

**Ю. А. Виноградов**

**О синтезе  
четырёхзначных ква-  
зикомплементарных  
МОП-схем**

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:**  
Виноградов Ю. А. О синтезе четырёхзначных квазикомплементарных МОП-схем // Математические вопросы кибернетики. Вып. 8. – М.: Наука, 1999. – С. 298–300. URL: <http://library.keldysh.ru/mvk.asp?id=1999-298>

## О СИНТЕЗЕ ЧЕТЫРЕХЗНАЧНЫХ КВАЗИКОМПЛЕМЕНТАРНЫХ МОП-СХЕМ\*)

Ю. А. ВИНОГРАДОВ

(МОСКВА)

В технической реализации той или иной логико-математической идеи оптимальное решение оказывается, как правило, компромиссным. Инженерные оценки проекта — быстродействие, энергоэкономичность, помехозащищенность, технологичность будущей конструкции — являются сильнейшими селекторами, отбирающими из множества равноценных, казалось бы, математических решений лишь очень немногие [1]. Нередко удовлетворительного решения не находят вовсе.

В настоящей работе, целью которой является построение функционально полного в  $P_4$  базиса, реализуемого в МОП-структурах, этой стороне дела уделено необходимое внимание.

Быстродействие структур, реализующих  $k$ -значные функции, приблизится к наивысшему, ограниченному лишь физикой явлений — скоростями распространения, элементарными релаксациями и др., если состояния  $0, 1, \dots, k-1$  не будут связаны с временем\*\*).

Организация «безвременного» функционирования в  $k$ -значных МОП-структурах, управляемых электрическим полем и формирующих электрические напряжения на своих выходах, не оставляет выбора: каждому значению из  $\{0, 1, \dots, k-1\}$  должен быть поставлен в соответствие электрический потенциал — напряжение из  $\{U_0, U_1, \dots, U_{k-1}\}$ .

В современной МОП-технике значительный интервал напряжений, которые могут быть приложены к каналу исток–сток МОП-транзистора, —  $[0, U_{ис\max}]$  (где  $U_{ис\max} \geq 15$  В), и относительно малое напряжение отсечки затвор–исток —  $U_{зи\отс}$  (где  $U_{зи\отс} \in [0, 5; 1]$  В; при  $U_{зи} < U_{зи\отс}$  проводимость канала исток–сток транзистора практически равна нулю), позволяют «рассставить» на интервале  $[0, U_{ис\max}]$  напряжения  $U_0, U_1, U_2, U_3$  (в  $P_4$  — константы  $0, 1, 2, 3$ ) так, что функционирующие в  $P_4$  МОП-структуры будут иметь и достаточно высокую помехозащищенность в любом из своих состояний. Особый интерес в МОП-технике представляют КМОП-структуры\*\*\*)

\*) Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 99-01-01111)

\*\*\*) Время присутствует, например, в частотных и фазоимпульсных кодировках.

\*\*\*) Полевые транзисторы, составляющие МОП- и КМОП-структуры, работают в так называемом режиме обогащения (он обеспечивается специальной технологией их изготовления), отличающемся тем, что напряжения  $U_{зи}$  и  $U_{ис}$  оказываются в одном интервале, что позволяет связывать сток одного транзистора с затвором другого непосредственно. КМОП-техника привлекательна почти нулевым энергопотреблением в статике, большим входным и малым выходным сопротивлениями функциональных элементов во всех режимах. МОП- и КМОП-структуры технологичны: число трудоемких операций, которые должны быть выполнены при изготовлении кремниевого чипа, относительно невелико.

(комплементарные МОП-),  $n$ - и  $p$ -канальные транзисторы которых включены так, как это показано на примере простейшей из них — в КМОП-паре (рис. 1).

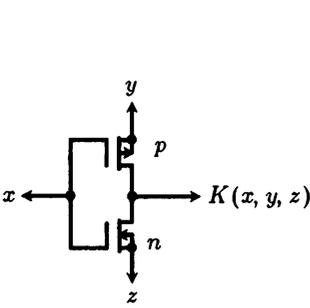


Рис. 1

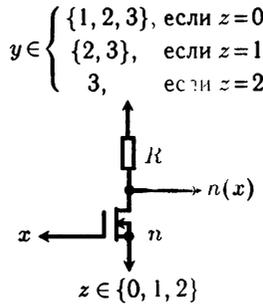


Рис. 2

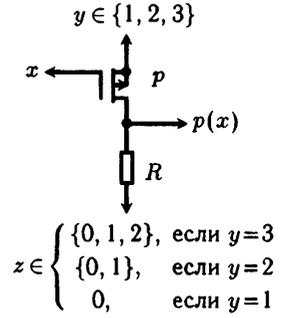


Рис. 3

Рассмотрим базисный набор, состоящий из КМОП-пары (ее четырехзначная модель приведена в табл. 1) и резисторных  $n$ МОП-инверторов (рис. 2, табл. 2) и  $p$ МОП-инверторов (рис. 3, табл. 3), реализующих все возможные здесь инверсии (источниками питания резисторных инверторов служат генераторы констант 0, 1, 2, 3).

