

7. Rioual, P. "Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state" [Текст] / P. Rioual, H. Pouliquen, and J. P. Louis // in Proc. IEEE-PESC Conf., 1993. — P. 641–647.
8. Heydt, G. T. "Second harmonic components in power system voltages and currents" [Текст] / G. T. Heydt, Y. Liu // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2006. — Vol. 20, No. 1. — P. 521–523.
9. Phodke, A.G. "Generation of Abnormal Harmonics in High-Voltage AC-DC Power System" [Текст] / A.G. Phodke, J.H. Harlow // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. — 1968. — Vol 87, №3. — P. 223–239.
10. Reeve, J. "Unusual Current Harmonics Arising for High-Voltage DC Transmission" [Текст] / J. Reeve, P.S. Krishnayya // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. — 1968. — Vol.87, №3. — P.883–892.

*В даній статті запропоновано інтегральний критерій оцінки ефективності струмових конвеєрів. Проведено комп'ютерне моделювання струмових конвеєрів на одному, двох і вісімнадцяти транзисторах та порівняння їх ефективності. Показано, що найбільш ефективним для побудови перетворювачів іміданса та інформаційних пристроїв на їх основі є конвеєр струму на одному транзисторі*

*Ключові слова: струмовий конвеєр, критерії ефективності, перетворювачі іміданса, негatronіка*

*В данной статье предложен интегральный критерий оценки эффективности токовых конвейеров. Проведено компьютерное моделирование токовых конвейеров на одном, двух и на восемнадцати транзисторах и сравнение их эффективности. Показано, что наиболее эффективным для построения преобразователей имиданса и информационных устройств на их основе является конвейер тока на одном транзисторе*

*Ключевые слова: токовый конвейер, критерии эффективности, преобразователи имиданса, негatronіка*

УДК 621.372.6

## КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКОВЫХ КОНВЕЙЕРОВ

**Н. А. Филинук**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: Filinyuk@vstu.vinnica.ua

**А. А. Лазарев**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: Alexander.Lazarev.VNTU@gmail.com

**Л. Б. Лищинская**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: L\_Fil1@mail.ru

**В. П. Стахов\***

E-mail: L\_Fil1@mail.ru

\*Кафедра проектирования компьютерной и

телекоммуникационной аппаратуры

Винницкий национальный технический университет

ул. Хмельницкое шоссе, 95,

г. Винница, Украина, 21021

### 1. Введение

В настоящее время интенсивно развивается схемотехника информационных устройств (ИУ) на основе токовых конвейеров [1]. Токовый конвейер (ТК) - новый 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 ССII (Current Conveyor of the Second generation) [3], который оказался более продуктивным блоком для построения электронных схем. Конвейер тока является базовым блоком, на базе которого можно реализовать все схемы, которые реализуются на операционных усилителях (масштабные преобразователи, интеграторы, дифференциаторы, сумматоры, конверторы и инверторы сопротивлений, активные фильтры и т.д.) [4]. К сожалению, токовые конвейеры не получили тогда развития, так как в это же время начали активно развиваться операционные усилители, как базовые эле-

менты для построения различных схем; многие фирмы наладили их производство, и интерес к токовым конвейерам на начальном этапе пропал. И только в 90-х годах прошлого столетия интерес к токовым конвейерам опять возродился, так как появилась необходимость в более высокочастотных и энергоэффективных схемах. Токовый подход обеспечивает определенные преимущества в сравнении с работой с напряжениями: большие быстродействие и частотный диапазон, так как схемы могут работать на частотах до  $f_T$  транзисторов; нет необходимости обеспечивать большие значения коэффициентов усиления, так как для токовых конвейеров коэффициент передачи тока равен единице; они имеют высокую точность, 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, так как в этом случае схемы меньше чувствительны к нелинейным искажениям, которые возникают при работе с малыми напряжениями

питания вследствие нелинейности ВАХ; реализация токовых конвейеров на полевых МОП-транзисторах обеспечивает возможность изготовления аналоговых микросхем по хорошо развитой CMOS технологии цифровых микросхем. Поэтому это направление в последнее время приобрело широкое развитие [1, 5, 6]. Появились токовые конвейеры третьего поколения, конвейеры управляемые током, дифференциальные, универсальные и др. [7 – 9]. Однако наиболее удобным для синтеза различных схем остается конвейер тока второго поколения [1, 5].

