

## ОПТИМАЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЕКОДИРУЮЩИХ СЕТОК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОД-ТОК ДВОИЧНО-ДЕСЯТИЧНЫХ СИСТЕМ СЧИСЛЕНИЯ

Показываются основные принципы построения декодирующих сеток (ДС) для преобразователей код-ток (ПКТ) двоично-десятичных систем счисления (ДДСС). Предложены оптимальные структуры декодирующих сеток для ПКТ ДДСС.

The subject of the article is about basic principles of creating scale transform circuits in current D/A conversion (DAC) schemes for the binary-coded decimal numbers (BCD). Optimal transform circuits for BCD DAC was also given.

### 1. Введение

Преобразователи код-ток (ПКТ) широко используются в цифровой измерительной аппаратуре (в аналого-цифровых преобразователях АЦП последовательного счёта и поразрядного уравнивания), для формирования управляющих сигналов в системах автоматического управления и регулирования, а также в цифро-аналоговых вычислительных комплексах (гибридных вычислительных системах).

Декодирующие сетки для ПКТ – это сумматоры токов (последовательного типа или комбинированные) [1,2,3,4,5], у которых коэффициенты передач  $k_i$  ( $i = \overline{1, n-1}$ ) пропорциональны весам разрядов декодируемого числа  $g_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ).

Как известно, для сумматора токов последовательного типа значения сопротивлений резисторов  $R_{i,i+1}$  ( $i = \overline{1, n}$ ) пропорциональны разностям требуемых значений коэффициентов передач  $k_i$  ( $i = \overline{1, n-1}$ ) и  $k_{i+1}$  ( $i = \overline{2, n}$ ), т.е с учётом того, что  $k_{n+1} = 0$  получаем

$$\begin{cases} R_{i,i+1} \sim k_i - k_{i+1} \quad (i = \overline{1, n-1}); \\ R_{n,n+1} \sim k_n. \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, сопротивления резисторов последовательной декодирующей сетки для ПКТ определяется по формулам:

$$\begin{cases} R_{i,i+1} \sim g_i - g_{i+1} \quad (i = \overline{1, n-1}); \\ R_{n,n+1} \sim g_n. \end{cases} \quad (2)$$

Рассматривая ДС для ДДСС необходимо рассмотреть особенности таких систем счисления.

Предположим, что  $m$  – количество десятичных разрядов (количество тетрад), соответственно  $n = 4m$  – количество двоичных разрядов.

### 2. ДС для ПКТ ДДСС 8421

В цифровой части вычислительной системы при использовании двоично-десятичных кодов наиболее часто используют коды ДДСС 8421.

Рассмотрим пример построения схемы ДС для ПКТ ДДСС 8421 при  $n = 12, m = 3$ .

Как известно для ДДСС 8421  $g_k = 8 \cdot 10^{-k}, g_{k+1} = 4 \cdot 10^{-k}, g_{k+2} = 2 \cdot 10^{-k}$  и  $g_{k+3} = 1 \cdot 10^{-k}$  ( $k = \overline{1, m}$ ).

Таким образом, с учётом вышесказанного, расчёт сопротивлений резисторов  $R_{i,i+1}$  ( $i = \overline{1, n}$ ) последовательной ДС ПКТ ДДСС 8421 должен осуществляться по формулам:

$$\begin{cases} R_{4k-3,4k-2} \sim 4 \cdot 10^{-k} \quad (k = \overline{1, m}), \\ R_{4k-2,4k-1} \sim 2 \cdot 10^{-k} \quad (k = \overline{1, m}), \\ R_{4k-1,4k} \sim 1 \cdot 10^{-k} \quad (k = \overline{1, m}), \\ R_{4k,4k+1} \sim 0.2 \cdot 10^{-k} \quad (k = \overline{1, m-1}), \\ R_{n,n+1} = R_{4m,4m+1} = R_{4m-1,4m} \sim 1 \cdot 10^{-m}. \end{cases} \quad (3)$$

Например, при выборе коэффициента пропорциональности  $2.5R$ , можно получить следующие значения сопротивлений резисторов последовательной ДС:  $R_{12} = R, R_{23} = R \cdot 2^{-1}, R_{34} = R \cdot 2^{-2}, R_{45} = 0.1 \cdot R \cdot 2^{-1}$ ,

