

УДК 621.372.63

Н. А. Филинюк, д. т. н., проф.; А. А. Лазарев, к. т. н., доц.;
Л. Б. Лищинская, д. т. н.

ОЦЕНКА РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ОДНОТРАНЗИСТОРНЫХ КОНВЕЙЕРОВ ТОКА

В статье обоснована система основных рабочих параметров конвейеров тока. Определены аналитические зависимости между рабочими и формальными параметрами конвейера тока, что позволяет по значениям четырех Y-параметров транзистора определить основные рабочие и формальные параметры однотранзисторного конвейера тока. Проведены исследования основных рабочих параметров однотранзисторных конвейеров тока на биполярном и полевом транзисторах, что позволило определить преимущества и недостатки рассмотренных конвейеров тока.

Ключевые слова: конвейер тока, Y-параметры транзистора, критериальная оценка эффективности.

Введение

Сегодня интенсивно развивается схемотехника информационных устройств на основе токовых конвейеров [1]. Токовый конвейер – базовый элемент для построения электронных схем, который в 1968 году предложили Седра (Sedra A. S.) и Смит (Smith K. C.) [2]. В 1970 году они предложили усовершенствованный вариант конвейера тока второго поколения ССП (Current Conveyor of the Second generation) [3], который оказался более продуктивным блоком для построения электронных схем. Конвейер тока является базовым блоком, на основе которого можно реализовать все схемы, реализующиеся на операционных усилителях (масштабные преобразователи, интеграторы, дифференциаторы, сумматоры, конверторы и инверторы сопротивлений, активные фильтры и т. д.) [4]. В 90-х годах прошлого столетия обновился интерес к токовым конвейерам, поскольку возникла необходимость в более высокочастотных и энергоэффективных схемах. Токовый подход обеспечивает определенные преимущества по сравнению с работой с напряжениями, а именно: большее быстродействие и частотный диапазон, так как схемы могут работать на частотах близких к граничной частоте f_T транзисторов; нет необходимости обеспечивать большие значения коэффициентов усиления, поскольку для токовых конвейеров коэффициент передачи тока равен единице; большая точность и простота, так как нет необходимости в использовании прецизионных резисторов для преобразования токов в напряжения – и схемы могут быть построены только на транзисторах; имеют меньшую потребляемую мощность, поскольку в этом случае схемы менее чувствительны к нелинейным искажениям, возникающим при работе с малыми напряжениями.

Стремление получить параметры конвейера тока близкие к идеальным привело к построению многотранзисторных конвейеров тока. Сравнительный анализ их эффективности показал, что такие многотранзисторные схемы по некоторым параметрам (энергопотребление, частотный диапазон работы) хуже, чем однотранзисторные схемы [5].

Поэтому актуальной является оценка рабочих параметров однотранзисторных конвейеров тока и определение наиболее оптимальных решений построения однотранзисторных конвейеров тока.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является аналитическая оценка основных рабочих параметров однотранзисторных конвейеров тока с целью их сравнительного анализа и поиска наиболее эффективных схемотехнических решений.

Для достижения этой цели решают следующие задачи:

1. Обоснование основных рабочих параметров конвейеров тока.

2. Нахождение аналитической зависимости между рабочими и формальными параметрами конвейера тока.

3. Исследование рабочих параметров однотранзисторных конвейеров тока в диапазоне частот и поиск наиболее эффективных решений.

Обоснование основных параметров конвейеров тока

На первоначальном этапе решают задачу обоснования основных рабочих параметров конвейеров тока второго поколения (ССП) (рис. 1), который в идеальном случае описывают системой уравнений (1), представленных на рис. 1 [6]:

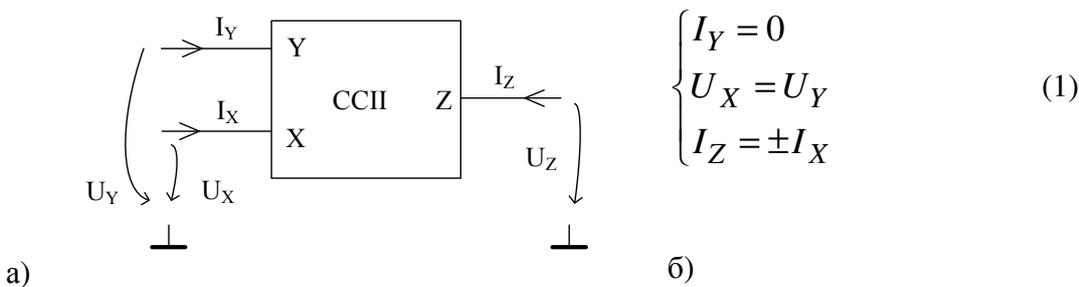


Рис. 1. Условное обозначение ССП (а) и система уравнений (б); I_X, I_Y, I_Z – токи электродов и значения напряжений U_X, U_Y, U_Z между клеммами и общей шиной в конвейере тока второго поколения

Исходя из этой системы, определим следующие основные параметры ССП:

- коэффициент передачи тока: $K_I = \frac{I_Z}{I_X}$ (для идеального ССП $K_I = 1$);
- коэффициент передачи напряжения: $K_U = \frac{U_X}{U_Y}$ (для идеального ССП $K_U = 1$);
- проводимость входа Y: $Y_Y = \frac{I_Y}{U_Y}$ (для идеального ССП $Y_Y = 0$);
- сопротивление входа X: $Z_X = \frac{U_X}{I_X}$ (для идеального ССП $Z_X = 0$);
- проводимость выхода Z: $Y_Z = \frac{I_Z}{U_Z}$ (для идеального ССП $Y_Z = 0$).