**2. Постановка задачи**

В настоящее время предложено большое количество схем токовых конвейеров, в которых количество транзисторов составляет от одного до нескольких десятков [10]. Увеличение количества транзисторов позволяет более точно реализовать параметры конвейера, приближая его к идеальному, но при этом увеличиваются сложность схемы и энергопотребление, ухудшаются частотные параметры. Улучшение одних параметров может приводить к значительному ухудшению других важных параметров. Поэтому возникает задача выбора оптимальной схемы по совокупности важных параметров для конкретного применения, которую можно решить путем критериальной оценки эффективности схем токовых конвейеров [11].

**3. Обоснование основных параметров токовых конвейеров**

На первичном этапе такой критериальной оценки решается задача обоснования основных параметров токового конвейера. Она решена применительно к конвейерам тока второго поколения (ССП) (рис. 1), и в идеальном случае описываемых системой уравнений (1) [10]:

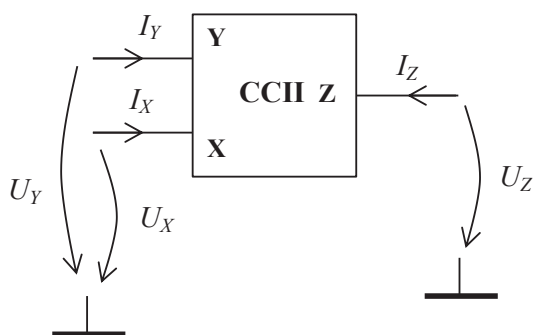


Рис. 1. Условное обозначение СПП, токи электродов  $I_X$ ,  $I_Y$ ,  $I_Z$  и напряжения  $U_X$ ,  $U_Y$ ,  $U_Z$  между клеммами и общей шиной в конвейере тока второго поколения

$$\begin{cases} I_Y = 0 \\ U_X = U_Y \\ I_Z = \pm I_X \end{cases} \quad (1)$$

Исходя из этой системы, определяем следующие параметры СПП:

1. Коэффициент передачи тока:  $K_I = \frac{I_Z}{I_X}$ . Для идеального СПП  $K_I = 1$ .
2. Коэффициент передачи напряжения  $K_U = \frac{U_X}{U_Y}$ . Для идеального СПП  $K_U = 1$ .
3. Проводимость входа Y:  $Y_Y = \frac{I_Y}{U_Y}$ . Для идеального СПП  $Y_Y = 0$ .
4. Сопротивление входа X:  $Z_X = \frac{U_X}{I_X}$ . Для идеального СПП  $Z_X = 0$ .
5. Проводимость выхода Z:  $Y_Z = \frac{I_Z}{U_Z}$ . Для идеального СПП  $Y_Z = 0$ .
6. Граничная частота коэффициента передачи тока  $f_{K_I}$ . Это частота, на которой модуль коэффициента передачи тока  $K_I$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  по сравнению с низкочастотным значением  $K_{I0}$ .
7. Граничная частота коэффициента передачи напряжения  $f_{K_U}$ . Это частота, на которой модуль коэффициента передачи напряжения  $K_U$  уменьшается в  $\sqrt{2}$  по сравнению с низкочастотным значением  $K_{U0}$ .
8. Коэффициент энергетической эффективности  $K_E = \frac{I_Z}{I_0}$ , где  $I_0$  - ток потребления от источника питания. Для идеального СПП  $K_E = 1$ .
9. Коэффициент динамического диапазона  $K_D = \frac{I_{mZ}}{I_{max}}$ , где  $I_{mZ}$  максимальный ток на выходе Z,  $I_{max}$  - максимальный ток данных транзисторов. Для идеального СПП  $K_D = 1$ .

**4. Обоснование критериев эффективности токовых конвейеров**

Исходя из общепринятых требований к критерию эффективности о необходимости его нормировки и о минимальном количестве используемых параметров [12], предложено характеризовать эффективность СПП системой коэффициентов:

- 1) коэффициенты, которые характеризуют точность СПП:
  - коэффициент точности передачи тока  $K'_I = 1 - |1 - K_{I0}|$ .
  - коэффициент точности передачи напряжения  $K'_U = 1 - |1 - K_{U0}|$ .
- 2) коэффициент граничной частоты по току  $K_{f_{K_I}} = \frac{f_{K_I}}{f_\alpha}$ , где  $f_\alpha$  - граничная частота однотранзисторного конвейера тока.
- 3) коэффициент  $K_E$ , который характеризуют энергетическую эффективность СПП  $K_E = \frac{I_Z}{I_0}$ .