Таблица 1

$x$	1	2	3	0	1	2	3	0	2	3	0	3	0	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	
$y$	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	3	3	1	1	1	2	2	2	3	3	3	2	2	3	3	1	1	2	2	3	3	3
$z$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	
$K(x, y, z)$	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	3	0	1	1	2	2	1	1	3	3	1	2	2	2	3	3	3	2	3	3	3	

Примечание:  
 1) наборы  $\{x, y, z\}$ , не указанные в таблице, недопустимы;  
 2)  $y, z \in \{0, 1, 2, 3\}$ ,  $K$  — истоки КМОП-пар — могут быть соединены лишь с генераторами констант и выходами (объединенными стоками) КМОП-пар.

Таблица 2

$x$	$n_1(x)$	$n_2(x)$	$n_3(x)$	$n_4(x)$	$n_5(x)$	$n_6(x)$
0	3	3	2	1	2	3
1	0	3	0	0	2	3
2	0	1	0	0	1	3
3	0	1	0	0	1	2

Примечание: выход  $n$ МОП-инвертора может быть соединен лишь с  $x$ -входами.

Таблица 3

$x$	$p_1(x)$	$p_2(x)$	$p_3(x)$	$p_4(x)$	$p_5(x)$	$p_6(x)$
0	3	2	3	1	2	3
1	3	2	3	0	2	3
2	3	0	3	0	1	3
3	0	0	1	0	1	2

Примечание: выход  $p$ МОП-инвертора может быть соединен лишь с  $x$ -входами.

Является ли базис

$$B = \{0, 1, 2, 3, K(a, b, c), n_1(x), n_2(x), n_3(x), n_4(x), n_5(x), n_6(x), \\ p_1(x), p_2(x), p_3(x), p_4(x), p_5(x), p_6(x))\}$$

функционально полным в  $P_4$ ?

Поскольку  $K$ -функция существенно зависит более чем от одной переменной и принимает все значения, то о полноте базиса  $B$  можно судить по числу одноместных функций из  $P_4$ , порождаемых суперпозициями базисных функций (см. теорему Слупецкого). Это число нетрудно установить в коротком компьютерном эксперименте. Базис  $B$  обладает функциональной полнотой, так как в суперпозициях были получены все одноместные функции из  $P_4$ .

В таких же коротких переборах найдем  $n$ - и  $p$ -функции, без которых (без любой из них) базис теряет полноту. Это функции:  $n_1(x)$ ,  $n_2(x)$ ,  $p_1(x)$  и  $p_2(x)$ . Они необходимы. Их достаточность также выяснялась экспериментально: базис проверялся на полноту без восьми функций:  $n_3(x)$ ,  $n_4(x)$ ,  $n_5(x)$ ,  $n_6(x)$ ,  $p_3(x)$ ,  $p_4(x)$ ,  $p_5(x)$  и  $p_6(x)$ . Они оказались лишними.

Таким образом был получен легко реализуемый в МОП-структурах и функционально полный в  $P_4$  базис  $\{0, 1, 2, 3, K(a, b, c), n_1(x), n_2(x), p_1(x), p_2(x)\}$ , содержащий лишь нужные функции. Легко видеть, что все его  $n$ - и  $p$ -элементы используются лишь в качестве входных, а основную нагрузку в синтезе принимают на себя  $K$ -элементы, в строгих суперпозициях которых и будет решаться та или иная задача. Энергопотребление структуры, реализующей в этой технике (назовем ее *квазикомплементарной* — ККМОП-техникой) функцию  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  в  $P_4$  не превысит  $3\epsilon n$ , где  $\epsilon$  — энергопотребление резисторного МОП-инвертора в активном (энергопотребляющем) состоянии.

В строго комплементарной технике — в базисе  $\{0, 1, 2, 3, K(a, b, c)\}$  — может быть синтезирована КМОП-структура, реализующая в  $P_4$  функцию  $K(K(x, 3, 1), K(K(x, 3, 2), 3, 2), K(K(x, 1, 0), 1, 0)) \equiv x$ . Этот КМОП-повторитель [2], практически снимающий ограничения на число нагрузок функциональных элементов (и так немалое — несколько десятков), — важный инструмент в инженерном синтезе четырехзначных ККМОП-схем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов Ю. А. О синтезе трехзначных МДП-схем // Математические вопросы кибернетики. Вып. 3. — М.: Наука, 1991. — С. 187–198.
2. Виноградов Ю. А. Авторское свидетельство № 1422399.

Поступило в редакцию 12 VII 1999