Граничная частота коэффициента передачи тока f_{K_I} – это частота, на которой модуль коэффициента передачи тока K_I уменьшится в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с низкочастотным значением K_{I0} .

Граничная частота коэффициента передачи напряжения f_{K_U} – это частота, на которой модуль коэффициента передачи напряжения K_U уменьшится в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с низкочастотным значением K_{U0} .

Аналитическая зависимость между рабочими и формальными параметрами конвейера тока

Система уравнений (1) характеризует идеальный конвейер тока. Реальный конвейер тока характеризует система уравнений вида:

$$\begin{cases} I_Y = a_{11}U_Y + a_{12}I_X + a_{13}U_Z \\ U_X = a_{21}U_Y + a_{22}I_X + a_{23}U_Z, \\ I_Z = a_{31}U_Y + a_{32}I_X + a_{33}U_Z \end{cases} \quad (2)$$

где a_{ij} – элементы квадратной матрицы, $i=1..3, j=1..3$.

В результате анализа системы уравнений (2) находим аналитические зависимости между элементами a_{ij} и рабочими параметрами конвейера тока:

$$\begin{aligned} \dot{K}_I = \frac{I_Z}{I_X} = a_{32}(U_Y = 0, U_Z = 0) \quad \dot{K}_U = \frac{U_X}{U_Y} = a_{21}(I_X = 0, U_Z = 0), \\ Y_Y = \frac{I_Y}{U_Y} = a_{11}(I_X = 0, U_Z = 0) \quad Z_X = \frac{U_X}{I_X} = a_{22}(U_Y = 0, U_Z = 0), \\ Y_Z = \frac{I_Z}{U_Z} = a_{33}(U_Y = 0, I_X = 0). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, для нахождения рабочих параметров ССП нужно измерить комплексные a_{ij} -параметры. Они могут быть как безразмерными, так и иметь размерность проводимости или сопротивления. Для их измерения нужно обеспечить режимы короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ) в различных комбинациях, что на высоких и сверхвысоких частотах представляет собой значительную техническую проблему, поэтому предлагаем описывать конвейер тока Y_{ij} -параметрами, для измерения которых необходимо обеспечить лишь режим короткого замыкания [7]. Для этого конвейер тока рассматриваем как независимый трёхполюсник, который описывает система уравнений

$$\begin{cases} I_Y = Y_{11}U_Y + Y_{12}U_X + Y_{13}U_Z \\ I_X = Y_{21}U_Y + Y_{22}U_X + Y_{23}U_Z. \\ I_Z = Y_{31}U_Y + Y_{32}U_X + Y_{33}U_Z \end{cases} \quad (4)$$

Решив одновременно системы уравнений (2) и (3), находим аналитические зависимости между системами a_{ij} - и Y_{ij} -параметрами:

$$\begin{aligned} a_{11} = Y_{11} - \frac{Y_{12}Y_{21}}{Y_{22}}, \quad a_{12} = Y_{12} / Y_{22}, \quad a_{13} = Y_{13} - \frac{Y_{12}Y_{23}}{Y_{22}}, \\ a_{21} = -\frac{Y_{21}}{Y_{22}}, \quad a_{22} = 1 / Y_{22}, \quad a_{23} = -\frac{Y_{23}}{Y_{22}}, \\ a_{31} = Y_{31} - \frac{Y_{32}Y_{21}}{Y_{22}}, \quad a_{32} = Y_{32} / Y_{22}, \quad a_{33} = Y_{33} - \frac{Y_{32}Y_{23}}{Y_{22}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, рассчитав или измерив Y_{ij} -параметры конвейера тока, находим его a_{ij} -параметры и рабочие параметры (3).

Процесс нахождения a_{ij} -параметров можно упростить. Y_{ij} -параметры, которые входят в (4), являются параметрами неопределенной матрицы, для которой справедливо уравнение [8]:

$$\sum_{i=1}^m y_{ij} = 0 (j = 1, 2, \dots, m); \quad \sum_{j=1}^m y_{ij} = 0 (i = 1, 2, \dots, m). \quad (6)$$

Используя Y-параметры четырехполюсника, образованного путем заземления одного из электродов конвейера тока и условия (6), находим другие Y-параметры конвейера тока и на их основе рассчитываем его a_{ij} -параметры (5) и рабочие параметры (3) (табл. 1).