Все представленные коэффициенты эффективности являются нормированными и могут принимать значения в диапазоне (0 ÷ 1). Значение  $K_I = 1$  соответствует идеальному СПП. Значение  $K_I = 0$  свидетельствует о технической неисправности СПП.

Так как количество критериев должно быть минимальным, то из приведенных выше 9 основных параметров токовых конвейеров коэффициенты эффективности введены только по 4 наиболее важным параметрам. Остальными 5 параметрами при предварительной оценке эффективности ССП можно пренебречь. Так, например, значения входных и выходного иммитансов влияют на точность работы конвейера тока, но при правильном выборе иммитансов генераторов и нагрузки их влияние мало (проводимость источника напряжения должна быть значительно больше, чем проводимость входа Y, а сопротивление источника тока - значительно больше, чем сопротивление входа X, сопротивление нагрузки - значительно меньше, чем сопротивление выхода Z). Коэффициент динамического диапазона определяет максимально возможный диапазон выходного тока конвейера тока, и при работе схемы в режиме малого сигнала этот параметр можно не учитывать. Анализ эффективности по данным параметрам целесообразно проводить для схем ССП, у которых вышерассмотренные основные параметры одинаковые.

Интегральный критерий эффективности предложено использовать в виде среднего геометрического от произведения коэффициентов эффективности.

$$\Theta = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n K_i} = \sqrt[n]{K'_i \cdot K'_U \cdot K_{k_i} \cdot K_E} \quad (2)$$

Критерий (2) является нормированным и может также принимать значения в диапазоне (0 ÷ 1). Величина  $\Theta=1$  соответствует потенциальному значению.

### 5. Компьютерное моделирование токовых конвейеров

С использованием разработанного критерия произведены компьютерное моделирование в MicroCap 8.1.1 и сравнительная оценка эффективности ССП, реализованных на одном, двух и 18 КМОП транзисторах. Модели транзисторов взяты с сайта MOSIS ([www.mosis.com](http://www.mosis.com)) для технологического процесса IBM 130nm 8RF-8LM-DM. В схемах использованы транзисторы с размерами: для транзисторов с каналом n-типа длина затвора  $L=250$  нм, ширина затвора  $W=350$  нм; для транзисторов с каналом p-типа  $L=250$  нм,  $W=1100$  нм. Напряжение питания 1,2 В. Для данных транзисторов максимальный ток стока  $I_{max} \approx 115$  мкА. Наибольшие граничные частоты  $f_T$  транзисторов: для n-типа 30 ГГц, для p-типа 10 ГГц. При напряжении на затворе близком к пороговому значению граничная частота для транзисторов p-типа  $f_T \approx 1,6$  ГГц.

Схема конвейера тока на одном транзисторе приведена на рис. 2 [10].

Эта наипростейшая схема реализует основные свойства токового конвейера, но имеет ряд недостатков: только однонаправленный входной (выходной) ток и однополярное входное напряжение; ток на выходе зависит не только от тока на входе, но и от значения напряжения на входе; необходимость использовать до-

полнительное напряжение смещения между затвором и истоком для работы схемы.

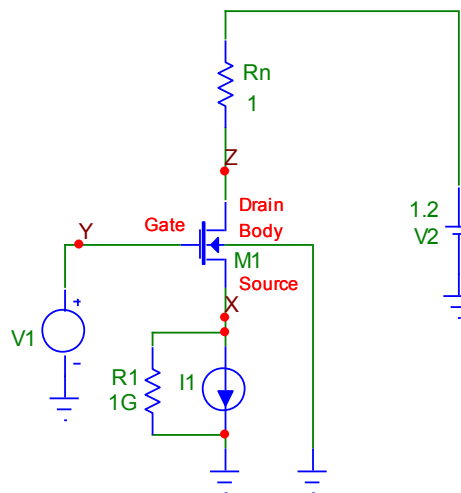


Рис. 2. Схема для компьютерного моделирования одно-транзисторного конвейера тока

На рис. 3 показана частотная зависимость коэффициента передачи тока при постоянном входном токе 100 мкА и напряжении 1,1 В.

