

ПРЕЦИЗИЙНИЙ ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ВІДЕОСИГНАЛІВ НЕПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

У роботі запропоновано метод побудови аналогових функціональних перетворювачів відеосигналів довільної форми з підвищеною швидкістю та точністю, що базується на відшуванні та математичному обґрунтуванні альтернативного схемного рішення пристрою. Розглянутий логарифмічний перетворювач сигналів, що надходять в масштабі реального часу, забезпечує неперервне перетворення інформації незалежно від характеру сигналу, включаючи амплітуду, спектральний склад та його полярність.

Ключові слова: функціональний перетворювач, логарифмуючий елемент, операційний підсилювач, крутизна перетворення, динамічна похибка.

В работе предложен метод построения аналоговых функциональных преобразователей видеосигналов произвольной формы с повышенным быстродействием и точностью, базирующийся на отыскании и математическом обосновании альтернативного схемного решения устройства. Рассмотренный логарифмический преобразователь сигналов, поступающих в масштабе реального времени, обеспечивает непрерывное преобразование информации независимо от характера сигнала, включая его амплитуду, спектральный состав и полярность.

Ключевые слова: функциональный преобразователь, логарифмирующий элемент, операционный усилитель, крутизна преобразования, динамическая погрешность

The method of construction of analog functional transformers of complex signals of arbitrary form with the promoted fast-acting and exactness, being based on searching for and mathematical ground of alternative scheme decision of device, is offered in work. The considered logarithmic transformer of signals entering in a real time scale factor provides continuous transformation of information regardless of character of signal, including his amplitude, spectral composition and polarity.

Keywords: functional transformer, logarithmic element, operational amplifier, conversion transconductance, dynamic accuracy

Вступ. Наряду з бурхливим розвитком цифрових технологій аналогове функціональне перетворення сигналів продовжує залишатися широко застосовуваним у тих випадках, коли від перетворювачів вимагається висока швидкодія, максимальна заводо захищеність, відсутність прояву побічних ефектів, що супроводжують операції квантування та дискретизації сигналів, а саме в приймачах радіолокаційних станцій, багатьох вузлах систем автоматичного керування, у вимірювальних підсилювачах тощо, тобто в ряді випадках, коли перехід в цифрову форму у даному місці сигнального ланцюга не є доцільним або навіть і неможливий [1].

Аналіз існуючих рішень та постановка задачі. Для побудови логарифмічного перетворювача сигналів довільної форми, призначеного для їх неперервної обробки, найбільш придатним є використання аналогових підсилювачів у поєднанні з елементами з відповідною нелінійною характеристикою [2-5]. В якості такого нелінійного елемента може виступати напівпровідниковий р-п перехід діода або транзистора, вольт-амперна характеристика якого описується моделлю Еберса-Молла:

$$i_d = i_0 \left[\exp\left(\frac{U_d}{\varphi_T}\right) - 1 \right],$$

де i_d – струм в колі р-п переходу, i_0 – зворотній струм насичення, U_d – різниця потенціалів, прикладена до переходу, $\varphi_T = \frac{kT}{e}$ – температурний потенціал, який визначається постійною Больцмана k , абсолютною температурою напівпровідникового

елемента T та зарядом електрона e .

Зворотній вираз дає наближено логарифмічну залежність напруги U_d від струму i_d , яка тим точніша, чим більше відношення i_d/i_0

$$U_d = \varphi_T \ln \left(\frac{i_d}{i_0} + 1 \right). \quad (1)$$

З врахуванням того, що для більшості кремнієвих діодів та транзисторів малої потужності зворотній струм i_0 при кімнатній температурі не перевищує одиниць наноампер, а його типове значення ще менше, можна застосувати цей елемент для здійснення логарифмічного перетворення з достатньо високою точністю, якщо представити вхідний сигнал у вигляді струму i_d , значно більшого за i_0 , а вихідний результат контролювати за значенням напруги U_d на р-п переході. Варіанти застосування операційних підсилювачів (ОП) для реалізації зазначеного алгоритму наведено на рис. 1.