Таблица 1

Y-параметры и рабочие параметры конвейера тока

№ п/п	Матрица проводимости	Y-параметры матрицы	Рабочие параметры конвейера тока
С заземленным Z-электродом	$[Y_Z] =$ $= \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} =$ $= \begin{bmatrix} Y_{11}^Z & Y_{12}^Z \\ Y_{21}^Z & Y_{22}^Z \end{bmatrix}$	$Y_{13} = -(Y_{11} + Y_{12}) = -(Y_{11}^Z + Y_{12}^Z)$ $Y_{23} = -(Y_{21} + Y_{22}) = -(Y_{21}^Z + Y_{22}^Z)$ $Y_{31} = -(Y_{11} + Y_{21}) = -(Y_{11}^Z + Y_{21}^Z)$ $Y_{32} = -(Y_{12} + Y_{22}) = -(Y_{12}^Z + Y_{22}^Z)$ $Y_{33} = -(Y_{13} + Y_{23}) = Y_{11}^Z + Y_{12}^Z +$ $+ Y_{21}^Z + Y_{22}^Z$	$\dot{K}_I = \frac{-(Y_{12}^Z + Y_{22}^Z)}{Y_{22}^Z}$ $\dot{K}_U = -\frac{Y_{21}^Z}{Y_{22}^Z}$ $Y_Y = Y_{11}^Z - \frac{Y_{21}^Z Y_{12}^Z}{Y_{22}^Z}$ $Z_X = 1 / Y_{22}^Z$ $Y_Z = Y_{11}^Z + Y_{12}^Z + Y_{21}^Z + Y_{22}^Z -$ $-\frac{(Y_{12}^Z + Y_{22}^Z)(Y_{21}^Z + Y_{12}^Z)}{Y_{22}^Z}$
С заземленным X-электродом	$[Y_Z] =$ $= \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{13} \\ Y_{31} & Y_{33} \end{bmatrix} =$ $= \begin{bmatrix} Y_{11}^X & Y_{12}^X \\ Y_{21}^X & Y_{22}^X \end{bmatrix}$	$Y_{12} = -(Y_{11} + Y_{13}) = -(Y_{11}^X + Y_{12}^X)$ $Y_{32} = -(Y_{31} + Y_{33}) = -(Y_{21}^X + Y_{22}^X)$ $Y_{23} = -(Y_{13} + Y_{33}) = -(Y_{12}^X + Y_{22}^X)$ $Y_{21} = -(Y_{11} + Y_{31}) = -(Y_{11}^X + Y_{21}^X)$ $Y_{22} = -(Y_{12} + Y_{32}) = Y_{11}^X + Y_{12}^X +$ $+ Y_{21}^X + Y_{22}^X$	$\dot{K}_I = \frac{Y_{21}^X + Y_{22}^X}{Y_{11}^X + Y_{12}^X + Y_{21}^X + Y_{22}^X}$ $\dot{K}_U = \frac{Y_{11}^X + Y_{21}^X}{Y_{11}^X + Y_{22}^X + Y_{21}^X + Y_{12}^X}$ $Y_Y = Y_{11}^X -$ $-\frac{(Y_{11}^X + Y_{12}^X)(Y_{11}^X + Y_{21}^X)}{Y_{12}^X + Y_{22}^X + Y_{11}^X + Y_{21}^X}$ $Z_X = 1 / (Y_{22}^X + Y_{12}^X + Y_{21}^X + Y_{11}^X)$ $Y_Z = Y_{22}^X -$ $-\frac{(Y_{21}^X + Y_{22}^X)(Y_{12}^X + Y_{22}^X)}{Y_{11}^X + Y_{22}^X + Y_{21}^X + Y_{12}^X}$

С заземленным Y-электродом	$[Y_Z] =$ $= \begin{bmatrix} Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} =$ $= \begin{bmatrix} Y_{11}^X & Y_{12}^X \\ Y_{21}^X & Y_{22}^X \end{bmatrix}$	$Y_{12} = -(Y_{22} + Y_{32}) = -(Y_{11}^Y + Y_{21}^Y)$ $Y_{13} = -(Y_{23} + Y_{33}) = -(Y_{12}^Y + Y_{22}^Y)$ $Y_{21} = -(Y_{22} + Y_{23}) = -(Y_{11}^Y + Y_{12}^Y)$ $Y_{31} = -(Y_{32} + Y_{33}) = -(Y_{21}^Y + Y_{22}^Y)$ $Y_{11} = -(Y_{21} + Y_{31}) = Y_{11}^Y + Y_{12}^Y +$ $+ Y_{21}^X + Y_{22}^X$	$\dot{K}_I = \frac{Y_{21}^Y}{Y_{11}^Y}$ $\dot{K}_U = \frac{Y_{21}^Y + Y_{22}^Y}{Y_{11}^Y}$ $Y_Y = Y_{11}^Y + Y_{12}^Y + Y_{21}^Y + Y_{22}^Y -$ $- \frac{(Y_{11}^Y + Y_{21}^Y)(Y_{11}^Y + Y_{12}^Y)}{Y_{11}^Y}$ $Z_X = 1/Y_{11}^Y$ $Y_Z = Y_{22}^Y - \frac{Y_{21}^Y Y_{12}^Y}{Y_{11}^Y}$
----------------------------	---	---	---

Исследование рабочих параметров однотранзисторных конвейеров тока

В качестве простейших конвейеров тока можно использовать биполярные и полевые транзисторы (рис. 2) [6].