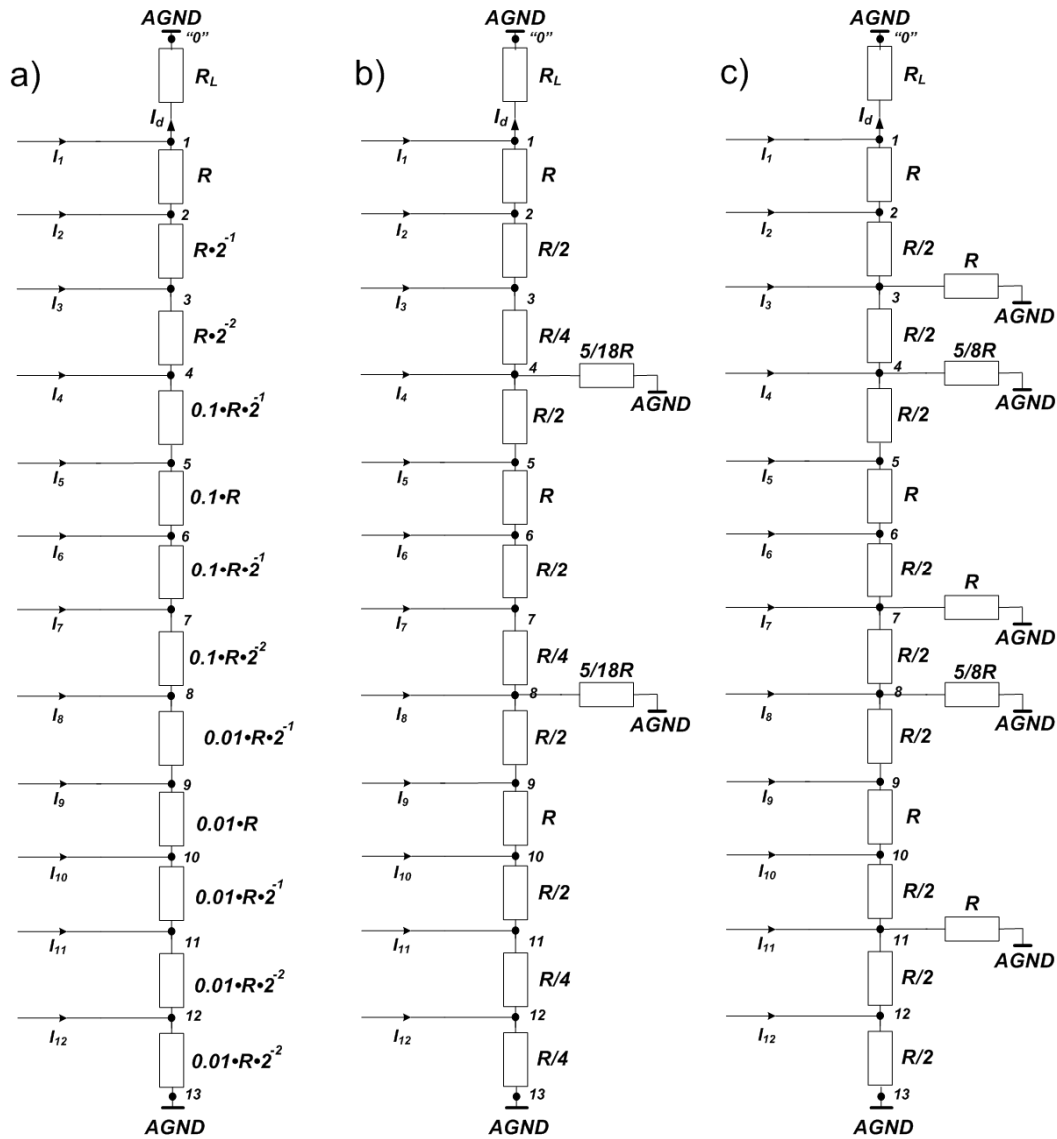


Рис. 1. Декодирующие сетки ПКТ ДДСС 8421.

$$\begin{aligned}
 R_{56} &= 0.1 \cdot R, \quad R_{67} = 0.1 \cdot R \cdot 2^{-1}, \quad R_{78} = 0.1 \cdot R \cdot 2^{-2}, \\
 R_{89} &= 0.01 \cdot R \cdot 2^{-1}, \quad R_{910} = 0.01 \cdot R, \\
 R_{10,11} &= 0.01 \cdot R \cdot 2^{-1}, \quad R_{11,12} = 0.01 \cdot R \cdot 2^{-2}, \\
 R_{12,13} &= 0.01 \cdot R \cdot 2^{-2}.
 \end{aligned}$$

Для данных значений весов разрядов получаются следующие значения резисторов параллельной ДС:  $R_1 = R$ ,  $R_2 = 2R$ ,  $R_3 = 4R$ ,  $R_4 = 8R$ ,  $R_5 = 10R$ ,  $R_6 = 20R$ ,  $R_7 = 40R$ ,  $R_8 = 80R$ .