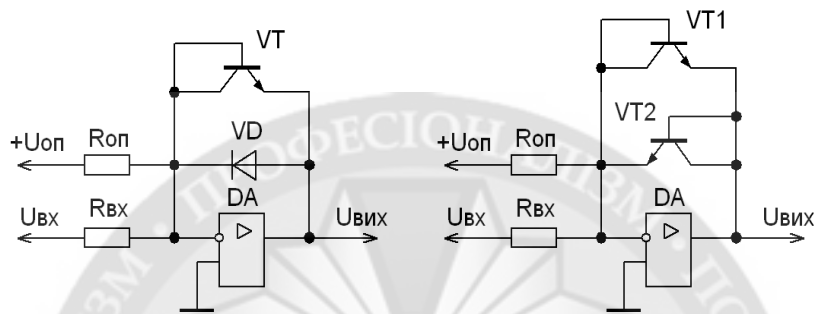


Рис. 1. Варіанти схемної реалізації одностороннього логарифмічного перетворювача

В схемах використовуються такі ідеалізовані властивості ОП, як відсутність вхідних струмів та нескінченний статичний коефіцієнт підсилення. В такому випадку справедливі співвідношення

$$i_d = \frac{U_{вх}}{R_{вх}} + \frac{U_{оп}}{R_{оп}} = i_{вх} + i_{оп}, \quad U_{вих} = -U_d,$$

де через $U_{вх}$, $i_{вх}$ та $U_{оп}$, $i_{оп}$ позначено величину напруги та струму вхідного та опорного сигналів відповідно, $R_{вх}$ та $R_{оп}$ – опори позначених на схемі резисторів.

Оскільки робочою полярністю таких перетворювачів є тільки позитивні вхідні сигнали, з метою запобігання насичення виходу ОП у випадку надходження сигналів протилежної полярності в обох схемах встановлено захисні обмежуючі елементи VD та VT_2 відповідно.

Скориставшись виразом (1) отримаємо залежність вихідного сигналу від вхідного сигналу робочої полярності (струму або напруги):

$$U_{вих} = -\varphi_T \ln \left(\frac{i_{вх} + i_{оп}}{i_0} + 1 \right) = -\varphi_T \ln \left(\frac{i_{вх}}{i_{оп} + i_0} + 1 \right) - \varphi_T \ln \left(\frac{i_{оп}}{i_0} + 1 \right),$$

якщо ж вважатимемо, що опорний струм $i_{оп}$ значно перевищує зворотній струм i_0 , результат можна спростити:

$$U_{вих} = -\varphi_T \ln \left(\frac{i_{вх}}{i_{оп}} + 1 \right) - \varphi_T \ln \left(\frac{i_{оп}}{i_0} \right) = -\varphi_T \ln \left(\frac{U_{вх}}{U_{он1}} + 1 \right) - \Delta U, \quad (2)$$

де $U_{он1} = i_{оп} R_{вх} = \frac{U_{оп}}{R_{оп}} R_{вх}$ – приведенне до входу значення постійного опорного сигналу,

ΔU – незалежна від вхідного сигналу складова виразу (2).

Таким чином, вихідний сигнал складається з двох частин – пропорційної логарифму вхідного сигналу та деякої константи ΔU . Зазвичай цю константу компенсують,

застосовуючи відповідні схемні рішення. Тоді функція перетворення зводиться до вигляду:

$$U_{вих} = -\varphi_T \ln\left(\frac{U_{вх}}{U_{оп1}} + 1\right). \quad (3)$$

Аналізуючи результат, можна зауважити, що коректне перетворення має місце лише для сигналів, що перевищують рівень приведеної опорної напруги $U_{оп1}$, і чим більше це перевищення, тим результат точніший. Природно виникає потреба максимально зменшити $U_{оп1}$, але окрім обмеження з боку забезпечення необхідного запасу співвідношення опорного і зворотного струмів, ми стикнемося з іншою проблемою, пов'язаною з кінцевою швидкодією реальних ОП. Будь-який операційний підсилювач являє собою інтегруючий елемент з певною постійною часу. Яким би не був ОП за швидкодією, обов'язково існує частота, вище якої коефіцієнт підсилення інтегратора стає меншим за одиницю. Ця властивість визначає цілком реальну кінцеву (а не скільки завгодно малу) постійну часу інтегрування вхідного сигналу, але водночас робить ОП універсальним активним елементом, придатним для використання в пристроях, властивості яких визначаються тільки зовнішніми по відношенню до ОП елементами. Частота одиничного підсилення f_0 більшості ОП становить від одного до кількох десятків мегагерц в залежності від заявленої швидкодії, за якої постійна часу інтегрування $t_i = 1/2\pi f_0$ розташовується відповідно в межах від 0,15 мкс до одиниць наносекунд. Наведені часові значення досить малі, але цього, виявляється, не завжди достатньо для забезпечення нормальної роботи розглядуваного варіанта перетворювача. Аналізу причин прояву зазначених нижче недоліків та відшукуванню способів їх ефективного подолання і присвячено дану статтю.

Реалізація перетворювачів за наведеним класичним варіантом має суттєві недоліки, що проявляються за певної форми вхідних сигналів. На рис. 2, а та 3, а наведено результати моделювання роботи логарифматора з сигналами у вигляді послідовності пар імпульсів протилежної полярності зі змінюваною вчетверо амплітудою (в мілівольтах) у такій черговості: 32, 8, 2, 8, 32 – в першому випадку, та 1024, 256, 64, 256, 1024 – в другому відповідно (малі та великі сигнали).

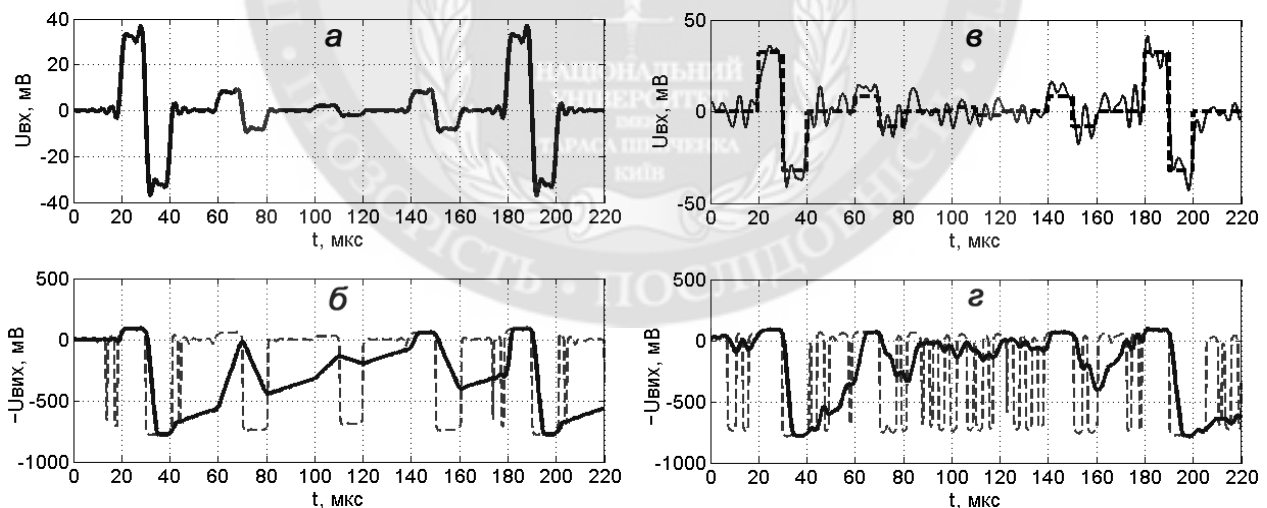


Рис. 2. Одностороннє перетворення імпульсних сигналів малої амплітуди за відсутності (а-б) та наявності (в-г) випадкових завад