Для биполярного транзистора (рис. 2, а) $U_x = \frac{U_y}{(1 + (1/g_m R_x))}$, где g_m – крутизна

биполярного транзистора, R_x – сопротивление, подключенное к выводу X. Так как $g_m R_x \gg 1$, то $U_x \approx U_y$. $I_z = -\beta/(\beta + 1)I_x$, так как $\beta \gg 1$, то $I_z \approx -I_x$ [6]. Таким образом, с учетом (1) биполярный транзистор можно рассматривать как простейший конвейер тока с инверсией направления тока ССП⁻.

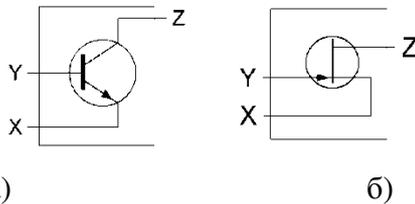


Рис. 2. Однотранзисторные конвейеры тока ССП⁻ на биполярном (а) и полевом (б) транзисторах

Аналогично для полевого транзистора (рис. 2, б) $U_x = \frac{U_y}{(1 + (1/g_m R_x))}$, где g_m – крутизна

полевого транзистора. Так как $g_m R_x \gg 1$, то $U_x \approx U_y$. $I_z \approx -I_x$. Таким образом, с учетом (1) полевой транзистор можно рассматривать как простейший конвейер тока с инверсией направления тока ССП⁻.

С целью сравнительной оценки рабочих параметров этих конвейеров тока проведено компьютерное моделирование и расчет их основных параметров.

Схемы, использованные для компьютерного моделирования работы однотранзисторных конвейеров тока на биполярном и полевом транзисторах, изображены на рис. 3. Моделирование выполнено в программе AWR Microwave Office 10. В схеме (рис. 3, а) использован биполярный транзистор 2SC5435 в режиме: $I_E = 2,4$ мА, $U_{KE} = 2,6$ В, граничная частота $f_T \approx 7$ ГГц. В схеме (рис. 3, б) использован полевой транзистор PMBF5484, $I_C = 2$ мА, $U_{3H} = -0,2$ В, $f_T \approx 220$ МГц.

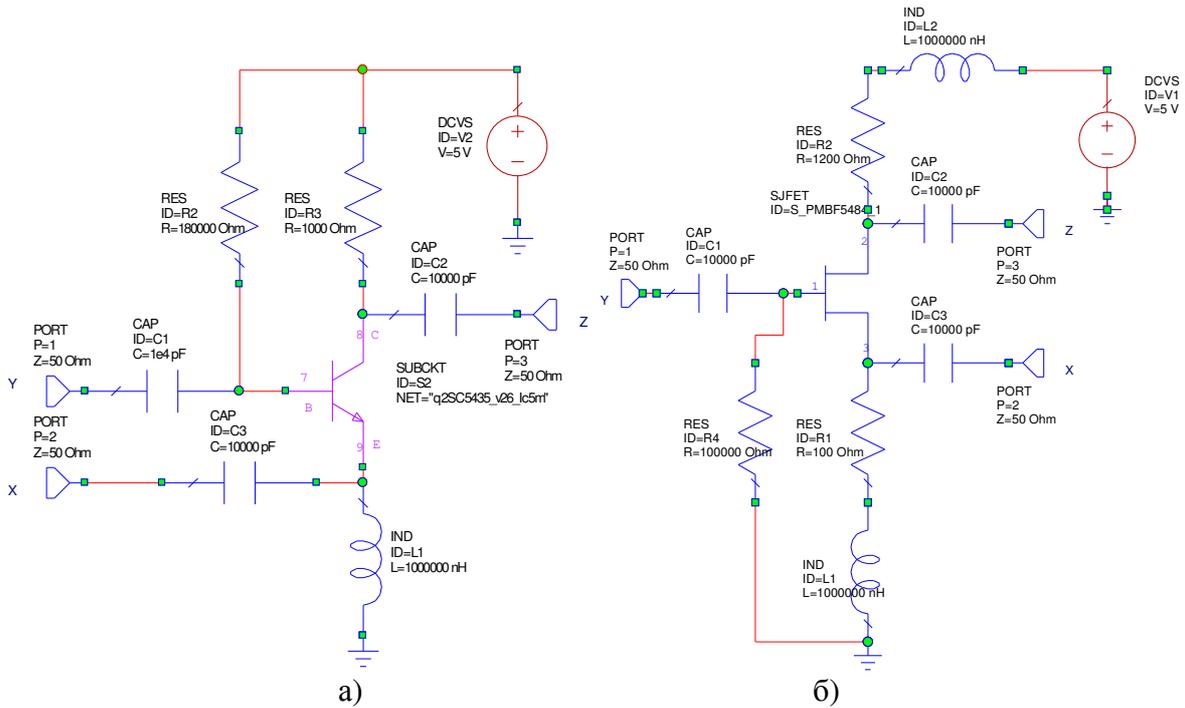


Рис. 3. Схемы однотранзисторных конвейеров тока на биполярном (а) и полевом (б) транзисторах

Для определения полной системы формальных a -параметров и рабочих параметров ССП необходимо определить значение лишь любых четырех Y -параметров неопределенной матрицы конвейера тока.