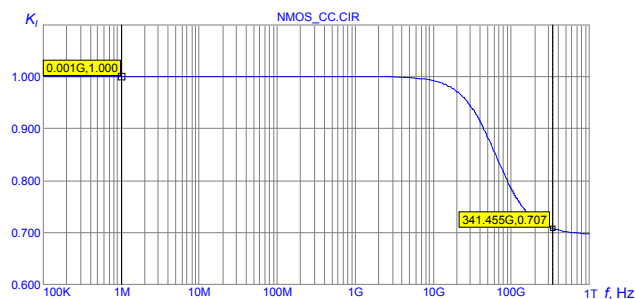


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи тока  $K_I$  от частоты  $f$

С графика видно, что на низкой частоте коэффициент передачи тока  $K_{I0}=1$ , граничная частота коэффициента передачи тока  $f_{K1}=f_a=341,5$  ГГц. Коэффициент передачи напряжения на низкой частоте  $K_{U0}=0,89$ . Коэффициент энергетической эффективности для данного конвейера тока  $K_E=1$ , так как ток потребления равен току на выходе.

Исходя из результатов моделирования расчетные значения коэффициентов эффективности для рассмотренного случая представлены в табл. 1.

Схема конвейера тока на двух транзисторах приведена на рис. 4 [10].

В данной схеме улучшен коэффициент передачи напряжения, нет необходимости использовать дополнительное напряжение смещения, но добавился управляемый источник тока смещения I2.

На рис. 5 показана частотная зависимость коэффициента передачи тока при постоянном входном токе 100 мкА и напряжении 1,1 В. Ток смещения  $I2=200$  мкА. С графика видно, что на низкой частоте коэффициент передачи тока  $K_{I0}=1$ , граничная частота коэффициента передачи тока  $f_{K1}=45,2$  ГГц.

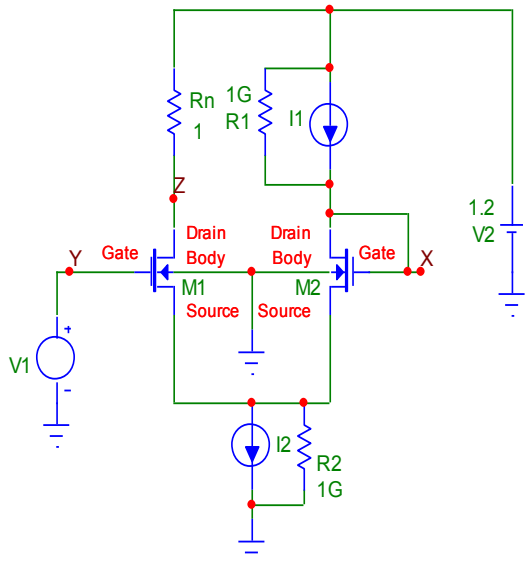


Рис. 4. Схема для компьютерного моделирования конвейера тока на двух транзисторах

В результате компьютерного моделирования получен коэффициент передачи напряжения на низкой частоте  $K_{U0}=0,96$ . Коэффициент энергетической эффективности для данного конвейера тока равен 0,5, так как ток потребления в два раза больше тока на выходе.

Результаты расчетов коэффициентов эффективности рассмотренной схемы представлены в табл. 1.

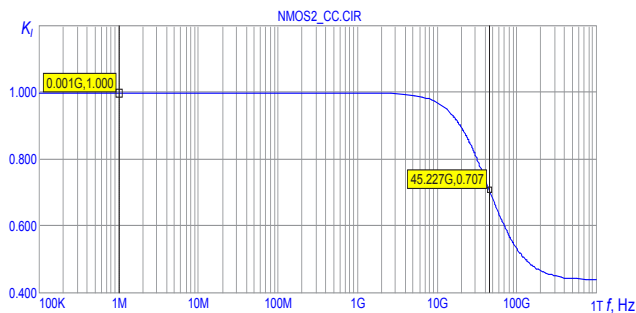


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи тока  $K_I$  от частоты  $f$

Схема конвейера тока на 18 транзисторах приведена на рис. 6 [10].

Данная схема наиболее точно передает свойства идеального конвейера тока, так как работает с двунаправленными входными токами и напряжениями. Но наличие большого количества транзисторов ухудшает частотные свойства и увеличивает энергопотребление.