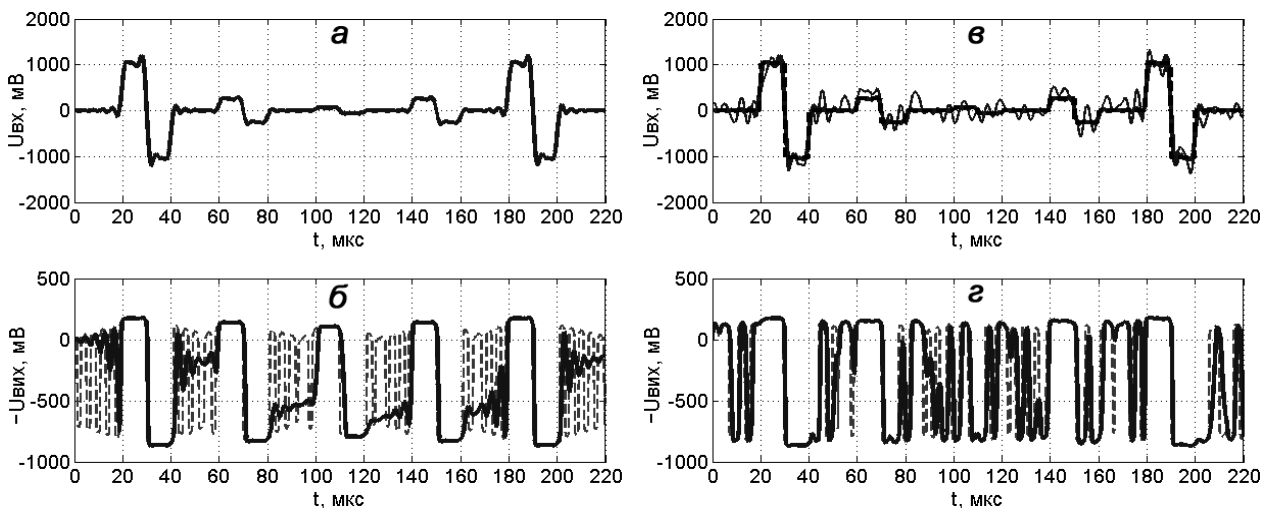


Рис. 3. Одностороннє перетворення імпульсних сигналів великої амплітуди за відсутності (а-б) та наявності (в-г) випадкових завад

Для зручності спостереження вихідний сигнал, який в розглядуваних реалізаціях перетворювачів має не співпадаючу з вхідним сигналом негативну робочу полярність, на всіх діаграмах зображено інвертованим.

Встановлено, що навіть за відносно немалих рівнів сигналу розглядуваний перетворювач не здатний виконати якісну обробку сигналу і допускає грубі відхилення результату від розрахункового значення (ідеалізований вихідний сигнал для порівняння показано пунктирною лінією). Картина додатково спотворюється за наявності випадкових завад, амплітуду яких було задано на рівні 4 мВ та 128 мВ для менших та більших сигналів відповідно (рис. 2, в та 3, в). І хоча класичний логарифматор непогано справляється з сигналами великої амплітуди (рис. 3, б), введення відносно невеликих завад і в цьому випадку суттєво погіршує його роботу (рис. 3, г).

Причини прояву зазначеного недоліку перетворювача полягають в намаганні обробити сигнал неробочої полярності, що призводить до порушення початкового стану логарифматора (з фіксованим опорним струмом i_0 в р-п переході) на тривалий час, швидкість повернення до якого обмежена швидкодією застосованих ОП. Так, якщо постійна часу вбудованого інтегратора ОП $t_i = 0,1$ мкс, а еквівалент опорного сигналу $U_{оп}$ дорівнює 1 мВ, швидкість повернення до початкового стану за умови нульового вхідного сигналу не перевищуватиме $1 \text{ мВ}/0,1 \text{ мкс} = 10 \text{ мВ}/\text{мкс}$, що і спостерігається при моделюванні (рис. 2, б).

Розв'язання задачі. Подолати виявлений недолік можна, обмеживши можливості формування на виході ОП сигналу неробочої полярності значної величини. Призначені для цього захисний діод або транзистор (рис. 1) забезпечити цього не можуть, оскільки для їх відкриття хоча б до значення малого опорного струму слід подолати різницю потенціалів у $2\Delta U$, яка досягає майже 1 В. В порівнянні з робочою зоною логарифмування (адже за виразом (2) при зміні вхідних сигналів від 1 мВ до 10 В одержуємо вихідний сигнал лише в діапазоні від 17 мВ до 230 мВ) – це значна величина.

