функционального блока (ФБ) и ФМ.

В самом общем случае структурной схеме, состоящей из однонаправленных ФМ, может быть поставлена в соответствие передаточная функция, определяемая по формуле Мэсона, в виде рациональной дроби с полиномами, содержащими передаточные функции K отдельных ФМ:

$$T(K) = \frac{a_0 + a_1 K + a_2 K^2 + \dots + a_n K^n}{1 + b_1 K + b_2 K^2 + \dots + b_m K^m} \quad (5.1)$$

и, наоборот, если имеется дробно-рациональная функция (5.1), то ей можно привести в соответствие сигнальный граф, который и определит вид структурной схемы. Таким образом, наличие функциональной связи между математическими моделями ФБ и ФМ в виде дробно-рационального выражения является необходимым и достаточным условием последующего перехода к структурной схеме соединения базовых ФМ.

Этап реализации

Обобщенная структурная схема

Основной и наиболее сложной задачей, решаемой на этапе реализации, является поиск структурной схемы соединения базовых ФМ, соответствующей найденной на этапе аппроксимации функции $T(K)$.

Обобщенная структурная схема соединения ФМ представлена в виде сигнального графа на рис. 5.6. При этом использованы обозначения: $K_i(p)$ — передаточные функции базовых ФМ; a_0 , a_{ij} , α_k и β_k — передачи ветвей графа, которые могут быть реализованы пассивными цепями.

Процедура расчета параметров ветвей обобщенного графа предполагает:

- а) выбор размерности графа, равной порядку функции $T(K)$;
- б) составление передаточной функции обобщенного графа выбранного порядка $T^*(K)$;
- в) составление системы уравнений путем приравнивания соответствующих коэффициентов функций $T(K)$ и $T^*(K)$ и ее решение.

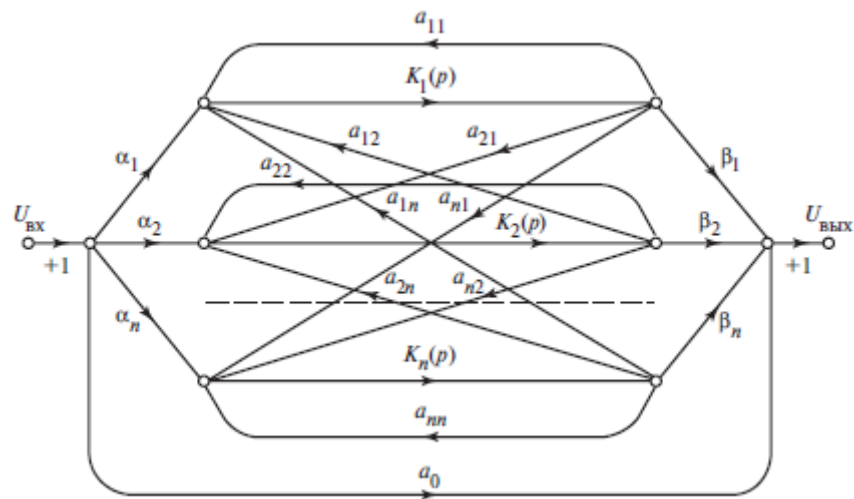


Рис. 5.6. Обобщенный сигнальный граф

Во многих случаях обобщенная структурная схема является избыточной и система уравнений не имеет единственного решения. На практике обычно используют более простые структурные схемы, являющиеся частными случаями обобщенной.

Каноническая структурная схема

Два варианта канонической реализации структурной схемы в виде сигнальных графов показаны на рис. 5.7. Второй вариант применяется в тех случаях, когда базовые ФМ имеют сумматоры на входе. Передаточная функция канонической структурной схемы является дробно-рациональной функцией, причем коэффициенты этой функции равны передачам соответствующих ветвей графа. В такой ситуации построение канонической структурной схемы осуществляется однозначно по функции $T(K)$.