Последовательная структура такой ДС [2,6] приведена на рис. 1а. Отметим, что в такой ДС большое количество разных номиналов резисторов ( $4m$  без учета  $R_L$ ), большой разброс номиналов резисторов

( $R_{max} / R_{min} = 4 * 10^m$ ) и общее количество резисторов  $n + 1$ .

Для уменьшения разброса номиналов и уменьшения количества номиналов резисторов необходимо использовать эквивалентные преобразования структуры сумматора токов последовательного типа включением резисторов утечки  $R_{4k}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ) через каждую тетраду.

При этом определяют эквивалентные значения сопротивлений резисторов  $R_{eqs}$  ( $s = \overline{1, n}$ ), выбирают значения  $C_s$  ( $s = \overline{1, n}$ ), и рассчитывают значения сопротивлений резисторов утечки  $R_s$  ( $s = \overline{1, n}$ ), включенных в  $s$ -ую точку, по формуле:

$$R_s = \frac{C_s}{C_{s-1}} \cdot R_{eqs} \quad (s = \overline{1, n}), \quad (4)$$

где  $R_{eqs}$  – это эквивалентное сопротивление части схемы, начиная с резистора  $R_{s,s+1}$  и заканчивая  $R_{n,n+1}$ , а  $C_s$  – это некоторый постоянный коэффициент, показывающий во сколько раз необходимо увеличить сопротивления всех резисторов ниже места включения резистора утечки  $R_s$ .

Если включить резисторы утечки  $R_{4k}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ) через каждую тетраду и выбрать  $C_{4k} = 10$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ), то  $R_{eq4k} = R \cdot 10^{-k+1}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ) и исходя из (4), сопротивления резисторов утечки будут равны  $R_{4k} = 5R/18 \cdot 10^{-k+1}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ). А с учётом того, что сопротивление резисторов ниже включённого резистора утечки  $R_s$  ( $s = \overline{1, n}$ ) увеличиваются в  $C_{4k}$  раз, то  $R_{4k} = 5R/18$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ). Схема такой комбинированной ДС ПКТ ДДСС 8421 представлена на рис. 1б.

Приведенная ДС в общем случае имеет всего 4 разных номиналов резисторов, разброс номиналов резисторов  $R_{max}/R_{min} = 4^m$  (без учета  $R_L$ ) и общее количество резисторов  $5m-1$ . Такие минимальные ДС на данный момент считаются наиболее оптимальными и наиболее часто используются [2,6].

Если кроме резисторов утечки  $R_{4k}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ) через каждую тетраду включить резисторы утечки  $R_{4k-1}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ), и выбрать  $C_{4k-1} = 2$ , а  $C_{4k} = 5$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ).

При этом  $R_{eq4k-1} = 2^{-1} \cdot R \cdot 10^{-k+1}$  ( $k = \overline{1, m}$ ),  $R_{4k-1} = 2 \cdot R_{eq4k-1} = 2 \cdot R \cdot 10^{-k+1}$  ( $k = \overline{1, m}$ ),  $R_{eq4k} = 0.25 \cdot R \cdot 10^{-k+1}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ), то воспользовавшись формулой (4) получаем, что  $R_{4k} = 5/4R_{eq4k} = 5/16 \cdot R \cdot 10^{-k+1}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ), а с учётом того, что  $C_{4k-1} = 2$ ,  $R_{4k} = 5/8 \cdot R \cdot 10^{-k+1}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ).

Соответствующая схема оптимальной ДС ПКТ ДДСС 8421 приведена на рис. 1с.

Такая ДС содержит всего 3 разных номиналов резисторов (без учета  $R_L$ ) и разброс номиналов резисторов  $R_{max}/R_{min} = 1,6$  при общем количестве резисторов (в общем слу-

чае)  $6m-2$ . Следовательно, предложенная структура ДС является наиболее оптимальной.

