

# Электрические измерения



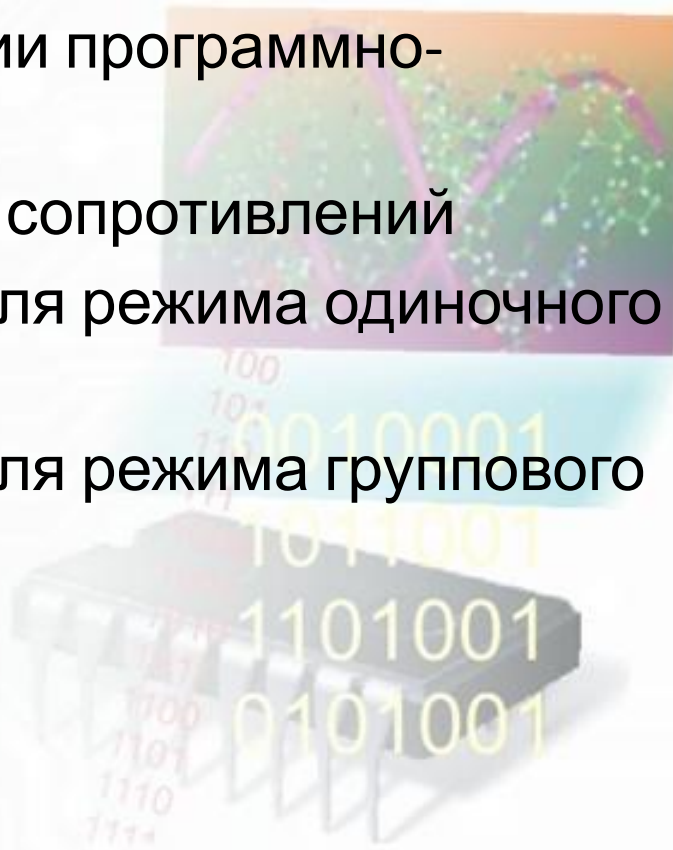
## *Лекция 9*

# *Программируемые сопротивления*

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

*Елена Артуровна  
Вахтина*

# ПЛАН

1. Введение
  2. Программируемые сопротивления
  3. Теорема минимальной реализации программно-управляемых сопротивлений
  4. Четыре схемы программируемых сопротивлений
  5. Минимальная реализация схем для режима одиночного переключения
  6. Минимальная реализация схем для режима группового переключения
  7. Расчет программируемых сопротивлений/проводимостей
  8. Программируемые делители
- 

- ✓ Современные приборы для измерений зачастую имеют **модульную** конструкцию. Каждый модуль состоит из большого числа микросхем, к внутренним элементам которых нет никакого доступа. Теряется гибкость в управлении такими приборами, поскольку нет никакой возможности изменять параметры микросхем.
- ✓ Однако, если ряд элементов с разными значениями или характеристиками объединить в одну микросхему и управлять ими при помощи программируемых ключей, можно достаточно легко перестраивать параметры всей измерительной системы.
- ✓ К таким элементам относятся программно-управляемых сопротивления, усилители, фильтры и т.д.

### 3. Теорема минимальной реализации программно-управляемых сопротивлений

Под минимальной реализацией будем понимать использование наименьшего числа компонентов.

**Теорема:** Для минимальной реализации набора из  $N$  независимых значений какого-либо параметра требуется  $N$  элементов и  $N$  ключей.

**Доказательство:** Пусть при помощи  $n$  ключей можно получить  $N$  значений параметра  $C$ :  $C_1, C_2, \dots, C_N$ . Поскольку для независимой работы каждому ключу требуется одноразрядный сигнал управления, то для  $n$  ключей необходим  $n$ -разрядный сигнал.

## Минимальная реализация программно-управляемых сопротивлений

Под минимальной реализацией будем понимать использование наименьшего числа компонентов.

**Теорема:** Для минимальной реализации набора из  $N$  независимых значений какого-либо параметра требуется  $N$  элементов и  $N$  ключей.

