

# Электрические измерения

## Лекция 10

# Программируемые усилители

преподаватель:  
*доцент кафедры электротехники,  
автоматики и метрологии, к.п.н.*

*Елена Артуровна  
Вахтина*

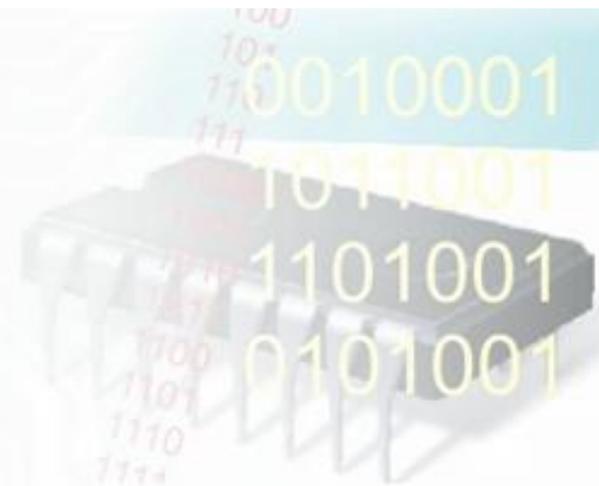


# ПЛАН

1. Теорема минимальной реализации схемы усилителя
2. Минимальная реализация программируемого усилителя с управляемым сопротивлением



Программируемые операционные усилители (ОУ) применяются в электронных схемах, к которым предъявляются жесткие ограничения по потребляемому току, например, схемы с питанием от гальванических элементов, аккумуляторов, солнечных батарей, а также с паразитным питанием.



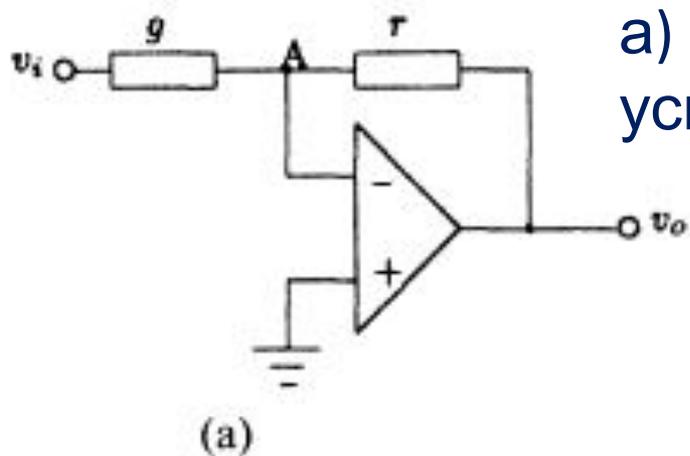
# 1. Теорема минимальной реализации схемы Лекция 10

Для минимальной реализации набора из  $N$  произвольных коэффициентов усиления  $A_k$  значения которых лежат в диапазонах:  $A_k \leq 0$ ,  $0 \leq A_k \leq 1$  или  $A_k \geq 1$ , и получения нулевого выходного сопротивления схемы, необходимо иметь  $N + 1$  резистор,  $N$  ключей и один операционный усилитель (ОУ). В зависимости от заданного диапазона значений коэффициента усиления ОУ включается как буфер-аттенюатор, или как инвертирующий или неинвертирующий усилитель.

**Доказательство:** Поскольку на пассивных компонентах нельзя построить схему для усиления или ослабления сигнала, обладающую нулевым выходным сопротивлением, в нее необходимо ввести хотя бы один активный элемент. Выберем в качестве активного элемента ОУ.

# 1. Теорема минимальной реализации схемы усилителя Лекция 10

- Так как коэффициент усиления является безразмерной величиной, то как минимум два пассивных элемента одинаковой физической природы, и, следовательно, одной размерности, должны входить в виде отношения в выражение, задающее значение  $A_k$ .
- Выберем резисторы в качестве пассивных элементов. Рассмотрим три возможных варианта схем, построенных на основе одного ОУ и двух резисторов.