На рис. 4 и 5 приведены графики частотной зависимости параметров Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} , Y_{22} конвейеров тока на биполярном и полевом транзисторах в диапазоне частот от $0,001 f_T$ до f_T .

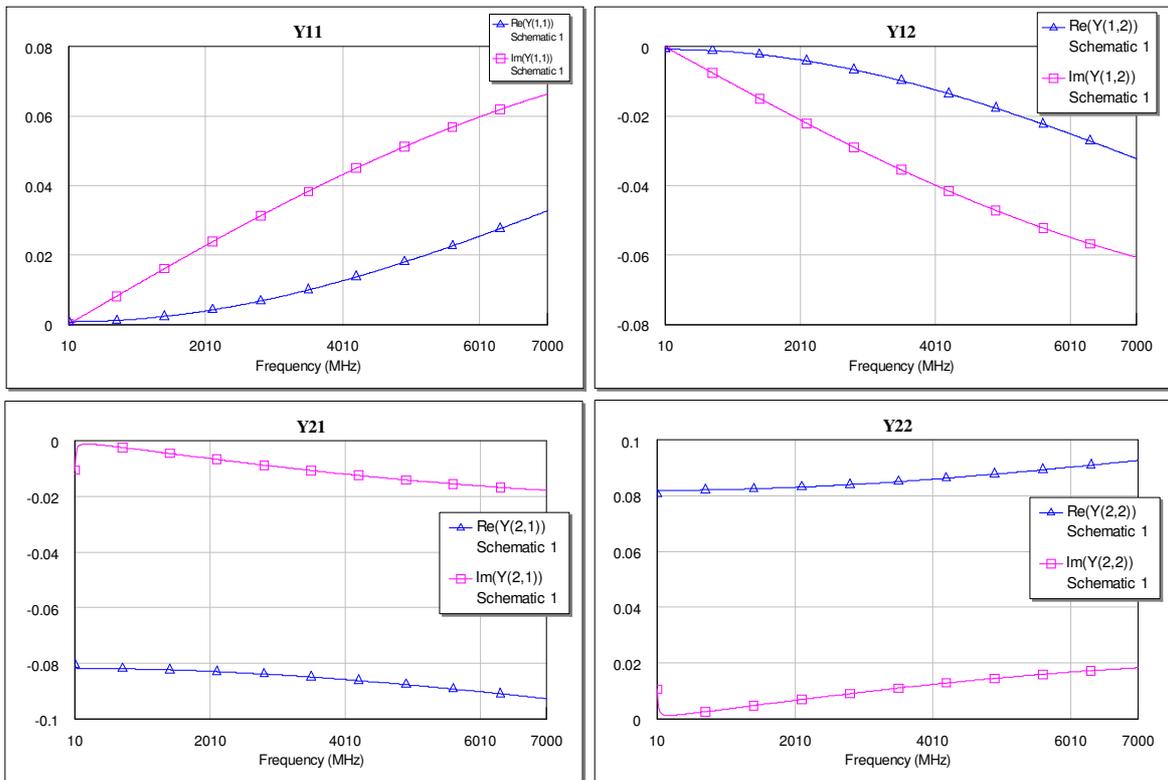


Рис. 4. Частотные зависимости Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} , Y_{22} – параметров ССП на биполярном транзисторе