**Доказательство:** Пусть при помощи  $n$  ключей можно получить  $N$  значений параметра  $C$ :  $C_1, C_2, \dots, C_N$ . Поскольку для независимой работы каждому ключу требуется одnorазрядный сигнал управления, то для  $n$  ключей необходим  $n$ -разрядный сигнал.

$$C_k < C_{k+1}, k = 1, 2, \dots, N-1. \quad (1)$$

Пусть на схеме в настоящий момент (А) реализуется значение  $C_k$  а в следующий момент времени (Б) при помощи другой комбинации ключей будет получено значение  $C$

Рассмотрим два типа операций переключения.

- 1. Режим одиночного переключения:** В момент **Н** все ключи разомкнуты (замкнуты) кроме  $S_k$ -го, который замкнут (разомкнут). В момент **Б** ключ  $S_k$  откроется (закроется), тогда как  $S_{k+1}$  - закроется (откроется). Это означает, что в любой момент времени только один ключ может быть замкнут (разомкнут). Таким образом,  $n$ -разрядный управляющий сигнал должен быть следующего вида:

$$2^{n-1}2^{n-2} \dots 2^{k+1}2^k 2^{k-1} \dots 2^2 2^1 2^0 = 00 \dots 010 \dots 011 \text{ или} \\ 11 \dots 100 \dots 000$$

#### 1. Режим одиночного переключения

Для реализации всех  $N$  значений параметра  $C$ , соответствующих  $k = 1, 2, \dots, N$ , потребуется  $N$  комбинаций управляющего сигнала.

Следовательно, минимальное значение  $n$  равно  $N$ .

Сигнал из  $N$ -разрядов может управлять работой  $N$  ключей, при этом для каждого ключа используется свой независимый разряд.

Таким образом, для реализации  $N$  значений параметра  $C$  количество ключей должно быть не меньше  $N$ .

#### 2. Режим группового переключения

В момент **Н** группа ключей  $S_1, S_2, \dots, S_k$  замкнута (разомкнута), а остальные — разомкнуты (замкнуты).

В момент **Б** ключ  $S_{k+1}$  должен замкнуться (разомкнуться). В этом случае управляющий сигнал будет иметь вид:

$$2^{n-1}2^{n-2} \dots 2^{k+1}2^k 2^{k-1} \dots 2^2 2^1 2^0 = 00 \dots 011 \dots 111 \text{ или} \\ 11 \dots 100 \dots 000.$$