Пропонується вихід, який полягає в штучному зближенні умов відкриття робочого і захисного р-п переходів аж до повного збігу їх опорних струмів у вихідному стані відповідно до схеми рис. 4. Схема логарифматора, утворена на основі двох комплементарних транзисторних струмових дзеркал зі штучно роз'єднаними емітерами, набуває повністю симетричної форми і здатності однаково реагувати на сигнали взаємно протилежної полярності. Початковий опорний струм всіх транзисторів формується однаковими опорами $R_{он1}$ і $R_{он2}$ від джерел різної полярності $+U_{оп}$ і $-U_{оп}$. Транзистори VT_1 і VT_2 виконують функцію логарифмування, а VT_3 і VT_4 формують необхідний зсув вихідного сигналу на величину $\pm \Delta U$ для кожного з плечей.

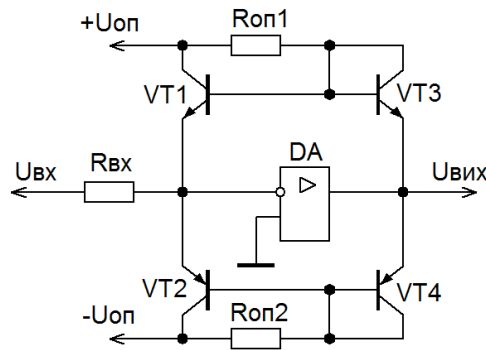


Рис. 4. Схемна реалізація симетричного логарифмічного перетворювача сигналів

Закон симетричного логарифмічного перетворення має вигляд непарної функції:

$$U_{вих} = -\varphi_T \ln \left(\frac{U_{вх}}{2U_{он1}} + \sqrt{\frac{U_{вх}^2}{4U_{он1}^2} + 1} \right), \quad (4)$$

де приведений до входу еквівалент опорної напруги $U_{он1}$ обчислюється аналогічним першому випадку чином

$$U_{он1} = (i_{он} + i_0)R_{вх} \approx \frac{U_{он}}{R_{он1,2}} R_{вх}.$$

Зазначимо, що дана реалізація перетворювача не потребує додаткових заходів для компенсації постійної складової вихідного сигналу ΔU , оскільки за логікою побудови схеми вона скомпенсована автоматично. Однак потенціал зсуву ΔU можна спостерігати на база-емітерних переходах транзисторів VT_3 і VT_4 та за його значенням зробити висновок про ступінь перевищення опорного струму над зворотнім згідно з виразом

$$\frac{i_{он}}{i_0} = \exp\left(\frac{\Delta U}{\varphi_T}\right) - 1,$$

наявність якого необхідна для забезпечення стабільності параметрів перетворювача.

Результати реагування симетричної схеми на ті ж самі входні сигнали, що і в попередньому випадку, наведено на рис. 5 і 6. На діаграмах б і г знову зображено пунктиром розрахунковий ідеалізований вихідний сигнал для випадку застосування ОП з необмеженою швидкістю. Слід відзначити, що порушень в роботі пристрою, які мали місце в класичній реалізації схеми, не спостерігається зовсім, а деяке відхилення від ідеального результату зумовлене лише виходом спектру входного сигналу за дещо обмежену смугу пропускання перетворювача для найменших сигналів, за яких диференціальний коефіцієнт передачі даної нелінійної системи $dU_{вих}/dU_{вх}$ починає перевищувати одиницю.