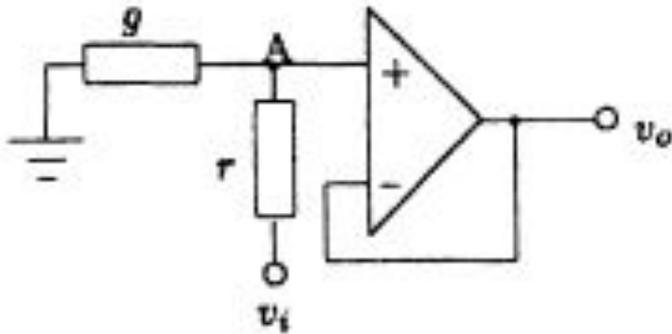
а) инвертирующий усилитель

$$A_1 = -gr,$$

# 1. Теорема минимальной реализации схемы

## Лекция 10

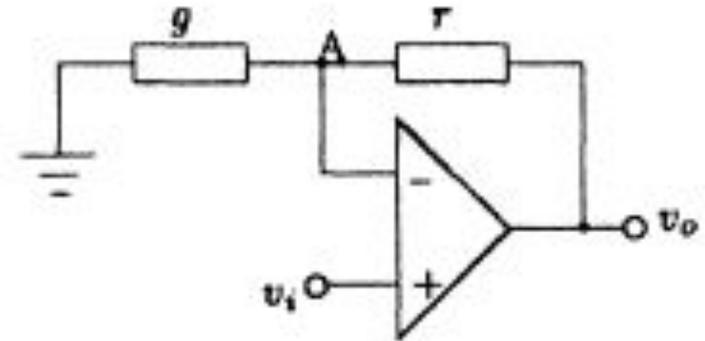
усилителя



(б)

б)

$$A_A = \frac{1}{1 + gr} = \frac{1}{1 + |A_I|},$$



(в)

в) неинвертирующий  
усилитель

$$A_N = 1 + gr = 1 + |A_I|.$$

### усилителя

- Из уравнений видно, что коэффициенты  $A_k \leq 0$ ,  $0 \leq A_k \leq 1$  или  $A_k \geq 1$  можно получить при помощи любой из трех схем. Следовательно, для построения минимальной реализации программируемого усилителя, в любую из этих схем нужно ввести дополнительные ключи для реализации каждого из значений коэффициента усиления.
- Для задания  $N$  значений коэффициента усиления, необходимо выполнить  $N$  операций переключения. Соответственно, для этого потребуется как минимум  $N$  ключей.
- Это справедливо для режимов и одиночного, и группового переключения.

# 1. Теорема минимальной реализации схемы Лекция 10

- Пусть есть один **ОУ** и  $N$  ключей, работающих либо в режиме одиночного, либо группового переключения. Требуется определить количество резисторов, необходимых для реализации  $N$  произвольных значений коэффициента усиления.
- Из уравнений (а, б, в) видно, что коэффициент усиления может меняться при варьировании параметров  $g$  или  $r$  по отдельности или одновременно.
- Рассмотрим случай, когда меняется только один из параметров:  $g$  или  $r$ .
- Тогда для реализации  $N$  значений коэффициента усиления, параметр  $g$  или  $r$  должен принимать  $N$  значений. Для этого, как было доказано ранее, требуется  $N$  ключей и  $N$  резисторов. Следовательно, минимальная схема для получения  $N$  произвольных значений коэффициента усиления должна состоять из одного **ОУ**,  $N$  ключей и  $N + 1$  резистора.

# 1. Теорема минимальной реализации схемы Лекция 10

- ❑ Оба параметра усилителя меняются одновременно. Если варьировать оба параметра *независимо* друг от друга, потребуется огромное количество резисторов. Очевидно, что эта реализация не минимальна.
- ❑ Оба параметра меняются одновременно, но их общее сопротивление или общая проводимость остаются постоянными.
- ❑ Для этого случая уравнения (а, б и в) могут быть переписаны:

$$|A_I| = gR_T - 1 = rG_T - 1, \quad (\text{а})$$

$$A_A = \frac{1}{gR_T} = \frac{1}{rG_T}, \quad (\text{б})$$

$$A_N = gR_T = rG_T, \quad (\text{в})$$

где  $R_T = (r + 1/g)$ ,  $G_T = (g + 1/r)$ .