### 3. ДС для ПКТ ДДСС 3321.

Для повышения точности в ПКТ ДДСС часто используют промежуточное преобразование кода ДДСС 8421 в код ДДСС 2421 (код Айкена) или в код ДДСС 3321. Рассмотрим оптимальные структуры ДС ДДСС 2421.

Рассмотрим структуры ДС ДДСС 3321. Для такой ДДСС  $g_k = g_{k+1} = 3 \cdot 10^{-k}$ ,  $g_{k+2} = 2 \cdot 10^{-k}$  и  $g_{k+3} = 1 \cdot 10^{-k}$  ( $k = \overline{1, m}$ ), и значения сопротивления резисторов следует рассчитывать исходя из следующей системы:

$$\begin{cases} R_{4k-3,4k-2} = 0 \quad (k = \overline{1, m}), \\ R_{4k-2,4k-1} \sim 1 \cdot 10^{-k} \quad (k = \overline{1, m}), \\ R_{4k-1,4k} \sim 1 \cdot 10^{-k} \quad (k = \overline{1, m}), \\ R_{4k,4k+1} \sim 0.7 \cdot 10^{-k} \quad (k = \overline{1, m-1}), \\ R_{n,n+1} = R_{4m,4m+1} = R_{4m-1,4m} \sim 1 \cdot 10^{-m}. \end{cases} \quad (5)$$

Соответствующие значения сопротивлений, рассчитанные с помощью (5), для такой ДС (для коэффициента пропорциональности  $10R$ ) будут следующие:  $R_{12} = 0$ ,  $R_{23} = R_{34} = R$ ,  $R_{45} = 0.7R$ ,  $R_{56} = 0$ ,  $R_{67} = R_{78} = R \cdot 10^{-1}$ ,  $R_{89} = 0.7R \cdot 10^{-1}$ ,  $R_{910} = 0$ ,  $R_{10,11} = R_{11,12} = R_{12,13} = R \cdot 10^{-2}$ .

Схема соответствующей стандартной ДС (при  $n = 12, m = 3$ ) для ПКТ ДДСС 3321 представлена на рис. 2а.

В такой ДС в общем случае большое количество разных номиналов резисторов ( $2m-1$  без учета  $R_L$ ), большой разброс номиналов резисторов ( $R_{max}/R_{min} = 10^{m-1}$ ) и большое количество резисторов ( $3m$  без учета  $R_L$ ).

Для уменьшения разброса номиналов и уменьшения количества номиналов используются эквивалентные преобразования структуры. Если включить резисторы утечки  $R_{4k+1}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ) через каждую тетраду и выбрать  $C_{4k+1} = 10$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ), тогда  $R_{eq4k+1} = 3R \cdot 10^{-k}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ) и сопротивления резисторов утечки, рассчитанные в соответствии с (4), будут равны