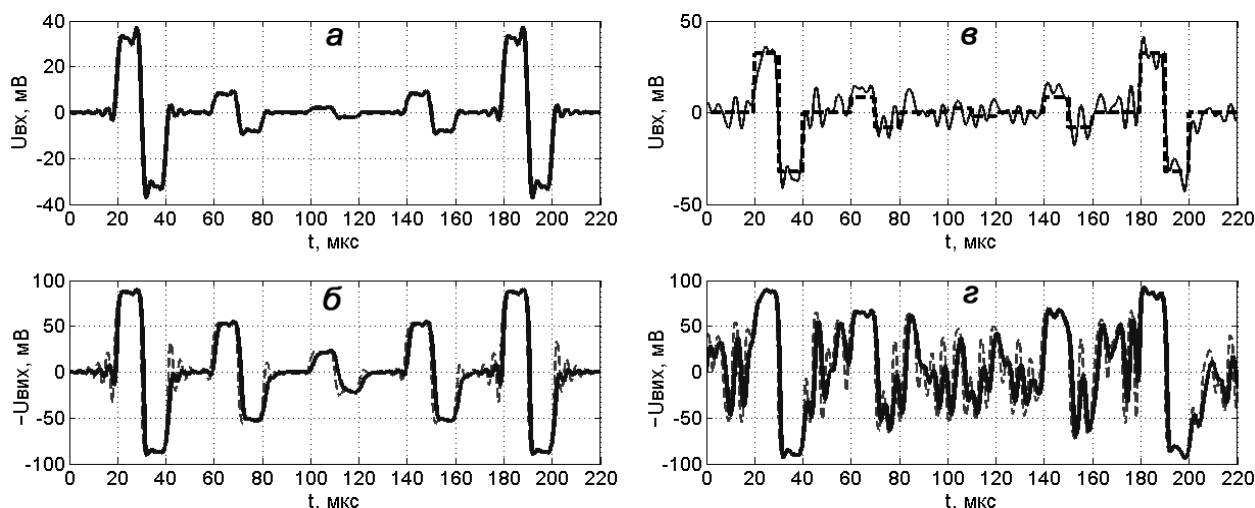


Рис. 5. Двостороннє перетворення імпульсних сигналів малої амплітуди за відсутності (а, б) та наявності (в, г) випадкових завад

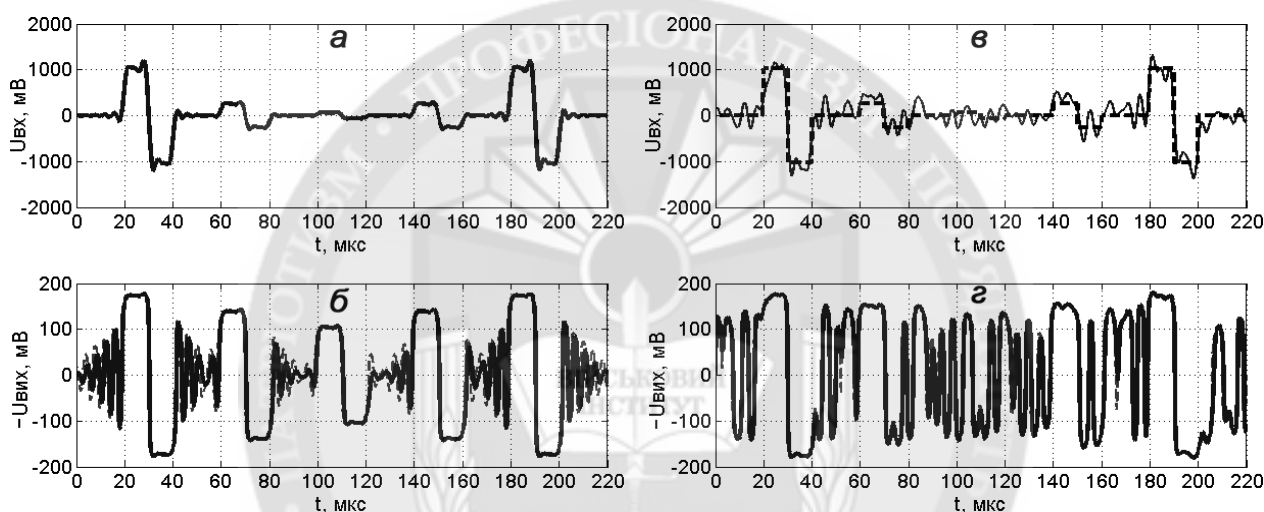


Рис. 6. Двостороннє перетворення імпульсних сигналів великої амплітуди за відсутності (а, б) та наявності (в, г) випадкових завад