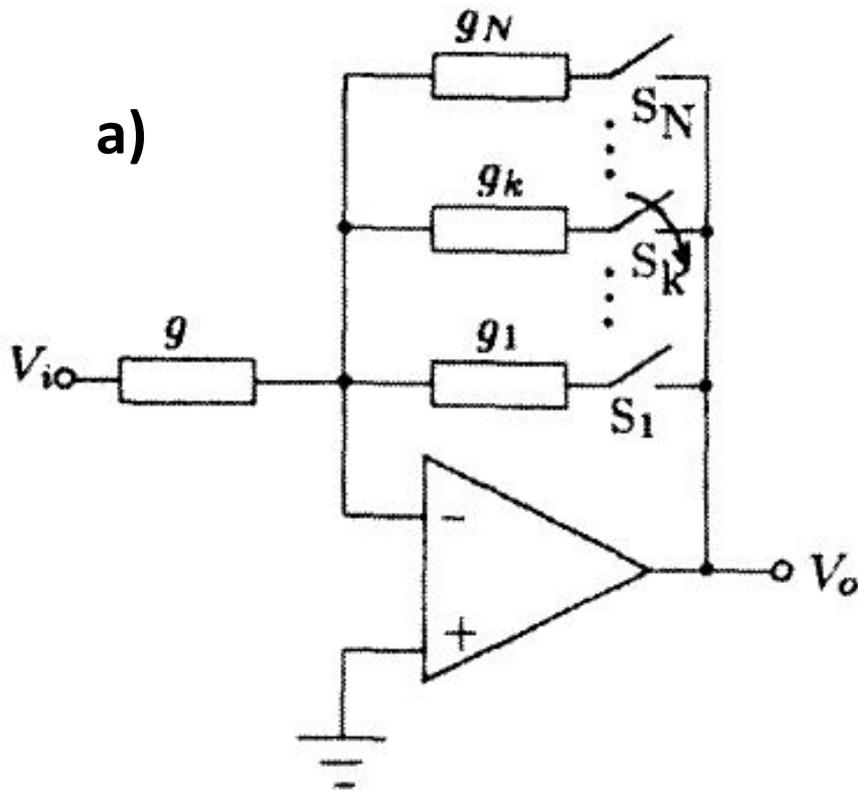
# 1. Теорема минимальной реализации схемы усилителя

Лекция 10

- Таким образом, коэффициентом усиления можно управлять изменением комбинации параметров  $g$  -  $r$  в схемах на рис. (а, б, в) при этом должно оставаться постоянным либо значение  $G_T$  либо  $R_T$ .
- Резисторы  $g$  и  $r$  могут быть заменены. многозвенными схемами программируемых сопротивлений: G-цепочек, R-цепочек.
- Таким образом, для программирования  $N$  значений коэффициента усиления снова требуется  $N + 1$  резистор,  $N$  ключей и один **ОУ**.

Теорема доказана.

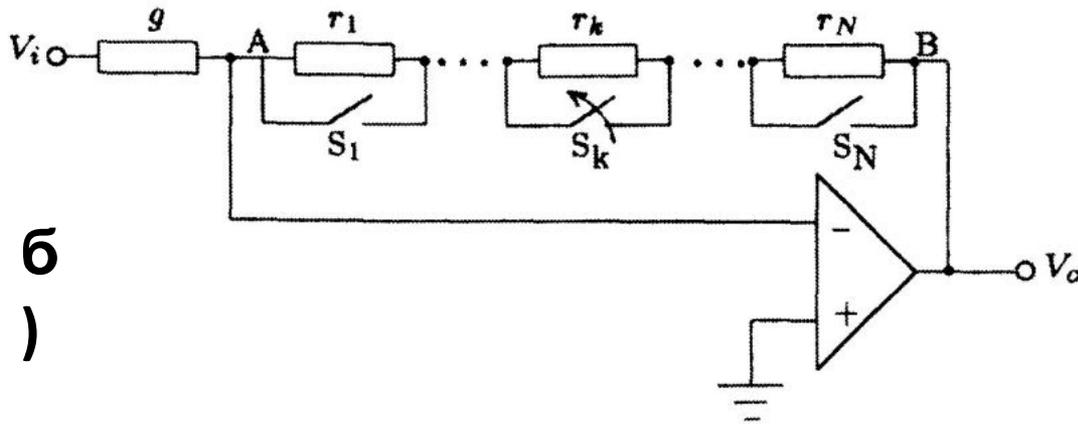
## 2. Минимальная реализация программируемого усилителя (ПУ) с управляемым сопротивлением



Если в схеме (а)  $g$  или  $r$  заменить на один из модулей управляемых сопротивлений получим минимальную реализацию программируемого инвертирующего усилителя, состоящего из одного ОУ,  $N + 1$  резисторов и  $N$  ключей.