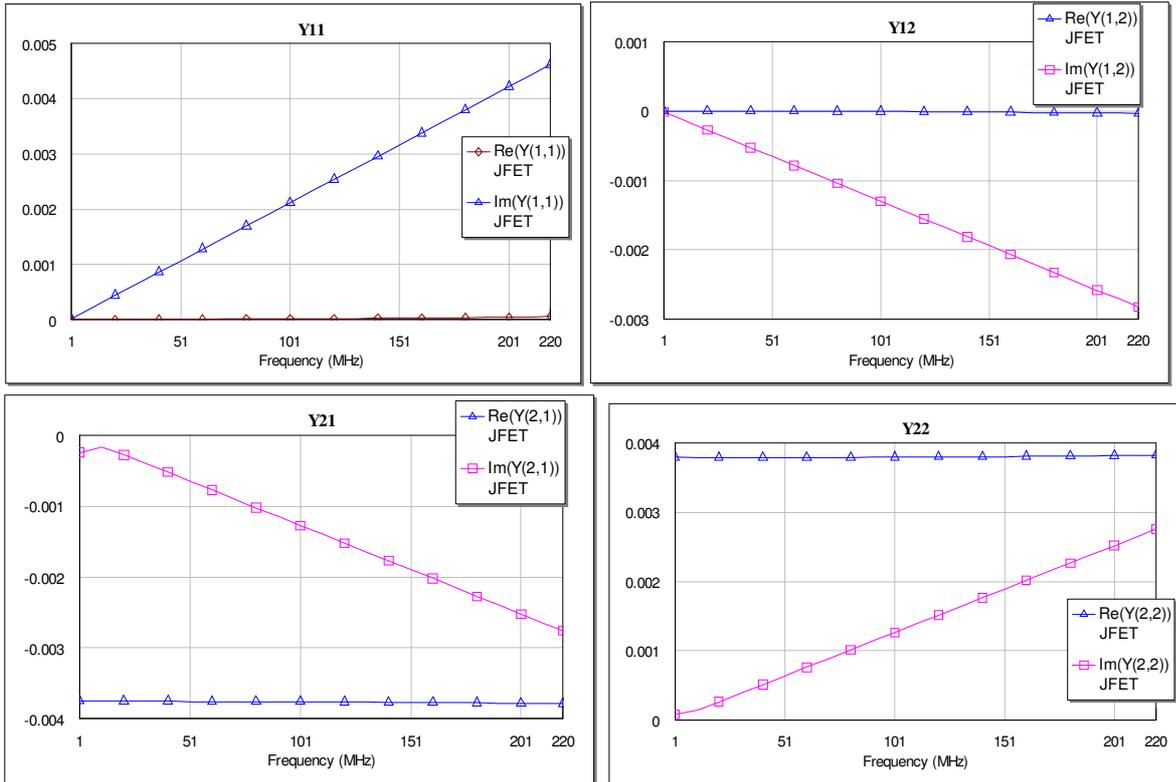


Рис. 5. Частотные зависимости Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} , Y_{22} – параметров ССП на полевом транзисторе

Используя значение Y -параметров ССП, рассчитывают частотные зависимости коэффициентов передачи тока и напряжения конвейера тока на биполярном и полевом транзисторах (рис. 6).

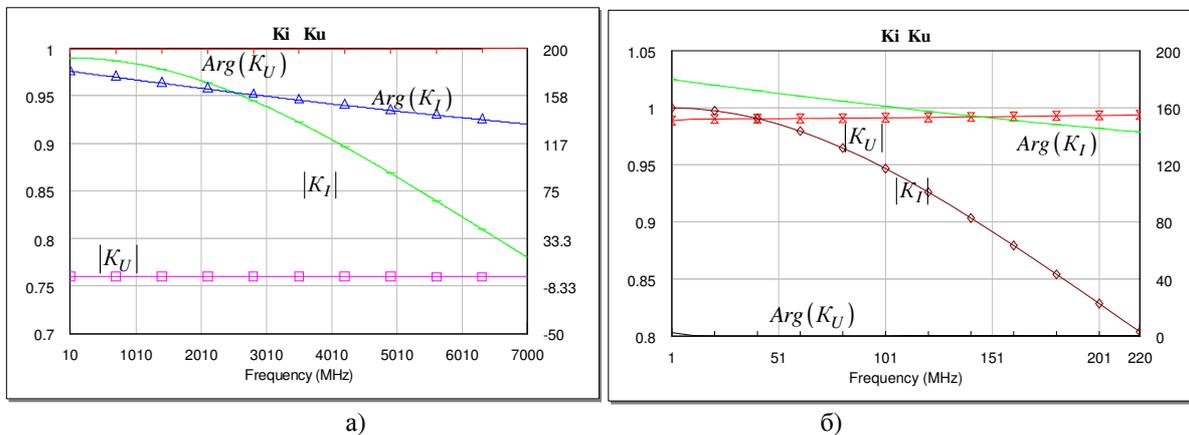


Рис. 6. Частотные зависимости фазы и модуля коэффициентов передачи тока K_I и напряжения K_U конвейера тока на биполярном (а) и полевом (б) транзисторах

Необходимо отметить, что данные значения коэффициентов передачи определены для режимов короткого замыкания на выводах Y и Z и холостого хода на X . При работе на нагрузку, например 50 Ом, значения коэффициентов уменьшаются.

При учете паразитных межэлектродных емкостей транзистора $C_{BK} = 0,25$ пФ, $C_{EK} = 0,25$ пФ, и индуктивности выводов данного транзистора $L_K = 0,6$ нГн, $L_B = 0,45$ нГн активная составляющая проводимости транзистора становится отрицательной на высоких частотах, что приводит к увеличению коэффициентов передачи тока и напряжения на данных частотах.

На рис. 7, 8 и 9 изображены частотные зависимости входной проводимости Y_Y , входного сопротивления Z_X и выходной проводимости Y_Z .

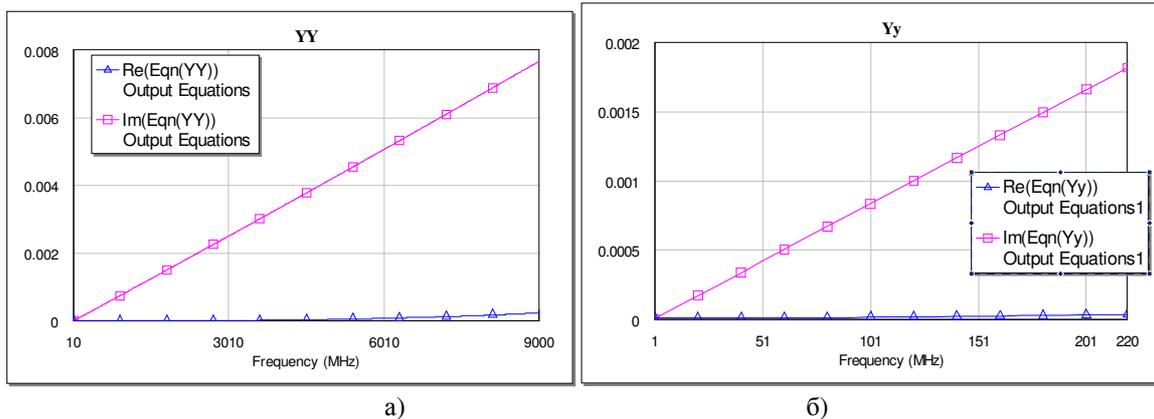


Рис. 7. Активная и реактивная составляющие исходной проводимости Y_Y конвейера тока на биполярном (а) и полевом (б) транзисторах