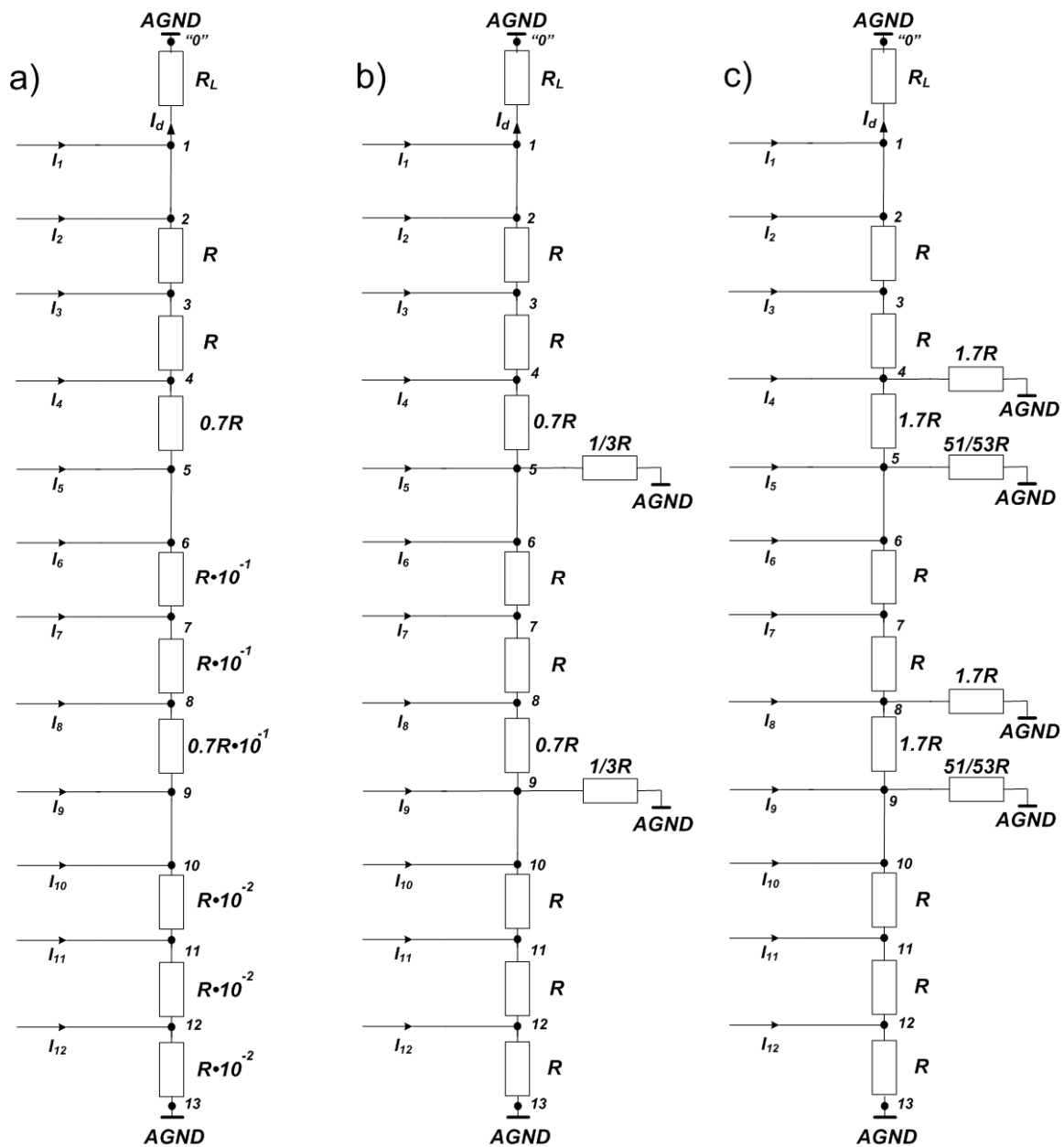


Рис. 2. Декодирующие сетки ПКТ ДДСС 3321.

$$R_{4k+1} = 10/9R_{eq4k+1} = 1/3 \quad (k = \overline{1, m-1}). \quad (6)$$

Схема такой известной комбинированной ДС ПКТ ДДСС 3321 приведена на рис. 2б.

В такой ДС 3 разных номинала резисторов, разброс номиналов резисторов  $R_{max}/R_{min} = 3$  и общее количество резисторов -  $4m - 1$ .

Для получения оптимальной структуры комбинированной ДС следует включить резисторы утечки  $R_{4k}$  ( $k = \overline{1, m}$ ) ( $R_4, R_8$  и т.д.) и выбрать  $C_5, C_9$  и т.д. равным  $70/17$ , и  $C_4, C_8$  и т.д. равным  $17/7$ . Исходя из (4) можно получить значения резисторов утечки  $R_{4k}$  и  $R_{4k+1}$ , равные соответственно  $1.7R$  и

$51/53R$ . Полученная оптимальная структура ДС представлена на рис. 2с.

Эта оптимальная ДС состоит из трех номиналов (без учета  $R_L$ ), имеет минимальный разброс номиналов сопротивлений резисторов ( $\approx 1.77$ ) и общее количество резисторов (в общем случае) -  $4m + 1$ .

#### 4. ДС для ПКТ ДДСС 2421 (4221)

Декодирующие сетки для ПКТ ДДСС 2421 могут быть реализованы только при рассмотрении ДДСС 2421 как ДДСС 4221 с изменением управления в первых двух разрядах каждой тетрады, то есть  $[a_1]$  управляет током  $I_2$ , а  $[a_2]$  управляет током  $I_1$  и т.д, где  $[a_i]$  - соответствующий цифровой сигнал.