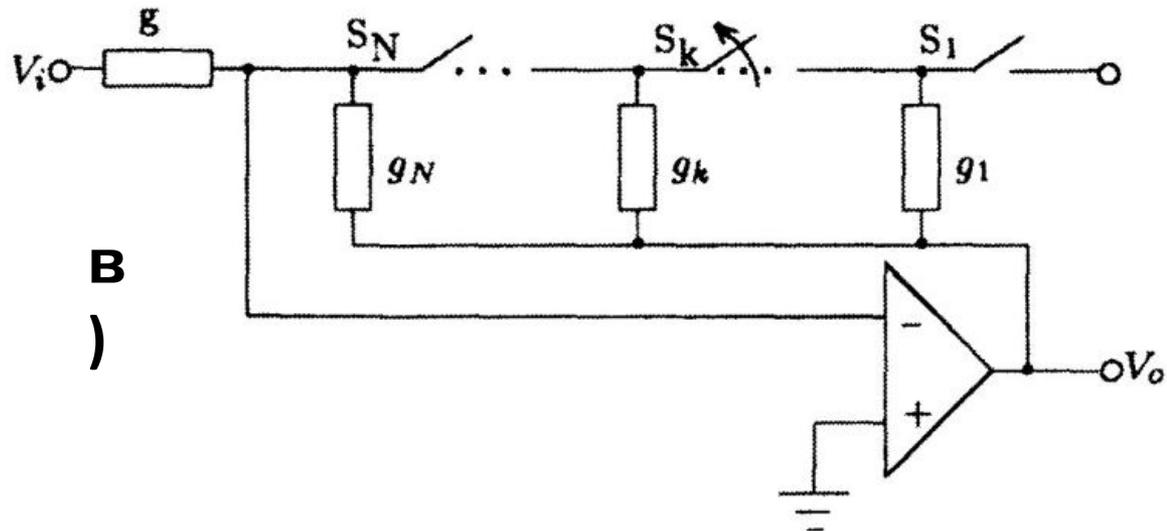
Параллельный программируемый усилитель в режиме одиночного переключения

## 2. Минимальная реализация ПУ с управляемым сопротивлением



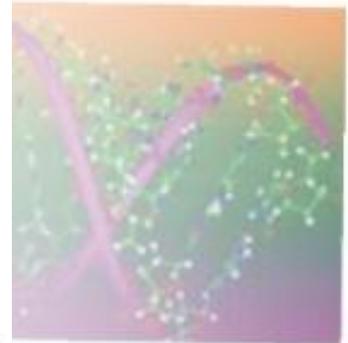
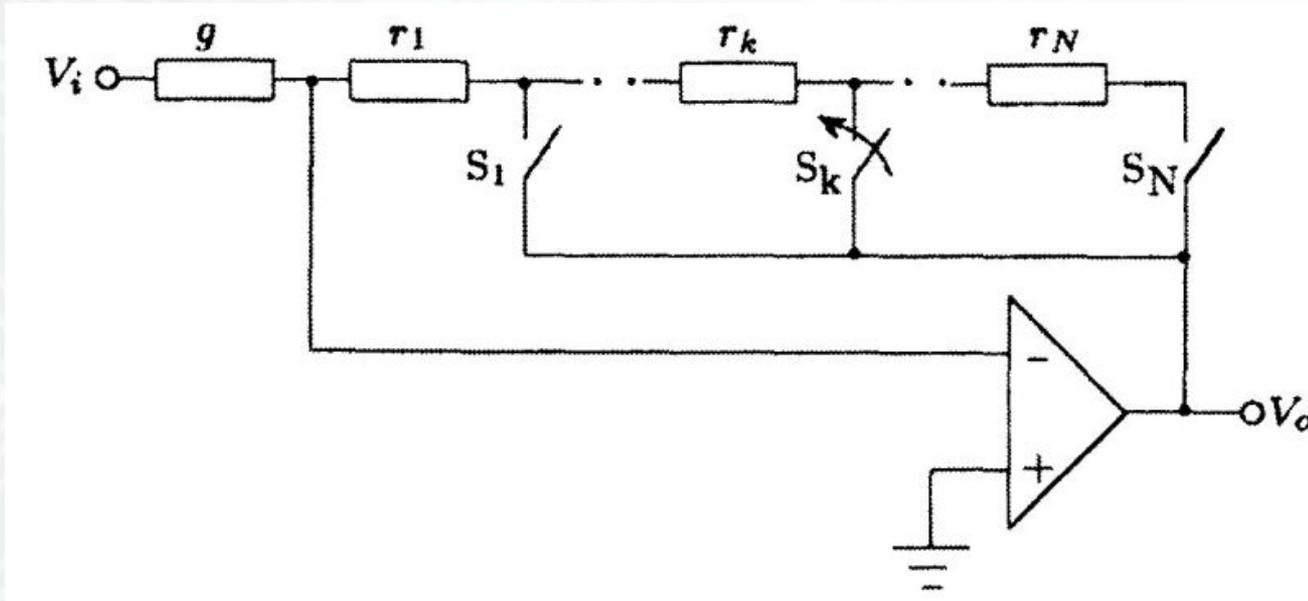
Последовательный программируемый усилитель в режиме одиночного переключения