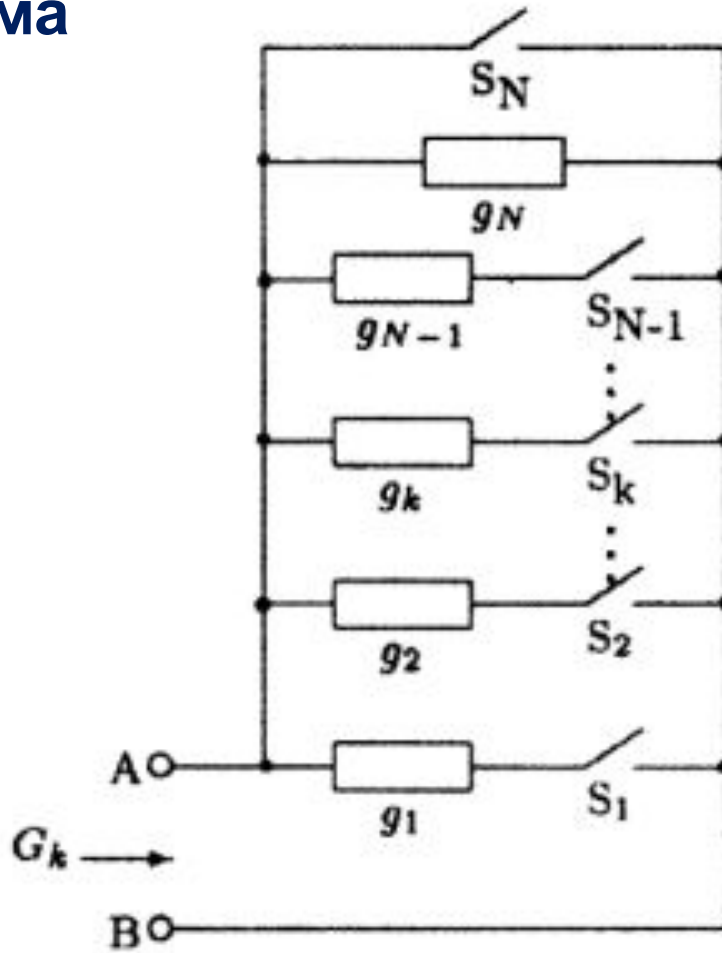


#### 2. Режим группового переключения

- ✓ Для реализации всех  $N$  значений  $C_k$  соответствующих  $k = 1, 2, \dots, N$ , потребуется  $N$  комбинаций управляющего сигнала.
- ✓ Следовательно, минимальное значение  $n$  опять равно  $N$ . Сигнал из  $N$ -разрядов может управлять работой  $N$  ключей, для каждого из которых используется свой независимый разряд.
- ✓ Таким образом, для реализации  $N$  значений параметра  $C$  количество ключей должно быть не меньше  $N$ .

**Вывод:** в обоих режимах переключения требуется как минимум  $N$  ключей для получения  $N$  значений параметра  $C$ .

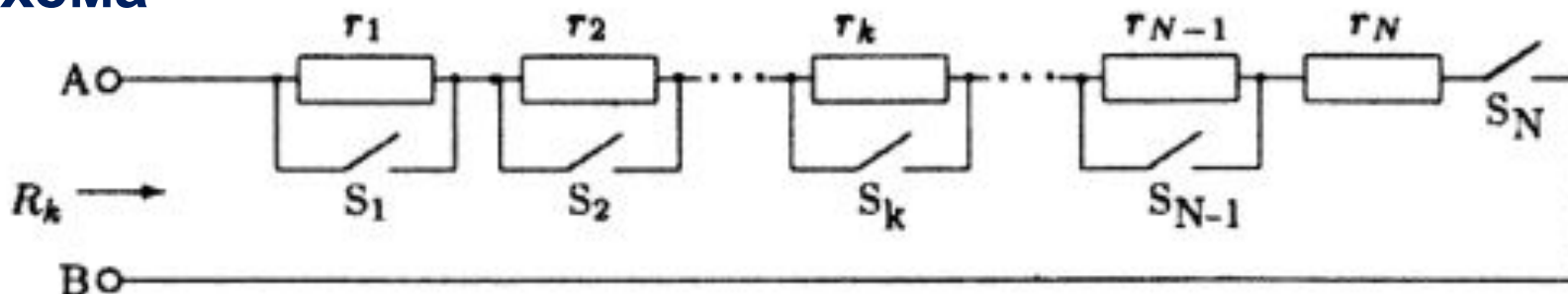
## программируемых сопротивлений

1) Параллельная  
схема

В параллельной схеме все последовательные группы, состоящие из сопротивления с ключом, включены в схему параллельно