Согласно приведенным результатам компьютерного моделирования, биполярный и полевой транзисторы являются однотранзисторными конвейерами тока на частотах до f_T . Наличие индуктивности и емкостей выводов приводит к появлению отрицательного активного сопротивления, что делает конвейер тока потенциально неустойчивым и увеличивает значение коэффициентов передачи больше единицы.

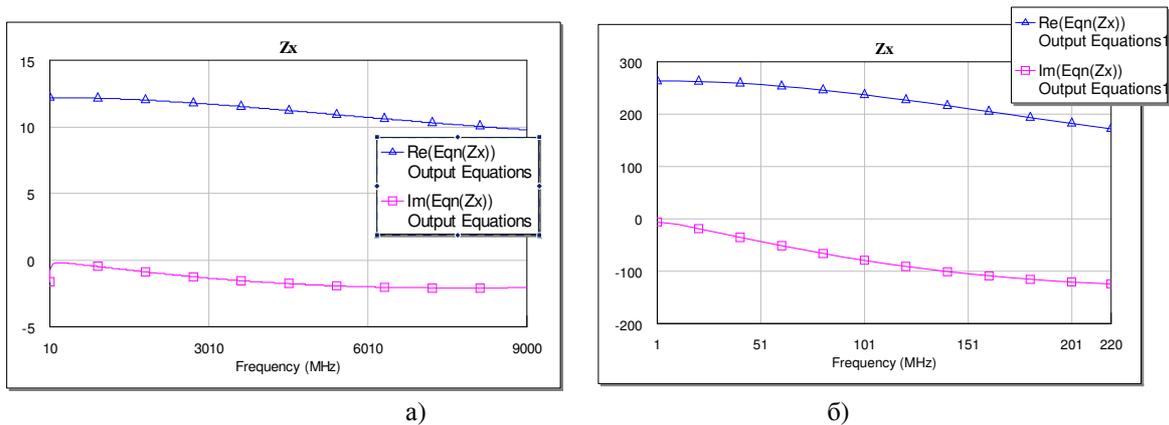


Рис. 8. Активная и реактивная составляющие входного сопротивления Z_X конвейера тока на биполярном(а) и полевом (б) транзисторах

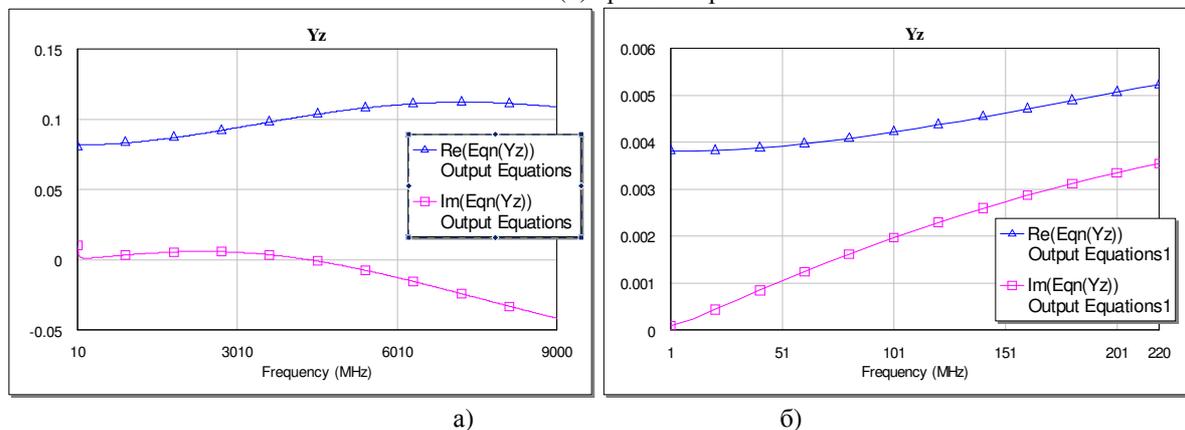


Рис. 9. Активная и реактивная составляющие выходной проводимости Y_Z конвейера тока на биполярном(а) и полевом (б) транзисторах

Проведем сравнительный анализ однотранзисторных конвейеров тока на биполярном и полевом транзисторах. В табл. 2 приведены рабочие параметры данных конвейеров тока на частоте $0,5f_T$. Оба конвейера тока могут работать на частотах близких к граничной частоте f_T транзисторов, однако коэффициент передачи тока немного больше (на 5...10 %) в полевом транзисторе, а коэффициент передачи напряжения – в биполярном вследствие большей крутизны g_m транзисторов. Также конвейер тока на полевом транзисторе имеет значительно большее (в 21 раз) входное сопротивление Z_X , что приводит к более сильному влиянию сопротивления нагрузки на коэффициент передачи напряжения K_U .