Программируемый усилитель из **G-цепочек** в режиме одиночного переключения



## 2. Минимальная реализация ПУ с управляемым сопротивлением

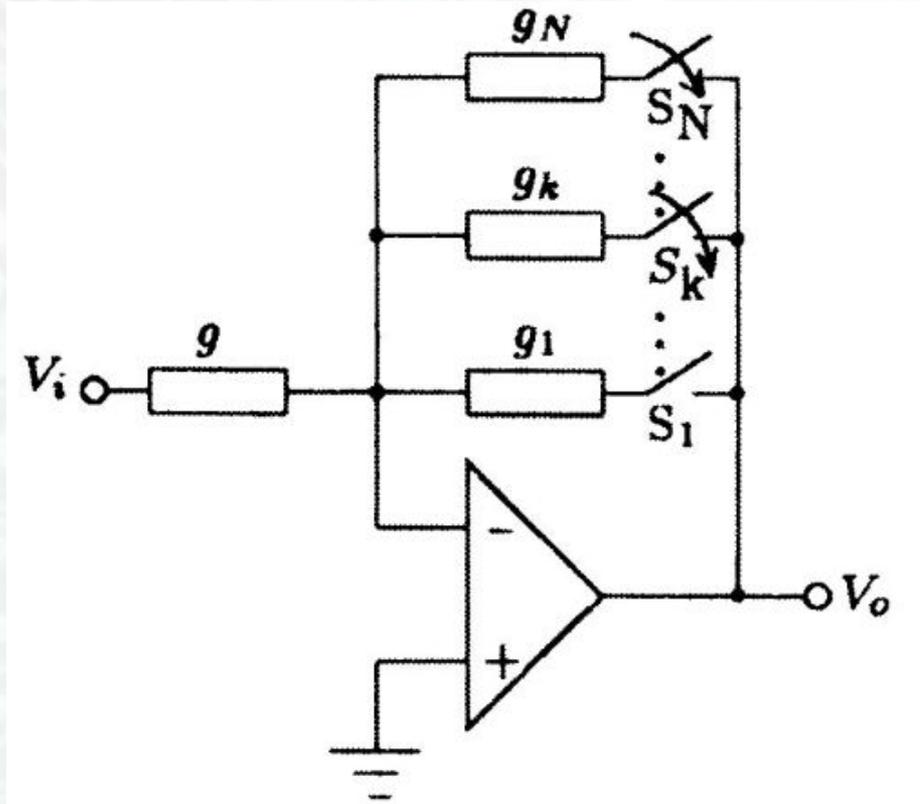
г)



Программируемый усилитель из ***R-цепочек*** в режиме одиночного переключения

## 2. Минимальная реализация ПУ с управляемым сопротивлением

д)