На рис. 7 показана частотная зависимость коэффициента передачи тока для входного тока: постоянная составляющая 100 мкА, переменная составляющая 10 мкА. Постоянное напряжение на входе Y один вольт. Из графика видно, что на низкой частоте коэффициент передачи тока  $K_{I0}=1,02$ , граничная частота коэффициента передачи тока  $f_{K1}=7,7$  ГГц. Необходимо заметить, что в данной схеме коэффициент передачи тока прак-

тически не зависит от значения тока и напряжения на входах X и Y, соответственно.

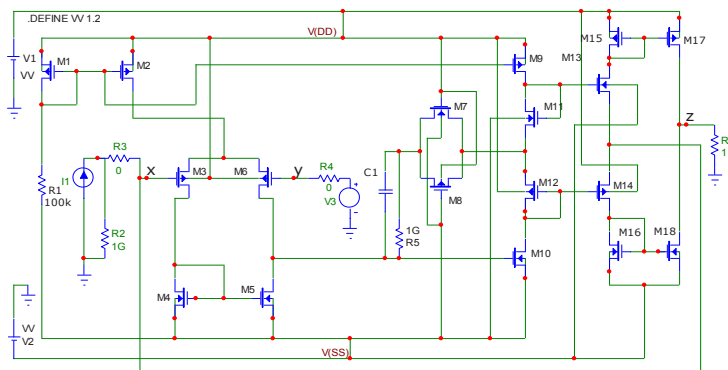


Рис. 6. Схема для компьютерного моделирования конвейера тока на 18 транзисторах

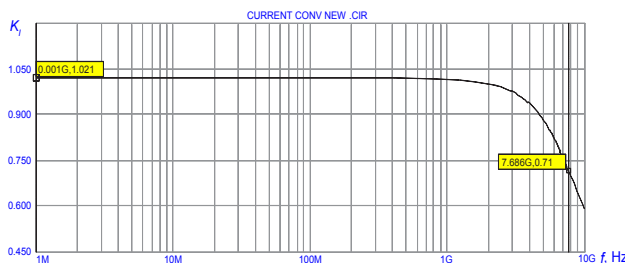


Рис. 7. Зависимость коэффициента передачи тока  $K_I$  от частоты  $f$

На рис. 8 показана частотная зависимость коэффициента передачи напряжения для следующих значений входного напряжения: постоянная составляющая 500 мВ, переменная составляющая 10 мВ. Постоянный ток на входе X равен 100 мкА. Из графика видно, что  $K_{U0}=0,996$ ,  $f_{KU}=0,92$  ГГц.

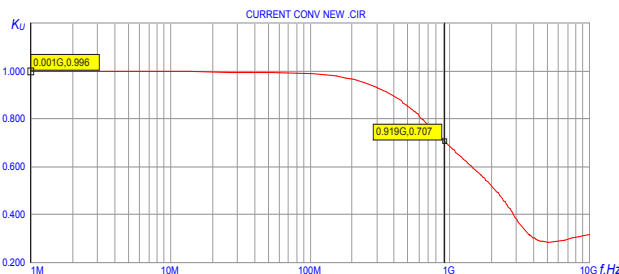


Рис. 8. Зависимость коэффициента передачи напряжения  $K_U$  от частоты  $f$

Из результатов компьютерного моделирования следует, что суммарный ток потребления от источников питания составил 258,4 мкА при выходном токе 101,6 мкА. Значения входного тока и напряжения равны 100 мкА и 1 В, соответственно. Откуда коэффициент энергетической эффективности  $K_E=0,39$ . При работе с малыми входными токами коэффициент  $K_E$  значительно меньше и равен 0,04 при входном токе 1 мкА. Среднее значение  $K_E=0,22$ .

Результаты расчетов коэффициентов эффективности рассмотренной схемы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты эффективности ССП

Вид ССП	$K'_I$	$K'_U$	$K_{f_{к1}}$	$K_E$	$\mathcal{E}$
Однотранзисторный	1	0,89	1	1	0,97
Двухтранзисторный	1	0,96	0,13	0,5	0,5
18-транзисторный	0,98	0,996	0,02	0,22	0,26

Как видно из табл. 1, 18-транзисторный конвейер тока имеет наилучший коэффициент точности передачи напряжения и также высокую точность коэффициента передачи тока (0,98), но в 50 раз хуже частотные и в 5 раз энергетические свойства в сравнении с однотранзисторным конвейером тока, что объясняется, в частности, использованием транзисторов р-типа, частотные свойства которых хуже в 3 раза транзисторов п-типа, а также большим количеством используемых транзисторов.