Важливим показником якості логарифмічного перетворення є стабільність крутизни перетворення $K_{пер}$ в межах робочого діапазону амплітуд сигналів, визначеної як відношення абсолютного приросту вихідного сигналу до відповідного йому приросту логарифма вхідного сигналу:

$$K_{пер} = \frac{dU_{вих}}{d \ln(U_{вх})} = \frac{dU_{вих}}{(1/U_{вх})dU_{вх}} = U_{вх} \frac{dU_{вих}}{dU_{вх}} \quad (5)$$

Наведений параметр має розмірність вихідного сигналу, а його асимптотичне значення для обох розглянутих варіантів при $U_{вх}/U_{онл} \gg 1$, визначене за виразом (5) з врахуванням відповідних законів перетворення (3) та (4), дорівнює температурному потенціалу ϕ_T , що в нормальних кліматичних умовах становить орієнтовно 25 мВ і чисельно співпадає з величиною приросту вихідного сигналу при відносній зміні вхідного в e^1 разів (де e – основа натурального логарифма).

Реалізація перетворювача за симетричною схемою виявила додаткові переваги в порівнянні з класичним варіантом, які також проявляються при малих сигналах. На рис. 7 представлено повні статичні характеристики (а, б) та діаграми крутизни перетворення (в, г) для трьох варіантів логарифмічних перетворювачів: 1 – класичного одностороннього, 2 – симетричного двостороннього, 3 – ідеалізованого, математично точного. Початкову зону

характеристик для малих вхідних сигналів (на рівні до одиниць мілівольт) показано у збільшеному масштабі (рис. 7, б та з).