Такое требование «упорядочения весов» ( $g_{i+1} \leq g_i (i = \overline{1, n-1})$ ) обусловлено спецификой построения ДС для любых ПКТ. Рассмотрим ДДСС 4221.

Как известно из формулы (2), расчёт сопротивлений резисторов последовательной ДС ПКТ ДДСС 4221 должен осуществляться по формулам:

$$\begin{cases} R_{4k-3,4k-2} \sim 2 \cdot 10^{-k} (k = \overline{1, m}), \\ R_{4k-2,4k-1} = 0 (k = \overline{1, m}), \\ R_{4k-1,4k} \sim 1 \cdot 10^{-k} (k = \overline{1, m}), \\ R_{4k,4k+1} \sim 0.6 \cdot 10^{-k} (k = \overline{1, m-1}), \\ R_{n,n+1} = R_{4m,4m+1} = R_{4m-1,4m} \sim 1 \cdot 10^{-m}. \end{cases} \quad (7)$$

Соответствующие значения сопротивлений резисторов (для коэффициента пропорциональности  $5R$ ) будут равны:  $R_{12} = R$ ,  $R_{34} = 0.5R$ ,  $R_{45} = 0.3R$ ,  $R_{56} = R \cdot 10^{-1}$ ,  $R_{78} = 0.5R \cdot 10^{-1}$ ,  $R_{89} = 0.3R \cdot 10^{-1}$ ,  $R_{910} = R \cdot 10^{-2}$ ,  $R_{11,12} = R_{12,13} = 0.5R \cdot 10^{-2}$ ,  $R_{23} = R_{67} = R_{10,11} = 0$ .

Схема последовательной ДС ПКТ ДДСС 4221 (при  $n = 12, m = 3$ ) представлена на рис. 3а.

В такой ДС большое количество разных номиналов резисторов ( $3m - 1$  без учета  $R_L$ ), большой разброс номиналов резисторов ( $R_{max} / R_{min} = 2 \cdot 10^{m-1}$ ) и общее количество резисторов  $3m$ .