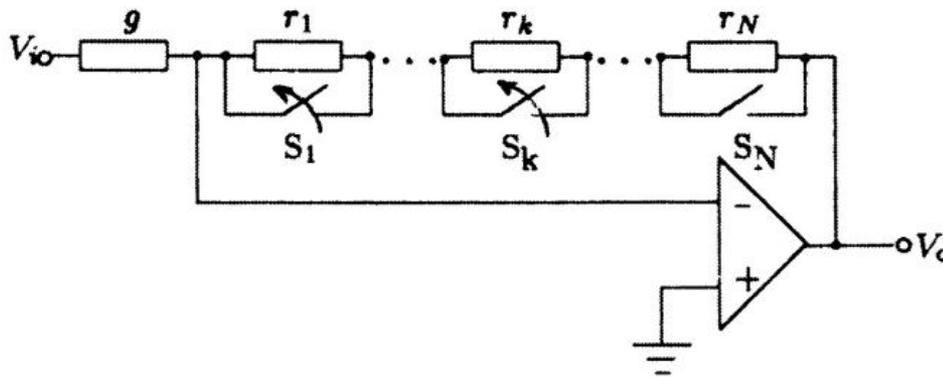


Параллельный программируемый усилитель в режиме группового переключения

## 2. Минимальная реализация ПУ с управляемым сопротивлением

Лекция 10

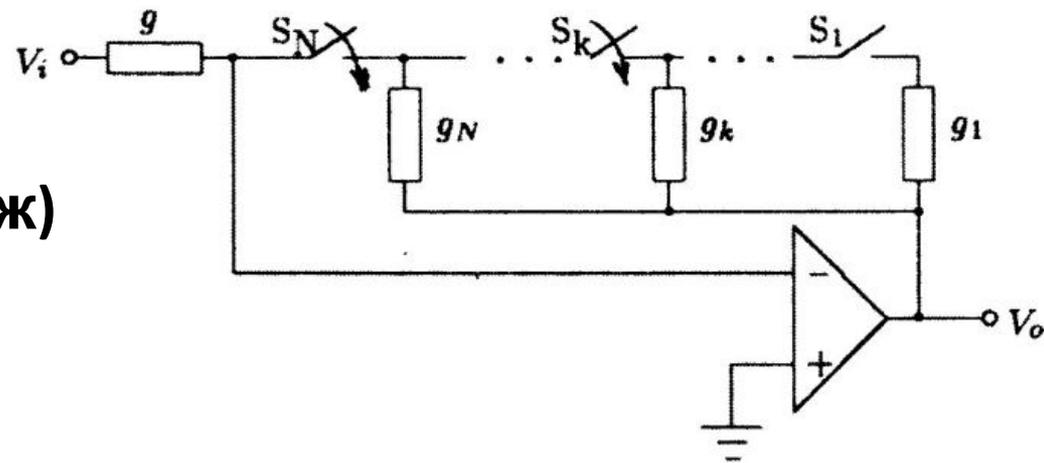
е)



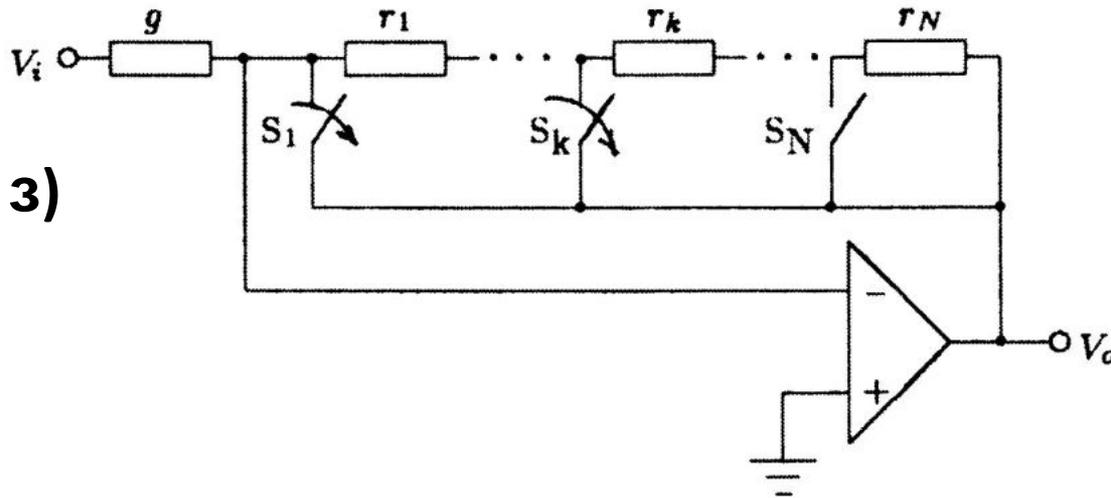
Последовательный программируемый усилитель в режиме группового