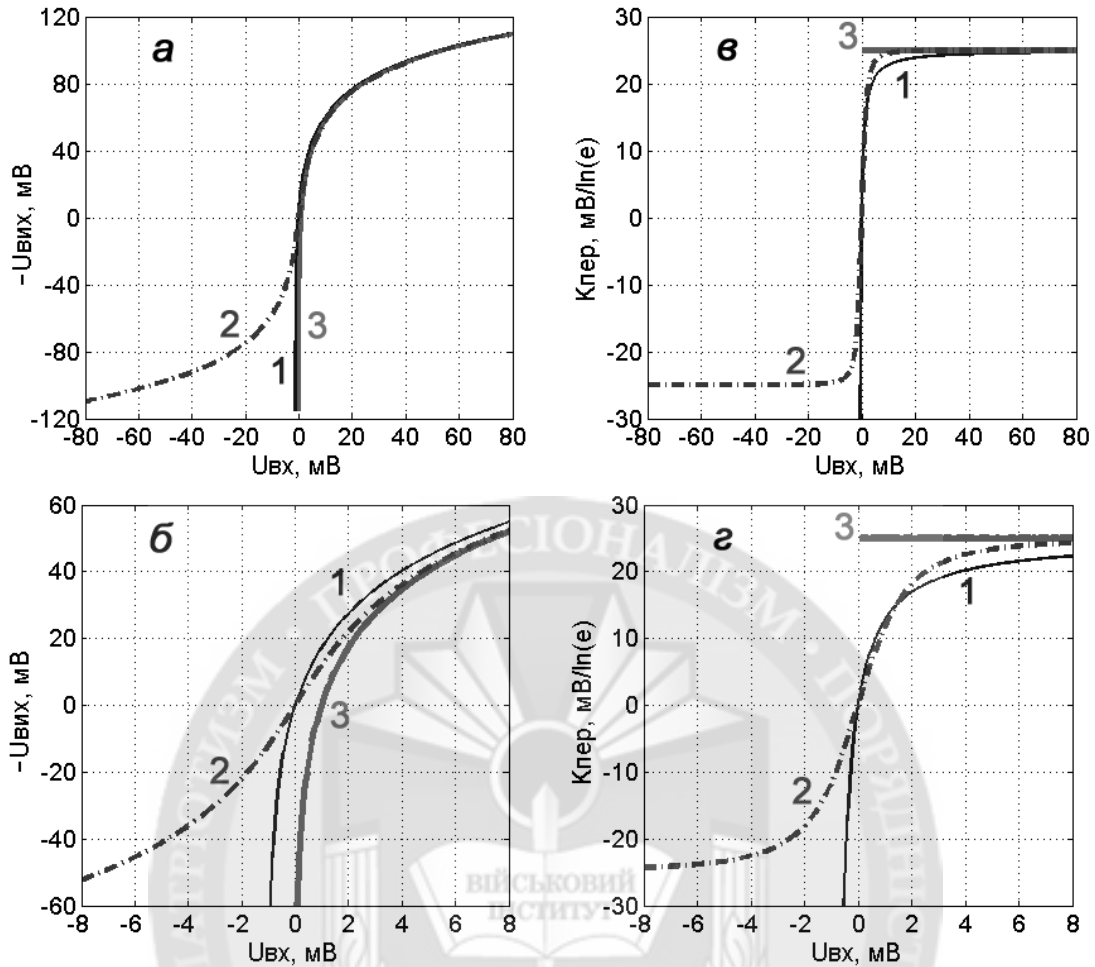


Рис. 7. Статичні характеристики логарифмічних перетворювачів (а, б) та крутизна перетворення (в, з)

Характеристики за варіантами 1 і 2 зображено для однакового значення еквівалента опорної напруги $U_{оп1} = 1$ мВ. Саме при такому рівні вхідного сигналу спостерігається двократне зменшення крутизни в порівнянні з асимптотичним значенням у обох варіантах перетворювачів. Відмінності починаються при зростанні сигналів вище 2 мВ: одна й та ж сама крутизна, що наближається до асимптотичного значення, за другим варіантом досягається при вхідному сигналі, меншому у 2-4 рази, ніж за першим (детальні дані для порівняння наведено в таблиці), а тому новий варіант є більш прийнятним з точки зору точності логарифмічного перетворення.

Таблиця

Порівняння рівнів вхідних сигналів в початковій зоні перетворення за умов одержання однакової крутизни $K_{пер}$ для обох варіантів

Параметр	Значення									
	$U_{вх1}$, мВ	3	5	9	14	19	26	30	34	43
$U_{вх2}$, мВ	2	3	4	5	6	7	7,5	8	9	10
$K_{пер1} = K_{пер2}$, мВ	18,5	21,0	22,6	23,4	23,8	24,1	24,2	24,3	24,4	24,5
$U_{вх1}/U_{вх2}$	1,50	1,67	2,25	2,80	3,17	3,71	4,00	4,25	4,78	5,00

Запропоноване схемне рішення пристрою забезпечує автоматичне налаштування початкового стану перетворювача, зокрема збалансованість вихідної напруги за відсутності вхідного сигналу. Поєднання комплементарних логарифмічних характеристик робить

перетворювач придатним для обробки сигналів будь-якої полярності, що розширює можливості його практичного застосування. Найбільша стабільність параметрів перетворювача досягається при використанні напівпровідникових нелінійних елементів, що входять до його складу, в інтегральному виконанні, зокрема в одному спільному кристалі.

Висновок. В даній статті було розглянуто існуючі підходи до побудови аналогових логарифмічних перетворювачів сигналів та проаналізовано причини виникнення та кількісні значення прояву їх недоліків. Запропоновано новий варіант двостороннього аналогового логарифмічного перетворювача відеосигналів довільної форми, який дозволяє реалізувати функціонування операційних підсилювачів, застосованих в якості активних елементів, у їх повній смузі пропускання та підвищити статичну і динамічну точність відтворення логарифмічного закону у розширеному діапазоні амплітуд вхідних сигналів.

Розглянутий логарифмічний перетворювач сигналів, що надходять в масштабі реального часу, забезпечує неперервне перетворення інформації незалежно від характеру сигналу, включаючи його амплітуду, спектральний склад та полярність.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Kugelstradt T. Integrated logarithmic amplifiers for industrial applications // *Analog Applications Journal*, 1Q, 2004, pp. 28-33.
2. Проектирование и применение операционных усилителей: / Под ред. Дж. Грэма, Дж. Тоби, Л. Хьюлсмана. Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 510 с.
3. Кофлин Р., Дрисколл Ф. Операционные усилители и линейные интегральные схемы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 360 с.
4. Щербаков В.И., Грездов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях: Справочник. – К.: Техніка, 1983. – 213 с.
5. Алексенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых ИС. – М.: Радио и связь, 1981. – 224 с.

Рецензент: д.т.н., проф. Конін В.В.