**6. Выводы**

В настоящее время предложено большое количество схем токовых конвейеров, количество транзи-

сторов в которых от одного до нескольких десятков. Увеличение количества транзисторов позволяет более точно реализовать параметры конвейера, приближая его к идеальному, но при этом увеличивается сложность схемы, энергопотребление и ухудшаются частотные параметры. В работе разработан интегральный критерий эффективности токовых конвейеров, использование которого позволяет выбирать оптимальную схему конвейера для конкретного применения.

Среди рассмотренных конвейеров тока наиболее функциональной и точной является схема на 18 транзисторах, при этом имея худшие частотные и энергетические параметры. Предложенный интегральный критерий оценки эффективности по совокупности наиболее важных параметров показал, что для построения схемотехнических негатронов на преобразователях иммитанса [11] наиболее эффективной является схема на одном транзисторе, так как высокая точность здесь не так важна, особенно для устройств иммитансной нечеткой логики [13], а наилучшие частотные и энергетические свойства позволяют синтезировать высокоэффективные информационные устройства.

Литература

1. Ferri, G. Low-voltage low-power CMOS current conveyors [Текст] / 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 [Текст] / K.C. Smith, A.S. Sedra // Proc. IEEE. — Vol. 56. — Aug. 1968. — С. 1368 — 1369.
3. Sedra, A.S. A second-generation current conveyor and its applications [Текст] / A.S. Sedra, K.C. Smith // IEEE Transactions on Circuit Theory. — Vol. CT-17. — Feb. 1970. — С. 132 — 134.
4. Sedra, A.S. Current Conveyor Theory And Practice [Текст] / A.S. Sedra, W. Gordon; C. Toumazou, F. J. Lidgley, D. Haigh.// In book Analogue IC design: the current-mode approach. — IET. — 1993. — 646 p. — ISBN 0863412971, 9780863412974.
5. Sajal, K. P. IC Analog Filter Design: A Current Conveyor Approach [Текст] / K. Paul Sajal, Neeta Pandey, Shail Bala Jain. — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. — 144 p. — ISBN 3843360073, 978-3843360074
6. Amisha Naik. CMOS second generation current conveyors [Текст] / Amisha Naik — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. — 136 p. — ISBN 3659105694, 978-3659105692.
7. Fabre, A. Third-generation current conveyor: a new helpful active element [Текст] / A. Fabre // Electronics Letters. — vol. 31. — March 1995. — pp. 338–339.
8. Indu, P. S. Current Conveyor: Novel Universal Active Block [Текст] / Indu Prabha Singh, Kalayan Singh, S.N. Shukla // S-JPSET. — 2010. — Vol. 1, Issue 1. — pp. 41–48. — ISSN: 2229–7111.
9. Sponar, R. Universal conveyor: novel active device suitable for analog signal processing [Текст] / R. Sponar, K. Vrba, D. Kubanek // Proceedings of the 9th International Conference on Circuits ICC'05, Stevens Point, Wisconsin, USA. — 2005. — Article No. 44. — ISBN: 960–8457–29–7.
10. Eloranta, P. Current Conveyors. History, Theory, Applications and Implementation [Электронний ресурс] / P. Eloranta, C. Toumazou // CC.PPT. - 11.03.04. — Режим доступу: \www/ URL: [http://cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E416/cc\\_hands\\_out07.pdf](http://cas.ee.ic.ac.uk/people/dario/files/E416/cc_hands_out07.pdf). — Загол. з екрану.
11. Філінюк, М. А. Основи негатроніки [Текст] / М.А. Філінюк. — В 2-х томах. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. — 456 с.
12. Філінюк, Н.А. Аналітичні вимоги до критеріям ефективності інформаційних пристроїв [Текст]: матеріали 4-ої МНТК Контроль і управління в технічних системах / Н.А. Філінюк, Ли Туан Ту, Р.А. Анфілов. — УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1997. — С. 56–62.
13. Ліщинська, Л.Б. Імітансна логіка [Текст] / Л.Б. Ліщинська, М.А. Філінюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. — 2010. — № 2(18). — С. 25–31.