Программируемый усилитель из **G-цепочек** в режиме группового переключения

ж)



## 2. Минимальная реализация ПУ с управляемым сопротивлением

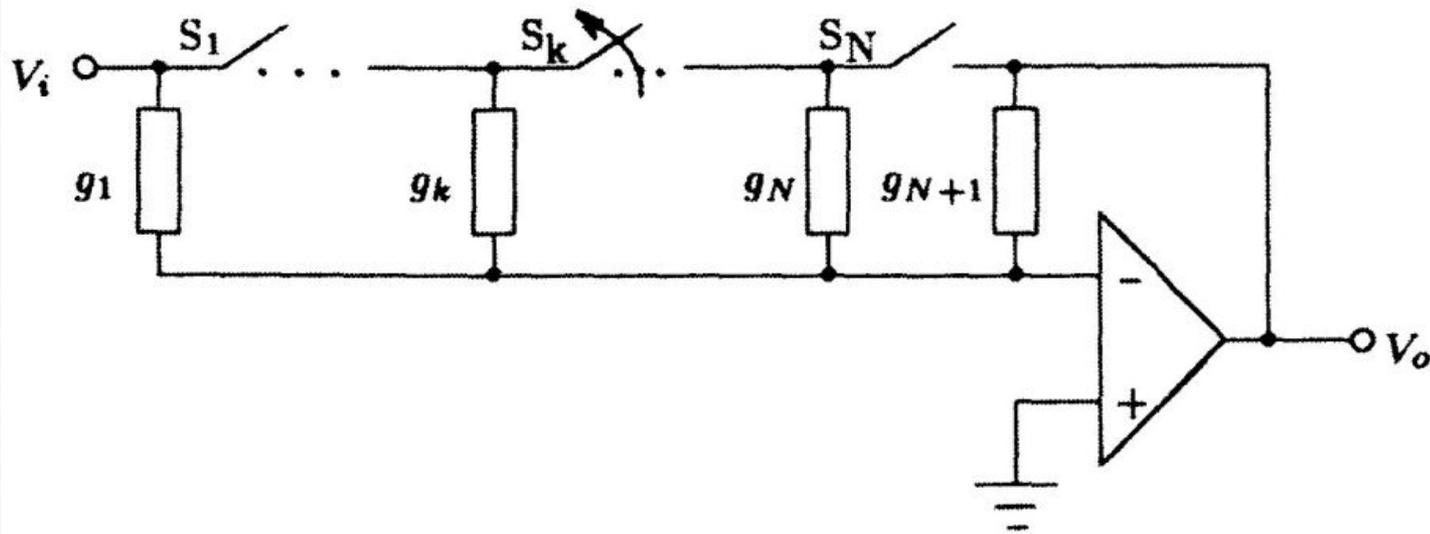


Программируемый усилитель из ***R-цепочек*** в режиме группового переключения



## 2. Минимальная реализация ПУ с управляемым сопротивлением

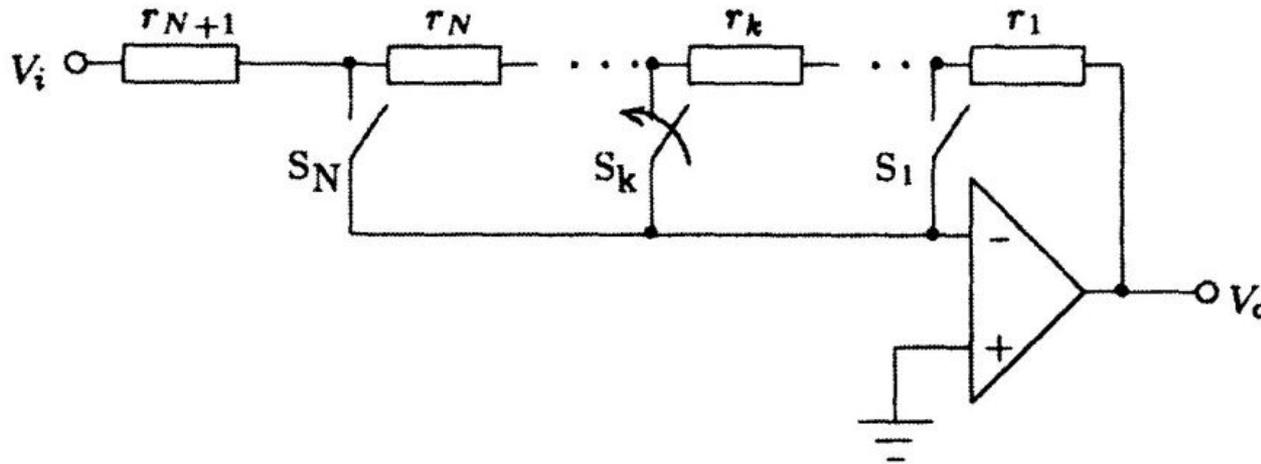
и)



Программируемый усилитель из ***G*-цепочек** с фиксированным значением  $G_T$  (независимое переключение).

## 2. Минимальная реализация ПУ с управляемым сопротивлением

к)



Программируемый усилитель из ***R-цепочек*** при фиксированном значении  $R_T$  (независимое переключение).

## 2. Минимальная реализация *Лекция 10* ПУ с управляемым сопротивлением

- ✓ На рис. (а)-(з) показаны только варианты схем с фиксированным параметром  $g$ . Предполагается, что реализуется коэффициент усиления  $A_k$ , если ключи находятся в положении, показанном на рис., и что  $A_k > A_{k-1}$  ( $2 \leq k \leq N$ ).
- ✓ Аналогично можно спроектировать еще восемь схем программируемых усилителей для случаев изменения параметра  $g$  при фиксированном значении  $r$ .