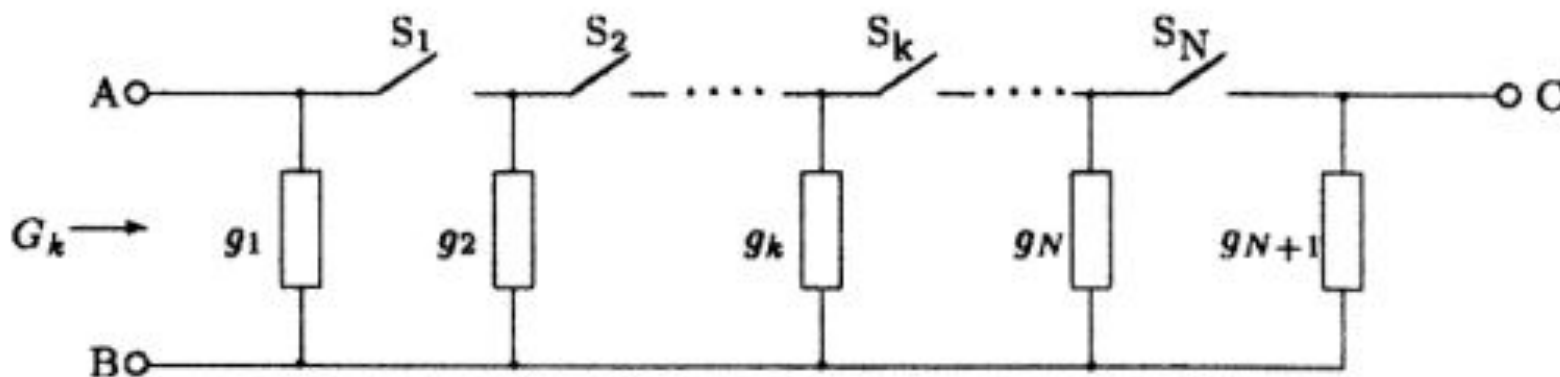


## 2) Последовательная схема



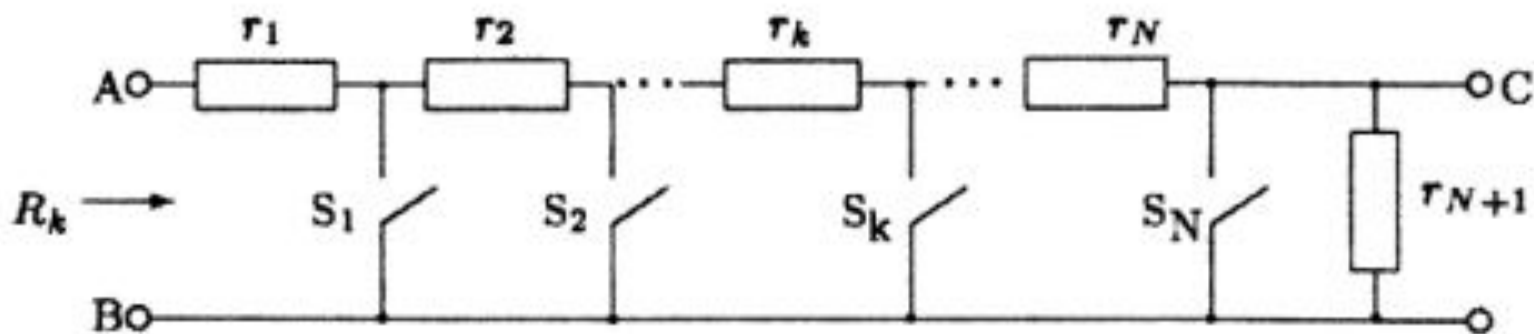
В последовательной схеме все параллельные группы из резистора и ключа соединены последовательно

## 3) Многозвенная схема из G-цепочек



Один из концов каждого резистора соединен общим проводом

## 4) Многозвенная схема из R-цепочек



общим является один из концов всех ключей

Предполагаем, что все рассматриваемые схемы имеют минимальную реализацию программно-управляемых сопротивлений и могут работать в 2-х вышерассмотренных режимах переключения. Рассмотрим **параллельную** схему и схему из **G-цепочек**, для остальных приведем только результаты.