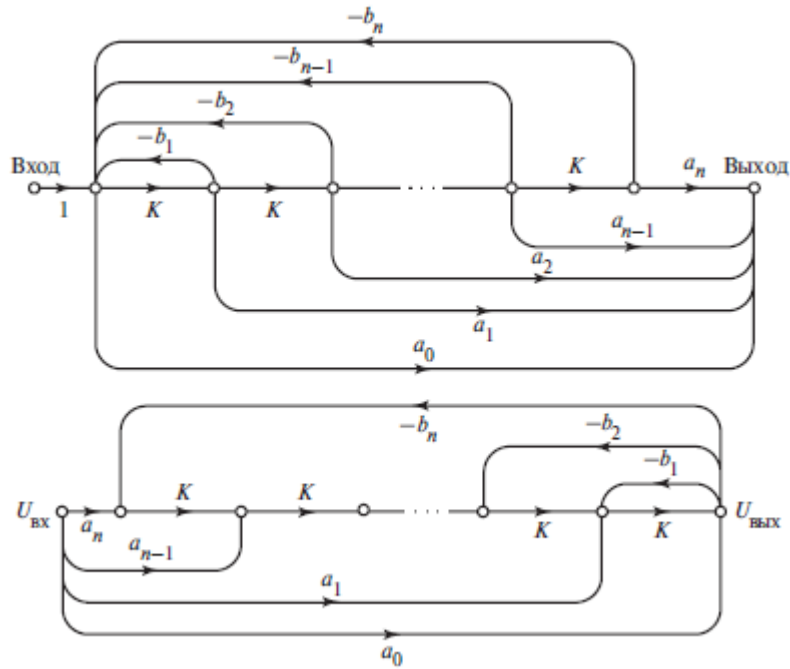


Рис. 5.7. Два варианта канонической структурной схемы

Последовательная структурная схема

Последовательная (каскадная) структурная схема (рис. 5.8) состоит из последовательно соединенных звеньев, описываемых передаточными функциями $T_i(K)$ первого и второго порядков.

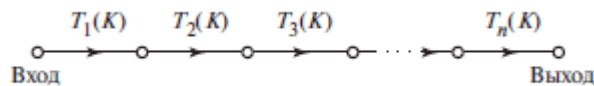


Рис. 5.8. Последовательная структурная схема

Процедура построения структурной схемы в этом случае базируется на возможности представления числителя и знаменателя функции $T(K)$ в виде произведений сомножителей первого и второго порядка. В такой ситуации функция $T(K)$ может быть представлена в виде произведения дробно-рациональных функций $T_i(K)$, которое описывает передаточную функцию последовательной структурной схемы (см. рис. 5.8). При этом задача реализации функции высокого порядка сводится к реализации передаточных функций $T_i(K)$, что существенно проще.

Параллельная структурная схема

Параллельная структурная схема (рис. 5.9) состоит из параллельно соединенных звеньев, описываемых передаточными функциями $T_i(K)$ первого и

второго порядков. Процедура построения параллельной структурной схемы базируется на возможности представления дробно-рациональной функции $T(K)$ в виде суммы передаточных функций $T_i(K)$.

При этом задача реализации, как и в предыдущем случае, сводится к реализации передаточных функций первого и второго порядков.

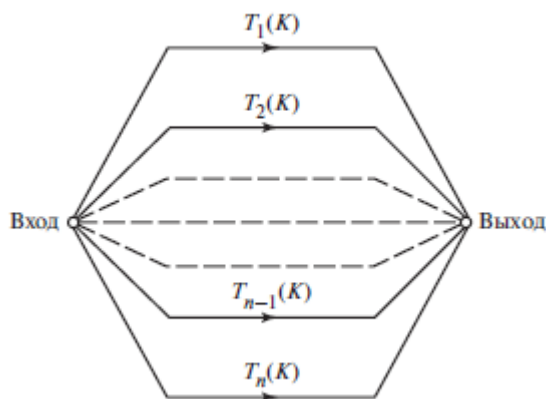


Рис. 5.9. Параллельная структурная схема

Цепная структурная схема

Вариант цепной структурной схемы показан на рис. 5.10. Процедура построения цепной структуры базируется на представлении функции $T(K)$ в виде цепной дроби, по виду которой однозначно может быть построена структурная схема в виде сигнального графа.

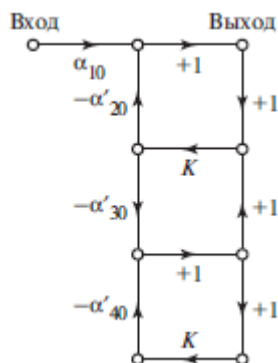


Рис. 5.10. Вариант цепной структурной схемы

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику четырех видов управляемых источников.
2. Поясните структуру, которую называют обобщенным сигнальным графом.

3. При каких условиях целесообразно использовать последовательную и параллельную структурные схемы?