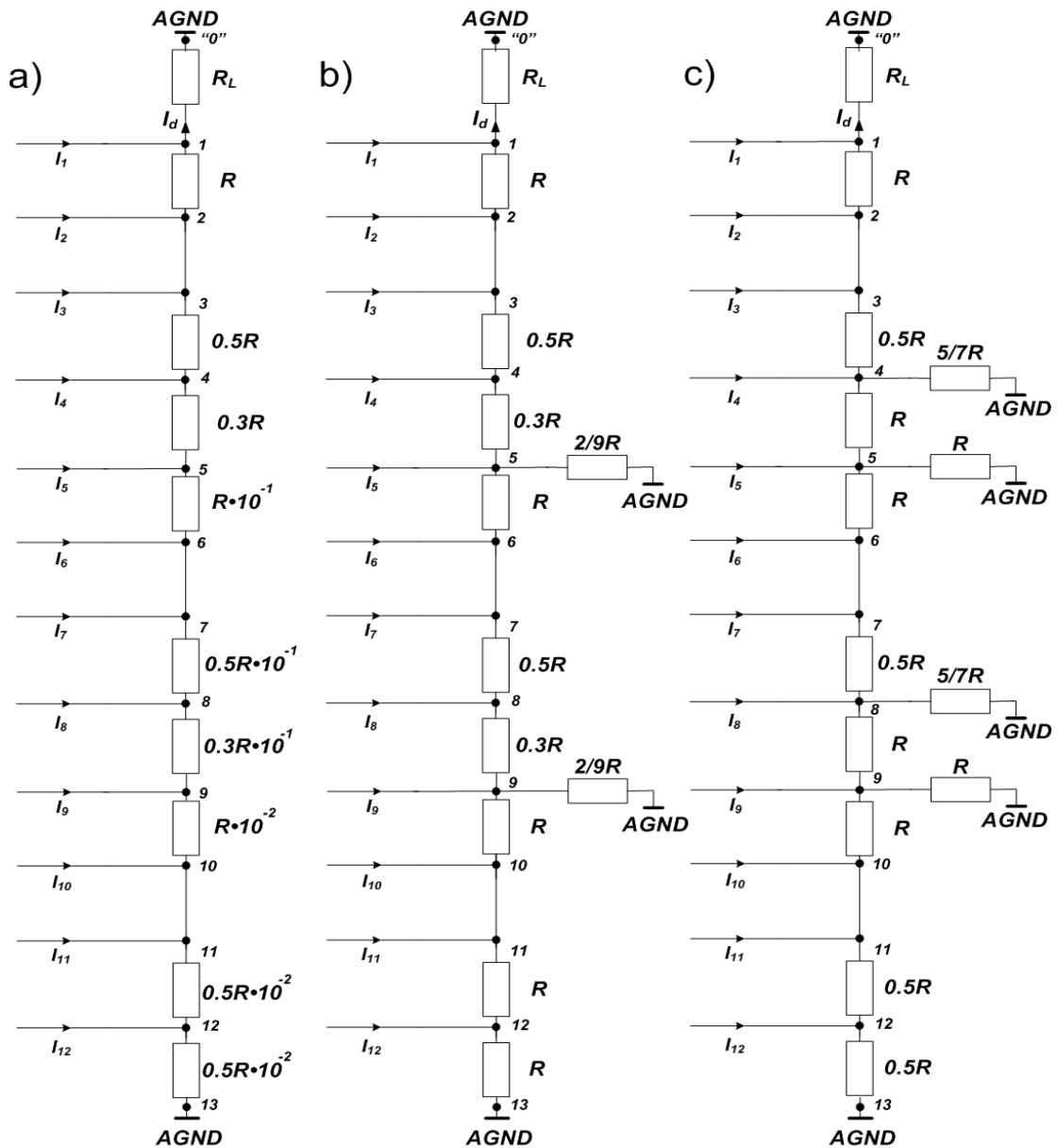


Рис. 3. Декодирующие сетки ПКТ ДДСС 2421 (4221).

Если включить резисторы утечки  $R_{4k+1}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ) через каждую тетраду и выбрать  $C_{4k+1} = 10$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ), тогда  $R_{eq4k+1} = 2R \cdot 10^{-k}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ) и сопротивления резисторов утечки, рассчитанные в соответствии с (4), будут равны  $R_{4k+1} = \frac{2}{9} R \cdot 10^{-m+1}$  ( $k = \overline{1, m-1}$ ) (соответственно  $R_5 = R_9 = 2/9$ ).

Соответствующая минимальная комбинированная ДС ПКТ ДДСС 4221 приведена на рис. 3б.

В такой ДС 4 разных номинала резисторов, разброс номиналов резисторов  $R_{max} / R_{min} = 4.5$  и общее количество резисторов –  $4m - 1$ .

Если воспользоваться формулой (4) и применить эквивалентное преобразование структуры включением резисторов утечки ( $R_4, R_8, R_5, R_9$  и т.д.) между тетрадами и внутри тетрады и выбрать  $C_5, C_9$  и т.д. равным 3,

и  $C_4, C_8$  и т.д. равным  $10/3$ , то можно получить оптимальную ДС ДДСС 4221.

Тогда сопротивления резисторов утечки будут равны  $R_{4k} = 5/7R \cdot 10^{-k+1}$   $R_{4k+1} = R \cdot 10^{-k}$ , ( $k = \overline{1, m-1}$ )

Оптимальная структура такой комбинированной ДС ПКТ ДДСС 4221 представлена на рис. 3с.

В такой ДС всего три номинала (без учета  $R_L$ ), при минимальном разбросе номиналов ( $R_{max} / R_{min} = 2$ ), и количестве резисторов –  $4m + 1$ .

### Выводы

Предложенные структуры ДС для ПКТ ДДСС являются оптимальными исходя из оценочной характеристики по трём параметрам: количество разных номиналов резисторов, разброс номиналов резисторов и количество резисторов используемых в структуре.

### Список литературы

1. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и цифро-аналоговых электронных устройств. Москва, 2005 г.
2. Гнатек Ю.Р. Справочник по цифроаналоговым и аналогоцифровым преобразователям. Москва, 1982 г.
3. Лебедев О.Н., Марцинкявичюс А.-Й.К. и др. Микросхемы памяти. ЦАП и АЦП. "КУБК-а" Москва, 1996г.
4. Сентурия С.Д., Уэдлок Б.Д. Электронные схемы и их применения, Издательство "МИР", Москва, 1977.
5. Raj Kamal. Digital Systems Principles and Design. Pearson Education India, 2007.
6. Корн Г., Корн Т., Электронные аналоговые и аналого-цифровые вычислительные машины, пер. с англ., М., 1967.