# Минимальная реализация схем для режима одиночного переключения

## Лекция 9

### Параллельная схема

В момент времени  $\mathbf{H}$  все выключатели

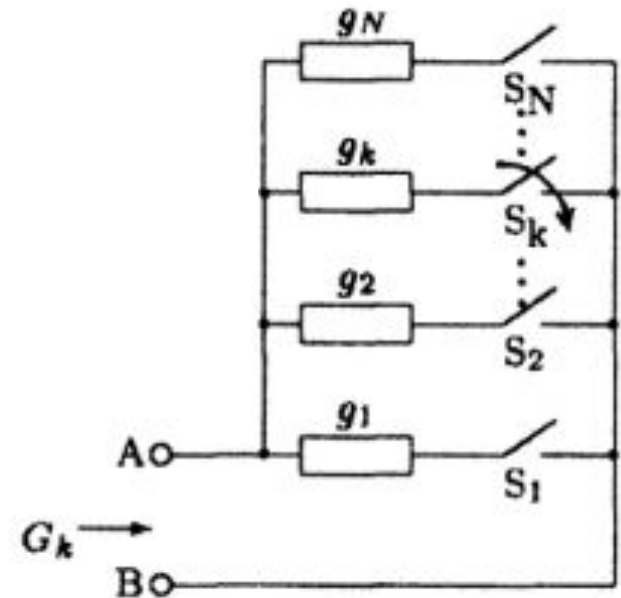
В схеме реализуется следующая

пр

$$G_k = \begin{cases} g_k + g_N, & 1 \leq k \leq N-1 \\ \infty, & k = N. \end{cases}$$

□ Каждое значение  $G_k$  соответствует конкретному  $k=1, 2, \dots, N-1$ .

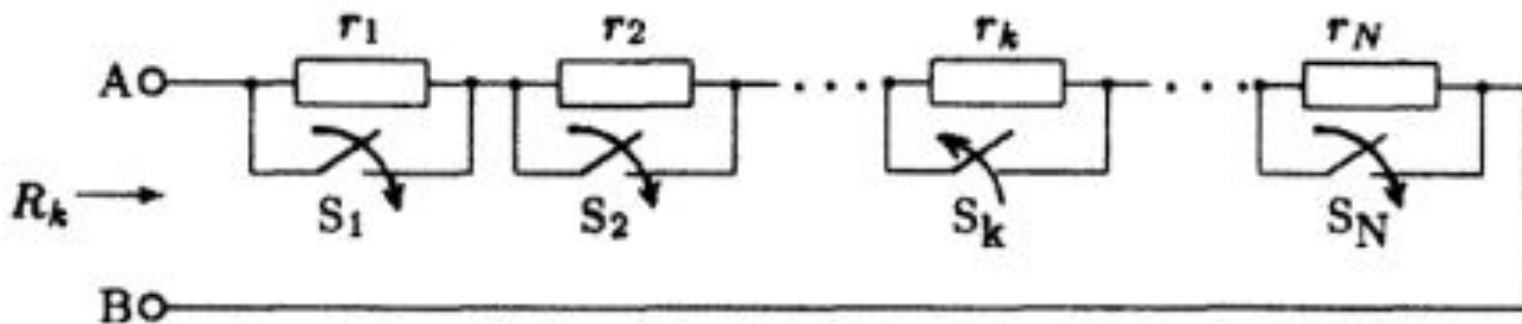
□ Проводимость  $g_N$  появляется в виде дополнительного члена при любых значениях  $k$ , поэтому от  $g_N$  можно избавиться, заменив каждое значение  $g_k$  на  $g_N$ .



- ✓ Частный случай  $g_N = \infty$  получается при замене ключа на последовательное соединение ключа и резистора, проводимость которого равна  $\infty$ .
- ✓ Таким образом, для момента  $N$  проводимость параллельной схемы, работающей в режиме одиночного переключения, может быть определена как:

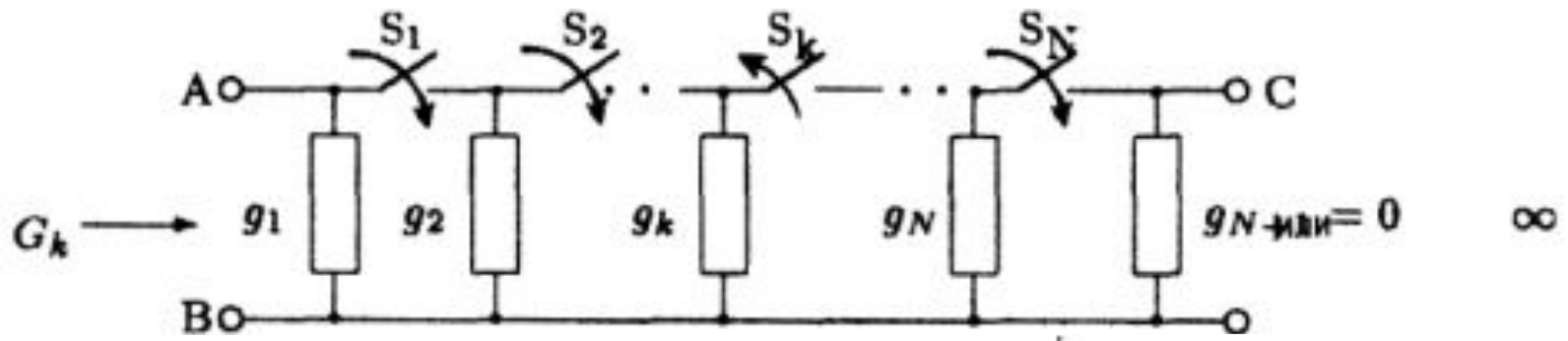
$$G_k = g_k, \quad 1 \leq k \leq N.$$

## Последовательная схема



Для момента  $N$   
справедливо:

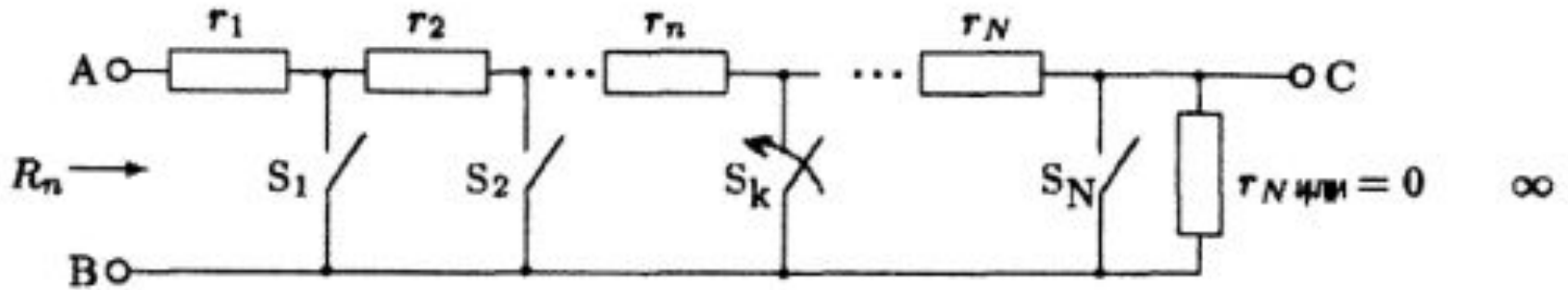
$$R_k = r_k, \quad 1 \leq k \leq N.$$



Тогда для момента  $N$   
справедливо:

$$G_k = \sum_{i=1}^k g_i, \quad 1 \leq k \leq N.$$

## Схема R-цепочек



Для момента  $N$   
справедливо:

$$R_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad 1 \leq k \leq N.$$

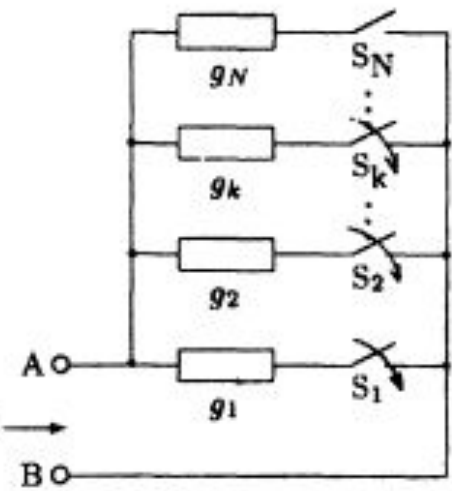
# Минимальная реализация схем для режима группового

## Лекция 9

### Параллельная схема

Пусть в момент времени  $\mathbf{H}$  ключи  $S_1, S_2, \dots, S_k$  замкнуты. В этом случае можно записать:

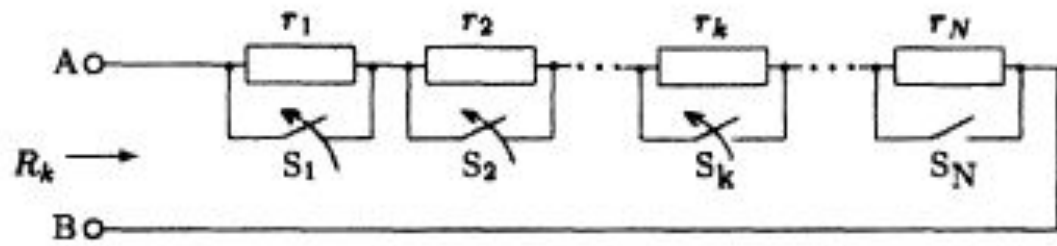
$$G_k = \sum_{i=1}^k g_i, \quad 1 \leq k \leq N.$$



### Последовательная схема

Для момента времени  $\mathbf{H}$  можно записать

$$R_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad 1 \leq k \leq N.$$





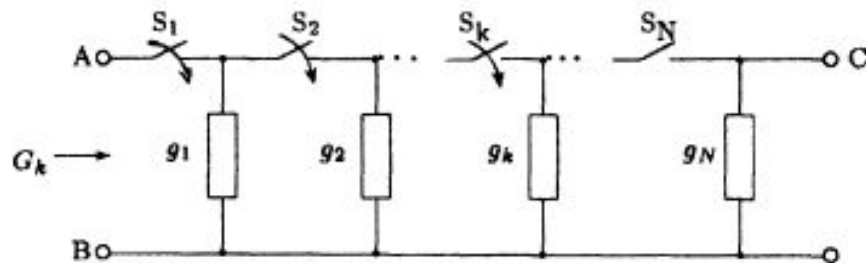
# Минимальная реализация схем для режима группового

## Лекция 9

### Схема G-цепочек

Пусть в момент времени  $N$  ключи  $S_1, S_2, \dots, S_k$  замкнуты. В этом случае можно записать

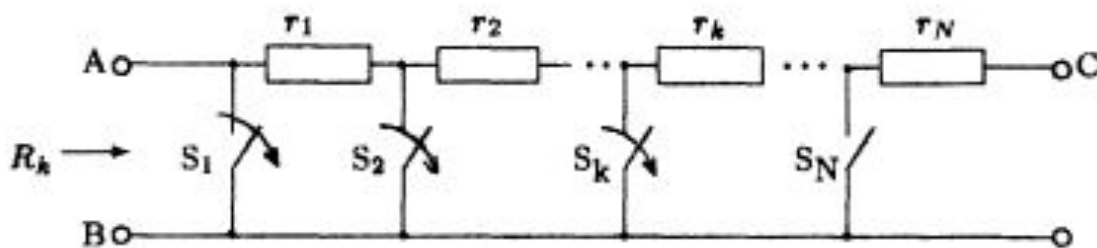
$$G_k = \sum_{i=1}^k g_i, \quad 1 \leq k \leq N.$$



### Схема R-цепочек

В момент времени  $N$  ключи  $S_1, S_2, \dots, S_k$  разомкнуты. В этом случае:

$$R_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad 1 \leq k \leq N.$$



# Расчет программируемых *Лекция 9* сопротивлений / проводимостей

## А. Режим одиночного переключения

### 1) Параллельное / последовательное соединение

$$g_k = G_k, \quad 1 \leq k \leq N.$$

$$r_k = R_k, \quad 1 \leq k \leq N.$$

### 2) Схема G-цепочек

$$g_k = \begin{cases} G_k - G_{k-1}, & 2 \leq k \leq N \\ G_1, & k = 1 \end{cases}.$$

### 3) Схема R-цепочек

$$r_k = \begin{cases} R_k - R_{k-1}, & 2 \leq k \leq N \\ R_1, & k = 1 \end{cases}, \quad \text{при } R_k > R_{k-1}.$$

## Б. Режим группового переключения

### 1) Параллельное соединение / Схема G-цепочек

$$g_k = \begin{cases} G_k - G_{k-1}, & 2 \leq k \leq N \\ G_1, & k = 1 \end{cases}.$$