Таблица 2

Рабочие параметры конвейеров тока на базе биполярного и полевого транзисторов

Параметр	Биполярный конвейер тока	Полевой конвейер тока	Идеальный конвейер тока
K_I	0,92	0,94	1
K_U	0,999	0,99	1
Y_Y	0,003 См	0,009 См	0 См
E_{Y_Y}	0,87	0,69	1
Y_Z	0,098 См	0,0048 См	0 См
E_{Y_Z}	0,169	0,806	1
Z_X	11,6 Ом	247 Ом	0 Ом
E_{Z_X}	0,812	0,168	1
E	0,643	0,614	1

Критерии эффективности по проводимостям Y_Y , Y_Z и сопротивлению Z_X рассчитаны по формулам $E_Y = \frac{0,01}{0,01+Y}$, $E_Z = \frac{100}{100+Z}$, исходя из предположения, что эффективности 0,5 соответствует проводимость 0,02 См и сопротивление 50 Ом. Интегральный критерий эффективности рассчитан по формуле

$$E = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n E_i} \quad [5].$$

Исходя из полученных результатов, конвейер тока на биполярном транзисторе по интегральному критерию эффективности является немного лучше (на 5%), чем конвейер тока на полевом транзисторе, что объясняется немного большим значением коэффициента передачи напряжения K_U и меньшим значением входного сопротивления Z_X .

Выводы

1. Обоснована система основных рабочих параметров конвейеров тока, которая содержит коэффициент передачи тока K_I , коэффициент передачи напряжения K_U , проводимость входа Y_Y , сопротивление входа Z_X , проводимость выхода Y_Z , граничную частоту коэффициента передачи тока f_{K_I} , граничную частоту коэффициента передачи напряжения f_{K_U} , что позволило определить критерии для проведения сравнительного анализа эффективности однотранзисторных конвейеров тока на биполярном и полевом транзисторах.

2. Определены аналитические зависимости между рабочими и формальными параметрами конвейера тока, что позволяет по значениям четырех Y -параметров транзистора определить основные рабочие и формальные параметры однотранзисторного конвейера тока.

3. Проведены исследования основных рабочих параметров одно- транзисторных конвейеров тока на биполярном и полевом транзисторах, что позволило определить преимущества и недостатки данных конвейеров тока. Оба конвейера тока работают на частотах близких к граничной частоте f_T транзисторов, однако конвейер тока на биполярном транзисторе по интегральному критерию эффективности является немного лучше ($E = 0,643$), чем конвейер тока на полевом транзисторе ($E = 0,614$), что объясняется немного большим значением коэффициента передачи напряжения K_U и меньшим входным сопротивлением Z_X .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferri G. C. Low-voltage low-power CMOS current conveyors / G. Ferri, N. C. Guerrini. – Springer, 2010 – 226 p. – ISBN 1441953639, 978-1441953636.
2. Smith K. C. The current conveyors – a new circuit building block / K. C. Smith, A. S. Sedra // Proc. IEEE. – Aug. 1968. – Vol. 56. – P. 1368 – 1369.
3. Sedra A. S. A second-generation current conveyor and its applications / A. S. Sedra, K. C. Smith // IEEE Transactions on Circuit Theory. – Feb. 1970. – Vol. CT-17. – P. 132 – 134.
4. Sedra A. S. Current Conveyor Theory And Practice / In book Analogue IC design: the current-mode approach // A. S. Sedra, W. Gordon; під ред. С. Toumazou, F. J. Lidgley, D. Haigh. – IET, – 1993. – 646 p. - ISBN 0863412971, 9780863412974.
5. Филинюк Н. А. Критериальная оценка эффективности токовых конвейеров / Н. А. Филинюк, А. А. Лазарев, Л. Б. Лищинская, В. П. Стахов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 4 (8). – С. 17 – 21.
6. Current Conveyors. History, Theory, Application sand Implementation [Электронный ресурс] / P. Eloranta, C. Toumazou // CC.PPT. - 11.03.04. - Режим доступа: http://cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E416/cc_handout07.pdf.
7. Бакалов В. П. Основы теории цепей. / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Крук. – М. : Радио и связь, 2000. – 592 с.
8. Сигорский В. П. Основы теории электронных схем / В. П. Сигорский, А. И. Петренко. – К. : Вища школа, 1971. – 568 с.

Филинюк Николай Антонович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры, e-mail: Filinyuk@vstu.vinnica.ua.

Лазарев Александр Александрович – к. т. н., доцент кафедры проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры, e-mail: Alexander.Lazarev.VNTU@gmail.com.
Винницкий национальный технический университет.

Лищинская Людмила Брониславовна – д. т. н., заведующий кафедрой экономической кибернетики и информационных систем, e-mail: L_Fil1@mail.ru.
Винницкий торгово-экономический институт.