- ✓ Заменяя в схеме на рис. (а) комбинацию  $g - r$  на модуль управляемых сопротивлений многозвенного типа, представленных на рис. (в) и (г), получим еще два программируемых усилителя (рис. (и)-(к)).
- ✓ Таким образом, всего можно спроектировать 18 схем программируемых инвертирующих усилителей. Отметим, что коэффициент усиления таких схем увеличивается с ростом значения  $r$  и/или  $g$ .

## самостоятельной работы

1. Разработайте схемы для получения наборов сопротивлений:

а) 0, 1, 2, 3, ... 15

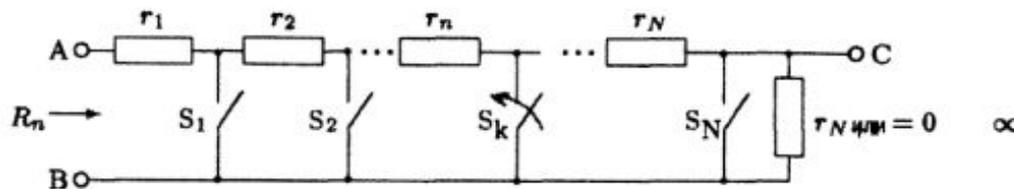
б) 1, 10, 100, 1000

в) 15, 14, 13, 12, ..., 1, 0

Сравните эти схемы по полному сопротивлению, диапазону значений используемых сопротивлений.

2. Разработайте схему программируемого сопротивления

В



жет принимать  
100 кОм, 1000 кОм.

## Вопрос 1: ...

### Ответы:

- а) действующее значение напряжения
- б) мгновенное
- в) среднее
- г) среднеквадратическое



## Вопрос 2: ...

### Ответы:

- а) действующее значение напряжения
- б) мгновенное
- в) среднее
- г) среднеквадратическое



**Вопрос 3 : ...**

**Ответы:**

а)



**Вопрос 4 : ...**

**Ответы:**

a)



**Вопрос 5 : ...**

**Ответы:**

**а)**

**б)**

**в)**

**г)**

**д)**

# Правильные ответы

## Лекция 10

1	2	3	4	5