### 2) Последовательное соединение / Схема R-цепочек

$$r_k = \begin{cases} R_k - R_{k-1}, & 2 \leq k \leq N \\ R_1, & k = 1 \end{cases}, \quad \text{при } R_k > R_{k-1}.$$

## Комментарии:

- Количество используемых резисторов будет уменьшаться на единицу для каждого последующего значения сопротивления (проводимости), изменяющегося от  $0$  до  $\infty$ .
- Если  $N$  значений сопротивлений (проводимости) определить в виде арифметической прогрессии с разностью  $d$  и первым членом, равным  $0$  или  $d$ , в схемах (**G**- и **R**-цепочек для режима одиночного переключения) можно использовать резисторы одинакового номинала.
- Использование резисторов одного номинала является большим достоинством таких схем при изготовлении, при настройке параметров, при компенсации разбаланса, связанного с изменениями температуры и старением.

- Как при одиночном, так и при групповом режиме переключения требуется преобразование двоичного кода в код, пригодный для управления ключами.
- Поскольку каждый ключ имеет два положения ЗАМКНУТ/РАЗОМКНУТ, то для реализации  $N$  комбинаций переключения требуется  $\log_2 N$  ключей. Таким образом, для программирования  $N$  значений сопротивлений (проводимостей) необходимо использовать  $\log_2 N$  ключей и  $\log_2 N$  резисторов. Это справедливо для параллельной и последовательной схем.
- Однако, при одиночном режиме переключения *независимыми* будут только  $\log_2 N$  значений сопротивлений (проводимости), остальные значения будут зависимыми от них.

## сопротивлений замкнутых ключей

- Во всех параллельных схемах для компенсации сопротивления  $R_{sk}$  замкнутого ключа  $S_k$  можно уменьшить значение последовательного с ним сопротивления на величину  $R_{sk}$ .
- Пусть все ключи схемы R-цепочек в замкнутом состоянии обладают одинаковым стабильным сопротивлением  $R_s$ . Влияние этого сопротивления может быть скомпенсировано заменой резистора  $r_1$ , на резистор с номиналом  $r_1 - R_s$ .
- Если ключи на схеме R-цепочек в замкнутом состоянии обладают разным сопротивлением  $R_{sk}$ , их влияние компенсируется уменьшением значений сопротивлений  $R_k$  на величину  $R_{sk}$  для всех  $k$  в диапазоне:  $1 \leq k \leq N$ .

## Программируемые делители

- ✓ Если в многозвенной схеме на основе  $G$ -цепочек  $g_{N+1} = 0$ , то она реализует следующее значение проводимости:

$$G_{AB} + G_{BC} = \sum_{k=1}^n g_k = G_T.$$

Схема будет работать в этом случае как **программируемый токовый делитель**.

- ✓ Если в многозвенной схеме на основе  $R$ -цепочек  $r_{N+1} = \infty$ , то она реализует следующее значение сопротивления:

$$R_{AB} + R_{BC} = \sum_{k=1}^n r_k = R_T.$$

В этом случае схема работает как **программируемый делитель напряжения**.

# Задание для самостоятельной работы

1. Разработайте схемы для получения наборов сопротивлений:

а) 0, 1, 2, 3, ... 15

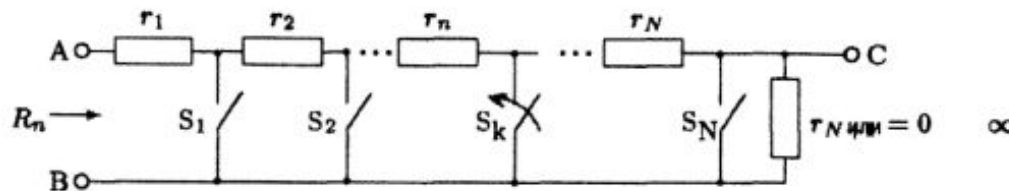
б) 1, 10, 100, 1000

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:**

a)



## 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 9

1	2	3	4	5

